

論 文

大韓造船學會誌
第15卷 第4號 1978年 12月
Journal of the Society of
Naval Architects of Korea
Vol.15, No.4, December 1978

船舶基本設計過程에서 經濟性檢討와 最適化技法의 應用

金 在 瑾* · 韓 淳 興**

Economic Optimization in Preliminary Ship Design

by

Z.K. Kim, S.H. Han

Abstract

The preliminary ship design step is made into a non-linear programming (NLP) problem. And using SUMT-exterior method and Hook Jeeves pattern search, the optimum ship characteristics are determined for the case where the ship is built in Korea and is operated by Koreans. Three programs for bulk carrier, tanker, and container ship are constructed and several sensitivity tests are performed. The result has little differences from the results of the other papers, but for high interest rate of return, slightly larger and faster ship is superior, and for low labour costs, slightly smaller and slower ship is superior.

1. 序 論

船舶設計過程에서 經濟性 工學을 이용하여 經濟性 檢討가 수행되기 시작한 것은 1950年代 후반부터이며 한편으로 設計에 수반하는 諸 計算들이 프로그래밍화되어 사용되어 왔다. 1960年代에 들어서면서 부터, 그때까지는 design spiral을 따라 경험많은 設計者에 依存하며, 많은 시간과 人力을 要하였던 基本設計過程을, 電算化하여 高度의 學問 知識을 이용하려는 노력이 계속되어 왔다[1~5]. 그 方法으로는 parametric study [5], random search technique [1] 등이 사용되다가 Nowacki 등이 [2] 非線型計劃 問題化하여 큰 進展을 보았다.

1.1. 最適化 理論

(1) 非線型計劃(non-Linear Programming: NLP)

Mathematical Programming이라고도 하는데, 다음과 같은 경우에서 함수 f 가 最小값이 되는, n 次元 공간상의 점(벡터) $X \in R^n$ 을 찾는 問題를 非線型計劃이라고 한다. [6]

Minimize $f(x)$

Subject to $g(x) \leq 0$

接 受 : 1978年 12月 10日

* 正會員 : 서울大學校 工科大學

** " : 서울大學校 大學院

$$h(x) = 0$$

여기서 $f(x)$ 를 目的函數(objective function)라하며 $x(x_1, \dots, x_n)$ 를 설계변수(design variable)

$$g(x) = \begin{bmatrix} g_1(x) \\ \vdots \\ g_m(x) \end{bmatrix} \text{를 inequality constraint}$$

$$h(x) = \begin{bmatrix} h_1(x) \\ \vdots \\ h_p(x) \end{bmatrix} \text{를 equality constraint라 한다.}$$

(2) 선박기본설계 과정의 비선형계획(NLP) 問題化.

주어진 모든 제한조건을 만족하면서 최고의 경제성을 보장하는 선박의 주요치수를 결정하는 기본설계과정은 다음과 같이 NLP問題化 할수있다.

목적함수 : 군함설계에서는 性能(performance)이 추구되겠지만 商船에서는 무엇보다도 收益性이 추구되겠다.

설계변수 : 기본설계과정에서는 배의 길이, 폭, 깊이, 흘수, C_B , 속도등이 결정되므로 L, B, D, T, C_B, V 등을 설계변수로 한다.

Constraint: 船主 요구조건(DWT, 속도등...)

安全性(복원성능, 진현, 선체강도...)

航路制約(항구, 운하의 길이, 폭...)

而 充 裕 能 力을 위해 많은 制約條件이 따른다

물론 이러한 것들이 定量的으로 설계변수에 의해 表現 되어야 하겠다.

예를들면

$$\begin{aligned} & \text{Minimize RFR (L,B,D,C}_B\text{,V...)} \\ & \text{Subject to DWT (L,B,D...)} \geq \text{DWT required} \\ & \text{GM (L,B,D...)} \geq \text{GMmin} \\ & \text{FB(L,B,D...)} \geq \text{FBmin} \\ & 0.6 \leq C_B \leq 0.85 \\ & L/D \leq 14 \end{aligned}$$

(3) 解法

여러가지 방법 [6,7]이 소개되고 있는데, 그중 gradient를 이용하는 방법들이 효율적이나, 선박기본설계 문제에서는 목적함수와 constraint의 gradient를 구하기 어려워 함수값을 직접 이용하는 直接法을 사용한다. 본 논문에서는 Nowacki [4]가 사용한 방법을 따랐다. 즉, SUMT(sequential unconstrained minimization technique)中的 exterior method를 이용하여 unconstained 문제화한 後에, adaptive search의 일종인 Hook and Jeeves pattern search를 이용하여 最適點을 구하였다.

