

論文

마이크로 유전자 알고리즘을 이용한 외부 수압을 받는 필라멘트 와인딩 복합재 원통의 최적 설계

문철진*, 권진희**+, 최진호**

Optimal Design of Filament Wound Composite Cylinders under External Hydrostatic Pressure using a Micro-Genetic Algorithm

Chul-Jin Moon*, Jin-Hwe Kweon**+, Jin-Ho Choi**

ABSTRACT

In this study, a micro-genetic algorithm was utilized for the optimal design of filament wound composite cylinders subjected to hydrostatic pressure for underwater vehicle application. The objective of the optimization was to maximize the design allowable load considering the buckling and static failure loads. A commercial finite element program, MSC.NASTRAN, was used for buckling and failure analysis. An open-source micro genetic algorithm by Carroll was modified for the optimization. The design variables are the helical winding angle and hoop layer thickness. The results of examples show that the micro genetic algorithm can be successfully applied to the optimization of filament wound cylinders with various geometries and gives better efficiency than general genetic algorithms.

초 록

본 연구에서는 마이크로 유전자 알고리즘을 이용하여 외부 수압을 받는 필라멘트 와인딩 복합재 원통의 최적설계를 수행하였다. 목적함수는 파손하중과 좌굴하중을 동시에 고려하여 설계하중을 최대화하는 것이다. 좌굴 및 파손해석은 MSC.NASTRAN을 이용하였고, Carroll의 공개된 마이크로 유전자 알고리즘에 기초한 최적화작업을 수행하였다. 설계변수로는 헬리컬(helical) 와인딩 각도와 후프(hoop) 와인딩 층의 두께비가 고려되었다. 본 연구를 통해 마이크로 유전자 알고리즘을 이용하여 다양한 형상을 갖는 필라멘트 와인딩 복합재 원통의 좌굴 및 파손하중 최적화가 가능함을 확인하였고, 제안된 알고리즘이 일반 유전자 알고리즘과 비교해서도 높은 효율을 보였다.

Key Words : 마이크로 유전자 알고리즘(micro-genetic algorithm), 필라멘트 와인딩(filament winding), 외부 수압(external hydrostatic pressure), 최적화(optimization)

1. 서론

최근 항공우주 분야에 축적된 복합재 설계, 제작 기술을 수중운동체와 같은 조선 해양 분야에 적용하기 위한 노력이

진행되고 있다[1]. 잠수함을 비롯한 고심도 내압구조물은 현재까지 대부분 고강도강, 타이타늄 및 알루미늄 합금 등의 금속재로 건조되고 있다. 이렇게 금속재를 사용하는 경우 전체 부력의 절반 가까이가 자체 중량 지지를 위해 사용된다.

* 경상대학교 기계항공공학부 대학원

**+ 경상대학교 기계항공공학부, 항공기부품기술연구소, 교신저자(E-mail:jhkweon@gnu.ac.kr)

** 경상대학교 기계항공공학부, 항공기부품기술연구소

따라서 이러한 중량민감 구조물(weight sensitive structure)에서는 자체 중량을 줄임으로써 성능을 획기적으로 개선할 수 있다.

일반적으로 수중운동체는 원통형태의 구조를 갖는 경우가 많다. 이러한 원통 형태의 구조물이 외압을 받는 경우 좌굴 후 지지하중이 감소하면서 대변형이 발생하는 경우가 많기 때문에 좌굴이 중요한 설계조건이 된다. 따라서 복합재를 수중운동체에 적용하기 위해 외부 수압을 받는 조건에서의 좌굴에 대한 연구가 이루어져 왔다. Messenger[2]는 필라멘트 와인딩 공정으로 제작된 원통이 외부 수압을 받을 때 기하학적 초기결함이 좌굴하중에 미치는 영향을 수치적으로 조사하였다. Graham[3]은 복합재를 심해 잠수정에 적용하기 위한 연구로서 CFRP 원통 쉘에 대한 좌굴 해석과 시험을 수행하였다. Carvelli 등[4]은 GFRP 반구(hemisphere)와 원뿔 모양의 잠수정 구조를 이용하여 실제 바다에 수압시험을 수행하고 유한요소해석 결과와 비교하였다. 또한 권진희 등은 선행연구[5,6]에서 고심도 수중운동체 등에 복합재료를 적용하기 위해 외부 수압을 받는 복합재 원통에 대한 좌굴 및 점진적 파손 연구를 수행한 바 있다.

