대한조선학회논문집
Journal of the Society of Naval Architects of Korea
pISSN:1225-1143, Vol. 54, No. 5, pp. 378-386, October 2017
eISSN:2287-7355, https://doi.org/10.3744/SNAK.2017.54.5.378

유전 알고리즘을 적용한 잠수함 압력선체 최적 구조설계

조윤식[1,2,†] · 백점기[2,3,4]
국방과학연구소[1]
부산대학교 조선해양공학과[2]
부산대학교 선박해양플랜트기술연구원[3]
런던대학교 기계공학과[4]

Optimal Design of Submarine Pressure Hull Structures Using Genetic Algorithm

Yoon Sik Cho[1,2,†] · Jeom Kee Paik[2,3,4]
Agency for Defense Development[1]
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University[2]
The Korea Ship and Offshore Research Institute (The Lloyd's Register Foundation Research Centre of Excellence) at Pusan National University[3]
Department of Mechanical Engineering, University College London[4]

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In this paper, a method is presented for the optimal design of submarine pressure hull structures by taking advantage of genetic algorithm techniques. The objective functions and design constraints in the process of structural optimization are based on the ultimate limit states of hull structures. One of the benefits associated with the utilization of genetic algorithm is that the optimization process can be completed within short generations of design variables for the pressure hull structure model. Applied examples confirm that the proposed method is useful for the optimal design of submarine pressure hull structures. Details of the design procedure with applied examples are documented. The conclusions and insights obtained from the study are summarized.

Keywords : Pressure hull structure(압력선체구조), Optimal design(최적설계), Genetic algorithm(유전알고리즘), Objective function(목적함수)

1. 서 론

잠수함 압력선체구조(pressure hull structure)는 잠수함의 생존과 운용을 위한 기본적인 구성요소로서, 심해의 외부압력을 받으며 요구강도를 충족시켜야 하고 최소중량을 유지하며 대기압 상태의 밀폐된 최대 공간을 확보하여야 한다. 잠수함의 선체구조 중에서 압력선체가 가장 중요한 부분이며, 압력선체구조는 외부압력에 대한 충분한 내압강도를 확보해야 한다.

잠수함의 압력선체구조는 보통 원환보강 원통형 또는 원추형 셸 구조(ring-stiffened cylindrical/conical shell structure)와 끝막이 격벽(end bulkhead)으로서 반구형 또는 타원형 셸 구조(hemi-spherical/tori-spherical shell structure)로 구성된다. 압력선체 구조설계는 붕괴심도(collapse depth)에서의 외부수압의 작용에 의해 압력선체 구조부재에 발생될 수 있는 붕괴양식(failure mode)에 따라 구조강도를 평가한다.

잠수함을 자체적으로 설계·제작 보유하고 있는 기술선진 국가들은 이러한 압력선체 붕괴양식에 따른 압력선체 강도계산 방법을 독자적으로 정립하여 압력선체 구조설계에 활용하고 있다. 국내에서도 설계규정 및 절차 연구가 수행되었고 (Cho, 2006), 최근에 잠수함 구조설계와 건조에 적용할 수 있도록 잠수함 설계·건조 기준서를 개발하여 제정하였다 (ROKN, 2016).

압력선체 구조부재 설계변수는 외판(shell) 두께, 원환늑골(ring frame) 간격, 원환늑골 웨브 및 플랜지 크기, 대형늑골(king frame) 웨브 및 플랜지 크기 등이며, 설계변수들을 다양하게 변

Received : 30 May 2017 | Revised : 18 July 2017 | Accepted : 27 July 2017
† Corresponding author : Yoon Sik Cho, yscho@add.re.kr

화시키며 요구되는 강도를 충족시키도록 구조부재의 크기를 결정한다. 이를 위해서는 잠수함 압력선체 구조설계를 위해 설계지침서에 포함되어 있는 각각의 압력선체 붕괴양식에 따른 강도계산식의 이해와 적용방법을 숙지하고, 과거 설계자료와 초기 설계 시작점을 선택하기 위한 지침을 적용하여 수행한다. 이러한 설계방식은 전문가의 판단에 의존하여 수많은 시행착오를 통해 최적 설계점을 탐색하는 방식이므로 시간이 많이 소요되며, 설계변수 선택의 폭이 넓어 설계자의 경험이 많이 매우 중요하며 설계 완성도에 대한 판단이 용이하지 않다.

본 연구에서는 압력선체 구조설계를 위해 최근에 제정된 함정설계·건조 기준서에 따라 압력선체 최종강도 계산식을 사용하여 강도계산을 수행하며, 최적의 압력선체 설계결과를 도출할 수 있는 방법으로서 최근에 다양한 분야에서 최적화 방법으로 많이 사용되는 유전알고리즘(genetic algorithm)을 적용한다. 압력선체 구조설계를 위해 유전알고리즘의 유전자를 압력선체 설계에 적합하도록 적용하고 그 유용성과, 압력선체 설계변수에 대한 설계특성을 고찰하고자 한다.

2. 압력선체 구조 강도계산

잠수함 압력선체 구조는 높은 외부수압을 견딜 수 있도록 주로 원통형 외판(shell)과 이를 지지하는 원환늑골(ring frame) 및 격벽 등의 구조부재로 구성된다. 구조부재의 배치 및 크기에 따라 압력선체는 외판 항복(shell yielding), 외판 비대칭/축대칭 좌굴(shell axisymmetric/lobar buckling), 전체좌굴(general instability), 보강 원환늑골 좌굴(ring frame tripping), 끝막이 격벽 좌굴(shell buckling of end bulkhead) 등으로 붕괴된다.

