

건조비를 고려한 LPG 운반선 화물창의 최적설계에 관한 연구

신상훈^{1,†} · 황선복² · 고대은³
현대중공업 선박해양연구소¹
현대중공업 조선구조설계부²
동의대학교 조선해양공학과³

A Study on the Optimum Design of Cargo Tank for the LPG Carriers Considering Fabrication Cost

Sang-Hoon Shin^{1,†} · Sun-Bok Hwang² · Dae-Eun Ko³
Hyundai Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.¹
Basic Hull Design Department, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.²
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University³

Abstract

Generally in order to reduce the steel weight of stiffened plate, stiffener spaces tend to be narrow and the plate gets thin. However, it will involve more fabrication cost because it can lead to the increase of welding length and the number of structural members. In the yard, the design which is able to reduce the total fabrication cost is needed, although it requires more steel weight. The purpose of this study is to find optimum stiffener spaces to minimize the fabrication cost for the cargo tank of LPG Carriers. Global optimization methods such as ES(Evolution Strategy) and GA(Genetic Algorithm) are introduced to find a global optimum solution and the sum of steel material cost and labor cost is selected as main objective function. Convergence degree of both methods in according to the size of searching population is examined and an efficient size is investigated. In order to verify the necessity of the optimum design based on the cost, minimum weight design and minimum cost design are carried out.

Keywords : LPG carrier(LPG 운반선), Evolution strategy(진화전략), Genetic algorithm(유전자 알고리즘), Labor cost(인건비), Minimum weight design(최소중량설계), Minimum cost design(최소건조비설계)

1. 서론

선체 구조물 및 선형 설계에 최적화 기법 적용이 늘어나고 있는 추세이며, 최적화 기법의 선택에도 새로운 변화가 일고 있다. 종래에 일반적으로 적용해온 미분기반 최적화 기법은 빠른 계산 속도가 장점이었으나 전체 최적점 탐색의 확률이 낮다는 단점이 있다. 이와는 반대로 전역 최적화 기법은 전체 최적점 탐색의 확률이 높지만, 계산 속도가 늦다는 단점을 갖고 있다. 최근 컴퓨터의 계산 능력이 급상승하면서 계산 소요시간이 단점이었던 전역 최적화 기법에 대한 관심이 증대되고 이에 대한 적용 및 연구가 활발히 진행되고 있다(Kim et al., 2008, Pinto et al., 2004, Shin & Ko 2009).

전역 최적화 기법이란 초기치 선정에 민감한 미분기반 최적화 기법 및 직접 탐색법과는 달리, 단일개체가 아닌 다개체를 이용하여 초기치의 무작위 발생과 효과적인 탐색 알고리즘을

통해 전체 최적점의 탐색 확률을 높인 최적화 기법으로서 확률론적 탐색법이라고도 한다. 최근 전역 최적화 기법의 도입을 통해 탐색해의 신뢰성을 크게 향상시켜 최적설계의 수준을 한 차원 높였다고 할 수 있다.

최적설계는 전체 최적해를 정확하게 찾는 것도 중요하지만, 설계의 목적에 맞는 목적함수를 얼마나 잘 설정하는가도 매우 중요하다. 현재 조선소에서 선체 구조물의 최적설계 시 가장 많이 선정하는 목적함수가 대상 구조물의 중량이다. 물론, 구조물의 중량과 건조비용은 비례관계를 나타내는 경우가 많다. 이러한 경우는 목적함수를 중량으로 두거나 건조비로 두어도 같거나 거의 일치하는 해를 탐색하게 되어 복잡한 건조 모델을 적용하는 것이 오히려 번거로운 작업이 될 수가 있다. 하지만, 두 관계가 상충적일 경우도 존재하여 이러한 경우 대상 구조물의 중량이 목적함수가 된다면 조선소의 입장에서는 오히려 비용이 더 발생하는 설계를 하게 되는 것이다.

판과 보강재로 이루어진 보강판의 결합구조가 대표적인 상충하는 경우이다. 중량을 감소시키기 위해 보강재의 간격을 줄여 판의 두께를 작게 하게 되면 줄어드는 강재비보다 증가된 용접장에 의한 용접비용이 더 크게 증가하는 상충되는 특징을 갖고 있다. 이와 같이 최적의 보강재 간격을 결정하기 위해서 조선소의 입장에서는 건조비를 고려하는 것이 효과적인 방법일 것이다.