그러나 외압을 받는 복합재 원통, 특히 필라멘트 와인딩(filament winding) 원통에서는, 기하학적 조건(원통의 종축길이, 반경, 두께)과 적층순서(winding angle)에 따라 좌굴 이전에 파손이 먼저 발생하기도 하기 때문에 실제 구조설계를 위해서는 좌굴과 파손 하중을 동시에 고려한 최적화가 필요하다.

전역 최적화 기법 가운데 유전자 알고리즘(genetic algorithm) [7]은 구현이 쉽고, 특히 이산 설계변수를 표현하는데 적합하기 때문에 복합재 구조물의 최적설계에 많이 이용되어 왔다 [8,9,10]. 하지만 일반 유전자 알고리즘은 표본이 적으면 해를 찾을 확률이 낮아지고, 많은 표본으로 탐색하게 되면 해를 찾을 확률은 높아지지만 그만큼 수렴이 느리고 효율이 떨어지게 된다. 이 같은 단점을 보완하기 위한 방법으로서, 인구수(population size) 자체를 줄임으로써 연산의 횟수를 줄일 수 있는 마이크로 유전자 알고리즘(micro genetic algorithm; μ GA)이 제안되었다[11,12]. 마이크로 유전자 알고리즘을 이용한 복합재 구조물의 최적설계 효율성은 여러 연구를 통하여 검증되었다[13,14].

따라서 본 논문은 고심도 소형 수중운동체에 복합재를 적용하기 위한 기초연구로서, 마이크로 유전자 알고리즘을 이용하여 외부 수압을 받는 필라멘트 와인딩 복합재 원통에 대한 최적설계를 수행하였다. 동일한 무게에서 선행좌굴하중과 파손하중을 동시에 고려한 설계하중을 최대화하는 것을 목적으로 설정하였다. 헬리컬 와인딩 각도와 후프 와인딩 층의 두께비를 설계 변수로 설정하였다. Carroll[15]의 마이크로 유전자 알고리즘 코드를 수정하여 상업용 유한요소프로그램

MSC.NASTRAN과 연결하여 최적설계를 수행하였다.

2. 마이크로 유전자 알고리즘

일반 유전자 알고리즘은 전역 최적해의 수렴 확률을 높이기 위해 인구수를 크게 하여 유전 인자의 다양성을 높여야 하며, 교배와 돌연변이를 통하여 전역 최적해를 찾아 간다. 전역 최적해를 찾기 위해 다양한 유전정보의 확보가 중요한 요소이기 때문에 일반 유전자 알고리즘에서 인구수의 증가와 이로 인한 계산시간의 증가를 피할 수 없다. 이런 문제를 해결하기 위한 방법 중 하나가 마이크로 유전자 알고리즘이다. 마이크로 유전자 알고리즘은 일반 유전자 알고리즘보다 적은 인구수로 탐색을 수행하기 때문에 연산의 수를 줄일 수 있다. 공칭수렴(nominal convergence)과 난수에 의한 새로운 유전자 생성을 통하여 다음 세대를 구성하기 때문에 세대의 평균 적합도(fitness)는 떨어지지만 적은 인구로도 유전인자의 다양성을 확보하게 된다[12].

