

**論 文**

大韓造船學會論文集  
 第32卷第2號 1995年5月  
 Transactions of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 32, No. 2, May 1995

**선박의 주요치수 선정에 있어서 다목적함수 최적화의 응용**

이동곤\*, 김수영\*\*, 신수철\*\*\*

**Applications of the Multiobjective Optimization  
 Method in Main Particular Selection**

by

Dongkon Lee\*, Soo-Young Kim\*\* and Soo-Chul Shin\*\*\*

**要 约**

본 논문에서는 설계자에게 보다 많은 정보를 제공할 수 있는 다목적함수 최적화방법을 이용하여 선박의 주요치수를 최적화하였다. 최적화에서 운항비와 건조비가 경제성에 미치는 영향을 보다 상세히 분석하기 위하여, 건조비와 운항비를 각각의 목적함수로 하여 다목적함수 최적화를 수행하였고, RFR은 종속함수로 계산하여 변화경향을 분석하였다. 최적화를 위한 설계모델로는 운항거리가 비교적 긴 항로에 대하여, 선속이 빠르며 다른 선종에 비하여 건조비가 높은 액화천연가스 운반선을 대상으로 하였다.

**Abstract**

In this paper, main particulars of a ship are optimized by the multiobjective optimization method which can offer more information to designer. To analyze the effect of a ship building cost and operating cost in the optimum design of a ship, the multiobjective optimization is performed with objective functions of building and operating costs. And Required Freight Rate(RFR) is also calculated as dependent variable. The design model was developed for the Liquefied Natural Gas(LNG) carrier with longer operating distance. The LNG carrier has some characteristics such as higher speed and building cost in comparison with other commercial ships.

접수일자 : 1994년 9월 23일, 재접수일자: 1995년 3월 2일

\* 정회원, 선박해양공학연구센터 조선시스템연구부

\*\*정회원, 부산대학교 조선해양공학과

\*\*\* 정회원, 삼성중공업 중앙연구소

## 1. 서론

선박설계시 경제성이 높은 선박의 주요치수를 결정하는 것은 선박을 설계하는 조선공학자 뿐만 아니라 선박을 구매하는 선주의 입장에서도 매우 중요하다. 그런데 선박을 건조하는 조선소의 입장에서는, 조선소의 최대 이윤의 관점에서 건조비가 낮아지는 주요치수를 결정하려는 입장인 반면에, 선주의 입장에서는 선박의 건조비 뿐만 아니라 운항비도 낮은 선박을 원한다. 운항거리가 비교적 길고 선속이 높을 경우에는 연료비가 운항경제성에 큰 비중을 차지하지만, 액화천연가스 운반선과 같이 일반상선에 비하여 건조비가 매우 높은 경우에는 건조비가 경제성에 중요한 인자가 된다 [1]. 그러나 선가와 운항비는 공학적으로 상반되는 관계에 있기 때문에, 선가와 운항비를 동시에 작아지는 주요치수의 조합을 얻는 것은 쉽지 않다.

경제성이 우수한 선박의 주요치수를 얻기 위하여 지금까지 Parametric Study와 최적화방법이 주로 이용되어 왔다. 그런데 Parametric Study는 계산양이 방대해지는 단점이 있기 때문에 최근에는 최적화방법을 이용한 최적설계가 많이 수행되고 있다[2]. 일반적으로 최적화방법을 이용하여 주요치수를 결정하는 경우에는 목적함수로 최소운임율(Required Freight Rate, RFR)을 많이 사용하고 있다. RFR에는 선박의 건조비와 운항비가 동시에 고려되기 때문에 조선소와 선주의 입장이 모두 반영되는 장점이 있다. 그러나, 이러한 장점은 설계자에게는 단점으로도 작용될 수 있다. 예를들면, 건조비와 운항비의 변화가 목적함수에 미치는 영향을 알기 위해서는 각각에 대한 민감도해석(Sensitivity Analysis)을 수행하여야 하고, 최적점의 거동을 파악하기 어렵기 때문에 설계자가 충분한 정보를 얻을수 없으며, 설계모델의 구성시에 성능추정 모듈들의 상대적인 중요도를 파악하기 힘들다.

따라서 본 논문에서는 설계자에게 보다 많은 정보를 제공할 수 있는 다목적함수 최적화방법을 이용하여 선박의 주요치수를 최적화하였다. 최적화에서 운항비와 건조비가 경제성에 미치는 영향을 보다 상세히 분석하기 위하여, 건조비와 운항비를 각각의 목적함수로 하여 다목적함수 최적화를 수행하였고, RFR은 종속함수로 계산하여 변화경향을 분석하였다. 최적화를 위한 설계모델로는 운항거리가 비교적 긴 항로에 대하여, 선속이 빠르며 다른 선종에 비하여 건조비가 높은 액화천연가스 운반선을 대상으로 하였다. 한국과 카타르 간 항로에서 연간 240 만톤의 액화천연가스를 운반하는 경우(선단은 4척으로 가정, 한척당 60만톤)에 대하여

여 설계모델을 개발하였다. 개발된 설계모델에 다목적 함수 최적화기법을 사용하여 액화천연가스 운반선의 주요치수와 속력을 최적화하였다

## 2. 다목적함수 최적화

최적설계에서 적절한 목적함수를 선택하고 결정하는 것은 매우 중요하다. 그런데 목적함수가 하나가 아니고 여러개가 존재하는 경우가 많이 있다. 목적함수가 여러개인 경우에, 이를 목적함수를 하나의 척도로 환산할 수 있으면 별 문제가 없지만, 그렇지 못할 경우에는 여러개의 목적함수를 동시에 고려하여야 한다 [3,4]. 예를 들어 선박의 건조비를 최소화하고 동시에 선박의 성능을 최대화하는 경우를 생각하면, 건조비와 성능을 같은 척도로 둘 수가 없으므로 다목적함수 최적화문제가 된다

다목적함수 최적화 문제를 풀기위한 여러가지 방법들이 발표되었으나 일반적이고도 신뢰할만한 방법은 아직 알려지지 않고 있다[5]. 다목적함수 최적화 문제를 풀기 위한 방법들을 1) 가능한 해의 집단을 생성하는 방법, 2) 선호도의 초기결정에 의한 방법, 3) 선호도의 계속적인 결정에 의한 방법으로 분류된다[6]. 본 논문에서는, 이 방법들 가운데서 각 목적함수간의 상관관계를 보다 잘 표현하고, 상대적으로 많은 정보를 제공할 수 있으며 목적함수가 3개 이하인 경우에 효과적으로 사용할 수 있는 가능한 해의 집단을 생성하는 방법[7,8]의 범주에 속하는 Constraint Method를 사용하였다.

