

## 論 文

大韓造船學會誌  
第21卷 第2號 1984年 6月  
Journal of the Society of  
Naval Architects of Korea  
Vol. 21, No. 2, June 1984

### 初期設計段階에서의 컨테이너船의 經濟性에 관한 研究\*

李 東 坤\*\* · 馬 淳 一\*\*\*

#### A Study on the Economics of Container Ships at Preliminary Design Stage\*

by

Dong Kon Lee\*\*, S.I. Ma\*\*\*

#### Abstract

This paper is concerned with an optimum design study of containerships in preliminary stage by applying economic criteria.

The Net Present Value Index (NPVI) and the Required Freight Rate(RFR) are used as measures of merit.

Hooke & Jeeves direct search method and External Penalty Function method of Sequential Unconstrained Minimization Techniquis (SUMT) are used for solving constrained nonlinear optimization problem.

Sensitivity analysis is carried out to investigate the effect on the optimum solution due to change of values in some parameters such as crane capacity, load factor, oil price, ship speed and the ratio between loaded FEU and TEU.

#### I. 서 언

근래에 해상수송에 있어서 일반 화물선에 싣고 다니던 화물들이 점차 container화 되면서, 컨테이너선의 수요는 빠르게 증가하였다. 따라서, 이러한 컨테이너선을 이용한 해상수송에 있어서 항구의 크레인 용량과 선박의 수송능력을 포함한 선박의 최적화에 대한 연구들이 최근 수행되어왔다. [1], [2]

일반적으로 컨테이너선은 화물의 하역시간이 빠르고 운항 속력이 높으므로, 화물의 수송시간이 다른 일반 선박에 비하여 짧은 특징을 가지고 있다. 정기선 운항 일 경우 항구의 크레인 용량, 선박의 운항속력, 운항

주기 및 선단의 규모는 정기선 운항의 생명인 service의 정확성과 신뢰성에 있어서 매우 중요하며 선박의 크기에 도 많은 영향을 주게 된다.

본고에서는 두개의 항로(Busan-LOS Angles, Busan-Panama-New York)에 대하여 최적 컨테이너선을 조사하였으며, 항구의 크레인 용량, 운항속력, 적하율(load factor), 유가(oil price), 그리고 TEU(20ft) 컨테이너와 FEL(40ft) 컨테이너의 적재비율이 최적선에 미치는 영향을 조사하기 위하여 sensitivity analysis를 수행하였다.

#### II. 설계 모델

두 항로에 대해서 다음과 같은 가정과 방법을 사용

授受日字：1984年 4月 12日, 再接受日字：1984年 5月 31日.

\* 本論文은 1983年 11月 11日 韓國船級協會 會議室에서 開催되었던 學會秋季研究發表會에서 發表되었던 論文인.

\*\* 正會員, 韓國機械研究所 大德船舶分所

\*\*\* 正會員, 釜山大學校 工科學 造船工學科

하여, 주어진 콘테이너 물량을 경제적으로 수송할 수 있는 최적 콘테이너 선단(fleet)을 구하였다.

2.1. 설계기준

일반적으로, 선박의 설계기준은 선박의 종류와 주어진 임무에 따라 달라지게 되는데, 영리를 추구하는 상선에서는 최대수익이 목표가 된다. 상선에 대한 설계기준은 여러가지가 있으나 [3], [4], 본문에서는 NPVI와 RFR을 사용하였다.

2.1.1. NPVI(Net Present Value Index)

NPVI는 경제성에 관계되는 가능한 모든 요소를 포함할 수 있으나, 선박을 운항하여 얻어지는 수익을 예측할 수 있을 때만 사용가능하며 다음과 같이 표시된다.

NPVI=NPV/P

where NPV:net present value

P :total initial investment

이때, NPV는 선박이 유효수명 동안에 운항하여 얻은 총수익에서 운항비와 선박의 구입비를 뺀 것을 현재가치로 표시한 것이며, P는 선박을 운항하기 위하여 초기투자한 금액이다.