본 연구는 고부가가치선인 LPG 운반선의 화물창을 대상으로 최소중량설계와 최소건조비 설계를 모두 수행하고 그 결과를 비교 검토하여 목적함수 선정의 중요성과 경제성을 고찰하는 것이다.

전체 최적점 탐색을 위해 전역 최적화 기법인 진화전략(Schwefel 1981)과 유전자 알고리즘(Goldberg 1989)을 적용하였다. 선체 구조물에 적용 시 다개체의 탐색 크기는 두 기법이 어느 정도가 적당한지를 검토하였고, 두 기법에 의한 해의 수렴 정도를 비교해 보았다. 또한, 강재비와 인건비가 각각 증가하게 되면 최적화 결과가 어떻게 변화하는지에 대해서도 검토해보았다.

2. 최적화 개요

2.1 최적화 대상

최적화 대상은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 LPG운반선의 화물창을 구성하는 외판(Shell plate)과 외판을 지지하는 보강재이다.

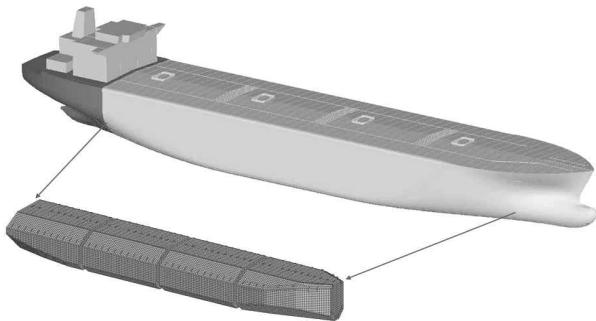


Fig. 1 Cargo tanks of LPG carrier

외판은 화물창의 하부(Bottom), 상부(Top), 측부(Side), 경사(Slant)부와 화물창의 앞과 뒤를 구성하는 Bulkhead, 내부에 위치한 Wash bulkhead를 포함하며, 보강재는 이들 외판에 부착된다. 각 외판의 보강재 간격에 따라 각 보강재 크기와 판 두께가 달라지므로, 본 연구에서는 건조비 관점의 최적 간격을 결정하고자 한다.

2.2 건조비 구성

건조비를 추정하기 위해 Na et al.(2010)과 Lee and Kim(2007)은 강재비와 용접비를 고려한 연구를 수행한 바 있다. 조선소에서 선박 건조에 소요되는 비용은 강재비와 용접비 외에도 도료비, 건조 부재 수에 따른 발생 비용, 중량의 증감으로 인해 작업자의 핸들링을 고려한 비용 등도 고려되어야 한다.

본 연구에서 사용한 건조비는 식 (1)에 나타난 바와 같이 화물창의 중량, 용접비, 부재수에 따른 비용, 중량에 따른 비용으로 구성하였고, 각각의 비용은 식 (2)~식 (5)에 나타내었다. LPG 운반선의 화물창은 크롬-망간강으로 제작하며 외판과 보강재에 대한 도색을 하지 않기 때문에 도료비를 제외하였다.

$$f_{cost} = f_{weight} + f_{welding} + f_{acc_number} + f_{acc_weight} \quad (1)$$

여기서, f_{cost} : Total cost (\$)

f_{weight} : Material cost (\$)

$f_{welding}$: Welding cost (\$)

f_{acc_number} : Number of member related cost (\$)

f_{acc_weight} : Weight proportion cost (\$)

$$f_{weight} = \alpha \times Total\ weight \quad (2)$$

$$f_{welding} = \beta \times Total\ welding\ length \quad (3)$$

$$f_{acc_number} = \gamma \times Total\ number\ of\ members \quad (4)$$

$$f_{acc_weight} = \lambda \times Total\ weight \quad (5)$$

여기서, α : Material cost per unit weight

β : Welding cost per unit length

γ : Labor cost per piece

λ : Labor cost per unit weight

식 (3)~식 (5)의 β , γ 와 λ 는 작업자 한 사람이 한 시간 일할 때 소요되는 비용인 시간당 인건비(\$/MH)의 곱으로 표현되므로 인건비가 증가하면 동일한 비율로 증가하게 된다.