Constraint Method는 중요한 목적함수 하나를 택하여 최적화를 수행하고 나머지 목적함수는 제한조건으로 취급하는 방법으로 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$\text{Minimize } F(x) = F(fd(x)), x = 1 \text{ to } n$$

*Subject to*

$$hj(x) = hj(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, j = 1 \text{ to } p$$

$$gi(x) = gi(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0, i = 1 \text{ to } m$$

$$F(fd(x)) \leq ei, i = 1, \dots, d-1, d+1, \dots, k$$

여기서,

$F(x)$  : 다목적 함수

$fd(x)$  :  $k$ 개의 목적함수 가운데서  $d$ 번째 목적함수

$x$  : 설계변수

$hj(x)$  : 등호 제한조건

$gi(x)$  : 부등호 제한조건

$n$  : 설계변수의 갯수

$p$  : 등호 제한조건의 갯수

- $m$  : 부등호 제한조건의 갯수
- $k$  : 목적함수의 갯수
- $ei$  :  $d$ 번째 목적함수를 제외한 나머지 목적함수들에 대한 제한조건 값

여기서  $d$ 번째 목적함수는 설계자에 의하여 임의로 정해지는 것이며,  $ei$ 는  $d$ 번째 목적함수를 제외한 나머지 목적함수들에 대한 제한조건의 최대값을 의미한다. 이 방법에서는  $ei$ 의 값을 체계적으로 변화시킴으로서 각각의 경우에 대한 최적점들의 집합(Pareto Optimal Set)을 얻을 수 있다. 이 방법은 다목적함수 최적화 기법을 사용하지 않고 목적함수가 하나인 일반적인 최적화기법을 사용하여 해를 얻을 수 있는 장점이 있으며, 제한조건으로 취급할 목적함수의 제한값을 다음과 같은 방법으로 결정할 수 있다.

먼저 하나의 목적함수를 임의로 선택하여 최적화를 수행하고, 나머지 목적함수들은 종속함수로 취급하여 값들을 계산한다. 이 과정을 나머지 목적함수들에 대하여 동일하게 수행한다. 목적함수를 종속함수로 취급하여 얻은 값들의 최대값과 최적화를 수행하여 얻은 최소값의 차이를 계산하고, 이 값을 Pareto Optimal Set을 계산할 갯수로 나누어 준다. 나누어서 얻어진 값을 최적화를 수행하여 얻은 최소값에 더하고 이값을 목적함수의 제한조건으로 취급하여 최적화를 수행한다. 목적함수에 대한 제한조건의 값을 목적함수를 종속함수로 취급하여 얻은 값들의 최대값까지 계속 증가시키면서 최적화를 수행하면 Pareto Optimal Set을 생성할 수 있다.

Constraint Method는 목적함수가 하나인 기존의 최적화방법을 이용하여 Pareto Optimal Set을 구한다. 일반적으로 사용되는 최적화기법들은 각각의 장단점이 있겠지만, 기존의 최적화기법들을 사용하는데 있어서 가장 큰 문제점으로는 얻어진 최적점이 국부적인 최적점(Local Optimum)일 가능성이 많다는 것이다. 따라서 설계자는 설계변수의 출발점, 탐색폭 및 종료조건 등을 바꾸어 가면서 최적화를 수행한 후, 이들 값을 비교하여 최적점을 검증하는 과정을 거쳐야만 하였다. 본 논문에서는 이러한 불편함을 없애고 탐색의 효율을 높이기 위하여 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)과 기존의 최적화기법인 직접탐색법을 결합한 Hybrid Optimization Method를 사용하였다[9].

### 3 설계모델

#### 3.1 설계모델

일반상선과 비교하여 액화천연가스 운반선이 갖는 특성이 설계에 미치는 영향을 살펴보면 다음과 같으며, 이들 특성을 고려하여 설계모델을 개발하였다.

- 1) 일반적으로 액화천연가스 운반선은 LNG의 장기 도입계약과 연계되어 발주된다. LNG의 연간 도입물량이 계약되면, 계약된 물량은 반드시 운송하여야 하고 만약 계약 물량을 운반하지 못하게 되어도 계약금 전액을 지불하여야 하는 특성이 있다. 따라서 액화천연가스 운반선을 설계할 때에는 일정량의 운송여유를 갖도록 설계한다.
- 2) 운송중에 기화되는 LNG를 추진장치의 연료로 사용한다.
- 3) Ballast 항해시에 LNG 탱크를 냉각시키기 위하여 모든 LNG를 하역하지 않고 일정량의 LNG를 탱크에 남긴다.
- 4) LNG 탱크의 종류에 따라서 주요치수의 결정에 영향을 받는다.
- 5) LNG의 소비량이 겨울철에 집중되는 특성이 있기 때문에, 육상저장 탱크의 용량제한에 기인한 해상여유 (Sea Margin)가 높다.

설계를 효과적으로 수행하기 위해서는 설계문제를 수학적인 형태로 표현하는 것이 필요하다. 수학적으로 표현된 설계문제를 설계모델이라 한다. 선박의 초기설계를 위한 설계모델에는 선주 요구조건, 목적함수, 설계변수, 제한조건 및 선박의 성능평가를 위한 요소들이 효과적으로 표현되어야 한다. 액화천연가스 운반선은 화물탱크의 종류에 따라 크게 독립탱크방식(Moss Type)과 멤브레인방식(Membrane Type)으로 나누어 진다. 본 논문에서는 선박의 주요치수를 연속적으로 변화시킬 수 있는 멤브레인형의 액화천연가스 운반선에 대한 설계모델을 구성하였고, 설계변수는 선박의 길이(LBP), 폭(B), 깊이(D), 훌수(T), 방형비척계수(Cb) 및 선속(SPEED) 등 6개로 하였다.

설계모델은 크게 조선공학적 기술 계산 부분과 경제성 계산 부분으로 구성되어 있다. 기술 계산 부분은 저항 및 추진성능, 주기관 선정, 길이방향의 구획분할, 경하중량, 화물창의 중앙단면형상 결정, 화물창 용적, 건현 등을 추정하거나 계산하는 모듈들로 이루어져 있으며, 경제성 계산 부분은 자재비, 인건비, 운항비를 추정하는 모듈로 이루어져 있다. 설계모델에 사용된 주요 성능 추정방법은 부록에 나타내었다.