1.2 船舶의 經濟性

(1) 경제성 基準 (economic criteria) [9]

어떠한 배를 선택할 것인가를 판단하는 기준으로, 歲入(revenue)이 豫測가능한지의 여부에 의해 크게 구분지어진다. 同盟運航船의 경우엔 運貨이 協約에 의해 결정되므로 세입이 예측가능하여, 본 논문에서는 콘테이너船에 대해 最大利潤率(maximum yield)을 기준으로 사용하였으며, 不定期船인 散積船과 油槽船에 대해서는 세입예측 불가능時에 사용되는 RFR을 이용하였다. 그것을 간단히 설명하면 다음과 같다.

가. 최대 이윤율 : 투자한 돈에 대한 최대이윤율.

나. RFR(required freight rate): 船主가 목표로 하는 이윤을 낼수있는 최소한의 要求運賃으로, 船價의 年當分割金(감가상각비), 利潤, 年間運航費들의 합을 年間 總運搬 貨物屯數로 나눈 값이다.

$$RFR = \frac{AAC}{C} = \frac{CRF \times P + AOC}{C}$$

- C: annual transport capacity
- AAC: average annual cost
- CRF: capital recovery factor
- P: total initial investment
- AOC: annual operating cost

그런데 이 기준들은 NLP문제의 목적함수가 되므로 最適船 결정에 가장 중요한 因子이다. 또한, Lamb의 意見대로[12] 운항업자마다 추구하는 바가 狀況에 따

라 다를 것이므로(charter rate, transportation contract cost), 어느것을 경제성 기준으로 삼을 것인가는 운항업자의 많은 검토가 요구된다.

(2) 原價計算(cost estimation)

Benford [8]의 분류대로 建造費, 運航費의 各細部項目을 材料費, 人件費, 間接費로 나누었다.

2. 韓國의 造船, 海運狀況에의 적용

國家마다 金利, 稅率이 다르고, 또한 船主마다 貸付金 比率등의 財務構造가 다를것이다. 이에 韓國建造, 韓國人運航時에 最適船이 어떻게 결정되었는가를 살펴 보았는데, 우리나라의 상황은 대략 낮은 임금, 높은 借入金 金利, 수입의존에 의한 높은 材料費로 나타난다.

2.1 計劃造船의 經濟狀況

1976年 2월에 발표된 "海運, 造船 綜合 育成方案"으로 비롯된 우리나라의 계획조선은 현재 제 4차 계획조선의 실수요자가 선정되고있다. 第 2次 계획조선 實施方案 [13]에 의하면 그 내용은 다음과 같다.

가. 自己資金

總 船價의 10%(full container 船은 8%)

나. 內融資

總 船價의 50%(full container 船은 52%)
金利... 9%

다. 外融資

總 船價의 40%
金利...LIBOR(London Interbank Offered Rate)
+2.5%

2.2 인플레이와 借入金의 영향

현재 우리나라는 매우 높은 인플레이션이 계속되고 있으며, 계획조선의 경우에 차입금의 비율 또한 높아, 그 영향이 크리라 생각되나, 실제로 外航船운항업자는 租稅감면의 혜택을 받으므로, Benford [9,10]에 따라 그 영향을 無視할수 있다. 稅金이 賦課되는 경우에는 depreciation allowance에 대해 不變價格을 적용하지 않으므로 실제 稅金率(effective tax rate)이 인플레이에 따라 증가하므로, 利潤率이 줄어들게 된다. 이때 Accelerated depreciation을 적용하면 그 영향이 완화될수 있다. 한편, 세금의 부과는 큰 初期投資와 운항경비감소로 나타나는 新技術 도입에 의한 新造船을 불리하게 하며, 借入金은 이 新造船을 유리하게 한다. 이렇게 볼 때 현재의 여러 特惠措置는 新造船을 적극 권장하고 있는 것이다.

3. 造船技術上的의 問題

3.1. 馬力 推定

(1) 主機 및 推進機 選擇

主機선택(diesel, steam, gas turbine), 추진기선택(可變, 固定피치) (雙, 單추진기)등이 最適化 過程에 포함되는 것이 바람직하겠으나, 본 논문에서는 direct drive slow diesel engine을 撒積船과 콘테이너船에 사용하였고, 유조선에는 steam turbine을 사용하는 것으로 했으며, 모두 固定피치인 單推進機船인 것으로 했다. slow diesel과 steam turbine을 간단히 비교해 보면 다음과 같다. [14]

diesel engine

연료소비율이 약간 낮다.

신뢰도가 높아 수리·유지비가 적게 든다.