최적화 결과를 비교, 검토하기 위하여 Table 1과 같이 4가지 경우에 대한 최적설계를 수행하였다. 일반적으로 많이 수행되고 있는 최소 중량설계를 Case 1, 건조비를 고려한 최소 건조비설계를 Case 2~4에 나타내었는데, Case 3은 Case 2에 비해 강재비만 20% 인상되었을 경우이고, Case 4는 인건비만 20% 인상이었을 경우를 의미한다. Case 2의 계수는 조선소에서 발생하는 단위 비용을 추정된 값이다.

Table 1 Optimum design cases

Factor	Min.weight design	Min. cost design			
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	
α	1,050	1,050	1,260	1,050	
β	0	38.5	38.5	46.2	
γ	0	7.0	7.0	8.4	
λ	0	28.0	28.0	33.6	

2.3 설계변수

설계변수는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 선정하였다.

X1은 화물창 상부와 하부의 보강재 간격이다. 화물창의 Bulkhead 에 Fig. 3에 나타난 것과 같이 수직 보강재가 부착되기 때문에 상하 부의 보강재는 같은 간격을 유지해야 제작상 용이하기 때문이다.

X4는 화물창 측부와 중앙 Bulkhead부에서의 보강재 간격이다. 횡방향으로 Stringer가 부착되어 같은 간격을 유지하도록 하였다.

X2와 X3는 각각 하부 경사면과 상부 경사면 위치에서의 보강재 간격이며, X5는 중앙 Bulkhead 상부에서의 보강재 간격을 나타낸다.

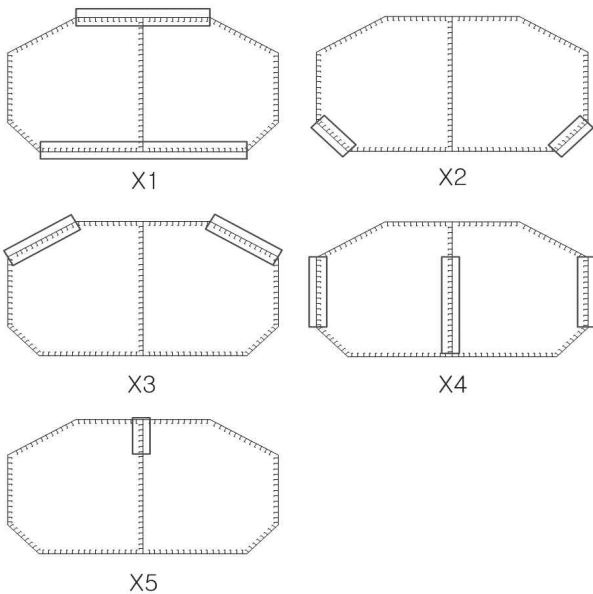


Fig. 2 Design variables

진화전락(ES)을 이용한 최적설계에서는 모든 설계변수를 500mm 에서 1200mm까지 5mm간격으로 변화도록 하였다. 유전자 알고리즘(GA)을 이용한 최적설계에서는 염색체(Chromosome) 수를 맞추기 위해 500mm에서 1135mm까지 5mm간격으로 변화도록 하였다. 설계변수 하나의 경우의 수는 $128(=2^7)$ 개로 전체의 String 은 $35(=7 \times 5)$ 개의 염색체로 이루어진다.

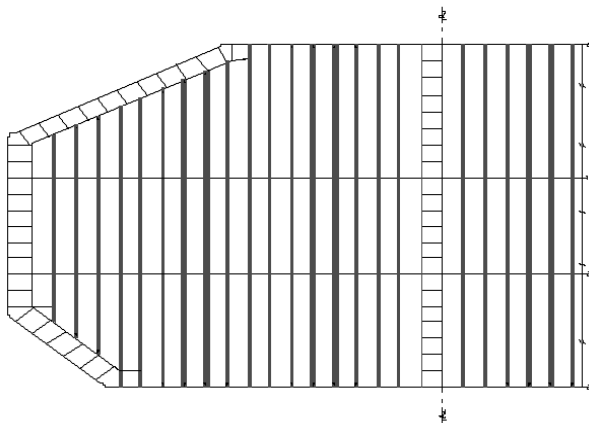


Fig. 3 Vertical stiffener of cargo tank bulkhead

2.4 추가 설명

본 연구의 설계변수는 외판의 두께와 보강재 치수를 제외한 보강재 간격만으로 구성되어 있다. 그 이유는 보강재 간격이 외판의 두께와 보강재의 크기를 결정하기 때문이다.