2.1 외판 응력 계산

균일한 외부압력을 받는 외판의 처짐 식은 원통 길이방향 압축과 굽힘으로 발생되는 효과를 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다 (Pulos & Salerno, 1961).

$$D\frac{d^4w}{dx^4} + \frac{pR}{2}\frac{d^2w}{dx^2} + \frac{Eh}{R^2}w = -p\left(1-\frac{\nu}{2}\right) \quad (1)$$

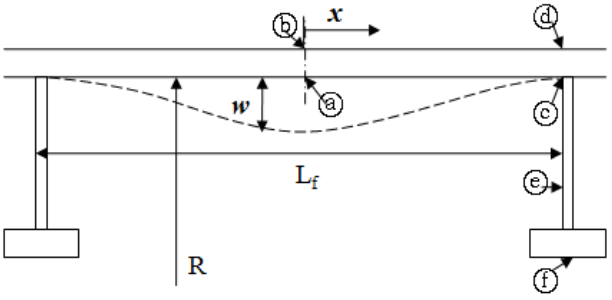

Fig. 1 Pressure hull diagram

여기서, w는 외판의 처짐, x는 외판중앙으로부터의 거리, D는 외판 강성, p는 외부 압력, R은 원통 반경, E는 재료탄성계수, h는 외판두께, ν는 재료 포아송비이다. 위 식으로부터 외판 처짐량을 구하고 외판 중앙부(ⓐ, ⓑ) 및 늑골 인접부(ⓒ, ⓓ)에 발생하는 막응력 및 굽힘응력을 고려한 길이방향 응력(σ_x) 및 원주방향의 응력(σ_ϕ)의 조합으로 외판응력(σ_v)을 계산한다 (ROKN, 2016).

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_\phi^2 + \sigma_x^2 - \sigma_\phi \cdot \sigma_x} \quad (2)$$

2.2 외판 좌굴강도 계산

원환늑골 사이에서 발생하는 외판 좌굴은 비대칭 좌굴모드(lobar mode)와 축대칭 좌굴모드(axisymmetric mode)로 구분하고, 재료의 탄소성 영역을 고려하여 강도계산을 수행한다.

외판 비대칭 좌굴에 대한 탄소성영역에서의 좌굴압력은 다음과 같이 구한다 (Reynolds, 1960).

$$p_{cr,L}^i = p_{cr}^{el}\frac{1-\nu^2}{1-\nu_p^2}\left\{\frac{E_t}{E}\left(1-\frac{3\Phi}{4}\right)+\frac{E_s}{E}\frac{3\Phi}{4}\right\} \quad (3)$$

여기서, $p_{cr,L}^i$은 임계탄소성좌굴압력, p_{cr}^{el} 은 탄성좌굴압력, ν_p는 재료의 소성 포아송비, E_t는 tangent modulus, E_s는 secant modulus, Φ는 원통 반경 R, 외판 두께 h, 늑골사이 외판 길이 L로 주어지는 값(=$1.23\sqrt{Rh}/L$)이다. 압력선체 제작과정에서 발생할 수 있는 초기처짐과 용접 잔류응력 등의 초기결함(Initial imperfection)의 영향을 고려한 감쇄계수(reduction factor) γ를 도입하여 최종적인 외판 좌굴압력($p_{cr}^{\exp}$)은 다음 식으로 산출한다.

$$p_{cr}^{\exp} = \gamma \cdot p_{cr}^i \quad (4)$$

외판 축대칭 좌굴에 대한 탄소성영역에서의 좌굴압력은 다음과 같이 구한다 (Lunchick, 1961).

$$p_{cr,S}^i = \frac{2E_s}{\sqrt{3(1-\nu^2)}}\left(\frac{h}{R}\right)^2 C\left[\left(\frac{\alpha L}{\pi}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{\pi}{\alpha L}\right)^2\right] \quad (5)$$

여기서, α 와 C는 재료의 응력상태에 따라 재료의 secant modulus와 tangent modulus에 따라 결정되는 값이다. 최종적인 외판 축대칭 좌굴압력은 외판 비대칭 좌굴과 마찬가지로 감쇄계수를 도입하여 식 (4)으로 구한다.

2.3 전체좌굴 강도 계산

압력선체 한 개의 구획 전체가 붕괴하는 전체좌굴 압력 p_g^n은 다음 식으로 구하게 된다.

$$p_g^n = p_{fr} + \frac{p_M p_D}{p_M + p_D} + p_B \quad (6)$$

여기서, p_{fr}은 원환늑골이 담당하는 좌굴압력, p_M은 외판이 담당하는 좌굴압력, p_D는 대형늑골이 담당하는 좌굴압력, p_B는 구획의 양단 경계에 있는 격벽이 담당하는 좌굴압력이고, n은 원주방향 좌굴모드의 파장 수이다. 전체좌굴 압력은 구획의 경계조건에 따라 식 (6)를 변형시켜 구하게 되며, 이때 각각의 구획 길이에 따라 좌굴식의 변수 값을 구하여 좌굴압력 계산식에 적용한다.

전체좌굴에서의 강도계산 평가는 전체좌굴 모드에 따라 원주방향에서 원환늑골에 발생하는 굽힘응력의 크기에 따라 결정되는 진원도(out-of-roundness) 크기를 다음 식으로 산출하여 검토한다 (ROKN, 2016).

$$w_o = \frac{\sigma_y - \sigma_{basic}}{Ee_{fr}\dfrac{n^2-1}{R_c^2}\dfrac{p}{p_g^n - p}} \quad (7)$$

여기서, w_o는 허용 진원도 크기, σ_y는 재료의 항복응력, σ_{basic}은 원환늑골 플랜지 끝단에서 발생하는 원주방향 응력, e_{fr}은 원환늑골 단면 중립축에서 플랜지 끝단까지의 거리, R_c는 원통 중심에서 원환늑골 단면 중립축까지의 거리, p는 작용하는 외부압력 n은 좌굴 파수이다. 원환늑골에서 최대 허용되는 진원도 크기는 보통 원통 반경의 0.3~0.4%로 적용한다.