본 논문에서 사용된 마이크로 유전자 알고리즘과 유한요소해석이 연계된 흐름도를 Fig. 1에 보였다. 초기 세대는 무작위로 구성된다. 먼저 초기 세대의 유전자 정보에 해당하는 복합재 원통의 헬리컬 와인딩 각도와 후프 와인딩 비율을 가지는 유한요소해석 입력파일을 생성한다. 생성된 입력파일로 해석을 수행하여 파손하중과 좌굴하중을 비교하여 설계하중을 구하게 된다. 설계하중이 본 논문에서의 적합도가 된다. 부모 선택법으로는 모집단에서 선택된 임의의 개체 중 최고의 적합도를 갖는 개체가 다음 세대를 위한 구성원이 되는 토너먼트 선택(tournament selection)을 사용한다[16]. 토너먼트 선택은 대체로 계산에 필요한 시간이 짧은 것이 장점이다. 부모의 유전 정보를 조합하여 자식의 염색체를 만드는 교배(crossover)에서는 먼저 임계확률을 설정하고 각각의 염색체 난수를 발생시켜 난수가 임계확률보다 높으면 부모 A의 유전자를 복사해오고 그렇지 않으면 부모 B의 유전자를 복사해오는 균일(uniform) 교배를 사용하였다[17]. 균일교배는 교란의 정도가 크므로 수렴 시간이 상대적으로 오래 걸리지만 다양한 유전 정보를 조합하여 보다 넓은 해 공간 탐색이 가능하다. 전 단계의 세대에서 최고의 적합도를 갖는 엘리트의 유전자와 선택과 교배로 생성된 자식세대를 비교하여 상위함이 어느 수준 이하가 되면 공칭수렴이 되었다고 판단한다[12]. 그 다음 세대는 공칭수렴 조건 판단에 쓰였던 엘리트를 복사하고 나머지 개체들은 무작위로 생성된다. 이와 같은 과정의 반복적인 수행으로 적합도는 진화하게 된다. 본 논문에서 반복수행의 종료 조건은 최대의 세대수를 만족시킬 경우이다.

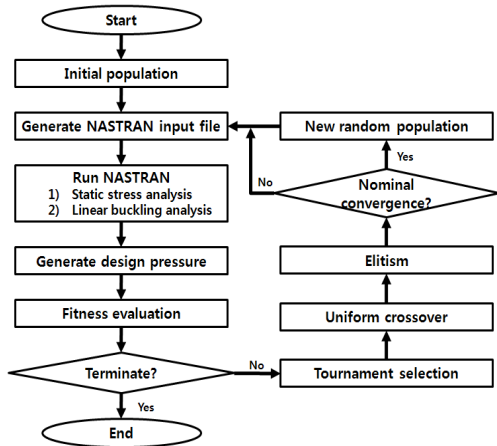


Fig. 1 Flowchart for the micro-genetic algorithm.

3. 필라멘트 와인딩 복합재 원통의 최적화

3.1 문제 설정

필라멘트 와인딩 복합재 원통의 기하학적 조건과 유한요소모델은 Fig. 2와 같다. 요소는 MSC.NASTRAN의 CQUAD4 [18]를 사용하였다. 이 요소는 2차원 쉘요소로 두께방향 강성(E_3)과 강도($Z_{T,C}$)는 고려하지 않지만, 두께방향 전단강성(G_{13} , G_{23} , G_{13})을 이용하여 1차 횡전단변형을 고려하고 있다. 층간 층의 접착은 완전한 것으로 가정하고, 층간분리 파손을 고려하지 않았다. 좌단은 고정지대로 구속하고, 플렌지로 보강되는 우단부분은 종축방향변위를 제외한 나머지 자유도를 구속시키고 원통 단면의 중간에 절점을 생성하여 강제요소(RBE2 element)[18]로 연결하였다. 이러한 방법으로 플렌지를 강체로 가정할 수 있다. 하중은 고심도 수중운동체가 정수압(hydrostatic pressure)을 받는 조건이다.

유한요소해석을 통하여 좌굴하중과 파손하중을 비교하여 더 보수적인 값이 설계하중이 되고 이 설계하중을 최대화하는 것이 본 논문의 목적함수이다.