#### 3.2 목적함수

최적화문제에서 최적화의 판단기준으로 사용되는

목적함수는 문제의 종류에 따라 달라진다. 선박의 초기설계에서 목적함수가 하나인 경우에는 경제성평가 기준인 RFR이나 NPV(Net Present Value)가 일반적으로 사용된다. 본 논문에서는 다목적함수 최적화기법을 적용하여 두개의 목적함수를 사용하였다. 조선소의 입장만을 고려한 최소건조비와 운항의 효율성을 위한 최소운항비를 목적함수로 사용하였다. RFR은 최소건조비와 최소운항비 계산시에 종속함수로 취급하여 그 값을 계산하였다.

### 3.2.1 최소건조비

선박의 건조비를 초기단계에서 정확하게 추정하는 것은 매우 어려운 일이다. 건조비에 대한 자료가 조선소의 영업적 차원에서 공개되지 않고 있기 때문에 최근의 자료를 입수하는 것이 쉽지 않다. Watson과 Carreyette가 실적선의 자료를 통계해석하여 일반상선의 건조비 추정식을 발표한 바 있으나 액화천연가스 운반선에 적용하기가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 액화천연가스 운반선의 건조 실적선 자료를 이용하여 건조비를 추정하는 방법을 사용하였다. 즉, 설계선과 유사한 크기의 실적선 자료를 근간으로하여, 설계선에 대한 재료비, 공수 및 공임 등에 대한 수정계수를 도출하여 사용하였다.

### 3.2.2 최소운항비

연간 운항비는 선박의 운항 일정에 직접 관련되는 연료비, 항비 및 하역비 등과 같은 변동비와 선원비, 보험비, 수리 유지비 등의 고정비로 이루어 진다.

### 3.2.3 Required Freight Rate

RFR은 선박을 일년간 운용하는데 소요되는 경비를 연간 운반 화물량으로 나눈것으로서 RFR이 작을수록 경제성이 우수한 선박이다. 즉, 선박의 연간 운항비와 선박의 가격이 낮으며 많은 화물을 운반할 수 있는 선박은 RFR이 낮아지게 된다. RFR의 물리적인 의미는 화물의 단위 톤당(혹은 단위 용적) 운반경비를 표시하는 것으로, 선주의 입장에서는 운임 결정에 있어 중요한 요소가 된다. 만약, 선박의 수명동안 자금흐름이 일정하다면 RFR은 다음식으로 표현된다.

$$\text{Required Freight Rate} = \frac{\text{Annual Operating Cost} + \text{CRF} \times \text{Ship's Initial Cost}}{\text{Annual Transported Cargo Quantity}}$$

여기서, CRF : Capital Recovery Factor

RFR의 계산목적이 상대적으로 우수한 경제성을 갖는 선박의 주요치수를 비교하는 것으로만 한정하면, RFR의 계산요소 가운데서 Ship's Initial Cost는 선박의 전조에 있어서 조선소의 이익이 반영되지 않은 전조비로 바꾸어도 문제가 되지 않는다. 따라서 RFR은 다음과 같이 된다.

$$\text{Required Freight Rate} = \frac{\text{Annual Operating Cost} + \text{CRF} \times \text{Building Cost}}{\text{Annual Transported Cargo Quantity}}$$

### 3.3 제한조건

선박의 주요치수에 대한 제한조건으로는 항로의 특성과 항구의 설비조건에 따른 것들로서 선박의 길이, 폭, 깊이, 흘수 등에 대한 것들과 조선공학적인 측면에서의 제한조건들이 있다. 조선공학적인 제한조건들에 대한 대표적인 것으로는 아르카메데스의 원리나 복원성, 구조강도 등등이 있으며, 주요치수에 대한 환경적인 제한조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{LBP} &\leq 270 \text{ m} \\ \text{Breadth} &\leq 45 \text{ m} \\ \text{Depth} &\leq 26.5 \text{ m} \\ \text{Draft} &\leq 11.5 \text{ m} \end{aligned}$$

## 4. 주요치수의 최적화

연간 건조비 CRF × Building Cost 만을 목적함수로 한 경우와 연간 운항비 만을 목적함수로 한 각각의 경우에 대한 최적설계와, 건조비와 운항비를 동시에 고려한 다목적함수 최적설계를 수행하였다.

### 4.1 건조비 최적화

경제성 기준을 이용한 최적설계에서, 목적함수를 최소건조비로 하는 것은 선주의 입장보다는 조선소의 입장을 고려한 것이다. 즉, 주어진 물동량을 운반하면서 건조비가 최소로 되는 선박의 주요치수와 선속을 구하게 된다. 이때 운항비와 Required Freight Rate는 종

Table 1 Results of the building cost optimization

LBP(m)	254.797	Cargo capacity( $\text{m}^3$ )	134,839
Breadth(m)	44.935	MCR(PS)	26,651
Depth(m)	26.436	Building cost(\$)	28,995,398
Draft(m)	11.383	Operating cost(\$)	18,055,776
Cb	0.7131	R.F.R(\$/Ton)	78.4186
Speed(Kts)	20.13		

속함수로 계산된다. 목적함수를 최소건조비로 하였을 경우에 대한 최적설계의 결과는 Table 1과 같다.

#### 4.2 운항비 최적화

목적함수를 최소운항비로 하는 것은 선박을 운항하는데 대한 경비를 최소화하는 것으로, 운항비를 구성하는 항목중에는 건조비의 함수로 표현되는 것이 있기 때문에 건조비에 의한 영향이 어느 정도 고려된다고 할수 있다. 운항비를 목적함수로 하였을 경우에 대한 최적설계의 결과는 Table 2와 같다.

Table 2 Results of the operating cost optimization

LBP(m)	269.084	Cargo capacity( $m^3$ )	144,861
Breadth(m)	44.908	MCR(PS)	21,704
Depth(m)	26.439	Building cost(\$)	29,383,946
Draft(m)	11.313	Operating cost(\$)	17,098,578
Cb	0.7249	R.F.R(\$/Ton)	77.4709
Speed(Kts)	18.55		

#### 4.3 다목적함수 최적화

목적함수를 건조비와 운항비로 하여, 목적함수가 2개인 경우에 대한 다목적함수 최적설계를 수행하였다. 먼저, 건조비와 운항비 각각 대하여 최적화를 수행한 후에, Pareto Optimal Set을 구하기 위하여 Constraint Method를 사용하여 60개의 구간에 대한 계산을 수행하였다.

