

보강된 복합재 패널의 최적설계를 위한 유전알고리즘의 연구

이 종 수*

(1999년 6월 11일 접수)

Advanced Genetic Algorithm Strategies in Optimal Design of Stiffened Composite Panels

Jongsoo Lee

Key Words: 유전알고리즘(Genetic Algorithms, GA's), 방향성교배(Directed Crossover), 다단계탐색(Multistage Search), 분리교배(Separated Crossover), 보강된 복합재 패널(Stiffened Composite Panels), 적층순서(Stacking Sequence), 좌굴(Buckling)

Abstract

The paper describes the use of genetic algorithms (GA's) to the minimum weight design of stiffened composite panels for buckling constraints. The proposed design problem is characterized by mixture of continuous and discrete design variables corresponding to panel elements and stacking sequence of laminates, respectively. Design space is multimodal and non-convex, thereby introducing the need for global search strategies. Advanced strategies in GA's such as directed crossover, multistage search and separated crossover are adopted to improve search ability and to save computational resource requirements. The paper explores the effectiveness of genetic algorithms and their advanced strategies in designing stiffened composite panels under various uniaxial compressive load conditions and the limit on stacking sequence of laminates.

1. 서 론

대부분의 공학설계 및 최적화문제에서 설계공간은 해석모델의 비선형성으로 인하여 불연속(disjoint)하거나 비오목적(nonconvex)이며 설계변수는 연속형(continuous), 정수형(integer) 또는 이산형(discrete) 등의 혼합된 형태로 구성된다. 전역적 탐색기법인 유전알고리즘(genetic algorithms, GA's)⁽¹⁾은 설계변수벡터를 일정량의 해상도(resolution)를 갖는 유한한 길이의 유전자배열(finite length of genetic bit string)로 표현하므로 혼합된 형태의 설계변수를 취급하는데 효과적이다. 이러한 유전알고리즘의 특성을 이용하여 복

합재 구조물의 최적설계에 대한 연구가 진행되어 왔다.^(2,3) 유전알고리즘은 전역적 최적해(global optimum)를 찾아낼 수 있는 가능성을 많이 내포하고 있으나 설계공간의 전 영역에 걸쳐서 각 세대(generation)당 다수의 설계집단(design population)의 해를 필요로 하기 때문에 수많은 계산량이 요구되는 단점이 있다. 즉, 설계변수의 양이 많은 대규모 설계문제 및 해상도 표현에 따라 유전자배열의 길이가 길어지는 경우에는 설계집단의 크기가 증가하므로 최적화과정에서 계산비용이 증가한다. 만일, 50개의 설계변수를 갖는 구조 설계문제에 있어서 각 설계변수에 대한 하한 및 상한 값(lower and upper bounds)이 다음과 같이 주어진다고 하면,

* 연세대학교 기계전자공학부

E-mail : jleej@yonsei.ac.kr

TEL : (02)361-4474 FAX : (02)362-2736

$$0.01 \leq x_i \leq 0.11 \quad \Delta x_i = 0.0001 \quad (1)$$

하나의 설계변수를 표시하는 유전자배열의 길이, N 은 2진법의 표현(binary representation)으로 식(2)와 같이 계산된다.

$$\frac{0.11-0.01}{0.0001} + 1 = 1001 \leq 2^N \quad (2)$$

여기서 $N=10$ 이 되며 전체 설계변수벡터는 500개의 유전자배열 길이를 갖게 된다. 그러므로 한 세대가 포함해야할 설계집단의 크기는 이 값에 비례하여 증가하는데, Goldberg⁽⁴⁾의 연구에 의하면 유전자배열의 길이가 500인 경우, 유용(feasible)/불용(infeasible)의 해를 포함하여 계산 가능한 모든 설계의 개수는 2^{500} 개이며 이에 따른 설계집단의 크기는 $O(10^{20})$ 의 order를 갖는다. 이러한 방대한 양의 설계집단을 요구하는 유전알고리즘 탐색방법은 엄청난 계산상의 비용이 들며 현실적으로 주어진 설계 및 개발 기간 내에 최적 설계해를 얻을 수 없게 된다.

유전알고리즘의 효율성증대를 위해 유전자 조작방법인 교배(crossover) 및 돌연변이(mutation)에 대해 다양한 기법을 적용했고,^(5,6) 설계해의 다양성을 유지하기 위한 탐색기법으로 sharing function approach⁽⁷⁾ 등이 개발되었다. 또한, 최근에는 유전알고리즘의 기본적 조작기법인 선택, 교배, 돌연변이 이외에 순열배치(permutation)⁽⁸⁾를 제안하여 구조물의 설계에 적용하기도 하였다.

본 연구에서는 연속형 및 이산형 등의 혼합된 형태의 설계변수로 표현되는 압축하중을 받는 보강된 복합재 패널구조물의 경량설계시, 최적화기법으로 적합한 유전알고리즘의 적용에 있어서 유전자배열의 길이에 따른 수치 계산상의 비용 증대의 문제점을 보완할 수 있는 유전알고리즘의 개선된 탐색방법인 방향성교배(directed crossover, DC), 다단계탐색(multistage search, MS) 및 분리교배(separated crossover, SC)를 적용하여 개선된 설계해를 탐색하고 설계비용의 절감을 위한 최적화 방법의 효율성을 제고한다.