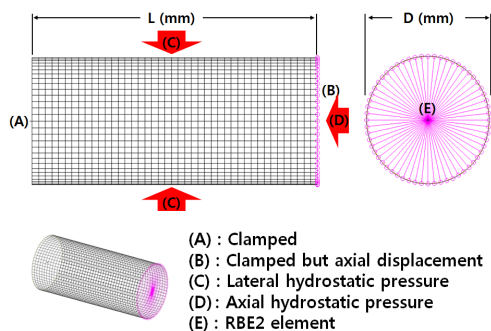
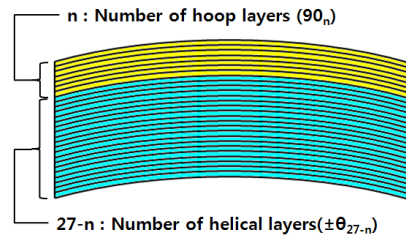


Fig. 2 Finite element model and boundary conditions.

Fig. 3에 보인 바와 같이 일반적으로 필라멘트 와인딩 기법으로 제작된 복합재 원통은 헬리컬 와인딩 층과 후프 와인딩 층으로 구성되어 있다. 사용자의 요구도에 따라 원통의 기하학적 조건은 정해진다. 본 논문에서는 전체 두께 8 mm, 총 27개의 와인딩 층($[\pm\theta_{27-n}/90_n]$)으로 구성된 필라멘트 와인딩 복합재 원통의 헬리컬 와인딩 각도($\pm\theta_{27-n}$, $0^\circ \leq \pm\theta_i \leq 89^\circ$, $i=27-n$, $\Delta\theta = 1^\circ$)와 후프 와인딩의 적층 수(90_n , $0 \leq n \leq 27$, $\Delta n=1$)를 설계변수로 설정하였다. 원통의 전체 두께가 일정하므로 후프 와인딩 층의 수를 조절하면 두께가 달라지고, 자동적으로 전체에 대한 두께비가 결정된다. 본 연구에서 설정한 문제 예제 I, II, III의 복합재 원통의 종축의 길이와 직경은 Table 1에 나타내었다.



Design variable 1 : Number of hoop layers (n)
 $0 \leq n \leq 27, \Delta n=1$

Design variable 2 : Helical winding angle ($\pm\theta$)
 $0^\circ \leq \pm\theta_i \leq 89^\circ, i=27-n, \Delta\theta=1^\circ$

Fig. 3 Stacking sequence of the cylinder.

Table 1 Geometry of composite cylinders

Case	L (mm)	D (mm)
Example I	300	300
Example II	700	300
Example III	1000	300

유한요소해석을 위해 Table 2에서와 같이 T700 탄소/에폭시 복합재의 물성치를 사용하였다[6]. E_1 은 섬유방향 강성, E_2 는 면내 횡방향 강성, G_{12} 는 면내 전단강성, G_{23} , G_{13} 은 횡전단 강성, ν_{12} 는 면내 푸아송 비(Poisson's ratio), X_T , X_C 는 각각 섬유방향 인장, 압축강도, Y_T , Y_C 는 각각 면내 횡방향 인장, 압축강도, S_{12} 는 면내 전단강도를 나타낸다.

Table 2 Material properties

Property	Value	Unit
E_1	120.8	GPa
E_2	8.5	GPa
$G_{12} = G_{13}$	3.4	GPa
G_{23}	2.7	GPa
ν_{12}	0.253	-
$X_T = X_C$	2064	MPa
$Y_T = Y_C$	32	MPa
S_{12}	45	MPa

일반적인 선형좌굴해석은 미분강성행렬을 구하기 위한 정적 해석과 고유치 해석으로 두 번의 해석이 필요하다. 선형정적 해석에서 식 (1)과 같이 최대응력판정식(maximum stress failure criteria)을 적용하여 각 섬유방향응력(σ_1), 면내 횡방향응력(σ_2) 및 면내 전단응력(τ_{12})과 각각의 강도의 비로 파손지수(FI)를 계산하여 가장 높은 값을 뽑아내어 파손하중을 구한다. 최대응력식의 작용하중과 파손지수의 관계가 선형적인 특징을 이용하여 식 (2)와 같이 작용하중($P_{Apply Load}$)에 해석으로 구한 파손지수를 나누어 주면 파손지수가 1이 되는 하중(Failure load)을 구할 수 있다. 이어서 고유치 해석을 통해 좌굴하중을 구한다. 이러한 방법으로 한 번의 선형좌굴해석으로 파손하중과 좌굴하중을 구하여 해석시간을 줄일 수 있으므로 유전자 알고리즘과 같은 대량의 연산의 수가 필요한 최적화에 유리하다.