2.4 원환늑골 좌굴강도 계산

압력선체 원환늑골의 강도계산은 원환늑골의 국부좌굴(ring frame tripping)로 인해 외판에 접하는 원환늑골 웨브 끝 부분 (Fig. 1의 ⓒ)에 발생하는 응력을 산출하여 수행한다 (Kennard, 1966). 응력계산 시에 원환늑골에서 발생할 수 있는 초기결함으로서 원환늑골 웨브의 경사각(pretilting angle)으로 발생하는 응력 σ_{bw}, 플랜지와 웨브 중심 간의 편차(eccentricity of flange)로 발생하는 응력 $\sigma_{bw,uex}$, 웨브 위치의 편차(out of plane)에 기인하여 발생하는 응력 $\sigma_{bw,uop}$을 고려하여 원환늑골 응력을 다음 식으로 나타낸다 (ROKN, 2016).

$$\begin{aligned}\sigma_{eq} &= \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_\phi^2 - \sigma_r \cdot \sigma_\phi} \\ \sigma_r &= (\sigma_{bw} + \sigma_{bw,uex} + \sigma_{bw,uop}) + \sigma'_r \\ \sigma_\phi &= \nu(\sigma_{bw} + \sigma_{bw,uex} + \sigma_{bw,uop}) + \sigma'_\phi\end{aligned} \quad (8)$$

여기서, σ_r과 σ_ϕ은 각각 반경방향 및 원주방향 응력이고, σ'_r과 σ'_ϕ은 각각 원환늑골이 압력을 받을 때 반경방향 응력 및 원주방향 굽힘 응력이다.

원환늑골 좌굴에서의 강도계산 평가는 원환늑골 국부좌굴로 인하여 허용될 수 있는 경사각(allowable pretilting angle)을 계산하여 검토한다. 원환늑골 초기결함 중에서 경사각 θ만을 고려하여 산출한 응력을 식(8)으로 구하고, 이 응력은 항복응력을 넘지 않아야 하므로 최대응력을 항복응력으로 했을 때 최대 경사각 θ를 구한다.

2.5 끝막이 격벽 좌굴강도 계산

압력선체 끝막이 격벽(End bulkhead)의 좌굴압력 계산은 구형 외판(spherical shell)에 대한 국부적인 좌굴을 고려하여 수행한다. 국부 곡률반경 R_{lo}의 구형 외판에 대한 탄소성좌굴 압력 $p_{cr,B}^i$은 다음 식과 같다.

$$p_{cr,B}^i = 0.84\sqrt{E_s E_t}\frac{t_h^2}{R_{lo}^2} \quad (9)$$

여기서, t_h는 외판 두께이다. 최종적인 끝막이 격벽의 좌굴압력은 외판 좌굴과 마찬가지로 감쇄계수를 도입하여 식 (4)로 구한다.

끝막이 격벽좌굴에서의 강도계산 평가는 좌굴압력과, 다음 식으로 결정되는 허용 구형도(out-of-sphericity) 크기 Δf를 검토하여 수행한다 (ROKN, 2016).

$$\triangle f = \frac{1}{8} l_c^2 \left(\frac{1}{R_{nom}} - \frac{1}{R_{lo}}\right) \quad (10)$$

여기서, R_{nom}은 구형 외판의 공칭 반경이고, l_c는 $2.42\sqrt{R_{lo}\, t_h}$이다.

3. 압력선체 구조 최적화를 위한 정식화

본 연구에서 압력선체 최적화를 위해 부피에 대한 중량비를 최소화하는 것을 목적함수로 하여 외판 두께, 원환늑골의 간격, 원환늑골의 크기(웨브 높이 및 두께, 플랜지 폭 및 두께), 대형늑골의 크기(웨브 높이 및 두께, 플랜지 폭 및 두께)를 설계변수로 사용하였다.

$$\begin{aligned}&Minimize\ f(X) = W(X)/V(X) \quad (11)\\ &(X_1 = h,\ X_2 = L_f,\ X_3 = h_w,\ X_4 = t_w\ \ X_5 = b_f,\\ &X_6 = t_f,\quad X_7 = h_{wk},\quad X_8 = t_{wk},\quad X_9 = b_{fk},\\ &X_{10} = t_{fk})\\ \text{Subject to}:\ &\sigma_{shell} \leqq \sigma_{allowable} \quad \text{for shell yielding}\\ &p_{cr.lobar} \geqq p_{cr.allowable} \quad \text{for lobar buckling}\\ &p_{cr.axisym} \geqq p_{cr.allowable} \quad \text{for axisym. buckling}\\ &w_o \geqq w_{allowable} \quad \text{for general instability}\\ &\theta \geqq \theta_{allowable} \quad \text{for frame tripping}\end{aligned}$$

여기서,

$f(X)$	:	압력선체 체적 V(X)에 대한 중량 W(X) 비
σ_{shell}	:	외판 응력
$\sigma_{allowable}$	:	허용 응력
$p_{cr.lobar}$	:	외판 비대칭좌굴 압력
$p_{cr.axisym}$	:	외판 축대칭좌굴 압력
$p_{cr.allowable}$	:	허용 좌굴 압력
w_o	:	진원도 크기
$w_{allowable}$	:	허용 진원도
$\theta_{allowable}$	:	허용 늑골 최대경사각

압력선체 설계변수로 사용되는 부재치수는 생산가능한 제품의 규격을 고려하여 경계제약조건으로 식 (12)와 같이 나타낼 수 있으며, 설계영역은 상황에 따라 변화시켜 새로운 부재치수를 탐색할 수 있다.

$$X_i^L \leq X_i^U, \quad i = 1 \sim 10 \tag{12}$$

유전알고리즘은 기본적으로 무제약 최적화(unconstrained optimization) 기법이나, 식 (11)과 (12)로 정식화된 문제는 제약 최적화 문제이다. 정식화된 문제에 유전알고리즘을 적용하기 위해서 벌점함수를 이용하여 다음 식과 같이 무제약 최적화 문제로 변환하였다.

$$Minimize \;\; F(X) = f(X) + \epsilon P(X) \tag{13}$$

$$P(X) = -\left\{\frac{\sigma_{allowable} - \sigma_{shell}}{\sigma_{shell}}\right\}^2 + \left\{\frac{p_{cr.lobar} - p_{cr.allowable}}{p_{cr.allowable}}\right\}^2 + \left\{\frac{p_{cr.axisym} - p_{cr.allowable}}{p_{cr.allowable}}\right\}^2 + \left\{\frac{w_o - w_{allowable}}{w_{allowable}}\right\}^2 + \left\{\frac{\theta - \theta_{allowable}}{\theta_{allowable}}\right\}^2$$

여기서 $F(X)$는 목적함수, ϵ는 상수, $P(X)$는 벌점함수(penalty function)이다.