2. 유전알고리즘의 응용기법

2.1 방향성교배(directed crossover)

유전알고리즘을 구성하는 기본적인 요소 중 하나인 교배는 두 개의 암호화(binary coded)된 설

계해가 가지고 있는 유전자 정보의 일부를 서로 교환(mating)하여 새로운 설계해를 생성시키는 역할을 하는데, 복제과정을 통해 얻은 새로운 설계해가 높은 생존확률(reproduction rate)을 갖는 경우에는 elitist에 의거하여 다음 세대로 이동하게 된다. 기존의 유전알고리즘의 경우, 상호 교환하는 유전자정보의 위치(mating site)는 임의로 선정된다. 이러한 임의성은 탐색과정에서 요구되는 계산 량의 증가를 야기하므로 교배의 효율적인 적용이 요구된다. 방향성교배는 탐색시간의 절감 및 최적해의 개선을 위해 유전자배열에 적용되는 교배의 결과를 통계적으로 분석함으로써, 목적함수의 감소 및 구속조건의 만족을 생성하는 설계해의 특정 유전자배열위치에 집중적인 교배작용을 부과하거나, 교배에 의해 유전자배열이 변화해도 설계해의 개선이나 탐색의 효과가 증대되지 않는 위치에 대해서는 교배작용이 일어나지 않도록 교배의 방향을 조절한다. DC의 적용과정은 다음과 같다.

○ 초기 과정의 세대(전체 탐색시간의 약 30-40%) 동안에는 임의의 교배를 통하여 기본적인 유전알고리즘(Plain GA, PGA)을 수행한다.

○ 임의의 교배과정이 진행되는 동안 각 유전자배열의 교환 및 변화에 대한 목적함수 및 설계해의 개선의 정보를 통계적 수치로 성능을 분석하여 기록, 저장한다.

○ 유전자배열 위치교환의 통계적 자료를 바탕으로 어느 정도의 세대가 지나간 후, 방향성교배를 적용함으로써, 설계해의 변화가 발생하는 유전자배열 위치에 대해서는 교배를 활발히 전개하거나, 설계해의 개선이 생성되지 않는 유전자배열 위치에 대해서는 교배를 제한한다.

2.2 다단계탐색(multistage search)

설계변수벡터를 2진수 표현으로 암호화하는 과정에서 유전자배열이 길어지면 이에 따라 설계집

Parent_1	11010100100110011010
Parent_2	01001110001011001000
Child_1	11001110001010011010
Child_2	01010100100111001000

Fig. 1 Crossover operation

단의 수가 증가하므로 계산비용의 절감을 위한 효율적 탐색전략이 필요하다. 다단계 유전배열탐색의 기본 원리는 최적화과정을 여러 단계로 분리하여 초기 단계에는 설계변수의 선택간격을 크게 하여 유전자배열의 길이를 감소시킴으로써 다수의 설계해가 존재하는 영역을 예비 탐색한다. 초기 단계에서는 유용 가능성이 높은 영역 (promising region of higher feasibility)을 확보한 후, 이 결과를 다음 단계의 초기 설계집단으로 변환시키고 설계변수간의 선택간격을 정밀하게 조절하여 최적의 해가 존재할 가능성이 높은 다수의 영역을 집중적으로 탐색한다.

즉, 초기에는 적은 수의 유전자배열을 이용하여 근사적인 유용 설계영역을 결정하고, 그 영역이 확보되면 정밀한 간격의 설계변수 선택을 통해 다량의 국부해를 탐색한다. 이때, 초기에 설정된 설계변수의 선택간격이 크면 그만큼 구속함수를 만족시킬 수 있는 가능성이 감소하므로 구속함수에 대해 완화율(relaxation rate)을 적용하여 어느 정도의 구속함수의 위배치(violation)는 수용하면서 최적화를 수행하며, 최종 단계에 이르러서는 100% 만족하는 구속조건하에서 실제 유용한 최적 설계해를 탐색한다. 다단계 탐색기법에 있어서 각 단계에 따른 설계변수 선택간격의 해상도 변화를 Fig. 2에 나타내었다.

2.3 분리교배(separated crossover)

앞서 기술한 바와 같이 기본적인 교배과정을 적용하는 경우, 유전자배열의 교환 인자 위치는 설계변수의 종류 및 특성 등, 고유의 물리적 의미와 무관하게 임의로 선정되므로 수렴과정 동안, 탐색 회수가 증가하게 되는 원인이 된다. 이러한 임의성의 문제를 해결하기 위한 또 다른 개선된 교배작용으로서 분리교배를 적용한다. 예를