$$\max \text{ of } \left\{ \frac{\sigma_1}{X_T}, \frac{|\sigma_1|}{X_C}, \frac{\sigma_2}{Y_T}, \frac{|\sigma_2|}{Y_C}, \frac{|\tau_{12}|}{S_{12}} \right\} = FI \quad (1)$$

$$\text{Failure load} = \frac{P_{Apply load}}{FI} \quad (2)$$

3.2 가능해 영역의 좌굴 및 파손 하중

본 연구에서 설정한 문제들의 가능해 영역(feasible region)을 Fig. 4, 5, 6에 보였다. 두 개의 표면(surface)은 각각 좌굴하중과 파손하중을 나타낸다. 설계하중은 좌굴하중과 파손하중 표면을 비교하여 더 낮은 값이 된다. 각 문제들의 가능해 영역의 해석점 수는 2403개이다.

원통의 길이가 300 mm인 예제 I의 최대 좌굴하중은 20.5 MPa이며 이때의 헬리컬 와인딩 각도는 73°, 후프 와인딩 두께비는 13.8%이다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 파손하중은 좌굴하중보다 대부분 낮은 값을 갖게 되어 설계하중이 파손하중으로 결정된다. 최대 파손하중과 최대 설계하중은 헬리컬 와인딩 각도 41°, 후프 와인딩 두께비 28.8%에서 나타나고, 그 값은 14.1 MPa이다. 원통의 길이를 700 mm로 키운 예제 II의 좌굴 및 파손하중 표면을 Fig. 5에 보였다. 최대 좌굴하중은 10.6 MPa이고, 설계변수는 헬리컬 와인딩 각도 73°, 후프 와인딩 두께비 10%이다. 최대 파손하중은 16.0 MPa이며, 헬리컬 와인딩 각도가 40°, 후프 와인딩 두께비 28.8%에서이다. 최대 설계하중은 헬리컬 와인딩 각도 57°, 후프 와인딩 두께비 10%일때 8.14 MPa의 값을 갖는다. 예제 III은 원통의 길이를 1000 mm로 늘인 경우이다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 설계하중은 좌굴하중으로 결정된다. 최대 좌굴하중은 5.90 MPa 이고 최대 설계하중은 5.83 MPa로 좌굴하중과 비슷한 값을 지닌다. 하지만 최대 좌굴하중은 헬리컬 와인딩 각도 79°, 후프 와인딩 두께비 6.3%에서 나타나며, 최대 설계하중은 헬리컬 와인딩 각도 28°, 후프 와인딩 두께비 73.8%에 해당한다. 최대 파손하중은 16.3 MPa로 각각 헬리컬 와인딩 각도 43°, 후프 와인딩 두께비 21.3% 지점이다.

