

다목적함수 최적화기법을 이용한 유조선의 최적구조설계

Optimum Structural Design of Tankers Using Multi-objective Optimization Technique

신상훈†

장창두*

송하철**

Shin, Sang-Hoon

Jang, Chang-Doo

Song, Ha-Cheol

(논문접수일 : 2002년 1월 28일 ; 심사종료일 : 2002년 5월 20일)

요지

공학설계에 있어 많은 문제들은 몇 가지 목적함수들을 동시에 최소화하여야 할 필요가 있을 경우가 있다. 선박설계에 있어, 종래에는 자체비 경감과 재화중량 증가를 위해 최소중량설계가 구조설계의 주된 목적이었으나, 값싼 노동력을 내세운 후발 조선국과의 치열한 국제경쟁을 극복하기 위해서는 보다 경제성 있는 선박 건조 기술 개발이 선행되어야 할 것이다. 이에 따라 본 연구에서는 다목적함수 최적화기법을 이용한 선체 구조의 보다 합리적인 설계방안에 대한 연구를 수행하여 실제 건조된 유조선에 대상으로 중량, 건조비 등의 경제성을 비교 평가하였다. 다목적 함수로는 유조선의 중량과 건조비로 하였으며 최적화 기법으로는 확률론적 탐색법인 ES(Evolution Strategies)를 이용하였다. 건조비 모델은 상대 건조비 개념을 도입하였고, 중강도 부재는 선급규정에 의해, 횡강도 및 횡격벽 부재는 직접해석법인 일반화된 경사처짐법을 사용하여 설계에 적용하였다. 다목적함수 최적화 결과로부터 도출된 Pareto 최적 설계점들에 대하여, 요구운임을 각각 산정함으로써 이들 최적 설계점들 중에서 가장 경제성이 뛰어난 선박 설계 방안을 제시하였다.

핵심용어 : 다목적함수 최적화, 확률론적 탐색법, 상대 건조비, ES(Evolution Strategies), 일반화된 경사처짐법, Pareto 최적해, 요구운임률

Abstract

In the ship structural design, the material cost of hull weight and the overall cost of construction processes should be minimized considering safety and reliability. In the past, minimum weight design has been mainly focused on reducing material cost and increasing dead weight reflect the interests of a ship's owner. But, in the past experience, the minimum weight design has been inevitably lead to increasing the construction cost. Therefore, it is necessary that the designer of ship structure should consider both structural weight and construction cost. In this point of view, multi-objective optimization technique is proposed to design the ship structure in this study. According to the proposed algorithm, the results of optimization were compared to the structural design of actual VLCC(Very Large Crude Oil Carrier). Objective functions were weight cost and construction cost of VLCC, and ES(Evolution Strategies), one of the stochastic search methods, was used as an optimization solver. For the scantlings of members and the estimations of objectives, classification rule was adopted for the longitudinal members, and the direct calculation method, GSDM(Generalized Slope Deflection Method), for the transverse members. To choose the most economical design point among the results of Pareto optimal set, RFR(Required Freight Rate) was evaluated for each Pareto point, and compared to actual ship.

Keywords : multi-objective optimization technique, stochastic search method, ES(Evolution Strategies), GSDM (Generalized Slope Deflection Method), Pareto set, RFR(Required Freight Rate)

† 책임저자, 현대중공업 산업기술연구소 선임연구원
전화: 052-230-3067; Fax: 052-250-9580
E-mail: sshoon@hhi.co.kr

* 정회원 · 서울대학교 조선해양공학과 교수

** 정회원 · 서울대학교 조선해양공학과

• 이 논문에 대한 토론을 2003년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2003년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

선체구조의 합리적인 설계를 위해서는, 효율적인 구조 배치를 통해 구조중량과 같은 재료비를 최소화하고 건조 과정에 소요되는 제반 경비들을 최소화할 수 있어야 한다. 그러나 구조중량과 건조비는 양쪽을 동시에 최소화할 수 없는 상충성을 띄고 있어, 이 두 가지 설계기준의 합리적인 수렴 과정이 중요한 과제인 바, 이를 해결하기 위한 방안으로 그간 다목적 함수 최적화 기법 및 탐색 기법에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다.^{1),2)}

이러한 다목적함수 최적화 문제³⁾를 해결하는 가장 잘 알려진 접근법으로는 단일 목적함수로의 치환을 이용하는 가중치법과 제한 조건식법이 있다. 그러나 가중치법은 Pareto 곡선의 non-convex한 부분에 있어서는 문제의 해를 위한 가중치가 존재하지 않는다는 문제점 등이 있고, 제한 조건식법은 사용되는 최적화기법에 따라 수행속도와 전체 최적점 탐색이 영향을 받는다는 특징이 있다.