본고에서는, 취급의 간편화를 위하여 NPVI를 다음과 같이 수정하여 사용하였고, 편의상 NPVIM이라 칭한다.

NPVIM=

{ (NPVI/ship life)-annual investment / annual investment } x 100

where, annual investment=

{ sum from 1 to n of [PW(annual operating cost) + PW(ship acquisition cost)] / n }

최적화 과정에서는 최적해를 찾기 위해서 최대 NPVIM을 구한다.

2.1.2. RFR(Required Freight Rate)

선박을 운항하여 얻어지는 수익을 예상할 수 없을 경우에는 NPVI를 계산할 수 없으므로 최적선에 대한 비교가 불가능하게 된다. 이때는 RFR을 설계기준으로 사용한다.

RFR은 선박이 연간 운반한 화물의 단위 톤당 운반 경비이며 최적화에서는 최소 RFR을 구하게 된다.

RFR=

sum from 1 to n of { [PW(annual operating cost) + PW(ship acquisition cost)] / annual transport cargo quantity }

where PW: present worth factor

N : ship life

2.1.3. 경제성 인자에 대한 가정

선박의 건조비 조달은 계획조선인 경우로 하였으며, 선박의 유효수명은 20년으로 가정하여 20년 후에 매각하는 것으로 하였다.

콘테이너 증량은 TEU당 12톤으로 가정하였고, 수송운임을 단일 요금제로하여 BSN-LA 항로에는 1,200 US\$, NY항로에는 1,800US\$인 실제자료를 사용하였다(1982년 5월 기준). 연간 물동량은 두항로 모두 10만 TEU로 가정하였다.

2.2. 건조비 및 운항비의 추정

2.2.1. 증량과 건조비의 추정

선박의 경하증량을 세 부분(선가, 의장, 기관)으로 분리하여 추정하였고, 건조비는 주어진 속력에서 소요마력을 구한 다음, 각부분의 증량을 추정하여 건조비용을 산출하는 Watson[5], Carreyett[6]의 방법을 이용하였다.

1) 증량추정

설계의 초기단계에서 선박의 증량을 정확하게 추정한다는 것은 매우 어려운데, 그동안 제안된 몇가지 방법 중에서 본문에서는 기존선의 자료를 이용하는 Gilfillan [7]의 비례배분법으로 선가 및 의장품의 증량을 추정하였고, 기관의 증량은 주기관과 remainder machinery를 분리하여 증량을 구하는 Watson[5]의 방법을 이용하였다. 한편, 주기관의 증량은 discrete value로 하여 계산하였다.

2) 건조비추정

선박을 건조하는데 소요되는 시간과 경비는 국가마다 다르고 같은 나라에서도 조선소의 효율, 기술자들의 자질과 숙련도에 따라라도 변한다. 그러나, 동형선의 Series를 건조하는 경우에는 선박의 크기, 종류, 선박의 구조등이 모두 같으므로, 기술자들의 경험(숙련)으로 건조단가가 절감되고 건조시간이 단축된다.

즉, 선박을 n척 건조할 경우에 있어서 한척당 평균 건조비는 다음과 같이 표시된다[8].

average cost = first ship cost / n^alpha

alpha: 기술자의 과거경험과 선박구조의 복잡성에 따르는 계수

본문에서는 선단(fleet) 전체의 선박을 국내의 동일 조선소에서 건조하는 것으로 하였다.

2.2.2. 운항비추정

유류비, 항비, 선적 및 하역비, 선원비, 보험금, 수리유지비 등을 고려하였다.