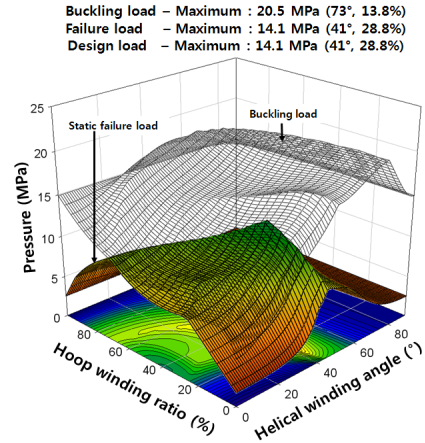


Fig. 4 Feasible region of Example I

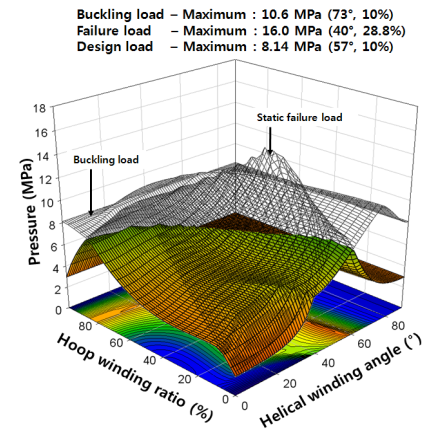


Fig. 5 Feasible region of Example II

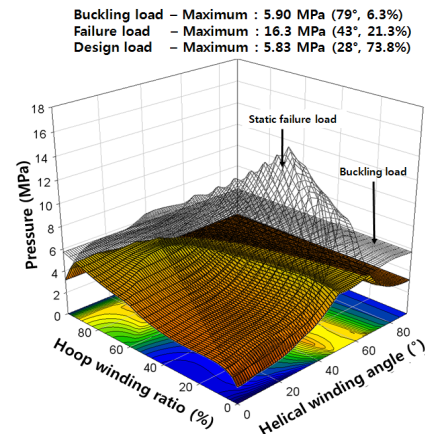


Fig. 6 Feasible region of Example III

3.3 최적화 결과

각 문제들의 마이크로 유전자 알고리즘의 최적화 결과를 Table 3에 나타내었다. 세 문제의 인자는 인구수 10, 교배확률 0.5, 공칭수렴 0.05로 동일하게 설정하였다. 세 문제 모두 가능해 영역의 설계하중 최대값과 동일하게 성공적으로 전역 최적값을 탐색하였다. 예제 I은 최적점에서 파손하중(14.1 MPa)이 좌굴하중(16.2 MPa)보다 보수적으로 나타나 파손하중이 설계하중이 되었다. 예제 II의 경우 최적점에는 좌굴하중(8.14 MPa)이 파손하중(8.16 MPa)보다 보수적으로 나타났다. 예제 III도 좌굴하중(5.83 MPa)이 파손하중(7.65 MPa)보다 보수적으로 나타나 좌굴하중이 설계하중을 결정하였다.

Table 3 Optimization results

Results	Example I	Example II	Example III
Optimum (MPa)	14.1	8.14	5.83
Helical winding angle (°)	41	57	28
Hoop winding ratio (%)	28.8	10	73.8

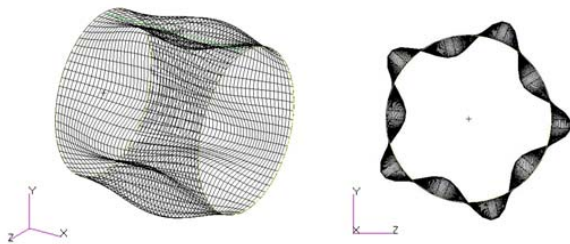


Fig. 7 Buckling mode at the optimum (Example I).

Fig. 7에 보였듯이 예제 I의 최적점에서 좌굴모드는 종축으로 1개의 웨이브, 원주방향으로 5개의 웨이브를 보였다. 나머지 두 문제에서는 종축으로는 모두 하나의 웨이브를 갖고, 원주방향으로는 예제 II와 III가 각각 3개와 2개의 웨이브를 보인다. Fig. 8에 예제 II의 가능해 영역에서 마이크로 유전자 알고리즘이 최적점을 찾을 때까지의 탐색점들을 나타내었다.

본 연구에서 설정한 최적설계 문제 중 예제 II에 대한 마이크로 유전자 알고리즘(μ GA)과 일반 유전자 알고리즘(SGA-1, SGA-2)의 효율성을 비교하였다. Table 4에 알고리즘의 실행에 필요한 인자와 Table 5에 최적화 결과를 나타내었다. SGA-1은 μ GA와 동일한 인구수를 가지고 SGA-2는 μ GA의 2배의 인구수를 가진다. 교배확률(probability of crossover)은 토너먼트 선택법을 사용할 경우 일반적인 값 0.5를 동일하게 적용하였다. 일반 유전자 알고리즘의 돌연변이확률은 인구수에 따라 설정하였다 (probability of mutation = 1/population size).