다목적함수 문제는 김기화⁴⁾에 의해 MOGA(Multi-criteria Optimization by Genetic Algorithm)라는 새로운 알고리즘이 도입됨에 따라 단일목적함수로의 치환을 이용하는 기존의 접근법을 벗어나게 되었다. 최근에는 제한 조건식법을 이용하는 다목적함수 문제의 탐색시간을 줄이기 위한 연구가 진행되어, Lee 등⁵⁾은 GA(Genetic Algorithm)와 Hooke & Jeeves 직접 탐색법을 결합한 형태의 최적화기법을 제안하였고, 장창두 등⁶⁾은 ES(Evolution Strategies)의 (1+1) 방법과 ($\mu + \lambda$) 방법을 결합한 기법을 제안하였다.

본 연구에서는 Jang 등⁷⁾이 제안한 개선된 ES 기법을 바탕으로 VLCC급 유조선에 대한 다목적함수 최적 설계를 수행하였으며, 그 결과를 조선소에서 실제 건조된 선박과 비교, 평가하여 개선된 설계안을 제시하였다. 다목적함수는 유조선의 중량과 건조비로 하였으며 건조비 모델은 상대 건조비 개념을 도입하였다. 종강도 부재는 평가 대상 선박에 적용된 선급 규정인 DnV Rule에 의해 설계하고, 횡강도 및 횡격벽 부재 설계는 장창두 등⁸⁾에 의해 정립된 직접해석법인 일반화된 경사처짐법을 사용하였다.

2. 다목적함수 알고리즘

본 연구에 사용한 알고리즘은 계산의 효율성을 위해 ES의 plus 전략 중 ($\mu + \lambda$) 방법을 변형한 방법을

사용하였으며, 적합성의 형태를 Pareto 조건에 의해 두 가지로 양분하여 λ 값이 매우 적어지면 실행을 종료하는 계산 완료 조건(termination condition)을 적용하였다. 여기서 μ 는 ES에서의 부모 개체의 수를 의미하며, λ 는 부모 개체로부터 생성된 자식 개체의 수를 뜻한다.

본 연구의 다목적함수 최적화 과정은 다음과 같다.^{9),10)}

2.1 초기 부모 개체 집단 생성

초기에 부모 개체의 수 μ 에 해당하는 설계변수 집합들과, 자식 개체가 생성되는 구간 크기(step size)의 조정 역할을 하는 분산값인 σ 집합들을 무작위로 발생시켜 설계영역에 골고루 분포시킨다. 설계변수는 각각 상한과 하한 사이에 일정한 무작위 수(uniform random number)를 사용하여 발생시키고, 초기 σ 값은 설계변수의 상,하한 구간 크기의 10~20% 정도에 해당되는 일정한 무작위 수를 사용하여 발생시켰다.

2.2 자식 개체 집단 생성

위에서 구한 μ 개의 부모 개체로부터 λ 개의 자식 개체를 생성한다. 이때 설계변수는 개체성(discrete) 재결합 형태이며 σ 는 중간 인자(intermediate) 재결합 형태이다. 마지막으로 돌연변이(mutation) 과정을 거쳐 자식 개체를 생성하게 된다.

2.3 적합성 판정

제한 조건이 있는 최적화 문제를 무구속 최적화 문제의 형태로 변환시키는데 필요한 목적함수 $\Phi(x)$ 는 다음 식들과 같이 도입하여 계산한다.

여기서 c_p 는 벌칙(penalty) 항의 영향계수, $g_i(x)$ 는 제한조건을 나타내며, 첨자 m 과 n 은 각각 제한조건과 목적함수의 개수를 나타낸다.

$$\Phi(x) = f(x) \left(1 - c_p \sum_{i=1}^m \min[0, g_i(x)] \right) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Phi_1(x) &= f_1(x) \left(1 - c_p \sum_{i=1}^m \min[0, g_i(x)] \right) \\ &\quad \vdots \\ \Phi_n(x) &= f_n(x) \left(1 - c_p \sum_{i=1}^m \min[0, g_i(x)] \right) \end{aligned} \quad (2)$$

적합성 정도 판정을 위해, $\Phi_1(x)$ 에서 $\Phi_n(x)$ 까지의 모든 값을 비교하고 Pareto 조건을 만족하면 '적합성이 있다', 만족하지 못하면 '적합성이 없다'라고 한다. Pareto 조건을 만족하기 위해서는 한 점 x_i 에 대한 목적함수 값들이 그 점을 제외한 모든 점들에 대해서 어느 한 점에서라도 다음 식(3)과 같은 조건이 형성되면 도태되며, 식(3)을 위배하지 않는다 하더라도 다음 식(4)와 같은 조건이 형성되면 도태시켜야 한다. 이러한 점을 도태시키지 않으면 설계 영역 전체 탐색에 지장을 줄 수가 있기 때문이다.