2.3. 조선 기술적인 인자들

2.3.1. 주요치수

일반적으로 산물선이나 유조선의 최적설계에서는  $L, B, D$ 를 연속적으로 증가 혹은 감소하는 연속변수(continuous variable)로 볼 수 있으나, 콘테이너선은 콘테이너의 적재갯수가 결정되면 적재단수 및 열과 폭이 정해지고 이에 따라  $L, B, D$ 가 결정된다. 즉,  $L, B, D$ 가 증가 혹은 감소할때 콘테이너의 규격만큼씩 변화하게 되므로 연속적으로 주요치수를 변화시킬 수가 없게 된다. 그러므로, 최적화 과정에서 global optimum point를 찾기 위해서는 parametric study가 동시에 수행되어야 하나, 본문에서는 주요치수가 연속적으로 변화 가능하다고 가정하여 최적화를 수행하였다.

2.3.2. 복원성능과 건현계산

선박의 복원력이 과대하면, 횡요운동시에 횡요가속도가 커지므로 갑판의 콘테이너 지지장치가 파손될 위험이 있어 화물과 선박의 안전에 좋지못하다. 한편, 갑판에 콘테이너를 과대적재하게되면, 조타실에서 가시범위가 좁아지게되어 운항상에 어려움이 발생하고, 횡요시에 복원성능이 떨어지게 되므로, 본고에서는 갑판위에 3단 적재하는 경우로하여 GM을 Erichsen[10]이 제시한 방법으로 구하였다. 또 KG는 최근에 건조되어 운항중인 실선의 자료로부터 경험식을 도출하여 깊이(depth)의 함수로서 표시하였다. 콘테이너선에서 GZ의 값은 중요하나 고려하지 못하였다.

건현은 international freeboard regulation에 따라 계산하였다.

2.3.3. 구조강도에 대한 제한조건

콘테이너선에서 문제가 되는 wide hatch opening과 갑판상 화물적재에 따른 구조강도상의 문제를 다른 상세한 논문이 발표되었으나 [11], 이를 초기설계에 응용하는 것이 불가능하므로, 본고에서는 주요치수의 비로 선체의 강도를 검사하는 Nakamura[12]의 제안식을 이용하였다.

2.3.4. 마력추정, 주기관 및 추진기의 선정

소요마력과 선체효율, 상대회전효율은 Holtrop & Mennen[13]의 방법으로 추정하여 15%의 sea margin을 주었고, MCR은 NCR의 1.1배로 하였다. 프로펠러 단독효율은 Kupras[14]의 방법으로 계산하였다.

프로펠러는 고정피치 프로펠러를 사용하였고, 단축으로 하였다. 프로펠러는 일반적으로 회전수가 낮은 경우가 높은 경우에 비하여 효율이 좋으므로 저속 디젤 엔진을 사용하였다.