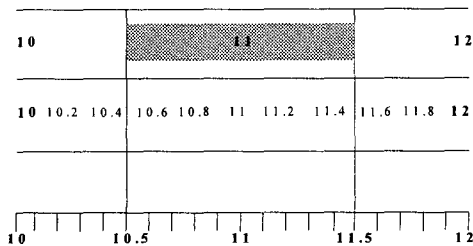


Fig. 2 Granularity of design variable in multistage search⁽⁹⁾

들어, 복합재 구조물의 설계문제인 경우에 Fig.3 과 같이 2진수로 표현된 설계변수의 유전자배열에서 1번째부터 15번째까지의 유전자배열은 구조물의 두께를 나타내는 부분이고, 16번째에서 20번째까지의 유전자배열은 적층각에 해당한다면, 두 가지 유전자배열 부분은 물리적으로 다른 의미를 지니며 최적화 과정동안 설계변수가 변화하는 탐색의 형태도 다르게 나타난다. 이러한 효과를 고려하기 위해 각 설계변수 고유의 물리적 특성에 해당하는 부분을 분리하여 교배를 적용하고 GA's를 수행한다.

PGA의 경우 유전자배열로 암호화된 설계변수 벡터의 길이가 l 인 H 형태의 schema (H-schema)가 여러 세대 동안 생존하는 개수를 수학적으로 표현하면 식 (1)과 같다.⁽⁹⁾

$$m(H, t+1) \geq m(H, t) \frac{f(H)}{f_{av}} \times [1 - P_c \frac{\delta(H)}{l-1} - O(H)P_m] \quad (3)$$

여기서, $m(H, t+1)$ 및 $m(H, t)$ 는 각각, $t+1$ 및 t 인 세대에 존재하는 H-schema의 개수이며, $f(H)$ 는 H-schema의 실제 목적함수 값이고 f_{av} 는 전체 설계집단에 존재하는 모든 설계목적함수 값의 평균이다. 또한, P_c 및 P_m 은 각각, 교배 및 돌연변이의 발생 확률이며, $\delta(H)$ 및 $O(H)$ 는 각각, H-schema의 규정길이(defining length) 및 차수(order of schema)를 나타내는데, H-schema의 생존은 schema의 규정길이가 짧고 차수가 낮으며 전체 목적함수의 평균치보다 높은 함수 값을 가지고 있을 때 가능하다. 분리교배를 유전알고리즘의 탐색특성(exploitative characteristics)으로 표현하기 위해서는 schema의 규정길이를 조절해야 한다.

만일, N 개의 서로 다른 교배 확률 $P_c^{(i)}$ 를 유전

Parent_1	110101001001100	10010
Parent_2	010011100010110	01000
Child_1	110011100011100	11000
Child_2	010101001000110	00010

Fig. 3 Separated crossover operation

배열에 적용한다면 식 (3)은 다음과 같이 표현된다.⁽¹⁰⁾

$$H = \sum_{i=1}^N H_i \quad (4)$$

$$m(H, t+1) \geq m(H, t) \frac{f(H)}{f_{av}} \times \left[1 - \frac{1}{t-1} \sum_{i=1}^N P_c^{(i)} \delta(H_i) - P_m \sum_{i=1}^N O(H_i) \right] \quad (5)$$

전체 설계변수벡터의 유전자배열은 식 (4)와 같이 분리되며, 각 분리된 유전자배열의 부분(segment)에 각기 다른 교배 확률을 적용하면 식 (1)에서의 규정길이보다 짧은 다수의 규정길 이로 변화하므로 식 (5)의 결과로부터 특정한 형태의 H-schema가 여러 세대를 거쳐 생존하는 경우가 증가하게 된다.

3. 보강된 복합재 패널

본 연구에서의 설계문제는 모자형의 보강재(hat stiffener)를 갖는 복합재 패널(Fig. 4 참조)이다. 보강된 복합재 패널은 경량화를 요구하는 우주로켓 또는 헬리콥터 동체구조물에 있어서 충격 및 충돌에 의한 에너지를 흡수하기 위해 사용하는 구조물로서 본 연구의 최적화 문제에서는 보강재 길이 방향으로 단일 하중이 작용하고 있을 때 국부적 좌굴(local buckling) 또는 오일러 좌굴(Euler buckling) 하중을 만족하는 최소무게의 보강된 복합재 패널 요소의 길이 및 복합재 적층순서를 결정한다. 패널설계에 적용되는 모델은 Fig. 5에 나타내었으며 설계변수는 4개의 패널요소의 길이 및 3가지 대칭형 적층판(symmetric laminate)에서의 적층순서를 결정하는 35개의 적층각(layer angle)이다. 이때, 패널요소의 길이 b_i 는 연속형 설계변수이고 적층판에서의 적층각을 0° , 45° , -45° 및 90° 로 선택할 경우 이산형의 설계변수이므로 이러한 혼합된 설계변수를 동시에 포함하여 해석문제의 비오목성을 고려한 최적화기법으로는 유전알고리즘이 적합하다. 구속함수를 갖는 설계문제를 위해 exterior penalty function method에 의한 PGA⁽¹¹⁾를 이용하였다.