$$\begin{aligned} \Phi_1(x_i) &> \Phi_1(x_j) \text{ and} \\ &\vdots \text{ and} \\ \Phi_n(x_i) &> \Phi_n(x_j) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Phi_1(x_i) &= \Phi_1(x_j) \text{ and} \\ &\vdots \text{ and} \\ \Phi_n(x_i) &= \Phi_n(x_j) \end{aligned} \quad (4)$$

2.4 세대의 반복

새로 선택된 개체들이 다음 세대의 부모 개체로 전 환되어진다. 여기서 부모 개체의 수에는 제한성을 두지 않았고, 부모 개체에 의해 새로이 형성되는 자식개체의 수에 제한성을 두었다.

Pareto 조건을 만족하는 설계점의 수가 줄면 자식 개체의 수를 늘리고, 반대로 설계점의 수가 늘어나면 자식 개체의 수를 줄여서 조절한다. 이는 $(\mu + \lambda)$ 로 시작하여 매 Pareto 조건을 만족하는 점을 새로운 부모 개체 p 로 선택하고 그 점들을 바탕으로 새로운 자식 개체 c 를 형성하는 방법으로, 자식 개체의 수를 늘리고 줄이는 정도는 식(5)에 의해 조절되어진다.

$$\mu + \lambda = p + c \quad (5)$$

세대가 반복됨에 따라 p 의 크기는 늘어나고 줄어드는 과정을 반복하면서 점차 $\mu + \lambda$ 값에 가까워진다. 따라서 점진적으로 새롭게 계산되어지는 목적함수와 제한조건의 수가 줄어들면서 효율적인 Pareto 최적해 탐색이 이루어지게 된다.

2.5 계산 종료 조건(termination condition)

다음 세 가지 조건 중 한 조건을 만족하면 계산과

정을 종료한다.

- 제1조건 : n 세대 동안 Pareto 최적해들에 대한 변화가 없다.
- 제2조건 : $(\mu + \lambda)$ 형태가 $(p + 1)$ 형태로 전환된다.
- 제3조건 : 적정 세대수에 도달한다.

3. 최적화 알고리즘의 검증

본 알고리즘의 검증을 위한 예제로 non-convex 최적해 문제³⁾를 택하였으며 다목적함수, 구속조건 및 탐색영역은 다음 식(6)과 같다. 그림 1은 (10+100)을 시작점으로 하여, 제안된 ES 알고리즘에 의해 생성된 Pareto 최적해들을 보여주고 있는 바, 총 109개의 적절한 Pareto 최적해가 생성되었음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Min}_{x \in C} F(x) &= \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{bmatrix} \\ f_1(x) &= -x_1 + x_2 \\ f_2(x) &= x_1 + x_2 \\ g_1(x) &= 1 - x_1^2 - x_2^2 \geq 0 \\ g_2(x) &= 1 - (x_1 - 1)^2 - x_2^2 \geq 0 \\ g_3(x) &= 1 - (x_1 - 2)^2 - x_2^2 \geq 0 \\ g(x) &= g_1(x) \cup g_2(x) \cup g_3(x) \\ C &= \{x \mid 0 \leq x_1 \leq 2, -2 \leq x_2 \leq 2\} \end{aligned} \quad (6)$$

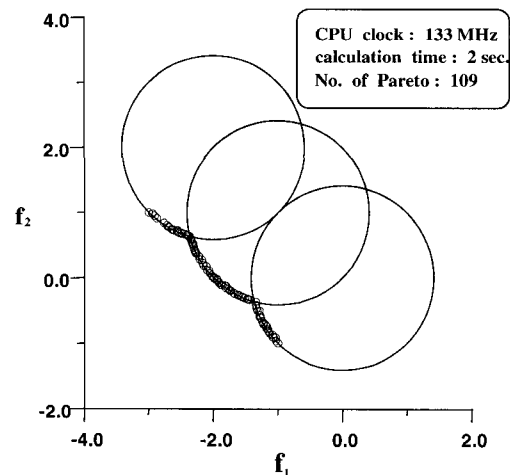


그림 1 Results of Pareto optimal set obtained by the proposed algorithm using (10+100) ES

4. 유조선의 다목적함수 최적구조설계

유조선 중앙단면의 형상은 일반적으로 다음과 같이 분류된다. 첫째는 비교적 작은 선박의 형태로 종격벽이 없고, 톱 사이드 탱크(top side tank)가 존재한다. 둘째는 Aframax, Suezmax급의 유조선으로 중앙에 한 개의 종격벽을 갖는다. 마지막으로는 중앙에 두 개의 종격벽을 갖는 형태로 주로 VLCC급 유조선에 쓰인다. 본 연구에서는 다목적 함수 최적화 모델로 1996년에 국내 조선소에서 설계, 건조된 VLCC(310,000 DWT)의 주요치수를 적용하였으며, 이에 따른 최적화 결과를 실선의 자료와 비교, 검토하였다.