2.3.5. 콘테이너 적재량 추정

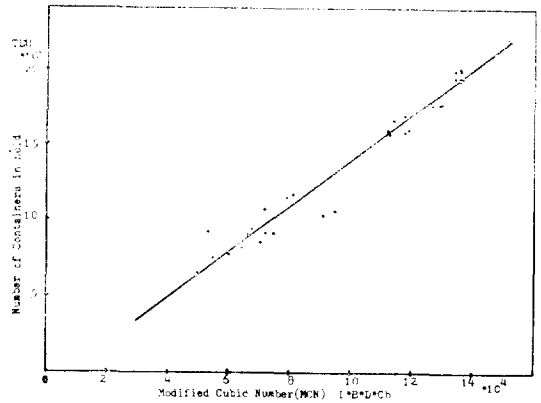


Fig. 1 Variation of Container Capacity in Hold due to Change of Main Dimensions

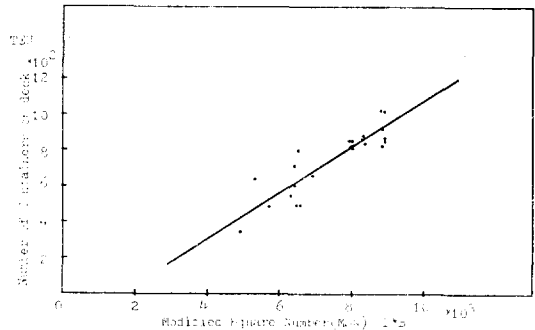


Fig. 2 Variation of Container Capacity on deck due to Change of Main Dimensions

선박의 콘테이너 적재갯수를 계산하기 위하여 최근에 건조된 선박의 자료로부터 경험식을 도출하였는데, hold내의 적재량은 modified cubic number ( $L \times B \times D \times C_b$ )의 함수로, 갑판위의 적재량은 modified square number ( $L \times B$ )의 함수로 각각 표현하여, Fig. 1, 2에 이것을 나타내었다.

Ⅲ. 최적화기법 및 응용

3.1. Sequential Unconstrained Minimization Technique (SUMT)

SUMT는 제한조건이 있는 일반적인 비선형 문제를 설계변수가 주어진 제한조건을 위반했을 경우, 제한조건이 목적함수에 미치는 영향을 고려한 penalty term을 목적함수에 덧붙임으로서, 제한조건이 없는 연속적인 비선형 문제로 바꾸는 기법이다.

SUMT에 의하여 치환된, 제한조건이 없는 문제를

풀기위하여는 Hooke & Jeeves의 direct search method를 이용하였다.

### 3. 2. 제한조건

운항환경이나 기술적인 조건등에 의하여 설계상의 제한조건이 존재하게 되는데, 본고에서 설정한 제한조건은 19개로 구성되어 있으며, 다음과 같이 나누어 진다.

- 설계변수의 feasible region에 관계된 것 : 8개
- EHP 추정에 관계된 것 : 3개
- 물동량에 관계된 것 : 1개
- 전현 및 복원성능에 관계된 것 : 5개
- 구조강도에 관계된 것 : 2개

이들의 자세한 내용은 다음과 같다.

$$160m \leq L \leq 320m$$

$$12.5m \leq B \leq 32.2m (\text{Panamax})$$

$$T \leq 12.5m \text{ for Busan-L.A (부산항 수심제한)}$$

$$\leq 11m \text{ for Busan-Panama-N.Y (Panama 운하 수심제한)}$$

$$0.5 \leq C_b \leq 0.7$$

$$22Kts \leq \text{speed} \leq 32Kts$$

$$0.02B \leq GM \leq 3.811m$$

$$2.25 \leq B/T \leq 3.25$$

$$\text{Freeboard} \leq (D - T)$$

$$B \geq 0.15L \text{ for } L \leq 214.67m$$

$$B = 32.2m \text{ for } L > 214.67m$$

$$L/D \leq 16.45 \text{ for } L < 175m$$

$$\leq 13.2 \text{ for } 175m \leq L < 200m$$

$$\leq 12.55 \text{ for } 200m \leq L < 214.67m$$

$$\leq 11.65 \text{ for } 214.67m \leq L < 250m$$

$$\leq 11.25 \text{ for } L \geq 250m$$

$$\text{연간물동량} = 100,000 \text{TEU}$$

$$0.55 \leq C_p \leq 0.67$$

$$6.0 \leq L/B \leq 9.5$$

## IV. 결과 및 결론

### 4. 1. 최적선

앞에서 설명한 설계모델을 이용하여 최적선을 구해본 바, 계산과정에서의 여러가지 starting point와 step

size에 따라서 최적선의 결과가 같지 않았는데 이것은 설계모델이 unimodal하지 않기 때문인 것으로 여겨진다.

다양한 starting point와 step size를 사용한 결과로 얻어진 최적선은 Table 1과 같다.