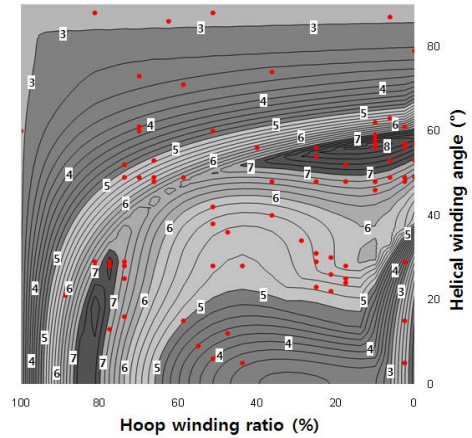


Fig. 8 Calculation points in the feasible region (Example II).

Table 4 Input parameters of Example II for μ GA and SGA-1,2

Parameters	μ GA	SGA-1	SGA-2
Population size	10	10	20
Probability of crossover	0.5	0.5	0.5
Probability of mutation	-	0.1	0.05
Nominal convergence	0.05	-	-
Crossover	Uniform	Uniform	Uniform
Selection	Tournament	Tournament	Tournament
Elitism	use	use	use

Table 5 Results of Example II

Results	μ GA	SGA-1	SGA-2
Optimum (MPa)	8.14	8.14	8.14
Helical winding angle (°)	57	57	57
Hoop winding ratio (%)	10	10	10
Calculation points	130	420	200

Fig. 9에 각각의 세대에 따른 최대 적합도(best fitness)의 진화과정을 나타내었다. μ GA, SGA-1, SGA-2 세 방법 모두 최적값을 잘 찾아 갔다. μ GA는 13번째 세대에서 최적값에 수렴하였으며 이때 130번의 해석(가능해 영역의 5.3%)이 수행되었다. 하지만 동일한 인구수를 가진 SGA-1의 경우 42번째 세대(420번의 해석, 가능해 영역의 17.3%)에서 최적값을 찾을 수 있었다. SGA-2의 경우 10번째 세대에서 최적값을 찾아 세대 간의 진화 속도는 μ GA보다 빠르지만 필요한 해석 수는 200번(가능해 영역의 8.2%)으로 μ GA보다 많은 연산을 필요로 한다. 따라서 효율성 측면에서 마이크로 유전자 알고리즘이 일반 유전자 알고리즘보다 뛰어난 것을 확인할 수 있다.

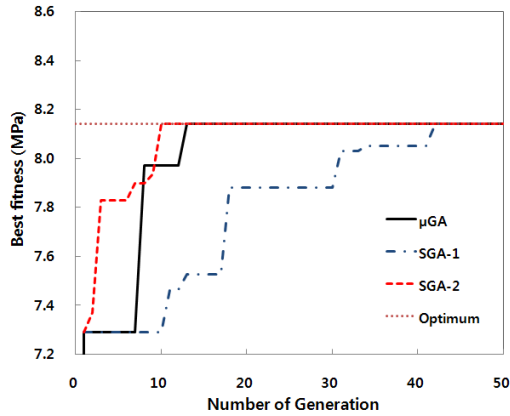


Fig. 9 Evolution history of the best fitness (Example II).

4. 결론

수중운동체에 복합재를 적용하기 위한 기초연구로서 외부 수압을 받는 필라멘트 와인딩 복합재 원통의 파손과 좌굴하중을 동시에 고려한 최적설계를 수행하였다. 설계변수는 헬리컬 와인딩 각도와 후프 와인딩 층의 두께비로 설정하였다. 최적화기법으로는 마이크로 유전자 알고리즘을 이용하였다. 마이크로 유전자 알고리즘의 효율성을 확인하기 위해 일반 유전자 알고리즘을 이용한 최적설계를 수행하였다. 두 알고리즘 모두 성공적으로 최적값을 탐색하였으나 마이크로 유전자 알고리즘이 높은 효율성을 보임을 확인하였다. 구조적 거동의 측면에서는 원통의 길이가 짧은 경우(예제 I)에는 구속 조건의 영향으로 좌굴하중이 올라가고 이에 따라 정적파손이 좌굴보다 먼저 발생함을 알 수 있었다. 반대로 예제 II, III에서와 같이 원통의 길이가 길어질수록 좌굴이 먼저 발생하며, 원통의 설계하중은 좌굴하중으로 결정되는 것을 확인하였다. 본 논문의 연구결과는 무인 잠수정, 어뢰, 소나와 같이 고심도 소형 수중운동체를 설계할 때 유용하게 사용할 수 있으며, 유한요소의 하중조건과 경계조건을 달리 하여 외압뿐만 아니라 다양한 하중 조건에서도 좌굴과 파손을 동시에 고려한 최적 설계에 적극 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 지정 수중운동체 특화연구센터와 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업으로 수행된 연구이며 (2009-0094015), 지원에 대해 감사드립니다.