최적화 목적함수로는 유조선의 중량과 건조비로 설정하였으며, 중량과 건조비의 단위를 통일하기 위해 중량은 재료단가를 곱한 재료비로 표현하였다.

다목적함수 최적 설계 과정을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 먼저 종강도 부재는 선급규정에 따라 각 부분의 종통재와 갑판 두께를 설계변수로 하여 다목적함수 최적설계를 수행한다.
- (2) 종강도 부재 설계 후, 종강도 부재에 대한 Pareto 최적해 집합의 각각의 설계점을 대상으로 횡강도 부재와 횡격벽 부재의 다목적함수 최적설계를 수행한다. 종강도 부재의 최적해 중 한 점이 선택되어지면 횡강도, 횡격벽 부재의 설계변수를 제외한 모든 설계 정보는 선택된 종강도 부재 설계점의 정보를 이용하여 최적화가 수행되어진다.
- (3) 횡강도 부재의 플랜지(flange)로 작용하는 각 부분의 외판의 두께는 선택되어진 종강도 부재의 두께로 하며, 종강도 부재와의 교차부 수는 종강도 부재의 종통재 개수를 적용한다. 또한 교차부의 용접장은 종통재의 웹(web)과 플랜지의 길이를 사용하고, 스트링거(stringer) 형식 횡격벽 부재 중 외판에 붙는 이면 형강재들은 종강도 부재의 선저 종통재의 수에 맞추어 계산하여 횡강도, 횡격벽 부재의 최적설계를 수행한다.
- (4) 전체 최적해 집합의 추출
 상기 과정을 통해 생성된 설계점들의 조합들 중에 전체의 Pareto 최적해를 만족하는 설계점들을 가려내 최적 설계점들의 집합을 구한다.

4.1 건조비의 구성

건조비(f_{cost})는 식(7)과 같이 재료비($f_{material}$), 인건비(f_{labor}), 경상비($f_{overhead}$)로 구성되며 경상비는 고정경상비와 가변 경상비로 분류되어진다.

$$f_{cost} = f_{material} + f_{labor} + f_{overhead} \quad (7)$$

이 중 고정경상비는 동일한 조선소에서 동일한 선박 건조에 필요한 시설, 장비 등은 고정되어 있으므로 항상 일정하다고 가정할 수 있다. 그러나 가변경상비는 작업내용, 직접 노동력과 관계 있으며, 작업의 종류에 따라 소요되는 공수와 설비에 대한 보수비용 등이 증감되므로 인건비 산정에 이를 포함시켜야 할 것이다. 따라서 상대건조비에는 고정경상비가 제외되며 가변경상비는 인건비 항목에 포함되어진다. 인건비 산정은 용접, 절단, 굽힘 가공, 운반, 도색비 등을 고려하였다.

4.2 종강도 부재

일반적으로 설계 치수는 규격화되어 있으므로 설계변수들은 규격화된 이산변수들을 사용하였고, 종통재들의 치수도 규격에 따라 분류하여 선급 요구치를 최소로 만족하는 형상을 찾으려 하였다. 제한조건은 갑판의 선급요구 최소치수 및 선저와 갑판에서의 선급요구 최소 선각 단면계수로서, 이 조건을 만족하는 범위 내에서 최적설계를 수행하였다. 또한 종강도 부재의 용접비

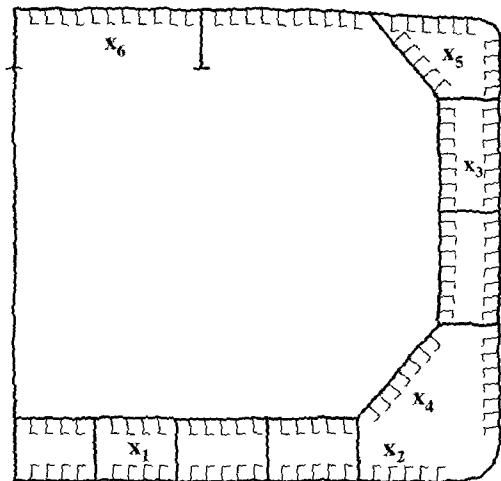


그림 2 Design variables for longitudinal members

중에서 종강도 부재와 횡강도, 횡격벽 부재와의 교차부에 해당되는 부분은 각각 횡부재 설계시 계산되도록 구성하였다.