### 4. 2. Sensitivity Test

1) Fig. 3은 항구의 크레인 용량의 변화가 최적선에 미치는 영향을 고려한 것인데, 항차수가 많고 항로가 짧은 경우(BSN-LA)가 크레인 용량의 변화에 더욱 민감함을 알수있다. 바꾸어 말하면 sea time에 대하여 port time의 비율이 큰선박 즉, 항구에서의 정박시간이 많고 call 회수가 많은 선박일수록 크레인 용량이 목적함수에 크게 영향을 준다는 것을 알수 있으며, 본고에서는 크레인 용량이 본문에서는 30개 이상을 넘어가면 목적함수의 증가율은 매우 둔화된다는 것을 알수 있다.

2) Fig. 4는 적하율의 변화에 대한 sensitivity analysis의 결과인데, 적하율이 1.0에 가까워 질수록 목적함수의 값이 증가하며, 이때의 최적속력은 하한속력인 22kts였다.

3) Fig. 5는 유가의 변화에 대한 것이다.

유가가 상승함에 따라 선박의 크기는 변화하지 않으나, 최적속력이 하한속력에 머물러 운항비가 증가하므로 목적함수값이 감소한다.

4) Fig. 6은 선박의 콘테이너 적재량 가운데서 FEU가 적재되는 비율의 변화에 대한 결과이다. FEU의 적재비율이 증가함에 따라 항구에서의 하역시간이 단축되어 항차수가 증가하며, 따라서 선박의 크기가 줄어들므로 건조비가 낮아진다. 그러나 목적함수값 NPVIM은 감소하고 있다. 이것은 FEU가 TEU가 점유하는 공간의 2배를 차지하나 운임은 2배가 되지 못하기 때문이다.

해운회사에서는 최근에 FEU의 적재를 선호하는 경향을 보이고 있는데, 이 원인을 파악하기 위하여 TEU의 적재톤수를 10톤, FEU의 적재톤수를 20톤으로 가정하여 RFR을 목적함수로 두고 계산한 결과가 Fig. 7이다.

Fig. 7을 보면, FEU 적재비율 증가에 대하여 선박의 크기와 속력은 동일해도 하역시간의 단축으로 연간 항차수가 증가한다. 따라서, 같은 적하율일 경우, 보다

Table 1 Global Minimum from Multiple Starting Point (Local Minimum)

	L(m)	B(m)	D(m)	T(m)	C <sub>b</sub>	V(Kts)	척 수	TEU 적재갯수
BSN-L.A	207.3	31.48	16.54	9.71	0.607	22.1	3	1,482
BSN-N.Y	202.3	31.09	16.18	9.57	0.630	22.0	5	1,429