Table 3과 Fig.1 ~ Fig.9에 다목적함수 최적화기법으로 얻어진 Pareto Optimal Set의 상세한 내용을 나타내었다.

Table 3 Detail data of the pareto optimal set for LNG carrier optimization

	LBP (m)	Breadth (m)	Depth (m)	Draft (m)	Cb	Speed (Kts)	Hold Capa. ( $m^3$ )	MCR (PS)	RFR (\$/Ton)	Operating cost(\$)	Building cost(\$)
Pareto1	269.08	44.91	26.44	11.31	0.7249	18.55	144,860	21,700	77.47	17,098,600	29,384,000
Pareto2	266.56	44.97	26.47	11.43	0.7156	18.78	143,280	22,080	77.36	17,146,800	29,267,600
Pareto3	265.00	44.99	26.48	11.43	0.7164	18.86	142,760	22,360	77.42	17,202,400	29,249,000
Pareto4	264.34	44.99	26.48	11.45	0.7148	18.94	142,220	22,560	77.46	17,240,200	29,233,700
Pareto5	264.34	44.99	26.47	11.45	0.7148	18.94	142,230	22,560	77.46	17,240,700	29,234,500
Pareto6	263.70	44.94	26.45	11.46	0.7134	19.07	141,400	22,890	77.56	17,311,200	29,227,600
Pareto7	262.77	44.96	26.47	11.46	0.7134	19.15	140,870	23,170	77.66	17,371,200	29,224,600
Pareto8	260.78	44.97	26.46	11.45	0.7136	19.31	139,830	23,730	77.85	17,489,500	29,218,500
Pareto9	254.80	44.94	26.44	11.38	0.7131	20.13	134,840	26,650	78.42	18,055,800	28,995,400

#### 4.4 결과 분석

Fig.1(a)에서 건조비를 최적화하여 얻은 건조비와 운항비를 최적화하였을때 계산된 건조비와의 차이보

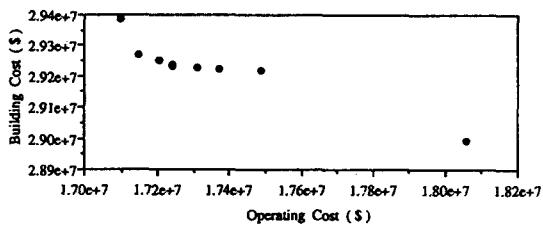


Fig. 1(a) Pareto optimal set of the LNG carrier design

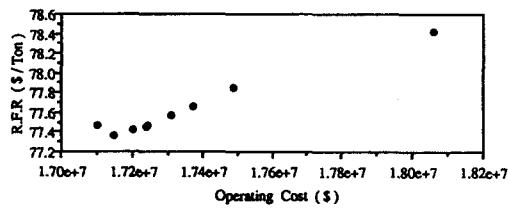


Fig. 1(b) Relationship between required freight rate and operating cost of the LNG carrier optimization

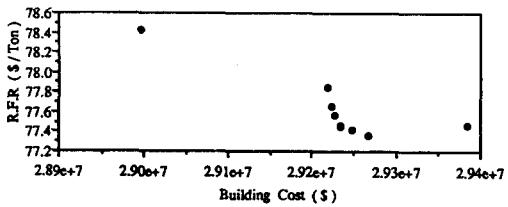


Fig. 1(c) Relationship between required freight rate and building cost of the LNG carrier optimization

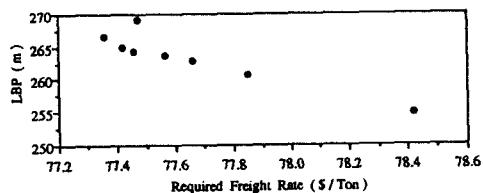


Fig. 2(a) Relationship between LBP and required freight Rate of the LNG carrier optimization

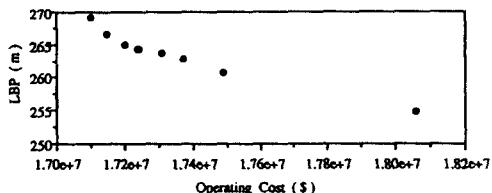


Fig. 2(b) Relationship between LBP and operating cost of the LNG carrier optimization

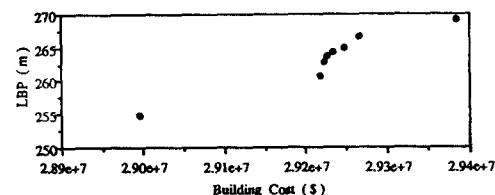


Fig. 2(c) Relationship between LBP and building cost of the LNG carrier optimization

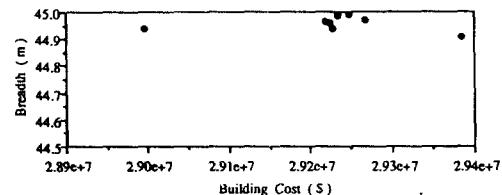


Fig. 3(c) Relationship between breadth and building cast of the LNG carrier optimization

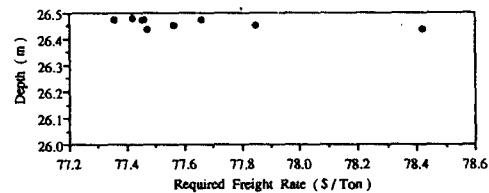


Fig. 4(a) Relationship between depth and required freight rate of the LNG carrier optimization

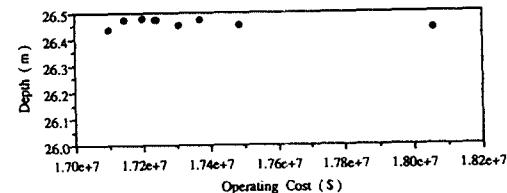


Fig. 4(b) Relationship between depth and operating cost of the LNG carrier optimization