위 최적화 문제에서 요구되는 강도(응력, 좌굴압력, 진원도 등)가 허용 강도보다 작은 경우는 목적함수에 참여시키지 않는다. 요구되는 강도가 허용 강도보다 큰 경우에는 최소화 문제에서 벌점함수의 벌점을 목적함수에 추가하게 되며 목적함수가 높은 값을 갖게 된다. 최소화 문제에서 벌점이 추가되면 목적함수를 근거로 평가하는 유전알고리즘의 적합도(fitness)는 반대로 낮은 값을 갖게 된다. 따라서 적합도가 낮은 개체는 새로운 개체의 생성에 참여할 수 있는 기회가 감소하고 다음 세대에서 생존 확률이 감소하므로 해의 개선은 제약 조건을 위배하지 않는 방향으로 진행된다.

4. 최적화 기법과 유전 알고리즘

최적화 기법은 전역 최적화와 국부 최적화로 크게 나뉠 수 있으며, 국부 최적화는 전역 최적화에 비해 비교적 빠른 시간 내에 해를 도출할 수 있지만 초기 시작점에 따라 전역 최적해(global optimum)가 아닌 국부 최적해(local optimum)에 도달할 가능성이 있다. 반면에 전역 최적화는 초기 시작점에 관계없이 올바른 전역 최적 해를 도출할 수 있기 때문에, 본 논문에서는 전역 최적화 기법으로 적용하며 유전 알고리즘을 사용하였다.

4.1 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)

유전 알고리즘은 다윈의 생물학적 진화이론인 자연선택과 적자생존 원리를 이용하여 진화와 도태 원리를 구현한 알고리즘으로서 최근에 공학 분야에 다양하게 많이 적용되고 있다. 휴리스틱 기반의 알고리즘들이 하나의 해를 운용하여 이웃한 해를 탐색하는 방법을 사용하지만, 유전 알고리즘은 다수의 개체로 구성된 해 집단을 구성하여 해를 탐색하는 조합최적화 기법이다. 기존의 최적화 기법들은 경사도 벡터를 이용하여 경사도가 급하거나 다수의 국부 최적점이 존재하는 경우에 안정적이지 못하는 단점이 있으나, 유전 알고리즘은 경사도 벡터를 사용하지 않고 목적함수의 값만을 이용하여 확률론적으로 최적 해를 탐색함으로써 이러한 단점을 극복할 수 있다.

유전 알고리즘의 세대(generation)는 특정한 순간의 해의 집단을 의미하며 세대는 개체(individual)들의 집합, 즉 개체군(population)으로 구성되며, 각 개체의 수를 개체군의 크기(population size)라고 한다. 각 개체들은 해를 도출하기 위한 유전정보를 포함하고 있는 복수개의 유전자(gene) 집합인 염색체(chromosome)로 구성되며, 염색체에서 유전자가 있는 자리를 유전자좌(locus)라 한다. 유전자좌는 염색체의 각 위치에 어떠한 유전 정보가 결정되어 일반적으로 이진법의 문자열(string)로 표현된다. 각 개체들의 목적함수와 구속조건의 위반 정도에 따라 개체들의 적합도(fitness)가 부여되는데, 적합도가 높은 개체일수록 다음 세대를 구성하는데 참여할 확률을 높게 하여 세대가 지날수록 전체 집단이 더 좋은 방향을 탐색하게 된다. 초기에 선정된 개체들의 적합도가 우수한 개체들을 선택하여 다음 세대를 구성하기 위한 부모(parents)가 되어 교배(crossover)를 통해 부모의 유전자를 자손(offspring)에게 물려주며 일부 자손의 유전자는 돌연변이(mutation)를 통해 생성된다.

일반적인 유전알고리즘의 구현은 초기 세대의 구성으로부터 시작된다. 무작위로 초기 세대가 구성되고 그 세대의 적합도를 계산하여 우수하지 못한 개체는 도태시키고 최고의 적합도로 진화할 가능성이 있는 개체들을 선택(selection)하게 된다. 이렇게 선택된 개체들이 부모가 되어 교배(crossover)를 통해 자손에게 부모의 유전자를 물려주게 되고 일부 자손은 돌연변이(mutation)를 통해 유전자의 다양성을 확보하게 된다. 이렇게 생성된 자손들이 다음 세대를 구성하는 개체가 되어 다시 적합도를 계산한다. 이와 같은 과정의 반복적인 수행으로 자손은 우수한 유전자를 물려받아 적합도는 진화하게 된다. 각 단계에서 다양한 방법으로 선택, 교배, 돌연변이를 실행할 수 있으며 각 단계에서 적절한 방법으로 선택하여 효과적인 유전 알고리즘을 구현할 수 있다.

4.2 마이크로 유전알고리즘(micro-Genetic Algorithm)

일반적으로 사용되는 일반 유전알고리즘(simple genentic algorithm)은 전역 최적해의 수렴 확률을 높이기 위해 개체 수를 크게 하여 유전 인자의 다양성을 높여야 한다. 전역 최적 해를 찾기 위해 다양한 유전정보의 확보가 중요한 요소이므로 일반 유전 알고리즘에서는 개체 수를 증가시킬수록 최적 해를 안정적으로 구하는 장점이 있으나, 이로 인해 개체 수만큼 계산시간이 증가하는 단점을 피할 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Goldberg (1989)는 일반 유전알고리즘 보다 작은 집단을 이용하여 효율적으로 탐색할 수 있는 방법을 제시하였고, 이러한 방법을 기반으로 Krishnakumar (1989)는 매우 작은 집단을 운용하는 마이크로 유전알고리즘(micro-GA)을 제안하였다.