현장에서 외판과 보강재 크기를 설계할 때 보강재 간격이 결정되면 선급 규정에서 요구하는 최소의 외판 두께와 보강재 크기를 선택한다. 선급에서는 구조강도를 만족시키기 위해 보강재 간격에 따른 최소의 요구 두께와 보강재 단면계수를 규정하고 있기 때문이다. 본 연구에서 적용한 DNV 선급 규정을 예로 들면 대표적인 최소 요구 두께(t)와 최소 요구 단면계수(Z)는 식 (6)과 식 (7)로 표현된다.

$$t = 15.8s \sqrt{P} / \sqrt{215f_1} \quad (t_{\min} = 10s) \quad (6)$$

$$Z = 83l^2 s P / \sigma \quad (7)$$

여기서, s : Longitudinal spacing

P : Applied pressure

f_1 : Material factor

σ : Allowable stress factor

식 (6)과 식 (7) 모두 보강재 간격의 함수로 되어있다. 따라서, 보강재 간격의 결정은 외판의 두께와 보강재 크기의 결정과 같은 의미라 할 수 있다.

또한, Side constraints (설계변수 범위)를 제외하곤 제한조건이 없다. 상하한 영역 안에서 설계변수가 어떠한 값을 갖더라도 강도를 모두 만족하는 외판과 보강재가 결정되기 때문이다. 일반적으로, 최소중량설계 시 보강재 간격이 작을수록 유리하나, 최소 규정 두께가 존재하여 어느 값 이하로 작아지면 오히려 중량이 증가하게 된다. 최소건조비설계 시 보강재 간격이 어느 이상 증가하면 외판두께와 보강재 크기 증가가 용접비의 감소보다 커지게 되어 건조비가 증가하게 된다.

3. 최적설계 기법 검토

본 연구에 적용한 최적한 기법인 진화전락과 유전자 알고리즘의 최적해 탐색 능력과 수렴 정도를 검토해 보았다.

성능이 우수한 최적화 기법은 목적함수의 계산 수를 적게 하면서도 전체 최적점을 탐색할 수 있어야 한다. 각 최적화 기법이 전체 최적점을 찾을 때까지의 목적함수 계산 회수를 비교해 보았다.

진화전락과 유전자 알고리즘은 모두 일반 최적화 기법과는 달리 다개체 탐색 방법을 채택하고 있어, 정의한 다개체의 수만큼 목적함수 계산을 하게 된다. 다개체의 수를 진화전락에서는 자식 개체의 수로 정의하고, 유전자 알고리즘에서는 개체군 크기 (Population size)로 정의한다. 전체 최적점을 찾는 데 소요된 세대 수가 N_g 일 때 두 최적화 기법이 목적함수를 계산한 회수(N_{obj})는 식 (8)과 식 (9)로 나타낼 수 있다. μ 는 부모개체의 수, ω 는 자식 개체의 수, ψ 는 개체군 크기를 의미한다.

진화전략

$$N_{obj} = w \times N_g + \mu \tag{8}$$

유전자 알고리즘

$$N_{obj} = \psi \times N_g \tag{9}$$

Table 1에 나타난 Case 2로 최적설계를 수행하고, 그 결과를 Table 2와 3에 나타내었다. Table 2는 진화전략 기법을 이용해 최적해를 탐색한 결과를 나타낸다. 목적함수 계산에 큰 영향을 주는 자식개체 수를 50, 100, 150, 200으로 선정하였고, 부모개체 수는 모두 20으로 선정하였다. 자식개체가 50인 경우는 200세대가 지나도 전체 최소점 탐색에 실패하였다. 탐색한 목적함수 값은 전체 최소점에서의 값과 별 차이가 없어, 실제 설계 시에는 어떤 값을 선택해도 경제적 효과에는 영향을 주지는 않으나, 이론적으로는 명백히 전체 최소점 탐색에 실패한 경우이다.

Table 2에 나타난 바와 같이 자식개체 수가 증가하면 전체 최적점을 찾는데 소요된 세대 수가 줄어들고 있으나, 목적함수 계산 회수는 큰 차이가 없게 된다. 식 (8)에서 알 수 있듯이 자식개체 수와 소요 세대 수의 곱이 전체 계산 회수에 영향을 주기 때문이다.

Table 3은 유전자 알고리즘 기법을 이용해 최적해를 탐색한 결과를 나타낸다. 개체군 크기를 50, 100, 150, 200으로 선정하였다.