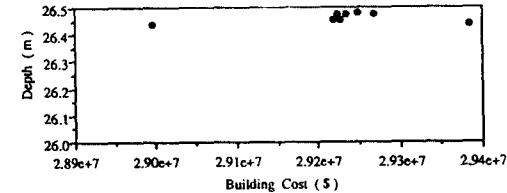


Fig. 4(c) Relationship between depth and building cost of the LNG carrier optimization

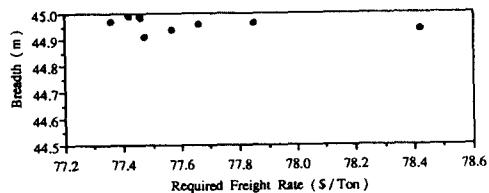


Fig. 3(a) Relationship between breadth and required freight rate of the LNG carrier optimization

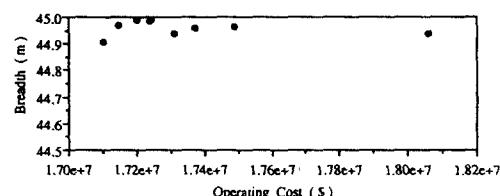


Fig. 3(b) Relationship between breadth and operating cost of the LNG carrier optimization

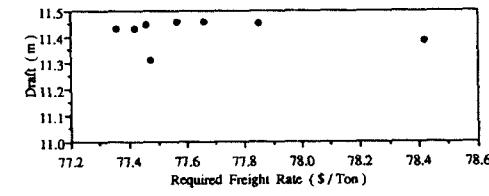


Fig. 5(a) Relationship between draft and required freight rate of the LNG carrier optimization

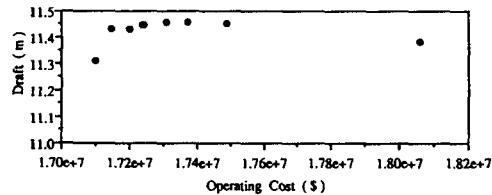


Fig. 5(b) Relationship between draft and operating cost of the LNG carrier optimization

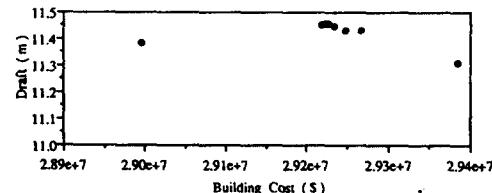


Fig. 5(c) Relationship between draft and building cost of the LNG carrier optimization

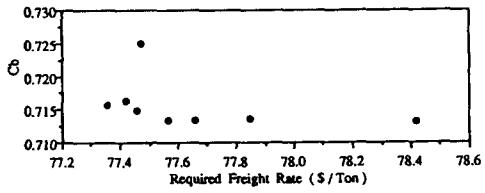


Fig. 6(a) Relationship between block coefficient and required freight rate of the LNG carrier optimization

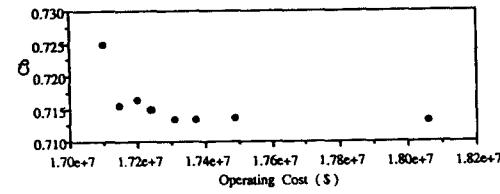


Fig. 6(b) Relationship between block coefficient and operating cost of the LNG carrier optimization

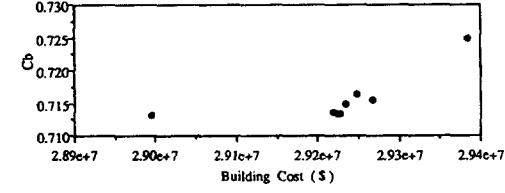


Fig. 6(c) Relationship between block coefficient and building cost of the LNG carrier optimization

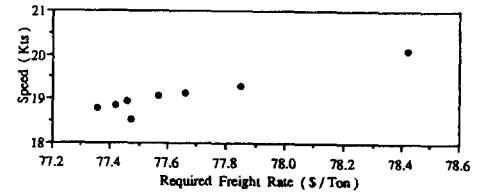


Fig. 7(a) Relationship between design speed and required freight rate of the LNG carrier optimization

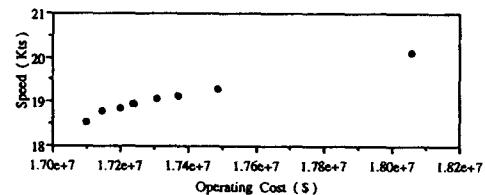


Fig. 7(b) Relationship between design speed and operating cost of the LNG carrier optimization

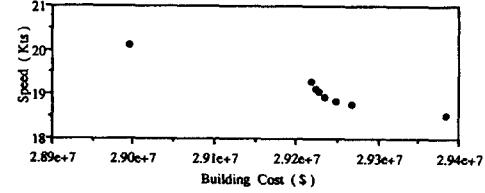


Fig. 7(c) Relationship between design speed and building cost of the LNG carrier optimization

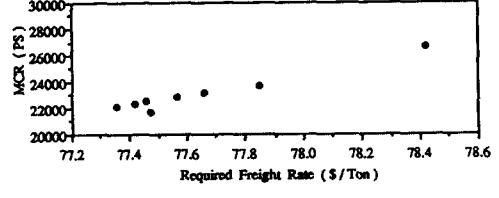


Fig. 8(a) Relationship between engine power and required freight rate of the LNG carrier optimization

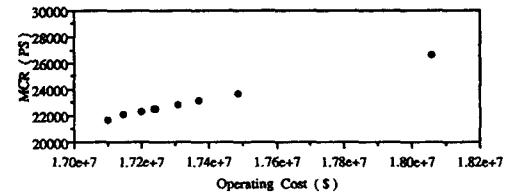


Fig. 8(b) Relationship between engine power and operating cost of the LNG carrier optimization

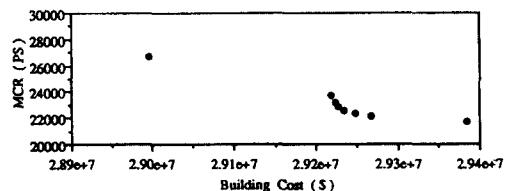


Fig. 8(c) Relationship between engine power and building cost of the LNG carrier optimization

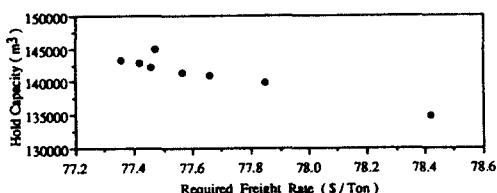


Fig. 9(a) Relationship between hold capacity and required freight rate of the LNG carrier optimization