그림 2는 일반적인 소형 유조선의 중앙 단면 형상과 중앙 단면 설계시 부위별 종강도 부재의 설계 변수를 보여주고 있다. 설계변수 x_1 부터 x_4 까지는 해당 부위의 종늑골(longitudinal stiffener) 간격을 나타내며, x_6 는 갑판 두께에 해당된다. 중앙에 종격벽이 없는 소형 유조선은 그림과 같이 톱 사이드 탱크가 존재하나, 본 연구에서 평가 대상으로 한 VLCC와 같이 종격벽이 있는 선형에서는 톱 사이드 탱크가 없으므로 최적화 과정에서 설계변수 x_5 를 제외시켰다.

4.3 횡강도 부재

진술한 바와 같이 횡강도 부재의 직접 해석을 위해서 장창두 등⁸⁾에 의해 개발된 일반화된 경사처짐법을 적용하였으며, 각 부재에 발생한 응력이 허용 응력 범위 안에 있도록 최적설계를 수행하였다. 일반화된 경사처짐법은 기존의 경사처짐법에 축방향의 변위를 고려한 것으로, 각 절점에서의 평형방정식만으로 해를 구할 수 있어 정식화가 용이하다는 장점이 있다.

해석 모델인 유조선에 대해 유효폭 이론을 사용하여 하나의 웹 간격을 떼어내고, 선체 종강도 부재인 선체 외판 및 종격벽을 단면보의 상하부 플랜지로 취급하여 그림 3에서와 같이 횡방향 웹이 붙어있는 I 단면을 형성하는 웹 프레임(web frame)으로 모델링하였다. 이 때 3차원 효과를 고려하기 위해 선체 종강도 부재인 선체 외판, 종격벽, 선저 및 갑판의 거어더를 Timoshenko 보 이론을 적용하여 등가의 스프링 강성으로 치환하였다. 아울러 등가의 보로 치환하기 위해, 브라켓(bracket) 부분의 강성을 크게 주어 강성이 무한대인 강체부 및 균일 단면부와 같은 재료 특성을 갖는 탄성부로 나누었다.

그림 3에 나타난 설계 변수들은 선측 및 선저부와 같은 이중 구조인 경우 각 웹의 두께들이며, 그 외의 부분은 웹의 두께와 높이, 플랜지의 폭과 두께이다. 플랜지와 같이 작용하는 선측 외판, 갑판부, 이중저, 종격벽 등은 종강도 부재 설계시 산출된 치수를 유효폭 개념에 따라 적용하였다. 종강도 부재와 횡강도 부재 교차부의 용접장은 커버 플레이트(cover plate)의 유무, 수밀 여부 등 교차부의 형상에 따라 산정하였다.

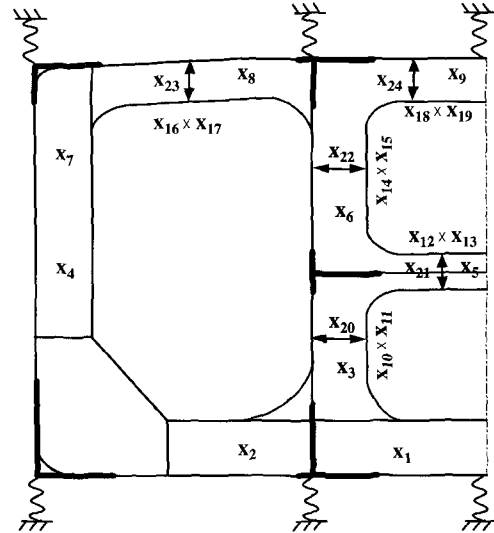


그림 3 Modeling and design variables for transverse members

4.4 횡격벽 부재

유조선의 횡격벽은 주로 스트링거 형식이다. 스트링거 격벽은 수직된 평판을 스트링거로 보강하기 때문에, 이의 해석을 위해서 그림 4와 같이 스패 포인트(span point) 개념을 이용하여 강체부를 포함한 보 요소로 모델링하였다. 하중 조건은 DnV에 규정된 full load condition인 센터 탱크(center tank)와 윙 탱크(wing tank)를 지그재그 형태로 채우는 경우로 하였다. 이