마이크로 유전알고리즘은 일반 유전알고리즘보다 적은 개체 수로 탐색을 수행하기 때문에 연산의 수를 줄일 수 있다. 공칭수렴(nominal convergence)과 난수에 의한 새로운 유전자 생성을 통하여 다음 세대를 구성하기 때문에 세대의 평균 적합도는 떨어지지만 적은 개체 수로도 유전인자의 다양성을 확보하게 된다. 세대를 구성하는 개체의 단위가 작은 경우에는 일정세대를 거치면서 개체들 간의 유전정보가 비슷해지게 된다. 마이크로 유전알고리즘에서 선택과 교배 연산자를 통해 생성된 개체 집단을 최적 개체와 비교하여 그 상이함(difference)이 어느 수준 이하가 될 때까지 반복하여 개체를 선택하고 교배하는 단계를 공칭수렴이라고 한다. 비교 방법 및 상이함의 수준은 사용자가 임의대로 선택할 수 있고, 일반적으로 5% 이내를 사용한다. 또한 공칭수렴 단계에서 넘어온 1개의 최적 개체를 제외한 (n-1)개의 개체를 다시 임의로 선택하여 n개의 모집단을 생성한다. 이 과정에서 임의로 개체를 재구성함으로써 일반 유전알고리즘의 돌연변이 연산자 기능을 대신한다. 따라서 마이크로 유전자 알고리즘은 돌연변이 연산자를 사용하지 않고 재시동(restart) 과정을 통해 새로운 유전 정보의 다양성을 확보하게 된다. 이러한 마이크로 유전자 알고리즘의 기본적인 흐름도는 Fig. 2와 같다 (Carroll, 2002).

본 연구에서는 유전알고리즘을 사용한 압력선체 설계에서의 최적화 가능성을 고찰하기 위해 개체군 크기 증가에 따른 계산시간 감소를 위해 마이크로 유전알고리즘을 적용하였으며, 유전알고리즘에 엘리트 개체를 선별하여 다음 세대에 좋은 개체를 유지할 수 있도록 엘리트 보존법을 적용하였다. 또한 본 연구에서는 대상으로 하는 설계 변수를 세분화하여 사용하므로 각 설계변수의 선택 영역이 넓어지게 되고, 이로 인해 유전알고리즘에 사용하는 이진스트링의 길이가 길어지게 된다. 따라서 길어진 이진스트링을 효율적으로 진화시킬 수 있도록 일점 교배보다 탐색성능이 우수한 균일 교배법을 적용하였다. 본 연구에서 적용한 유전알고리즘의 절차는 다음과 같다.

(1) n개의 초기 집단을 생성한다. 설계변수로 이루어진 이진스트링에 랜덤함수를 이용하여 0과 1로 구성된 스트링을 생성한다.

(2) 개체의 적합도를 평가하고 최적의 개체를 선택한다. 이때 적합도는 목적함수로부터 도출되며, 적합도가 큰 개체가 더 많은 보상을 받을 수 있도록 고려되어야 한다. 본 연구에서는 적합도 함수를 최소화 문제로 식 (13)과 같이 목적함수를 구성하였다.

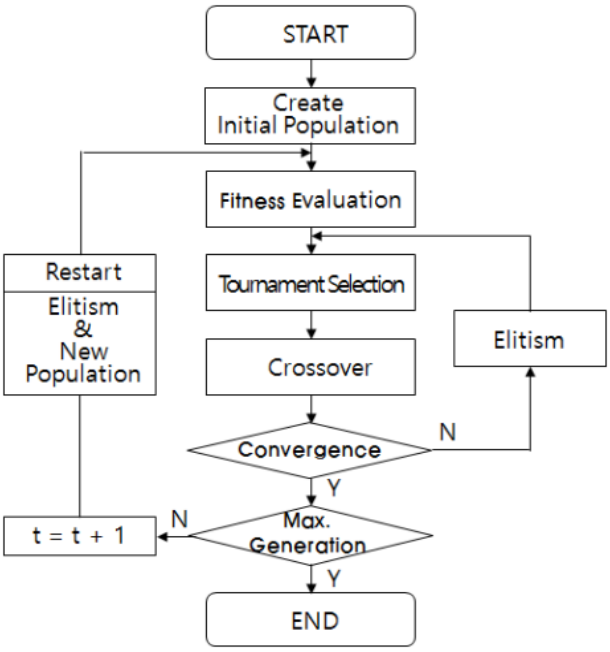

Fig. 2 Micro-genetic algorithm(μ-GA)

(3) 평가된 적합도를 기초로 개체를 선택하고 교배 연산을 수행한다.

(4) 교배 연산을 통해 생성된 개체 집단과 최적의 개체를 포함하여 수렴성을 검토한다. 내부루프의 수렴조건을 만족하지 못하면 동일한 내부루프를 수행하고, 내부루프의 수렴조건을 만족하면 외부루프의 종료조건을 검토한다. 외부루프의 종료조건을 만족하면 알고리즘을 종료하고 불만족하면 재시동을 하게 된다.

(5) 재시동 시에는 최적의 개체를 제외한 나머지 개체들을 랜덤함수를 이용하여 새롭게 구성한다. 최적의 개체는 지난 세대의 진화의 결과이며, 새롭게 생성되는 개체는 개체군에 새로운 형질을 부여하여 다양한 탐색을 가능하게 한다.

(6) 정해진 기준(최대 세대수 등)이 만족될 때까지 위 과정을 반복한다.

5. 압력선체 최적화

5.1 압력선체 최적화 결과

본 연구에서는 최적화 대상으로 Fig. 3과 같이 원통형 압력선체 1개의 구획을 선정하였으며, 대상구획 양단에는 대형늑골이 인접한 구획과 경계를 이루며 지지하고 있다. 압력선체 반경(R)은 5,000mm, 구획길이(L_D)는 20,000 mm, 인접한 구획 길이($L_{D,L}$, $L_{D,R}$)는 각각 15,000 mm로 고정하였다. 압력선체에 적용한 재료는 고항복강으로서 HY-100 강을 적용하였고, 항복강도는 686 MPa, 탄성계수(E)는 206 GPa이다.

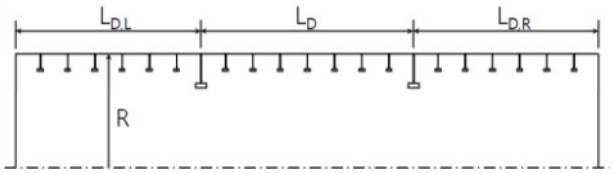

Fig. 3 Pressure hull geometry

대상으로 하는 압력선체 구획에 대한 최적화는 압력선체 강도에 크게 영향을 미치는 외판 두께, 원환늑골의 간격, 원환늑골의 크기(웨브 높이 및 두께, 플랜지 폭 및 두께), 대형늑골의 크기(웨브 높이 및 두께, 플랜지 폭 및 두께)에 대해 수행되었다.