한국, 일본에서 보편적으로 사용된다.

중량과 부피를 많이 차지한다.

약 5만馬力까지 낼수있다.

steam turbine

大馬力을 얻을수 있다.

Gear를 이용하여 最適 프로펠러 回轉速度를 얻을수 있다.

補機등에 steam을 사용해야 하는 유조선에 적당하다 減速 運航時에 특히 연료소비율이 높다.

정박시나 비상용으로 디젤 발전기를 따로 설치해야 한다.

可變피치프로펠러를 사용하면 港口內에서 선박 조종시간이 줄어들며 기관의 수리, 유지비가 감소하나, 초기 투자비가 증가하였다. [3]

쌍추진기는 투자비가 20%정도 더들며 추진효율이單推進機보다 7%정도 낮으므로, 출력제한에 의한 추진기 지름의 감소나, 大馬力등에 의한 過負荷로 cavitation, 진동문제가 일어나지 않는한, 單推進機가 유리하다. [15]

(2) 馬力추정

선박의 線圖가 완성되기 이전에, 주요치수만이 결정된 상태에서 馬力을 추정하는 것은 많은 가정이 포함되며 거칠은 계산이 되겠다. 현재 사용되는 방법은 크게 세 종류로 나눌수 있다. [16]

가. 자료를 그래프등으로 근사시켜 얻은 경험식들에 의한 추정.

나. 모형선 시험자료, 실선 시운전 자료를 모아 data retrieval의 방법을 통해 basis ship을 얻고 그것으로부터 근사시키는 방법.

다. methodical series의 자료를 통계학적으로 처리하는 회귀해석법(regression analysis)을 이용하는 방법.

본 논문에서는 "가"에 속하는 다음의 방법들을 사용

하였다.

Fisher [3]가 제시한 것은 점성저항계수, 양여저항계수를 따로 계산한 것으로 낮은 Froude數에서 잘 맞으므로 유조선과 撒積船에 이용하였고, Kupras [5]가 제시한 것은 boundary speed로 부터 저항을 산출하는 것으로 open water propeller efficiency, hull efficiency, trial prediction factor가 따로 계산되는 데, 적용범위가 넓으므로(~30kts) 콘테이너船에 이용하였다.

중추진효율은 Lamb[12]이 제시한

$$QPC=3.6 C_B (1-0.9C_B)-V/(4.8C_B \sqrt{L})$$

을 사용하였으며, sea margin은 운항계획 遵守의 重要度에 따라(특히 定期船의 경우) 船主와 상의하여 결정하여야 하겠지만 Cameron [12]이 제시한

$$SM=1.075+0.1667 V/\sqrt{L}$$

을 사용하였다.

3.2 安全 性能

(1) 乾舷과 GM

건현계산은 국제 반재흡수선 조약에 따라 Fisher[3]가 提示한 것을 사용하였으며, GM계산은 BM,KB,KG를 따로 계산하여 GM=BM+KB-KG를 이용한 Fisher [3]의 방법과, Nowacki[2]가 제시한

$$GM=0.515T+0.805 \frac{B^2}{T} \left(1-\frac{3.5+L/90}{100}\right) -0.525D$$

을 들다 사용해 보았다.

(2) Constraint

흡수는 撒積船에 대해 13m

유조선에 대해 50ft의 제한을 두었고,

GM은 撒積船에 대해 船幅의 5%

유조선에 대해 船幅의 6% 이상의 제한 두었다.

그밖의 것은 선체강도, 저항추정 유효 범위, rolling 주기 등에 대해 Nowacki [4]가 제시한 다음의 constraint를 주었다.

$$0.45 \leq V/\sqrt{L} \leq 0.9$$

$$2.5 \leq B/T \leq 3.5$$

$$6.25 \leq L/B \leq 7.75$$

$$14 \geq L/D$$

$$0.64 \leq C_B \leq 0.8$$

$$T_{roll} \leq 10초$$

$$FB \geq \text{minimum summer freeboard}$$

콘테이너船은 Miller의 논문[17]을 그대로 NLP問題化했으므로 건현과 GM의 검토가 생략되었으며

$$5.7 \leq C_B \leq 6.3$$

年間 콘테이너 物動量=10만개

의 constraint를 주었다. 그런데 목적함수가 RFR인 경우에는, 最適船의 진현과 GM은 충분히 크게 되므로 그 검토를 생략할수 있고, 따라서 계산량을 줄일 수있다.