보강재 부분에 작용하는 압축력에 대한 구조물

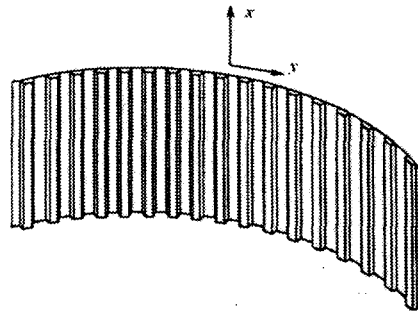


Fig. 4 Stiffened composite curved panel[3]

sublaminate_1														
90	0	0	0	0	45	-45	45	-45	0	0	0	90	0	0
sublaminate_2														
0	0	0	0	0	0	0	90	45	0	90	0	0	0	0
sublaminate_3														
45	-45	90	0	90										

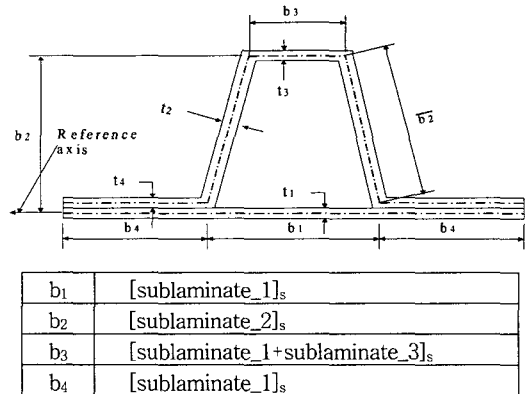


Fig. 5 Schematic of hat-stiffened composite panel

해석은 Agarwal⁽¹²⁾의 수학적 모델을 사용하였으며 그 과정을 간략히 정리하면 다음과 같다. 보강재의 길이 방향으로 압축력 N_x 가 작용할 때 보강재 간격간에 작용하는 하중은 식 (6)과 같다.

$$P = N_x(b_1 + 2b_4) = \sum_{i=1}^4 \sigma_{\alpha(i)} A_i \quad (6)$$

적합조건으로부터 얻어지는 패널구조물의 변형률은,

$$\epsilon = \frac{\sigma_{a(i)}}{E_i} \quad (7)$$

이며 위의 식 (6) 및 (7)로부터 다음의 식을 얻는다.

$$P = \sum_{i=1}^4 \epsilon E_i A_i \quad (8)$$

$$\epsilon = \frac{N_x(b_1+2b_4)}{\sum_{i=1}^4 E_i A_i} \quad (9)$$

최종적으로 계산되는 각 패널요소에서의 작용 하중은 식 (10)으로 주어진다.

$$P_{a(i)} = \sigma_{a(i)} A_i = \frac{N_x(b_1+2b_4)E_i A_i}{\sum_{i=1}^4 E_i A_i} \quad (10)$$

본 설계 문제에서 좌굴 하중을 고려하기 위해 보강된 패널을 단순 지지된 판으로 가정하며 직교이방성 이론을 적용하면 각 패널요소에 작용하는 국부 좌굴은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\sigma_{k(i)} = \left[\frac{2\pi^2}{b^2 t} (\sqrt{D_{11}D_{22} + D_{12} + 2D_{66}}) \right]_{(i)} \quad (11)$$

$$P_{k(i)} = [\sigma_i b_i t]_{(i)} \quad (12)$$

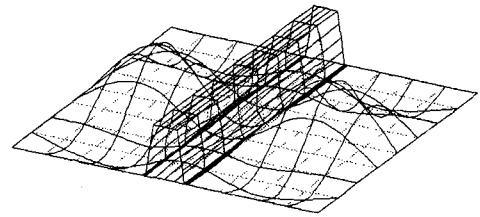
이때 식 (11)의 D_{ij} 는 적층각의 적층순서에 의해 결정되는 패널의 굽힘강성이다⁽¹³⁾. 전체 좌굴을 고려하기 위한 조건으로 다음과 같은 오일러의 식을 가정한다.

$$N_{x Euler} = \frac{\pi^2(EI)}{(b_1+2b_4)L^2} \quad (13)$$

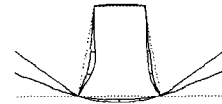
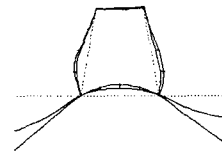
여기서 EI 는 각 요소의 강성의 변화를 고려한 등가강성(effective stiffness)이다.

이러한 이론적 전개를 바탕으로 단일 방향의 압축력이 작용하는 복합재 패널에 대해 좌굴 하중 및 변형률 등의 구속조건을 만족하는 최적화 문제는 다음과 같이 정의된다.⁽¹⁴⁾

$$\text{minimize } \phi = \frac{W}{b_1+2b_4} \quad (14)$$



(a) Panel



(b) Stiffeners

Fig. 6 Buckled shape (1st mode) by ABAQUS

$$\text{subject to } P_{k(i)} \geq P_{a(i)} \quad (15)$$

$$N_{x Euler} \leq N_x$$

$$\epsilon \leq \epsilon_a$$

$$b_1+2b_4 \geq b_3$$

여기서, 목적함수 ϕ 는 단위 폭 당 패널의 무게이고, $P_{k(i)}$ 및 $P_{a(i)}$ 는 각각, 4개의 패널요소에서의 국부 좌굴하중 및 작용하중이다. 또한, 구속함수로 오일러 좌굴(Euler buckling), 변형률 및 모자형의 보강된 패널의 형상을 유지하기 위한 조건을 고려하였다.