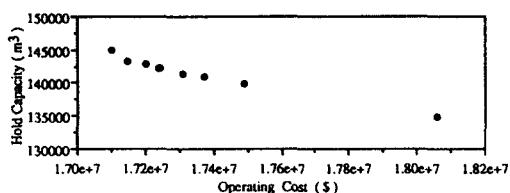


Fig. 9(b) Relationship between hold capacity and operating cost of the LNG carrier optimization

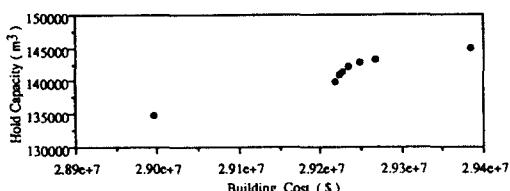


Fig. 9(c) Relationship between hold capacity and building cost of the LNG carrier optimization

다. 운항비를 최적화하여 얻은 운항비와 건조비를 최적화하였을 때 계산된 운항비의 차이가 상대적으로 크다. 이것은 액화천연가스 운반선이 고속이고 운항거리가 길기 때문에 건조비보다는 운항비의 비중이 보다 중요하다는 것을 의미한다. 이러한 영향이 RFR에 반영되어 낮은 RFR의 값을 갖는 점들이 운항비가 낮고 건조비가 높은 영역으로 편향되어 있는 것을 Fig. 1(b) 와 Fig. 1(c)에서 알 수 있다.

Fig. 2는 선박의 길이에 대한 영향을 나타낸 것이다. 운항비가 낮아질 수록 선박의 길이가 길어지는 것을 알 수 있다. 바꾸어 말하면 배수량이 크게 변화하지 않을 경우에, 선박의 길이가 길면 저항이 줄어들어 주기관 마력이 작아지고 운항비가 줄어 든다. 그러나 선박의 길이가 길어짐에 따라 건조비는 증가한다.

선박의 최적폭은 Fig. 3에서와 같이 최대 허용폭인 45m에 거의 근접한 44.9m - 45.0m 사이의 값을 가지며, 상대적으로 큰 변화가 없다.

Fig. 4에서 최적 깊이는 26.45m - 26.48m 사이의 값을 가진다. 이러한 값은 항구의 설비에 의한 최대 허용 깊이 26.5m와 거의 같은 값이라 볼 수 있다.

Fig. 5는 최적 홀수의 변화 경향을 나타낸 것이다. 대부분이 항로에 있어서 허용 최대 홀수인 11.5m에 근접하고 있다.

따라서 선박의 폭, 깊이, 홀수의 최적점은 항로조건의 최대 허용치에 근접하는 것을 알 수 있으며, 항로 조건에 따라서 선박의 주요치수가 큰 영향을 받는 결과는 일반적인 개념과 일치하고 있다.

방형비척계수(Cb)는 Fig. 6에서와 같이 0.713 - 0.717 부근의 값을 가진다. Cb는 건조비와 운항비의 변화에 따라 큰 영향을 받지 않으며 고속선의 형상 특성에 지배된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 선박의 운항 속력에 대한 결과이다. 선속이 낮을수록 운항비는 줄어 들고 선박이 대형화되어 건조비는 증가한다. 선속이 변화함에 운항비는 상당히 큰 폭으로 변화하고 있으나 건조비의 변화량은 상대적으로 적다. 이러한 경향은 전체적인 경제성의 관점으로 볼 때 건조비의 최적화보다는 운항비의 최적화가 보다 중요하다는 것을 의미한다. 그런데 운항비의 많은 부분을 연료비가 차지하므로, 결국은 선속을 최적화하는 관점에서 주요치수를 결정하는 것이 필요하게 된다. Fig. 8의 주기관 마력에 대한 영향은 선속과 같은 경향을 가진다.

선박의 화물창용적은 Fig. 9와 같이 화물창용적이 커질수록 건조비는 증가하고 운항비는 감소한다. 즉, 주어진 물동량을 운반할 경우에 선박이 커지면 선속이 낮아도 되므로 운항비는 감소하게 된다. 따라서 물동량을 제한할 경우에는 화물창용적과 선속은 반비례의 관계가 성립한다.

이상의 결과를 요약하면, 선박의 길이가 길어질수록 운항비 측면에서는 유리하나 건조비 측면에서는 불리하다. 선폭과 깊이 및 홀수는 항로조건에 큰 영향을 받으며, 선속과 화물창용적은 주어진 물동량을 운반하기 위한 상관관계에 의하여 결정된다. 반면에 방형비척계

수는 상대적으로 큰 변화가 없었다. 최적 RFR은 운항비가 낮은 영역으로 치우쳐져 있는데, 이것은 선박의 속력이 빠르고 항로가 긴 경우에는 운항비가 전체 경제성에 지배적인 인자가 됨을 의미한다. 따라서 이러한 경우에는 상대적으로 건조비보다 운항비를 보다 정확하게 추정하여야 한다. 그런데 운항비의 많은 부분을 연료비가 차지하고 있고, 변동비(Voyage Cost)를 제외한 고정비(Fixed Cost)도 건조비의 함수로 추정되는 것이 많기 때문에 결국은 연료비를 정확하게 추정하여야 한다.

Pareto Optimal Set에서 어떤 것을 최종적으로 선택할 것인가는 설계자의 선호도에 따라 많은 영향을 받는다. 그러나 일반적으로 하나의 목적함수가 크게 나빠지지 않고 다른 목적함수 값이 많이 향상된다면, 즉 하나의 목적함수 값이 나빠지는 비율보다 다른 목

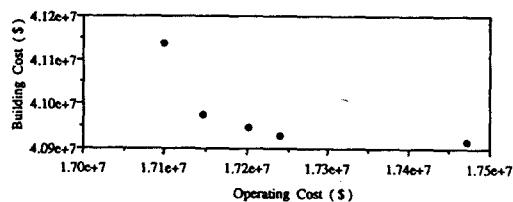


Fig. 10(a) Pareto optimal set of the LNG carrier optimization with higher building cost

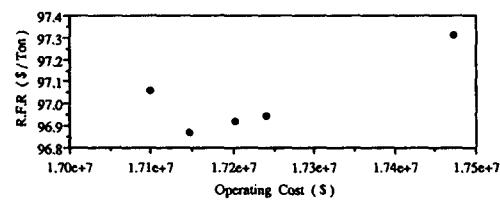


Fig. 10(b) Relationship between required freight rate and operating cost of LNG carrier optimization with higher building cost