3.3 航次計算

Kuvas [18]가 제시한 것을 따르면 年間 運搬貨物量 C는

$$C=2 \text{ CAP} \cdot \text{FL} \cdot \text{VOY}$$

2: 往復

CAP: 선박의 최대 화물적재량

FL: load factor

VOY: 年間航次數

로 나타나는데 년간항차수는 다음과 같이 계산된다.

$$\text{VOY} = \frac{365 - \text{Toff}}{T}$$

Toff: 年間 休船日數

T: 1항차당 所要日數

$$T = \text{STIME} + \text{PTIME}$$

STIME: 1항차당 항해일수

PTIME: 1항차당 정박일수

$$\text{STIME} = \frac{\text{VOYL}}{V \cdot 24}$$

VOYL: 항해거리(왕복)

V: service speed

$$\text{PTIME} = 2 \cdot (2 \cdot \text{CAP} \cdot \text{FL} / \text{LR} + \text{Twait})$$

2: 2항구 및 loading과 Unloading

LR: 하역능력 噸/日 또는 個/日

Twait: 入港 待機時間

하역능력은 충분히 크다고 가정했는데, 컨테이너船에 대해서는 부산항 컨테이너터미널의 처리능력 [19]

$$20 \text{ 個/시간} \times 20 \text{ 시간/日} \times 2 \text{ 크레인} = 800 \text{ 個/日}$$

을 이용하였다. 한편 撤積船과 유조선에 대해서는 ballast상태의 속도를 만재상태의 1.15배로 하였고, 惡天

候에 대해 항해일수(STIME)에 8%의 margin을 주었다. [3]

4. 프로그램의 構成

船舶은 운항업자의 입장에서 보면 全운항시스템의 主要 副시스템이므로, 全시스템의 最適化가 先行되거나 同時에 행해져야 하겠으나 [17], 본 논문에서는 선박의 최적화에 국한하였다. (특히 컨테이너船의 경우에는 컨테이너 자체, 육상 운반수단, 컨테이너 터미널 등이 더 큰 資本費를 구성한다) 이렇게 하여 撤積船, 油槽船, 컨테이너船에 대해 각각 프로그램을 만들어 보았다.

5. 計算結果 및 考察

(1) Sensitivity test

변수의 변화에 목적함수가 얼마나 민감하게 변하는가를 조사하는 것을 sensitivity test라 하는데, 계획조건의 경제환경이 최적선의 주요치수에 어떤 영향을 주는가를 검토하기 위하여, 건조비와 운항비의 각 항목을 조사하여 撤積船프로그램을 완성한 후에, 선주요구이윤율, 인건비, 연료비(90 \$/ton)를 변화시켜본 결과가 Table 1과 같으며, 그밖에 $C_B=0.8$, $홀수=13m$, $L/B=6.25$, $L/D \approx 14$, $B/T \approx 3.11$ 은 모두 같았다.

이상을 종합해 보면, 다른 논문들의 결과와 마찬가지로 대형, 저속, 비대선이 最適船으로 나타나며, 한편 작은 변화이지만은, 요구이윤율과 인건비의 증가는 고속, 대형선을 유리하게 하며, 연료비의 증가는 저속선을 유리하게 하고 있다.

(2) 유조선은 $L=915 \text{ ft}$, $B=146.5$, $D=67.95$, $T=50$, $C_B=0.8$, $\text{SHP}=18650$, $V=13.82 \text{ kts}$, $\text{DWT}=134200$, $\text{RFR}=10.41 \text{ \$ / ton}$ 인 最適船을 얻었다.

(3) 컨테이너船은 Miller의 논문 [17]이 길이 900ft까

Table 1

yield	labour cost	fuel cost	speed	power	L (m)	B	D	DWT	RFR \$ /ton
10%	1	1	13.21	13090	252.7	40.44	18.04	88170	5.125
12%	1	1	13.41	13770	252.7	40.44	18.04	88110	5.490
14%	1	1	13.61	14480	252.7	40.44	18.04	88050	5.868
16%	1	1	13.55	14350	254.3	40.68	18.16	89020	6.260
18%	1	1	13.61	14640	254.8	40.77	18.20	89360	6.661
14%	0.8	1	13.34	13520	252.5	40.41	18.02	88010	5.546
14%	1.2	1	13.59	14410	253.0	40.48	18.07	88220	6.186
14%	1	1.2	13.21	13090	252.7	40.44	18.04	88170	6.076
14%	1	1.4	13.14	12850	252.5	40.41	18.03	88060	6.281

지의 선박자료를 근거로 한 것이므로 그 범위안에서 $L=842\text{ft}$, $B=102$, $D=63.3$, $T=31.6$, $C_B=0.57$, $V=23.6\text{kts}$, $BHP=49000$, 적재능력 1880個人 배 4隻으로 每 11日마다 load factor=0.74로 운항하여 15%의 이윤율을 얻었다.