4. 결과

보강된 복합재 패널의 최적화문제를 적용하기에 앞서, 보강재를 포함하는 판 구조물의 좌굴 모드를 ABAQUS를 이용하여 해석하였다. 총 192개의 8-절점 사각형 평면 판요소를 사용하여 단위하중에 의한 정적해석 및 고유치해석을 수행하

였다. Fig. 6(a)에 1차 모드에 대한 결과⁽¹⁵⁾를 나타내었다. 정방형 (L=0.8m)의 복합재 패널 구조물 각 끝단에는 단순 지지의 경계 조건을 적용하였고 보강재의 길이 방향으로 단위 하중의 압축력을 작용시켰다. 경계 조건에 따라 좌굴 모드는 전체적으로 대칭형으로 나타나는데, Fig. 6(b)에서는 보강재 부분에서의 좌굴 형상을 확대하여 표시하였다. Fig. 6(b)의 첫 번째는 패널의 경계 부근에서의 보강재 요소 및 판의 좌굴 모드이며 두 번째는 보강재 중앙 부근에서의 좌굴 모드이다. 보강재 길이 방향에 따른 각 위치에서 서로 반대의 좌굴 형상을 보여주며 이는 기존의 유한 요소 해석으로부터 얻어지는 결과⁽¹⁶⁾와 동일하다.

앞 절에서 전개한 수학적 모델을 유전알고리즘에 적용하여 모자형의 보강된 복합재 패널의 최적화를 수행하였다. 설계 문제에서 사용한 복합재료[12]는 Gr/Ep ($E_{11}=138\text{GPa}$, $E_{22}=8.96\text{GPa}$, $G_{12}=4.48\text{GPa}$, $\nu_{12}=0.304$, $\rho=1552\text{kg/m}^3$)이며, 4개의 패널요소 길이 및 35개의 적층각의 설계변수 상한 및 하한 값들은 다음과 같다.

$$0.01 \leq b_i \leq 0.11 \text{ (cm) with } \Delta b_i = 0.0001 \text{ (16)}$$

$$\theta_j = \{0, 45, -45, 90\}$$

일반적으로 패널요소의 길이 및 두께 등은 연속형의 설계변수이나, 본 연구에서 사용한 GA's는 설계변수를 이진법 표현에 의한 일정량의 해상도를 갖는 불연속형으로 취급하였고 그 값을 $\Delta b_i = 0.0001$ 로 하였다.

유전알고리즘을 통한 패널 구조물의 최적화 결과를 비교하기 위해 4가지 탐색방법, 즉 기본적인 기능만을 사용한 PGA, 방향성 교배를 이용한 DC, 설계변수의 해상도 및 구속함수의 완화를 적용한 MS 및 설계변수의 물리적 특성에 따라 차별된 교배를 적용하는 SC를 통해 최적화를 수행하고 각 방법의 효율성을 비교하였다. 식 (16)으로부터 설계변수 범위에 따른 유전자배열의 길이는 NSTRING=110, 설계집단의 크기는 NPOP=120, 세대수는 NGEN=500 이다.

Fig. 7 및 Fig. 8에는 PGA의 방법에 의해 각각 교배 확률 및 돌연변이 확률의 변화에 따른 목적 함수 ϕ 의 결과를 표시하였는데, 초기 설계집단 (initial design population)을 다르게 선정하여 3회씩 GA's를 수행하였다. Fig. 7에서는 교배확률이

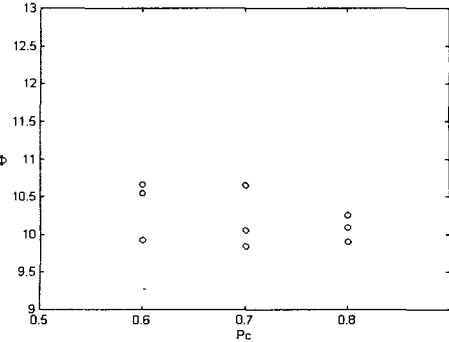


Fig. 7 Effect of crossover

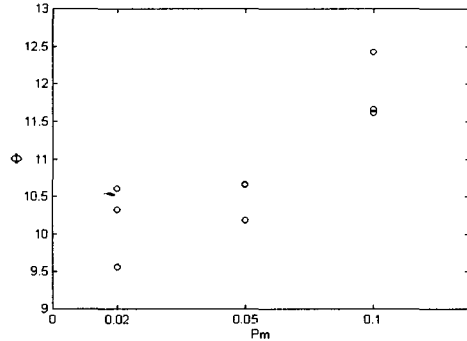


Fig. 8 Effect of mutation

증가할수록 즉, 교배에 참여하는 유전자의 수가 증가할수록 편차가 적은 안정된 설계해가 생성됨을 보여준다. 돌연변이의 발생 확률을 변화시켜 수치 실험을 수행한 경우(Fig. 8 참조), 복제 및 교배의 작용으로부터 충분히 새로운 설계해를 탐색할 수 있으므로 돌연변이 발생확률을 작게 선택하는 것이 주어진 계산 시간동안 개선된 설계를 얻을 수 있다. 이러한 수치실험의 바탕으로 유전알고리즘 기반 최적화를 위한 교배 및 돌연변이 발생확률을 각각 0.8 및 0.05로 선택하였다.