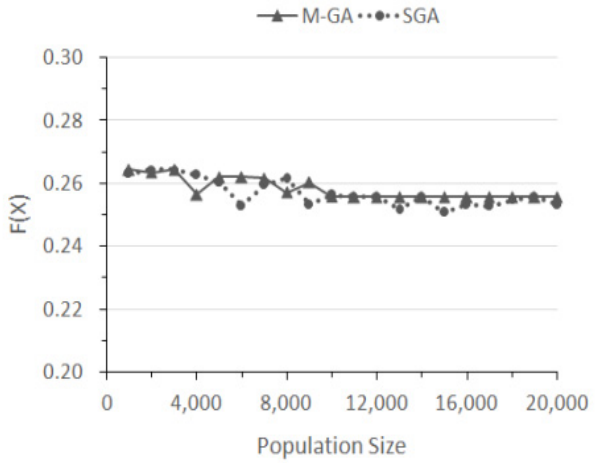

Fig. 4 Comparison of fitness values F(X) using micro-GA and SGA

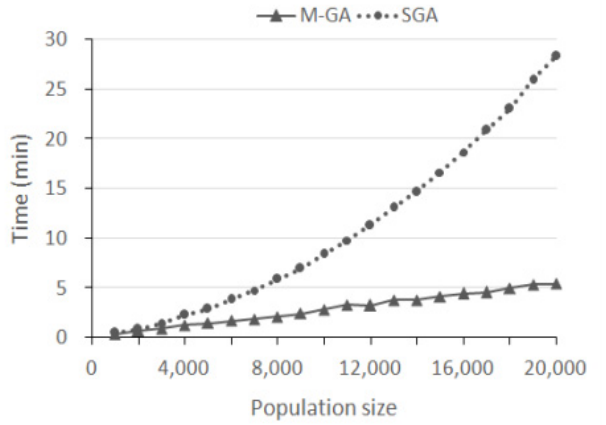

Fig. 5 Comparison of calculation time using micro-GA and SGA

압력선체 최적화기법으로써 일반 유전알고리즘과 마이크로 유전알고리즘의 비교를 위해 개체군의 크기 및 계산시간을 대상으로 결과를 고찰하였다. Fig. 4는 개체군의 크기에 따른 최적 함수값의 변화로서 개체군이 클수록 좀 더 최적값을 도출하고 있으나 개체군의 크기가 10,000개 이상일 경우에는 유사한 최적값을 도출하고 있고, 마이크로 유전알고리즘과 단순 유전알고리즘의 최적값 차이는 거의 없는 것으로 나타나고 있다. Fig. 5는 마이크로 유전알고리즘과 단순 유전알고리즘의 계산시간으로서 개체군의 크기가 클수록 마이크로 유전알고리즘 경우에는 선형적으로 증가하나, 단순 유전알고리즘 경우에는 급격히 증가하고 있다. 따라서 압력선체 최적화 기법으로서 최적값 도출에는 거의 차이가 없으며 계산 시간 측면에서 매우 유리한 마이크로 유전알고리즘을 적용하고, 개체군은 10,000개로 선정하여 압력선체 최적화 결과를 고찰하였다.

외부압력에 대한 단위길이당 부피에 대한 중량비의 수렴곡선으로서 Fig. 6은 유전알고리즘에 의한 시뮬레이션 결과는 안정성 있게 수렴하는 결과를 보여 주고 있으며, 각각의 공칭압력(P_n, Nominal pressure)에 따라 최적함수 값이 증가하는 결과를 나타내고 있다.

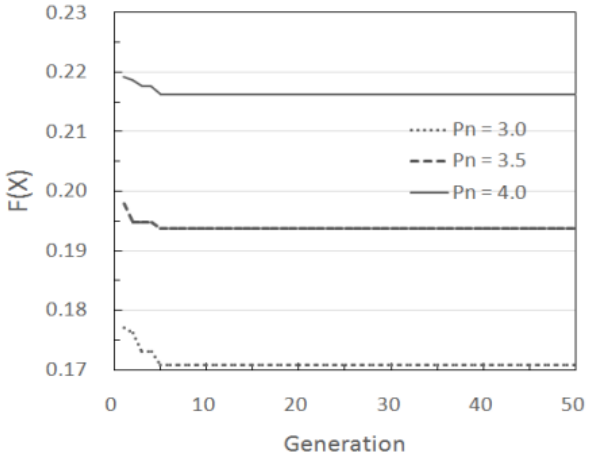

Fig. 6 Convergence of fitness values(min. weight/volume ratio)

Table 1은 유전알고리즘을 사용하여 외부압력(P_n)에 대해 도출된 압력선체 부재들의 최적 치수이고, Fig. 7은 외부압력의 변화에 따라 최적함수값의 변화, Fig. 8은 압력의 변화에 따른 외판 두께-원환늑골 간격 비(h/L_f)를 나타내고 있다.

Table 1 Optimal structural member size of pressure hull by GA

Item(mm) \ P_n (MPa)			3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
Shell thickness		h	30	35	40	48	51
Spacing		L_f	430	520	560	590	640
Ring frame	Web	$h_w \times t_w$	268x20.5	242x22	264x24	264x25	270x26
	Flange	$b_f \times t_f$	240x19	126x66	230x39	166x56	186x63
King frame	Web	$h_w \times t_w$	890x36	840x20	820x50	900x21	800x40
	Flange	$b_f \times t_f$	520x64	380x86	520x70	500x92	600x84
Fitness value, $F(X)$ (Weight/Volume ratio)			0.17331	0.19451	0.21687	0.23813	0.25624