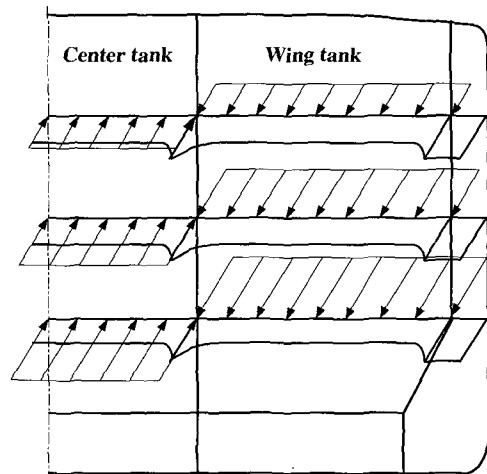


그림 4 Loading conditions for the analysis of bulkhead

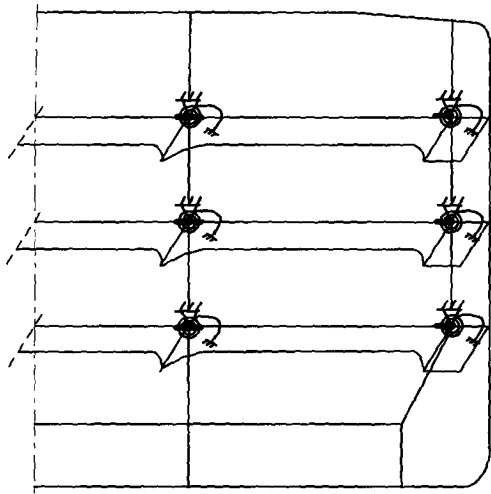


그림 5 Boundary conditions for the analysis of bulkhead

때 압력은 수두 높이에 영향을 받으므로 그림 4와 같이 수직방향으로 수두가 다른 사다리꼴로 분포하게 되는데, 이를 고려하기 위해 해석에 사용한 하중은 종격벽을 사이에 두고 지그재그 꼴로 채우는 형태로 모델링하였다. 경계조건은 측판과 종격벽 강성이 선체 길이 방향으로 매우 크다고 가정하여 선체 길이 방향으로의 변위를 구속하고, 각 스트링거 위치별로 측판과 종격벽이 만나는 곳은 비틀림에 의한 스프링 강성을 그림 5와 같이 걸어 주었다.

횡격벽 부재의 설계 변수로는 그림 6과 같이 스트링

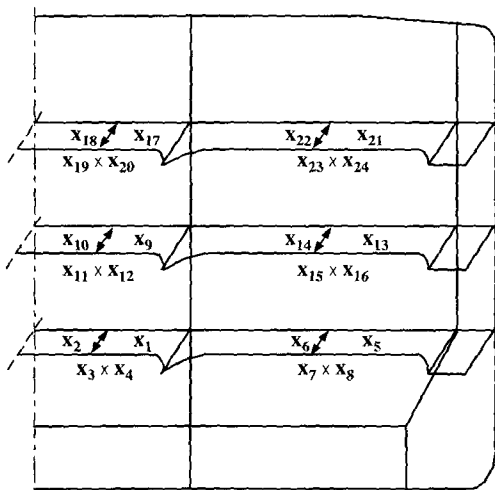


그림 6 Design variables for bulkhead

거의 높이와 두께, 하부 플렌지의 폭과 두께로 하였다. 상부 플렌지인 외판은 선급 규정에 의한 치수를 사용하였고 폭은 유효폭을 사용하였다. 설계의 제한조건은 각 스트링거에 발생하는 전단 응력, 굽힘 응력 및 스트링거 웨브와 플렌지의 좌굴 방지를 위한 최소 두께이다.

4.5 선수미 등 기타 부분

선수미부 및 선실 등의 재료비와 건조비는 평가 대상 선박 건조시 조선소에서 사용된 추정 공식을 이용하여 산정하였다.

5. 결 과

전술한 바와 같이 본 논문의 다목적합수 최적화 결과의 비교, 평가를 위해 적용된 실적선은 1996년에 설계하여 건조된 VLCC 유조선(310,000 DWT)으로서 유조선의 형태는 중앙에 종격벽이 두 개 설치되어 있는 형태이며, 실적선의 주요치수는 다음과 같다.

- L_{BP} (선박의 길이) : 320.0m
- L_S (선박의 길이: scant) : 317.72m
- B (선박의 폭) : 58.0m
- D (선박의 높이) : 31.0m
- T (선박의 흘수) : 20.95m
- T_S (선박의 흘수: scant) : 22.7m
- 플로어(Floor) 간격 : 5700mm
- Transverse 웨브 간격 : 5700mm

그림 7은 최적 설계의 결과로 얻어진 Pareto 최적해 집합을 보여주고 있으며, 표 1은 주요 Pareto 점에서의 중량에 따른 재료비 및 건조비를 보여주고 있다. 이 결과를 검토해 보면, 실적선의 실 설계점(E)은 Pareto 최적해 집합에서 약간 벗어나 있으며, 본 논문의 다목적 합수 최적화 결과로서의 설계점들 B, C, D가 중량면에서나 건조비면에서 모두 실적선보다 우수함을 알 수 있다.