4가지 유전알고리즘의 설계 방법에 따른 최적 설계의 수렴 과정 및 최종 설계 해의 비교 결과를 Fig. 9 및 Fig. 10에 각각 나타내었다. 각 경우에 대하여 5가지의 초기 설계집단을 선정하여 최적화에 대한 수치실험을 수행하였는데, 이때 사용한 복합재 패널의 길이는 L=0.76m이며, 압축하중은 $N_x=3000 \text{ kNm}$ 이다.

Fig. 9에서는 각 탐색방법에 따른 수렴과정을 보여주는데, DC는 200번째 세대(전체 500번의 세대중 40%에 해당)부터 방향성 교배를 적용하여 최종적으로 PGA보다 개선된 해를 탐색하였다.

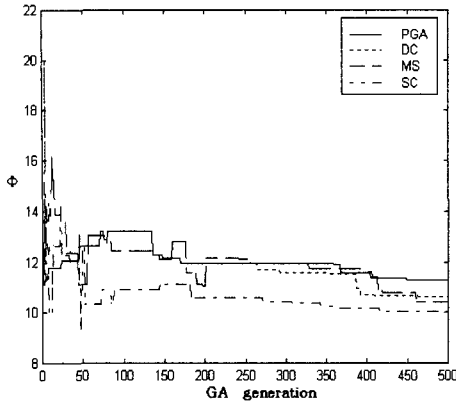


Fig. 9 Convergence history in panel design

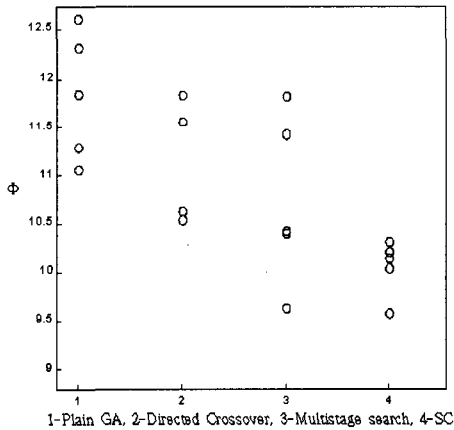


Fig. 10 Optimal solutions of composite panel

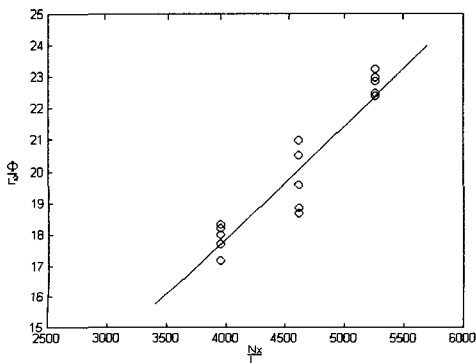


Fig. 11 Optimal weight distribution vs compressive load

330번째 세대에서 얻은 PGA의 최종 설계는 DC의 경우와 비교하면 220번째에 해당한다. MS를 사용한 경우에는 3단계의 탐색 과정을 거쳤는데 각 단계별 적용한 패널요소 길이에 대한 설계변수의 해상도는 $\Delta b_i = 0.001, 0.0005, 0.0001$ 이며, 구속함수 완화율은 각각 20%, 10%, 0% 이고 탐색 세대수는 각각 NGEN=100, 100, 300이다.

MS의 결과로부터 100번째 및 200번째에 해당하는 목적함수의 값이 매우 작게 나타났지만 이것은 구속함수 완화율에 의해 각각 80% 및 90%의 구속조건의 만족으로 얻어진 결과이다. 그러나, 3단계 즉, 200번째 세대 이후의 결과는 100%의 구속조건을 만족하는 완화율 및 PGA와 DC에서와 같은 설계변수의 해상도를 사용하였으므로 이를 통해 얻은 최종적인 최적설계는 유용한 설계(feasible design)로서 보다 개선된 결과를 생성하였다. 또한, 39개의 설계변수로 구성되는 유전자배열을 패널요소의 길이를 나타내는 부분과 적층각을 나타내는 부분으로 분리하는 SC를 적용하여 최적화를 수행하였다. 이때, 두 부분으로 분리된 유전자배열에 사용한 교배확률 값은 각각 0.9 및 0.6이다. 예상하는 바와 같이 SC가 PGA보다 효율적인 결과를 제공하고 있음을 알 수 있다.