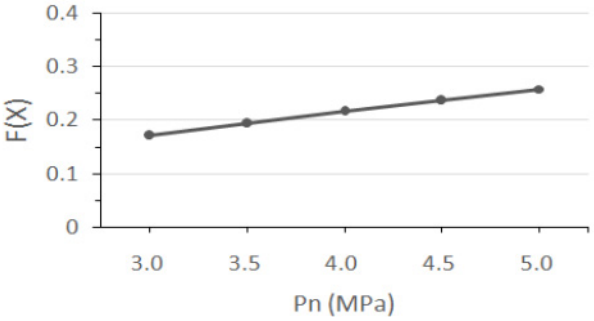

Fig. 7 Fitness values $F(X)$ on P_n, by GA

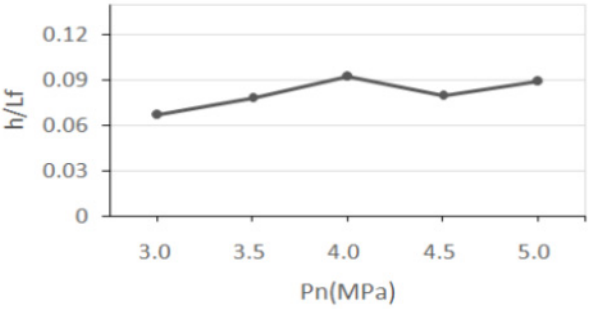

Fig. 8 Thickness/Spacing (h/L_f) on P_n, by GA

Table 2는 압력선체 설계전문가가 동일한 압력선체를 대상으로 최적의 치수를 도출한 결과이다. Fig. 9는 외부압력의 변화에 따라 최적함수값의 변화, Fig. 10은 압력의 변화에 따른 외판 두께-원환늑골 간격 비(h/L_f)를 나타내고 있다.

Table 2 Optimal structural member size of pressure hull by expert

Item(mm) \ P_n(MPa)			3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
Shell thickness		h	28	31	34	37	41
Spacing		L_f	380	390	400	410	420
Ring frame	Web	$h_w \times t_w$	254x20.0	265x21.5	270x22.5	270x23.5	270x24.5
	Flange	$b_f \times t_f$	180x30	180x30	200x31	230x32	250x34
King frame	Web	$h_w \times t_w$	750x36	850x36	900x45	900x50	900x50
	Flange	$b_f \times t_f$	500x90	550x90	600x90	600x100	600x100
Fitness value, $F(X)$ (Weight/Volume ratio)			0.18082	0.19354	0.21115	0.22975	0.24948

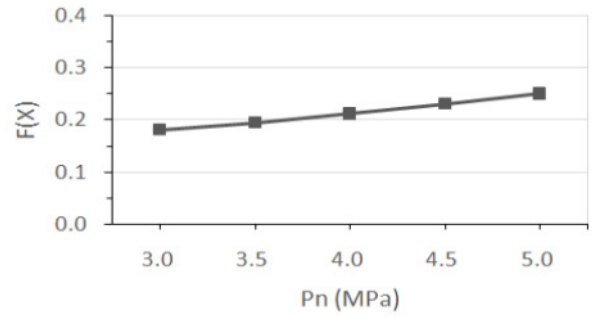

Fig. 9 Fitness values $F(X)$ on P_n, by expert

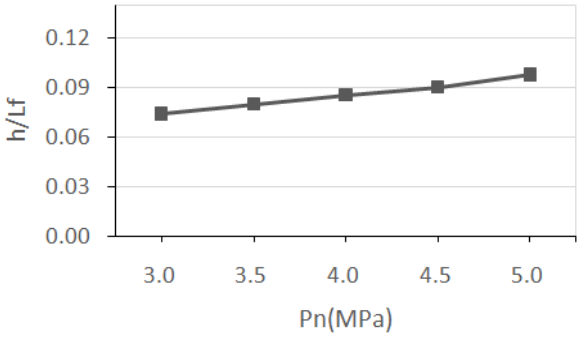

Fig. 10 Thickness/Spacing (h/L_f) on P_n, by expert

Table 1과 2에서 유전알고리즘을 사용한 압력선체 설계결과는 전문가 설계결과와 비교하여 도출된 치수는 약간 다르지만, 그림 7과 9의 최적값은 거의 유사하게 나타나고 있다. 도출된 부재치수의 차이는 다음과 같은 사유에서 발생한 것으로 판단된다. 즉, 유전알고리즘은 설계변수 10개를 변화시키며 도출한 결과이지만, 전문가 결과는 원환늑골 간격과 대형늑골의 변수를 고정시키고 나머지 변수를 변화시키며 최적값을 도출한 결과이다.

Table 1과 2에서 원환늑골의 간격이 증가함에 따라 두께가 증가 있음을 알 수 있으며, Fig. 8과 10에서 원환늑골의 간격에 대한 외판 두께 비는 하중 압력(P_n)이 증가함에 따라 증가하고 있음을 볼 수 있다.

5.2 유전알고리즘에 의한 압력선체 설계분석

Fig. 11은 유전알고리즘을 적용하여 원환늑골 간격 크기에 따라 최적 함수의 값의 변화를 나타낸 것으로서, 압력(P_n)이 증가할수록 최적함수 값은 증가하지만, 압력선체(P.H.) 원환늑골의 간격이 변화하더라도 최적 함수값 즉 중량-부피비는 거의 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다.

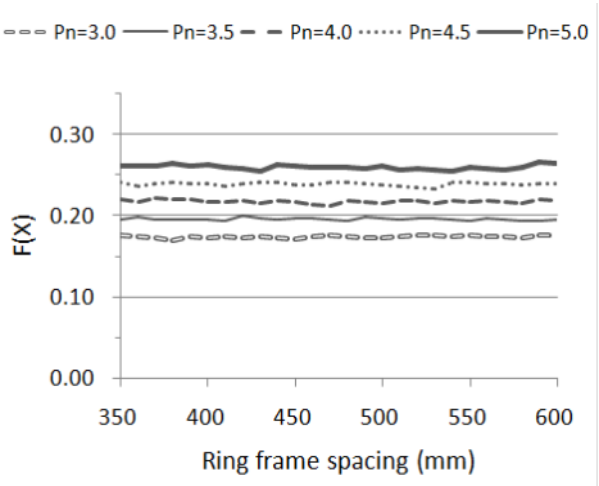

Fig. 11 Fitness values F(X) vs. ring frame spacing of P.H.