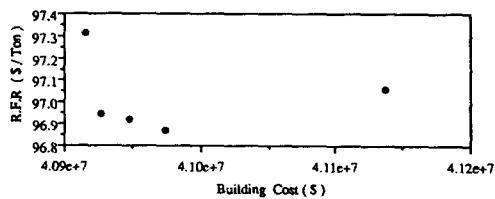


Fig. 10(c) Relationship between required freight rate and building cost of LNG carrier optimization with higher building cost

적합수 값이 좋아지는 비율이 상대적으로 크다면 그러한 점을 선택하는 것이 합리적이다. 본 연구에서는 Table 3의 Pareto2가 최적의 선속과 주요치수가 된다. Pareto2는 다른 최적점에 비하여 두개의 목적함수 즉, 연간운항비와 건조비가 서로 증가하는 비율보다 감소하는 비율이 크다.

운항비와 연료비의 상대적인 중요도를 검토하기 위하여, 건조비를 인위적으로 1.4배 증가시켜 최적화를 수행하였고, 즉 민감도 조사 (Sensitivity Analysis)를 수행하였고 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서 최적 RFR을 갖는 점들이 Fig. 1과 같이 운항비가 낮은 한쪽의 영역으로 치우치지 않고, 각각의 목적함수의 중간 영역에 속하여 있는 것을 알 수 있다. 이 경우에는 즉, 건조비가 현재보다 높아 졌을 경우에는 운항비 뿐만 아니라 건조비도 동시에 중요한 인자가 됨을 의미한다.

## 5. 결 론

선박의 운항경제성 향상을 위한 선속 및 주요치수에 관한 최적화를 액화천연가스 운반선을 대상으로 수행하였다. 종래에 사용하던 단일 목적함수 최적화의 한계를 벗어나 선박의 운항비와 건조비를 각각의 목적함수로 하는 다목적함수 최적화를 수행하여 다음의 결과를 얻었다.

- 1) 선박의 속력이 빠르고 항로가 긴 경우에는 운항비가 전체 경제성에 지배적인 인자가 되므로 건조비보다 운항비를 보다 정확하게 추정하여야 한다. 그런데 운항비의 많은 부분을 연료비가 차지하기 때문에 결국은 연료비를 정확하게 추정하여야 한다. 따라서 본 논문에서 대상으로 한 한국-카타르 항로의 액화천연가스 운반선의 경우에는 정확한 운항비만의 추정으로도 운항경제성이 높은 선박의 특성을 얻는 것이 가능하다. 한편, 선박의 속력이 느리고 항로가 짧은 경우에는 선박의 건조비가 지배적인 인자가 되므로 설계 모델의 구축시에 건조비를 보다 정확하게 추정하는 것이 필요하며, 건조비만을 고려하여도 운항경제성이 높은 선박의 주요치수를 얻는 것이 가능하다.
- 2) 다목적함수 최적화기법을 이용하여 얻은 여러개의 최적 선속과 주요치수 가운데서 어떤 것을 선택할 것인가 하는 것은 조선소나 선주 및 해운회사의 입장에 따라 달라질 수 있지만, 일반적인 공학의 관점에서는 Table 3의 Pareto2가 최적

의 선속과 주요치수가 된다. Pareto2는 다른 최적점에 비하여 두개의 목적함수 즉, 연간운항비와 건조비가 서로 증가하는 비율보다 감소하는 비율이 크다.

### 부록 : 설계모델의 주요성능 추정방법

#### 1. 주기관 마력추정

Taniguchi의 선형가분 원리를 바탕으로 선박의 마력을 추정하는 방법을 사용하였다[10,11,12]. 형상계수, 조파저항, 반류계수 및 추력감소계수 등의 추정식은 모형시험 자료를 통계해석하여 얻은 것과 경험식을 사용하였고 프로펠러 효율은 MAU 시리즈[13]를 사용하여 계산하였다.

#### 2. 주기관 선정

추정된 마력과 프로펠러의 회전수에 해당하는 증기터이빈이 있다고 가정하였다. 따라서 디젤 엔진과 같이 최적 연료소모율을 계산하기 위하여 엔진의 부하ダイ아그램(Load Diagram)에서 최적점을 찾아 디레이팅(Derating)하는 방법을 사용하지 않았다. 실적선 자료를 참고하여 주기관의 연속 최대 출력(MCR)과 상용 최대 출력(NCR)을 같게 하였다.

#### 3. 구획분할

길이 방향의 구획을 선미부, 기관실부, 화물창부 및 선수부의 4개부분으로 분할하여 추정한다. 선미부의 길이는 실적선의 값을 사용한다. 기관실의 길이는 주기관 마력의 함수로 추정하고, 선수부의 길이는 선급규칙으로부터 계산된다. 화물창부의 길이는 전체 길이와 선미부, 기관실부 및 선수부의 길이로부터 계산된다.

#### 4. 중량추정

설계초기단계에서 선체중량 추정방법은 크게 선박의 주요치수에 의한 추정방법[14,15,16]과 유사실적선자료를 이용한 추정방법[17,18]으로 나눌수 있다. 액화천연가스 운반선은 일반상선에 비하여 실적선이 많지 않기 때문에 주요치수에 의한 추정식은 개발되거나 발표되지 않고 있다. 따라서 상대적으로 주요치수에 의한 방법보다 정확성이 높은 유사실적선의 자료를 이용하는 LR의 방법과 DnV의 방법을 이용하여 추정한 뒤에, 각각 추정된 값의 평균을 사용하였다.

의장품의 중량은 기관의장, 전기의장 및 선체의장으로 분리하여, 유사실적선 자료를 이용한 추정방법을

사용하였다. 각각의 추정식에 대한 수정계수를 실적선의 중량자료를 이용하여 계산하고, 이를 설계선의 중량에 추정시에 반영하였다.

#### 5. 중앙 화물창단면 형상 결정

실적선의 중앙단면 형상자료와 실적선 및 설계선의 주요치수를 기초로한 수정계수를 사용하여, 설계선의 중앙단면 형상의 치수를 결정한다.