(4) 하역능력, 하역비의 영향

特定항로가 주어지지 않은 한은 항구의 하역능력이나 하역비가 결정되지 않을 것이므로, 본논문에서는 검토를 자세히 하지 않았다. 그러나, 항구의 하역능력은 경제성 있는 선박의 크기를 제한하는 주요因子중에 하나이므로, 반드시 충분한 검토가 있어야 한다. 특히 콘테이너 하역능력면에서, 부산항의 그것은 상당히 우수하며 가마쿠라타루, SL-7級의 대형선이 운항할수 있다. 하역비는, 같은 항로에서는 어느 선박이나 같을 것이므로 검토가 생략되어도 큰 영향은 없지만[8], 건조비 등에대한 상대적인 값이 다를것이므로 가능한 포함되는 것이 좋겠다.

6. 結 言

本論文은 자료의 制限등으로 實用에 當을만한 結果를 얻지 못했으나, 요즘 海運, 造船業의 격렬한 경쟁 상태에서 선박의 受注가 注文生産으로부터 경쟁입찰의 形態로 바뀌어가고 있으며, 이를 위해 신속, 정확한 기본설계상의 검토가 요구되어, 앞의 프로그램과 같은 것들이 사용되고 있으므로, 기본설계의 경험과 자료가 많은 實務陣에 의해 수정이 가해진다면 설계작업에 도움이 될수 있을 것이다. 특히, 建造費, 運航費 算定과정이 이미 電算化 되어있다면 쉽게 最適設計 프로그램화 할수 있을 것이며, 그밖에도 구조설계, 추진기설계 등의 작업들도, 반복되는 작업과정이 확립되어 있다면, 쉽게 最適設計化 할수있을 것이다. 한편, 이러한 최적화방법에 의한 설계는 最適值만을 내놓기 때문에 융통성이 부족하여 실제 설계에 큰 보탬이 되지 못하며, graphic display에 의해 設計者의 판단력이 작용될수 있는 방법이 더 효과적이라고 주장하는 이들도 있는데 [5, 11], 적어도 sensitivity test에 의해, 앞으로 해결되어야 할 研究課題의 優先順位를 提示할수가 있다. 예를들면, 비대선($C_B > 0.8$)에 대한 저항추정, 내항성능, 조종성능이 다른지 $L/B > 6.25$ 인 배의 문제등이다.

參 考 文 獻

[1] Mandel, Leopold; "Optimization methods applied to ship design" *Trans. SNAME* 1966.
 [2] Nowacki, Brusis, Swift; "Tanker preliminary design a optimization problem with constraints"

Trans. SNAME 1970.
 [3] Fisher; "Economic optimization procedures in preliminary ship design" *Trans. RINA*, April, 1972.
 [4] Nowacki; "Optimization in pre-contract ship design" *Proc. 1st ICCAS* 1973.
 [5] Kupras; "Optimization method and parametric study in precontracted ship design" *International Shipbuilding Progress* May 1976.
 [6] Haug; "Computer aided design of mechanical system" AMCP 706-192. *Engineering design Handbook* 1973.
 [7] Fan, Erickson, Hwang; "Methods of optimization Vol 3. Search techniques" *Kansas State University* 1971.
 [8] Berford; "The practical application of economics to merchant ship design" *Marine Technology*, January, 1967.
 [9] Benford; "Measures of merit for ship design" *Marine Technology*, October, 1970
 [10] Benford; Of Dollar signs and ship designs" *Proc. 1st STAR* 1975.
 [11] Watson, Gilfillan; "Some ship design methods" *Trans. RINA*, July, 1977.
 [12] discussion in [11]
 [13] "韓國과 日本의 計劃造船" 韓國船舶海洋研究所 UCE 17-27, 77, 1977
 [14] Steyert, Thomson; "Factors influencing the choice of propulsion machinery and controls" *Trans. IESS* 1977.
 [15] Gunsteren, Pronk; "Propeller design concepts" *International Shipbuilding Progress*, No. 227, 1973.
 [16] Sabit, Søntvedt; "A computer system for the hull surface generator and powering estimation based on methodical Series" *Proc. 1st PRADS*, B-8, 1977.
 [17] Miller; "The economics of the container-ship subsystem" *Marine Technology*, April, 1970.
 [18] Kuvas; "Transport capacity and economics of container ships from a production theory point of View" *Trans. RINA*, April, 1975.
 [19] 崔在洙: "釜山港 콘테이너 터미널 運營制度" 海洋韓國, 10月 1978