Fig. 12는 압력(P_n) 4.5 MPa일 때 원환늑골 간격에 따라 각 부재의 단면적 크기의 변화를 나타내고 있다. 외판 단면적(A_p), 웨브 단면적(A_w), 플랜지 단면적(A_{fl}), 원환늑골의 단면적(A_{fr}) 및 전체 단면적(A_{tot})은 원환늑골 간격이 커짐에 따라 모두 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 원환늑골 간격 크기에 따라 외판과 원환늑골의 단면적-늑골간격 비의 변화를 나타낸 것으로서, 하중이 증가할수록 단면적은 증가하지만 원환늑골의 간격이 변화하더라도 외판과 원환늑골의 전체 단면적(A_{tot})-늑골간격(L_f) 비는 거의 일정하게 유지되는 것으로 나타나고 있다.

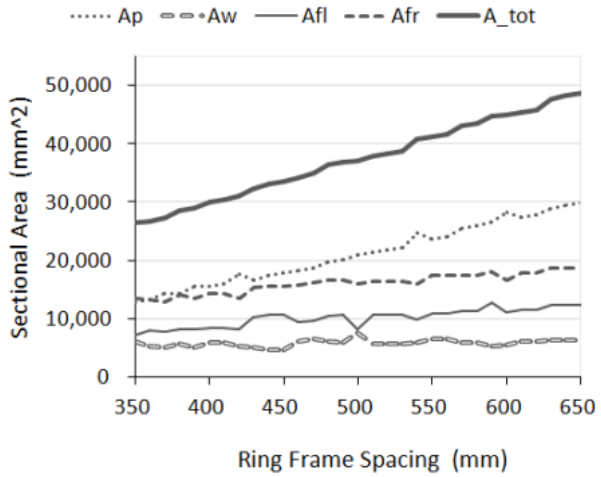

Fig. 12 Sectional area vs. ring frame spacing of P.H.

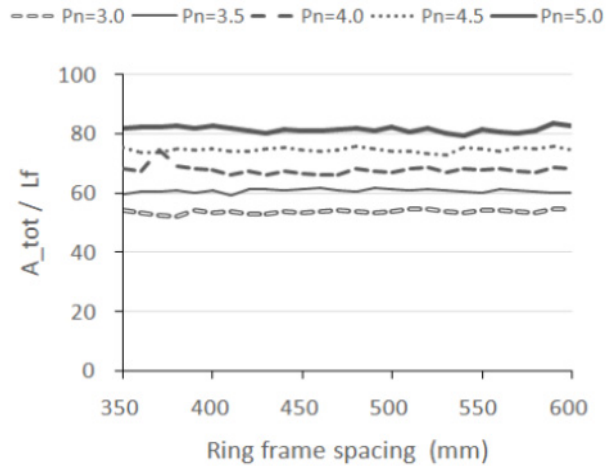

Fig. 13 A_{tot}/L_f vs. ring frame spacing of P.H.

6. 결 론

본 연구에서는 외부수압을 받는 압력선체 구조에 대해 최근 제정된 설계·건조기준서의 압력선체 최종강도계산식을 사용하고 마이크로 유전알고리즘(micrro-Genetic Algorithm)을 적용하여 최적화를 수행하였다. 최적설계를 수행한 결과, 유전알고리즘은 단순히 최적함수 값과 확률적인 크기만을 비교하여 압력선체 최적값을 탐색할 수 있었다. 본 연구의 압력선체 구조설계와 같이 설계변수가 많고 해가 설계변수에 따라 다양한 곡면으로 이루어지는 경우에 전역 최적화 기법으로 유전알고리즘은 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 압력선체 최적설계를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 압력이 증가할수록 외판 두께 및 원환늑골 간격은 거의 선형 직선적으로 증가하며, 외판 두께-원환늑골 간격 비도 증가하는 추세이다.
2) 압력이 증가할수록 중량-부피 비는 증가하며, 동일한 압력이 작용할 때 원환늑골 간격에 따라 중량-부피 비는 거의 변하지 않는다.
3) 동일한 압력이 작용할 때 원환늑골 간격이 증가할수록 외판과 원환늑골의 두께 및 크기가 증가하여 원환늑골의 단면적은 증가하지만, 전체단면적-늑골간격 비는 일정하게 유지된다.

본 연구의 결과에 따라 압력선체 설계 시에 최적화 기법으로서 마이크로 유전알고리즘은 최적부재 크기를 용이하게 결정할 수 있는 도구로 활용될 수 있으며, 설계자는 원환늑골 간격 등 설계변수의 영향을 쉽게 파악하여 목적하는 압력선체 최적배치 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

References

Carroll, D.L., 2002. *FORTRAN Genetic Algorithm(GA) driver.* Available at: http://cuaerospace.com/carroll/ga.htm [Accessed 15 Oct. 2016].

Cho, Y.S., 2006. *A study on the design rules and procedure for pressure hull.* Report NSDC-513-060586. Daejeon Korea: ADD

Goldberg, D.E., 1989. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning.* Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.: Boston, USA.

Kennard E.H., 1966. *Tripping of T-shaped stiffening rings on cylinders under external pressure.* Report 1079. Washington D.C.: DTMB

Krishnakumar, K., 1989. Micro-genetic algorithms for stationary and non-stationary function optimization. *Proc. SPIE 1196, Intelligent Control and Adaptive Systems*, pp.282-296.

Lunchick, M.E., 1961. *Plastic axisymmetric bucking of ring-stiffened cylindric shells fabricated from strain-hardening materials and subjected to external hydrostatic pressure.* Report 1393. Washington D.C.: DTMB.

Pulos, J.G. & Salerno, V.L., 1961. *Axisymmetric elastic deformations and stress in a ring-stiffened, perfectly circular cylindrical shell under external hydrostatic pressure*. Report 1497. Washington D.C.: DTMB.

ROK Navy, 2016. *Criteria for structural strength of pressure hull. Design and building criteria for submarine,* JoHam(Jam)-1-001(0). Daejeon Korea: ROK Navy

Reynolds, T.E., 1960. *Inelastic lobar bucking of cylindrical shells under external hydrostatic pressure.* Report 1392. Washington D.C.: DTMB.

조 윤 식 백 점 기