참고문헌

- Ross C.T.F., "A Conceptual Design of an Underwater Vehicle," *Ocean Engineering*, Vol. 33, 2006, pp. 2087-2104.
- Messenger T., "Buckling of Imperfect Laminated Cylinders under Hydrostatic Pressure," *Composite Structures*, Vol. 53, 2001, pp. 301-307.
- Graham D., "Composite Pressure Hulls for Deep Ocean Submersibles," *Composite Structures*, Vol. 32, 1995, pp. 331-343.
- Carvelli V., Panzeri N., Poggi C., "Buckling Strength of GFRP Under-water Vehicles," *Composites Part B*, Vol. 32, 2001, pp. 89-101.
- Hur S.H., Son H.J., Kweon J.H., Choi J.H., "Postbuckling of Composite Cylinders under External Hydrostatic Pressure," *Composite Structures*, Vol. 86, 2008, pp. 114-124.
- Moon C.J, Kim I.H., Choi B.H., Kweon J.H., Choi J.H., "Buckling of Filament Wound Composite Cylinders Subjected to Hydrostatic Pressure for Underwater Vehicle Applications," *Composite Structures*. (to be published, DOI:10.1016/j.compstruct.2009.08.005)
- Goldberg D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, 1989.
- Muc A., Gurba W., "Genetic Algorithms and Finite Element Analysis in Optimization of Composite Structures," *Composite Structures*, Vol. 54, 2001, pp. 25-281.
- Kim C.U., Kang J.H., Hong C.S., Kim C.G., "Optimal Design of Filament Wound Structures under Internal Pressure based on the Semi-Geodesic Path Algorithm," *Composite Structures*, Vol. 67, 2005 pp. 443-452.
- Park J.H., Hwang J.H., Lee C.S., Hwang W., "Stacking Sequence Design of Composite Laminates for Maximum Strength using Genetic Algorithms," *Composite Structures*, Vol. 52, 2001, pp. 217-231.
- Goldberg D.E., "Sizing Population for Serial and Parallel Genetic Algorithm," *Proc. of the 3rd Int. Conf. on Genetic Algorithms*, 1989, pp. 70-79.
- Krishnakumar K., "Micro-Genetic Algorithms for Stationary and Non-Stationary Function Optimization," *Proc. of the SPIE*, Vol. 1196, 1989, pp. 289-296.
- 이무근, 김천곤, "병렬 마이크로 유전자 알고리즘을 이용한 복합재 적층 구조물의 최적설계," 한국복합재료학회지 제21권, 1호, 2008, pp. 30-39.
- 김영빈, 이재홍, "마이크로 유전자알고리즘을 이용한 I-형 복합재료 보의 최적설계," 대한건축학회지, 제19권, 6호, 2003, pp. 69-76.

- 14) Carroll D.L., FORTRAN Genetic Algorithm Driver [Internet]. Champaign: CU Aerospace; c2007-2010 [updated 2001 Apr. 2]. Available from: <http://cuaerospace.com/carroll/ga.html>.
- 16) Miller B.L., Goldberg D.E., *Genetic Algorithms, Tournament Selection, and the Effects of Noise*, IlliGAL Report, No. 95006, 1995.
- 17) Syswerda, G., "Uniform Crossover in Genetic Algorithms," *Proc. of the 3rd Int. Conf. on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann, 1989, pp. 2-9.
- 18) MSC.NASTRAN User's Guide.