이러한 분석을 바탕으로 각 탐색방법에 따른 최적목적함수의 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 4가지 방법을 비교하면 SC가 가장 좋은 설계치를 생성하였고 DC은 PGA와 비교하여 유사하게 개선된 탐색 결과를 생성하였다. DC는 PGA의 초기 결과를 이용하여 교배의 확률적 성능을 바탕으로 200번째 세대 이후 적용하였는데 이러한 선택은 PGA 측면에서 고려하면 설계해의 다양한 탐색(multiple design search)에 제약이 된다. 즉, DC는 편차가 적은 설계 해를 제공하지만 다양성(diversity)의 측면에서는 MS의 결과보다 떨어진 다. MS는 각 초기 설계집단으로부터 설계해가 존재할 수 있는 영역으로 각 단계마다 해상도 및 구속함수 완화율을 줄여가면서 접근하므로 보다 개선된 설계를 생성하는데 역시 MS는 편차가 큰 결과를 준다. 이는 복합재료를 이용한 구조 설계 문제의 경우, 두께, 길이 및 적층 순서 등을 설계 변수로 고려하면 다수의 국부적 설계해가 존재하기 때문이다.⁽¹⁷⁾ Fig. 11에서는 압축하중을 3000,

3500, 4000 kNm 등으로 변화시켰을 경우 PGA에 의한 설계결과를 비교하고 있다. 예상 할 수 있듯이 작용하중이 증가할수록 경량설계 구조물의 무게가 증가함을 알 수 있다.

본 연구에서는 패널 길이 뿐 아니라 각 패널요소에 적용되는 복합재료의 적층순서를 설계변수로 고려하였는데, 적층각을 매번 변화시키면서 적층하게 되면 layup machine의 setup 위치의 잦은 변화로 제작시간에 따른 비용이 증가하게 된다. 예를 들어 Automated Fiber Placement Machine에 의해 적층작업을 하는 경우, 적층시간(layup time)은 정상상태의 layup machine의 속도, 시간 및 진행거리의 함수로 표현된다.⁽¹⁸⁾ 적층각의 변화에 따른 제작비용을 고려하기 위해 각 패널요소에서 사용하는 각 적층판에서의 적층각의 변화에 대해 제한을 주어 경량설계를 수행한 후, 최

적해를 비교하였다. 이를 위해 최적화문제의 수식 (14)-(15)에 추가되는 구속조건은 다음의 4가지 적층각에 대한 flag를 사용하여 식 (17)과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 n_i &= 1 && \text{for } \theta = 0^0 \\
 n_i &= 2 && \text{for } \theta = 45^0 \\
 n_i &= 3 && \text{for } \theta = -45^0 \\
 n_i &= 4 && \text{for } \theta = 90^0
 \end{aligned}$$

$$\sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^{N_i-1} |n_{i+1} - n_{i,j}| \leq 10 \tag{17}$$

즉, 전체 적층순서의 변화를 10번으로 제한하도록 하였으며, PGA방법 하에서 각 압축하중 조건에 따른 설계해의 결과를 Table 1에 나타내었

Table 1 Plain GA search based optimization results

Load (kNm)	No	Sublaminte stacking sequence	# of layup changes	ϕ (kg/m)	b ₁ (cm)	b ₂ (cm)	b ₃ (cm)	b ₄ (cm)
3000	1	[0 ₂ /90/0/45/0/90/45/0 ₂ /90/-45/0 ₂ /45] _s	15	9.857	4.27	2.08	1.77	2.12
	2	[0 ₁₅] _s						
	3	[0/45/0/45/90] _s						
	1	[0 ₈ /-45/45 ₂ /±45/45 ₂] _s	9	11.290	3.10	3.06	1.89	2.53
	2	[-45/0 ₁₁ /-45 ₃] _s						
	3	[-45 ₂ /90/45/90] _s						
3500	1	[0 ₃ /45/0 ₂ /-45/0 ₂ /45/0/-45/0/90/-45] _s	13	10.790	2.82	2.63	1.07	2.12
	2	[0 ₁₅] _s						
	3	[-45/0/45/0 ₂] _s						
	1	[0 ₇ /90/0 ₄ /±45/0] _s	9	11.090	3.15	2.43	2.30	2.12
	2	[0 ₁₄ /-45] _s						
	3	[0/-45 ₂ /45/0] _s						
4000	1	[-45/0 ₇ /90/0/45/0 ₄] _s	13	12.990	1.95	2.40	1.95	1.39
	2	[0 ₆ /45/0 ₆ /-45/0] _s						
	3	[0/90/-45 ₂ /45] _s						
	1	[90/0 ₆ /90/0/45/0 ₅] _s	10	13.130	1.87	2.65	1.55	1.38
	2	[0 ₈ /±45/0 ₅] _s						
	3	[45/90/0 ₃] _s						