Table 2 Calculated result by Evolution Strategy

Type	Searched object function value	N_g	N_{obj}
ES(20+50)	1,123,925	-	10,020
ES(20+100)	1,123,888	49	4,920
ES(20+150)	1,123,888	27	4,070
ES(20+200)	1,123,888	21	4,220

Table 3 Calculated result by Genetic Algorithm

Type	Searched object function value	N_g	N_{obj}
GA(50)	1,123,925	-	10,000
GA(100)	1,123,925	-	20,000
GA(150)	1,123,925	-	30,000
GA(200)	1,123,888	20	4,000

크기가 50, 100, 150인 경우는 200세대가 지나도 전체 최소점 탐색에 실패하였다. 탐색한 목적함수 값은 진화전략의 자식개체 수가 50인 경우와 같다. 진화전략보다 개체 수에 영향을 더 받는다고 할 수 있다.

전체 최소점과 값 차이가 적은 국소 최소점이 많이 분포하는 문제에 대해서는 두 기법 모두 탐색의 개체 수를 크게 해야 전체 최소점을 탐색 할 수 있으며, 이러한 최적화 문제에서는 유전자 알고리즘이 진화전략 보다 개체 수에 더 민감하게 나타난다.

4. 최소중량설계와의 비교

최소중량설계를 수행하여 그 결과를 최소건조비 설계와 비교해 보았다. Table 1의 Case 1에 대해 최적설계를 수행한 후 최소 건조비설계(Case 2)와 비교한 결과를 Table 4에 나타내었다. 두 경우의 비교를 위해 각각의 비용과 총비용은 Case 2의 Cost factor를 적용하여 나타내었다.

Table 4 Min. weight design and Min. cost design

Item	Min. weight design	Min. cost design
X1(mm)	795	930
X2(mm)	520	755
X3(mm)	695	805
X4(mm)	550	735
X5(mm)	565	770
f_{weight} (\$)	801,810	835,751
$f_{welding}$ (\$)	321,945	262,462
f_{acc_number} (\$)	4,046	3,388
f_{acc_weight} (\$)	21,382	22,287
Weight (ton)	763.63	795.95
Cost (\$)	1,149,182	1,123,888

최소중량설계에도 진화전략과 유전자 알고리즘을 모두 사용하였고, 자식개체 수와 개체군 크기는 모두 200을 적용하였고, 두 기법 모두 같은 최적해를 탐색하였다.

Table 4를 검토해보면 최소중량설계는 최소 건조비설계에 비해 설계변수 즉, 보강재 간격이 모두 줄어 판 두께가 감소하지만, 보강재의 취부 용접장이 늘어났다. 탱크당 중량은 32.32 ton(4.06%) 감소하지만, 탱크당 건조비는 25,294 \$(2.25%) 증가한다. 적당으로는 100,000 \$ 이상이 증가하므로, 조선소의 입장에서 최소건조비설계가 더 절실함을 알 수 있다.

5. 비용 변동 효과 검토

강재비와 인건비가 인상될 경우 최적설계 결과를 검토해 보았다. 강재비만 인상될 경우 설계변수의 변화와 인건비만 인상될 경우 설계변수의 변화를 조사하였다.

Table 1의 Case 3과Case 4에 대해 최적설계를 수행한 후 Case 1과Case 2에 대해 비교한 결과를 Table 5에 나타내었다. 총비용의 비교는 의미가 없으나, 각 비용 구성요소는 참고로 나타내었다.

Table 5 Comparison of optimum design results

Item	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
X1(mm)	795	930	930	930
X2(mm)	520	755	755	755
X3(mm)	695	805	740	805
X4(mm)	550	735	735	780
X5(mm)	565	770	770	790
f_{weight} (\$)	801,810	835,751	999,553	840,081
$f_{welding}$ (\$)	321,945	262,462	265,373	309,716
f_{acc_number} (\$)	4,046	3,388	3,416	4,015
f_{acc_weight} (\$)	21,382	22,287	22,212	26,883
Weight (ton)	763.63	795.95	793.30	800.08

비용 구성에서 Case 1과 Case 2는 Table 4에 나타난 값과 같으며, Case 3과 Case 4는 각각의 Cost factor를 적용하여 나타난 것이다.

각 경우의 최적 간격을 시각적으로 쉽게 알 수 있도록 Fig. 4에 그래프로 나타내었다.