#### 6. 화물창 및 밸라스트 탱크 용적

중앙단면 형상자료와 단열재의 두께를 고려하여 화물창 영역의 단면적을 계산하고, 화물창의 길이와 실적선으로부터 계산한 수정계수를 사용하여 화물창의 용적을 계산한다.

화물창 영역의 밸라스트 용적과 선수미부의 밸라스트 용적으로 구분하여 계산한다. 화물창 영역의 밸라스트 용적은 중앙단면 형상자료에서 밸라스트 탱크의 단면적을 계산하여 화물창의 길이와 실적선의 수정계수를 사용하여 구한다.

#### 7. 건조비

선박을 구성하는 요소를 크게 9개의 그룹으로 나누어 재료비를 추정한다. 각 그룹에 대한 공수(Man-Hour)를 실적선의 자료를 바탕으로 추정하고, 각각의 공수에 대한 공임(Labour Cost)을 고려하여 건조에 필요한 전체 인건비를 추정한다. 재료비와 인건비에 설계비와 간접비를 고려하여 선박의 건조비를 추정한다. 재료비는 내자와 외자로 나누어서 추정한 후에 달러(\$)로 표시된다.

건조비는 아래의 식으로 표시된다.

$$\text{Building Cost} = \text{Material Cost} + \text{Indirect Material Cost} + \text{Production Labour Cost} + \text{Design Labour Cost} + \text{Direct Expense}$$

9개의 그룹은 다음과 같다.

- 1) 선체부 : 외판, 격벽, 이중저 및 각종 보강재를 비롯한 선체
- 2) 페인트 : 화물창과 밸라스트 탱크의 도장
- 3) 화물취급기계 : 화물을 위한 파이프, 크레인, 등 의 의장품
- 4) 갑판기계 : 갑판 기기류
- 5) 거주구 : 선실 의장품
- 6) 추진장치 : 주기관, 프로펠러, 보일러 등의 기관 의장품

- 7) 전기장비 : 케이블, 발전기 등의 전기 의장품
- 8) 항해장비 : 항해 장비
- 9) 단열재 : LNG의 기화를 방지하기 위한 단열재

#### 8 운항비

운항비는 다음의 항목으로 구성되고, 운항선사의 운항자료와 선속 및 운항거리에 기초하여 추정하였다.

$$\text{Operating Cost} = \text{Heavy Oil Cost} + \text{LNG Cost as Fuel} + \\ \text{Crew Cost} + \text{Port Cost} + \text{Insurance Fee} + \\ \text{Maintenance Cost} + \text{Repair Cost} + \\ \text{Loading and Unloading Cost}$$

선박의 운항비 계산에 사용한 자료는 다음과 같다.

- LNG 비중 : 0.454
- 연간 물동량 : 600,000 톤
- 적재율 : 0.98
- 왕복 항해거리 : 13,000 N.M
- 연간 운항 일수 : 346 일
- 항구 정박 일수 : 항차당 3.5 일
- LNG의 기화율(Boil-Off Rate)
  - 만재상태 : 0.15 % / Day
  - 발라스트상태 : 0.1 % / Day
- 병크 C의 열량 : 498 KW / Ton
- LNG의 열량 : 248.7 KW / m<sup>3</sup>
- 발라스트상태의 선속 : 만재상태의 선속 + 0.5 Kts
- 선박의 수명 : 25 년
- 병크 C의 가격 : 100 \$ / Ton
- LNG의 가격 : 143 \$ / Ton
- 연간 운송여유 : 15 %
- 해상여유 : 21 %
- 연료 소비율 (SFOC) : 292 g / KWh

#### 참 고 문 헌

- [1] 김수영, "경제성을 고려한 선박 주요치수의 결정", 제31권 2호, 1994, 대한조선학회지
- [2] 이규열, "선박초기설계 단계에서의 최적설계모델", 제31권 2호, 1994, 대한조선학회지
- [3] Koski J., "Multicriteria Optimization in Structural Design : State of the Art", 1991, *Advances in Design Automation*, American Society of Mechanical Engineers
- [4] Bradley S.R., Agogino A.M., "Computer-Assisted Catalog Selection with Multiple Objectives", 1993, *Design Theory and Methodology*, American Society of Mechanical Engineers
- [5] Arora J.S., "Introduction to Optimum Design", 1989, McGraw Hill Book Company, Inc.
- [6] Cohon J.L., Marks D.H., "A Review and Evaluation of Multiobjective Programming Techniques", Vol. 11, No. 2, April 1975, *Water Resources Research*
- [7] Balachandran M., Gero J.S., "A Comparison of Three Methods for Generating the Pareto Optimal Set", Vol. 7, 1984, *Engineering Optimization*
- [8] 김기성, 염항섭, "다목적함수 최적설계기법", Vol. 30, No. 2, June 1993, 대한조선학회지
- [9] 이동곤, 정성재, 김수영, "유전자 알고리즘과 직접탐색법의 결합에 의한 효율적인 최적화방법에 관한 연구", Vol.31 No. 3, April 1994, 대한조선학회 논문집
- [10] Taniguchi K., Watanabe K., Tamura K., "On a New Method of Designing Hull Form of Large Full Ship, based on the Separability Principle of Ship Form", Vol. 120, 1966, 일본조선학회 논문집
- [11] Mori M., "Hull Form Design Note-2", Vol. 46, Apr. 1993, 船의 과학
- [12] Mori M., "Hull Form Design Note-4", Vol. 46, June 1993, 船의 과학
- [13] Yazaki A., Takahashi M., Uemori H., "Extension of the Design Charts of AU-Type Four and AUw-Type Six Bladed Propeller Series to High Pitch Ratio", No. 131, June 1972, 일본조선학회 논문집
- [14] Harvald S. A., Jensen J. J., "Steel Weight Estimation for Ships", 1992, 5th International Symposium on Practical Design of Ship and Mobil Units
- [15] Krappinger O., "Great Lakes Ore-Carrier Economics and Preliminary Design", Apr. 1967, *Marine Technology*, Society of Naval Architects and Marine Engineers of America

- [16] Benford H., "The Practical Application of Economics to Merchant Ship Design", Jan. 1967, *Marine Technology*, Society of Naval Architects and Marine Engineers of America
- [17] Sabit A. S., "A Note on Light Ship Weight Estimation", 1978, *DnV Technical Report*
- [18] Hagen E., "High Strength Steel in Oil Tanker and Bulk/Ore Carriers from a Weight Point of View", 1970, *DnV Information*