다. 하중조건의 변화 및 적층각 변화수 제한에 대한 최종적인 설계해를 비교하면, $N_x = 3000$ kNm 인 경우가 가장 넓은 유용의 설계공간을 가지고 있으므로 목적함수의 변화량이 가장 크게 나타난다. 이때, 패널요소 중, b_1 및 b_2 의 영향이 가장 크게 나타나며, b_4 의 영향이 가장 작게 나타남을 알 수 있다. 또한, 적층각 변화수에 대한 제한에 대해서도 $N_x = 3000$ kNm 인 경우에 가장 큰 변화의 결과를 생성하였으며 이러한 제한에 가장 큰 영향을 받는 적층판은 sublaminat_1임을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 패널요소의 길이 및 복합재의 적층각과 같이 연속형 및 이산형 등의 혼합된 설계변수로 표현되며, 설계공간의 불연속성 및 비오목성의 특성을 갖는 보강된 복합재 패널 구조물의 효율적인 최적설계를 위해 유전알고리즘을 적용하였다. 유전자배열의 길이에 따른 수치 계산상의 비용 증대의 문제점을 보완할 수 있는 유전알고리즘의 개선된 탐색 방법인 방향성교배, 다단계 유전배열탐색 및 분리교배를 적용하여 기본적 기능의 유전알고리즘의 결과보다 개선된 설계해를 탐색하고 설계비용의 절감을 위한 최적화 기법의 효율성을 입증하였다. 또한, 압축하중의 변화 및 제작과정상의 설계요구조건을 고려하기 위해 복합재 적층각의 변화 수 제한에 따른 최적 설계해의 변화를 고찰하였다. 이를 바탕으로 각 설계요구조건에 영향을 미치는 패널요소길이의 변화 및 적층판에서의 적층각의 선택 변화 등을 최적설계를 통해 분석하였다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 최적설계신기술 연구센터(Center of Innovative Design Optimization Technology, iDOT)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Goldberg, D. E., 1989, Genetic Algorithms in

Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, Reading, MA.

(2) Le Riche, R. and Haftka, R. T., 1993, "Optimization of Laminate Stacking Sequence for Buckling Load Maximization by Genetic Algorithms," *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 5, pp. 951~956.

(3) Harrison, P. N., Le Riche, R. and Haftka R. T., 1995, "Design of Stiffened Composite Panels by Genetic Algorithm and Response Surface Approximations," *proceedings of the 36th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, pp. 58~68, AIAA Paper No. 95-1163.

(4) Goldberg, D. E., 1989, "Sizing Populations for Serial and Parallel Genetic Algorithms," *proceedings of the 3rd International Conference on Genetic Algorithms*, pp. 70~79.

(5) Eshelman, L. J., Caruana, R. A., and Schaffer, J. D., 1989, "Biases in the Crossover Landscape," *proceedings of the 3rd International Conference on Genetic Algorithms*, pp. 10~19, Washington, DC.

(6) Fogarty, T. C., 1989, "Varying the Probability of Mutation in the Genetic Algorithm," *proceedings of the 3rd International Conference on Genetic Algorithms*, pp. 104~109, Washington, DC.

(7) Goldberg, D. E. and Richardson, J., 1987, "Genetic Algorithms with Sharing for Multimodal Function Optimization," *proceedings of the 2nd International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications*.

(8) Haftka, R. T., Le Riche, R., and Harrison, P., 1996, "Genetic Algorithms for Design of Composite Panels," *Emergent Computing Methods in Engineering Design: Applications of Genetic Algorithms and Neural Networks, Computer and Systems Sciences*, Vol. 149, pp. 10~29.

(9) Hajela, P. and Lee, J., 1993, "Genetic Algorithm Based Sizing of Low Vibration Rotors," *proceedings of the 5th International Workshop on Dynamics and Aeroelastic Stability Modeling of Rotorcraft Systems*, Rensselaer Rotorcraft Technology Center, Troy, NY, October.

- (10) 이종수, 김승진, 1998, "유전 알고리즘 기반 구조 설계문제의 최적화 개선에 관한 연구," 1998년 추계 정밀공학회 학술대회 논문집, pp. 837~840, 서울시립대학교.
- (11) Hajela, P., 1990, "Genetic Search - An Approach to the Nonconvex Optimization Problem," *AIAA Journal*, Vol. 26, No. 7, pp. 1205~1210, July.
- (12) Agarwal, B. and Davis, R. C., 1974, "Minimum-Weight Designs for Hat-Stiffened Composite Panels Under Uniaxial Compression," NASA TN D-7779, Washington, D.C.
- (13) Vinson, J. R. and Sierakowski, R. L., 1987, *The Behavior of Structures Composed of Composite Materials*, Kluwer Academic Publishers.
- (14) 이종수, 1998, "유전 알고리즘을 이용한 보강된 복합재 패널의 설계," 1998년 추계 기계학회 학술대회 논문집(A), pp. 957~962, 영남대학교.
- (15) Hajela, P. and Lee, J., 1997, "Analysis, Modeling and Design of Stiffened Composite Panels," DARPA MADESsmart Report-70NANB6H0074, Boeing Helicopters and Space Group, Philadelphia, PA.
- (16) Bushnell, D., 1987, "PANDA2 - Program for Minimum Weight Design of Stiffened, Composite, Locally Buckled Panels," *Computers and Structures*, Vol. 25, No. 4, pp. 469~605.
- (17) Miki, M., 1983, "A Graphical Method for Designing Fibrous Laminated Composites with Required In-Plane Stiffness," *Trans. JSCM*, Vol. 9, No. 2, pp. 51~55.
- (18) ACRAPLACE, 1995, Cincinnati Milacron, Cincinnati, OH.