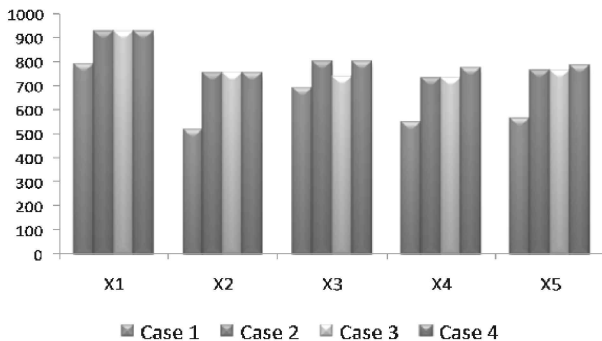


Fig. 4 Optimum space of each case

Case 2에 비해 강재비만 20% 인상한 경우인 Case 3은 Case 2의 최적해와 비교하면 설계변수 변화가 거의 없었으며, X3만을 줄여 강재의 중량을 절감하고 있다.

Case 2에 비해 인건비만 20% 인상한 경우인 Case 4는 Case 2의 최적해와 비교하면 설계변수 변화가 X4와 X5에 나타났으며, 그 두 설계변수를 늘려 강재의 중량이 증가하나, 용접장을 줄여 건조비를 감소시킨다.

최소중량설계와 최소건조비설계는 Fig. 4에서 알 수 있듯이 최적의 설계변수가 심한 차를 보이지만, 건조비를 고려할 경우는 강재비와 인건비가 변한다 하더라도 설계변수의 변화가 작게 나타나게 된다. 이러한 사실은, 최소건조비설계의 중요성을 의미한다고 할 수 있다. 다시 말해서, 최적설계에 건조비를 고려할 경우 강재비와 인건비의 산정에 약간의 오차가 발생하더라도 설계변수의 오차는 작을 것으로 판단되며, 강재비와 인건비를 정확히 고려하는 것 보다 최적설계에 건조비를 고려하느냐가 더욱 중요할 것으로 사료된다.

6. 결론

LPG 운반선의 화물창을 대상으로 건조비 모델을 구현하고 전역 최적화 기법을 이용하여 최소중량설계와 최소건조비 설계를 수행한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 다수의 국소 최소점이 분포하는 문제에 대해서는 진화전략과 유전자 알고리즘 모두 탐색 개체 수를 크게 해야 전체 최소점을 탐색할 수 있으며, 유전자 알고리즘 보다는 진화전략이 더 효과적이었다.
- 2) 최소중량설계는 최소건조비설계에 비해 탱크당 중량은 32.32 ton(4.06%) 감소하지만, 탱크당 건조비는 25,294 \$(2.25%) 증가한다. 최소건조비설계가 척당 100,000 \$ 이상 절감할 수 있으므로 조선소의 입장에서는 최소건조비 설계가 더 절실하다.
- 3) 최적설계에 건조비를 고려할 경우 강재비와 인건비의 산정에 약간의 오차가 발생하더라도 설계변수의 오차는 작을 것으로 판단되며, 강재비와 인건비를 정확히 고려하는 것 보다 최적설계에 건조비를 고려하느냐가 더욱 중요할 것으로 사료된다.

참고 문헌

Na, S.S. Yum, J.S. & Kim, Y.S., 2010. The Structural Design of a Large Oil Tanker Based on the CSR by Considering the Web Arrangement and Material Property. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(4), pp.598-605.

Goldberg, D.E., 1989. *Genetic Algorithms in Search Optimization & Machine Learning*. Addison Wesley.

Kim, M.C. Lee, U.S. & Byun, T.Y., 2008. Study on Optimization of Anti-erosion Rudder Section Large Container Ship by Genetic Algorithm. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(4), pp.403-410.

Lee, J.S. & Kim, J.M., 2007. Optimum Structural Design of Panel Block Considering the Productivity. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(2), pp.139-147.

Pinto, A. Peri, D. & Campana, E.F., 2004. Global Optimization Algorithms in Naval Hydrodynamics. *Ship Technology Research*, 51(3), pp.123-133.

Schwefel, H.P., 1981. *Numerical Optimization of Computer Models*, Wiley, Chichester.

Shin, S.H. & Ko, D.E., 2009. Development of the Weight Reduction Program for Corrugated Bulkheads of a Product Oil Carrier. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(3), pp. 279-289.