Pareto의 정의에 의하면 그림 7의 모든 점(실선은 제외)이 최적 설계점인 바, 설계점 A는 최소중량 설계점이고 설계점 F는 최소 건조비 설계점이다. 이러한 Pareto 최적 설계점을 고찰해 보면, 선주는 최소 중량 설계점을, 조선소에서는 최소 건조비 설계점을 선호하게 되는 상충성을 가지고 있다. 이러한 문제는 그간 여러 분야에서 발전

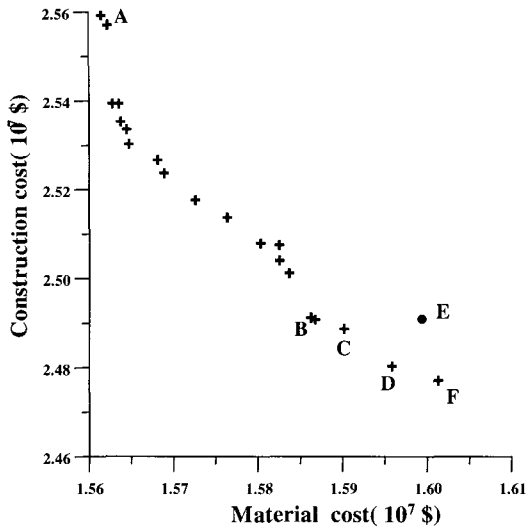


그림 7 Pareto optimal set of the VLCC

표 1 Comparison of cost at each design point (unit : 10⁷\$)

Pareto point	Material cost	Construction cost	Remarks
A	1.56152	2.55923	min. weight
B	1.58676	2.49073	
C	1.59017	2.48863	
D	1.59587	2.48030	
E	1.59940	2.49093	actual ship
F	1.60136	2.47701	min. construction cost

해 온 다목적함수 최적화 기법을 실제 문제에 적용하는데 가장 해결하기 힘든 문제점으로 지적되어 왔다.

이에 따라 본 연구에서는 조선 설계자로 하여금 어느 하나의 설계점을 선택하기 위한 기준을 제시하고자 한다. 이를 위해 상기한 두 설계점에 대한 객관화된 선박 경제성을 평가하고자 선박의 요구운임률(RFR, Required Freight Rate)을 산정, 비교하여 선박의 전 수명에 대한 경제성을 분석하였다.

요구 운임률은 식(8)과 같이 자본 회수율을 고려한 선가와 연간 선박의 유지에 필요한 제반 경비를 연간 운송 화물량으로 나눈 것으로, 단위 화물량에 대해 선주가 받아야 할 최저 운임을 뜻한다. 따라서 동일한 운임을 받는 두 선주의 수익을 비교할 때 요구 운임률이 낮을수록 선주의 수익이 증가되게 되어, 보다 경제성 있는 선박으로 평가된다.

$$RFR = (P \times CRF + AOC) / ACC \quad (8)$$

RFR(Required Freight Rate) : 요구 운임률

P : 선가

CRF(Capital Recovery Factor) : 자본 회수율

$$\left(\frac{i(1+i)}{(1+i)^n - 1} \right)$$

AOC(Annual Operating Cost) : 연간 운항비 (인건비, 연료비, 항만비, 보험비, 수리비, 경상 운영비 등)

ACC(Annual Cargo Capacity) : 연간 운송 화물량

각각의 Pareto 설계점에 대한 요구운임률의 계산 결과는 표 2에 정리하였다. 선가에 대한 상세한 자료는 그림 7과 표 1에 나타나 있으며, 자본 회수율, 연간 운항비 및 연간 운송 화물량을 계산하기 위해 이용한 데이터는 실적선의 자료로부터 다음과 같이 원용하였다.

본 연구 대상 선박은 중동과 일본을 운항하는 VLCC 유조선으로 항해거리는 10,000km 정도이며 항해일수는 34일, 항차수는 9회이다. 중유의 가격은 ton당 120\$, 선박의 수명은 20년, 선원 수를 20명으로 가정하였고, 자본 회수율에 사용되는 이자율은 12%를 적용하여 계산하였다. 선원 급여는 1인당 35,000\$를 적용하였고, 제반 보험료 및 수리유지 및 소모품비는 선가의 합수로 가정하였다.

표 2의 결과에 따르면 최소중량 설계점과 최소건조비 설계점의 요구 운임률 차이는 0.044\$/ton으로 최소 건조비 설계에 따라 건조된 선박이 더 낮게 나타났으며, 연간 12만\$이 넘는 차이를 보이게 된다. 선박의 수명을 20년으로 하고 이자율 10%로 가정할 때, 최소 건조비 설계점을 선택한 선주의 이익은 20년 간의 선박 운용 기간에 대해 약 700만\$ 정도로 나타나며, 최근의 저금리 기조를 반영한다고 하더라도 선주는 300~400만\$ 정도의 이익을 얻게 되는 것으로 나타났다.

본 연구의 설계 대상인 VLCC 선박은 경제성 측면에서 최소 중량 설계점보다 최소 건조비 설계가 더 우수한 것으로 평가되어 선주와 조선소 모두에게 보다 경

표 2 Comparison of RFR between min. weight and min. construction cost point

Pareto point	Weight (ton)	Construction Cost(10 ⁷ \$)	RFR (\$)	Remarks
A	35328.5	2.55923	6.079	min. weight
F	36229.9	2.47701	6.035	min. const. cost

제적인 설계안으로 여겨진다. 이에 따라 기존의 최소중량을 목적함수로 하는 단일목적함수 최적설계보다는 건조비까지 고려한 다목적함수 최적설계를 수행하는 것이 보다 합리적인 설계점을 선택할 수 있는 설계 기법임을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구는 확률론적 탐색기법의 하나인 ES를 적용하여 개선된 다목적함수 최적화 알고리즘을 제시하고 예제에 통해 그 유용성을 검증하였으며, 이를 바탕으로 선박의 구조 최적 설계에 적용하였다. 본 연구에서 도출된 다목적함수 최적 설계 결과와 실적선의 설계 자료를 비교, 검토한 바, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 기존의 선박 설계는 일반적으로 중량 최소화를 위한 단일 목적함수 최적화 문제를 다루고 있으나 인건비 및 제반 경비가 선박의 건조비에서 차지하는 비중이 커짐에 따라, 본 연구에서는 상대건조비 개념을 도입하여 중량과 건조비를 동시에 고려할 수 있는 다목적함수 최적설계 알고리즘을 개발하고, 이를 유조선의 다목적함수 최적 설계에 적용하였다.
2. ES를 이용한 다목적함수 최적화 알고리즘을 DnV 규정에 따라 건조된 310,000 DWT의 유조선의 실적선 자료와 비교한 결과, 실적선의 설계점이 본 알고리즘 상의 최적해 (Pareto optimal set) 인 근에 위치하였으나 중량 및 건조비를 더 줄일 수 있는 최적점이 존재함을 확인할 수 있었다.
3. 다목적 함수 최적해들에 대해 선박의 경제성을 나타내는 지표인 요구운임률(RFR)을 각각 계산하였다. 요구운임률은 최소중량 설계점보다 최소 건조비 설계점에서 더 낮게 나타나 후자가 보다 경제성 있는 선박으로 평가되었다. 이에 따라 기존의 최소중량을 찾기 위한 단일 목적함수 최적화 기법보다 건조비까지 고려한 다목적함수 최적화 기법이 보다 합리적인 선박 설계 기법임을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 해양시스템공학연구소의 2000년도 학술 연구비 지원 과제의 일부로 수행되었으며, 이에 저자는 깊은 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

1. 한상훈, 최홍식, 조홍동, "다단계 다목적함수 최적화를 이용한 구조물의 최적설계," 한국전산구조공학회논문집, 제7권, 제1호, 1994
2. 유원선, 양영순, "Genetic Algorithms과 Evolutionary Strategy의 상호 비교," 한국전산구조공학회논문집, 제7권 제3호, 1994
3. Borghi C. A., Fabbri M., Barba P. Di and Sabini A., "Loney's solenoid multi-objective optimization problem," *IEEE Transactions on Magnetics*, 1999
4. 김기화, "Genetic Algorithm에 의한 다목적함수 최적구조설계," 박사학위논문, 서울대학교, 1994
5. Lee, D. K. and Kim, S. Y., "Techno-Economic Optimization of an LNG Carrier with Multi-criteria in the Preliminary Design Stage," *Journal of Ship Production*, Vol. 12, No. 3, 1996
6. Jang, C. D., Jung, J. J. and Shin, C. H., "Minimum Weight Design of Midship Section of Double Hull Oil Tanker by Hybrid Evolution Strategies," *Proceedings of Asian Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures*, 1997
7. Chang Doo Jang and Sang Hoon Shin, "A Study on the Optimum Structural Design for oil Tankers Using Multi-Objective Optimization", 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 1998, pp.245~253
8. 장창두, 나승수, "일반화된 경사처집법에 의한 유조선의 횡강도 부재의 최소중량설계," 대한조선학회지, 제33권, 제3호, 1996
9. Knowles, J. D., "The Pareto Archived Evolution Strategy: A New Baseline Algorithm for Pareto Multi-objective Optimization," *IEEE*, 1999
10. Schwefel, H. P., "Evolutionsstrategie und numerische Optimierung," Dissertation, Technische Universitaet Berline, 1975