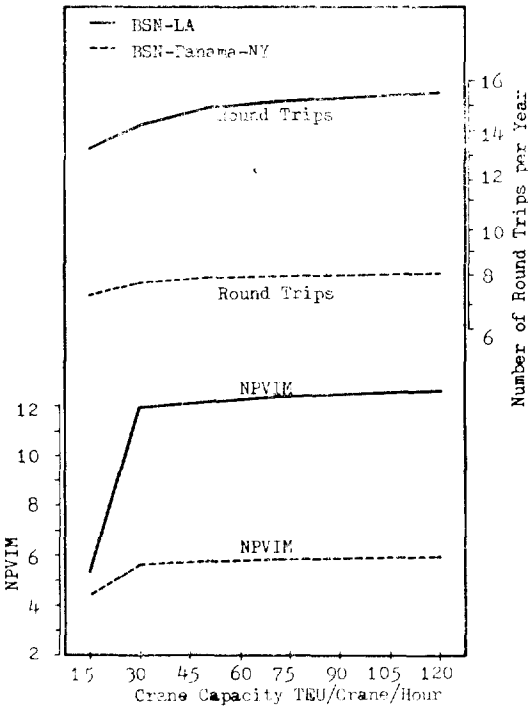


Fig. 3 Effect of NPVIM due to Crane Capacity

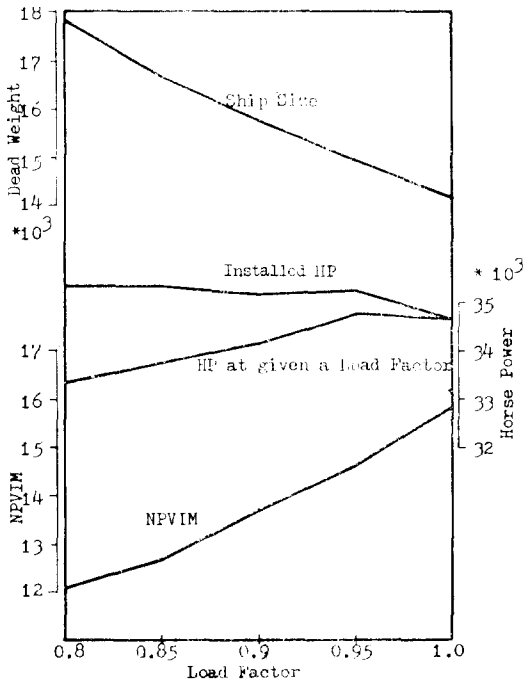


Fig. 4 Comparison of NPVIM due to Load Factor

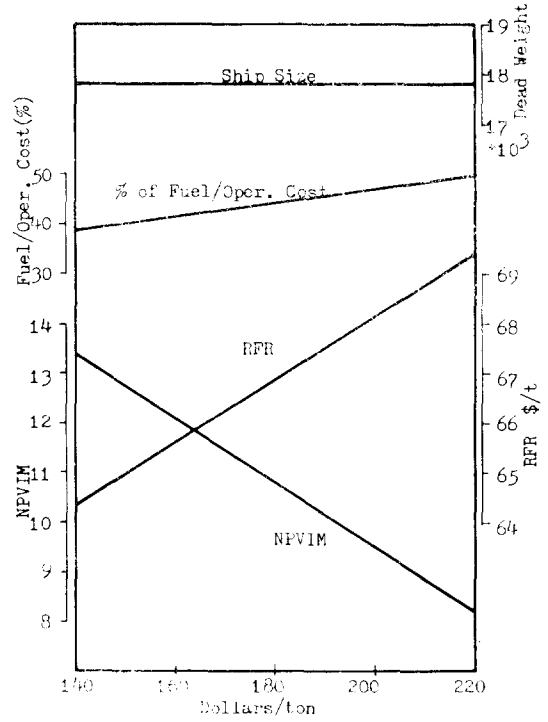


Fig. 5 Comparison of NPVIM due to Variation of Oil Price

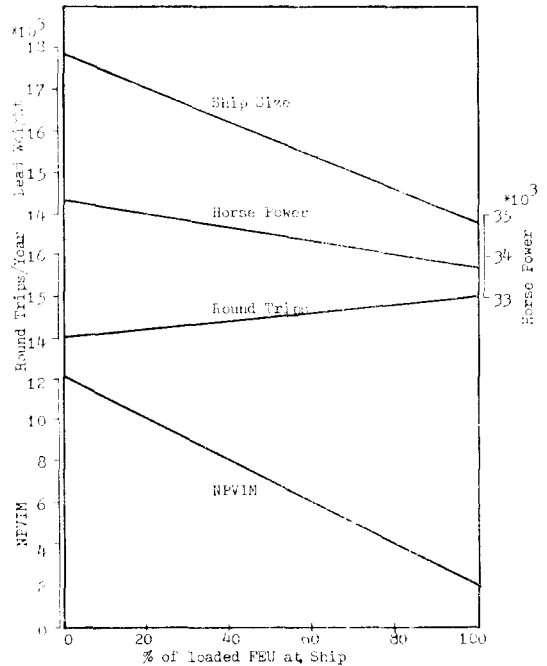


Fig. 6 Comparison of NPVIM by Variation of loaded FEU % in Total Container at Ship

Fig. 6 Comparison of NPVIM by Variation of loaded FEU % in Total Container at Ship

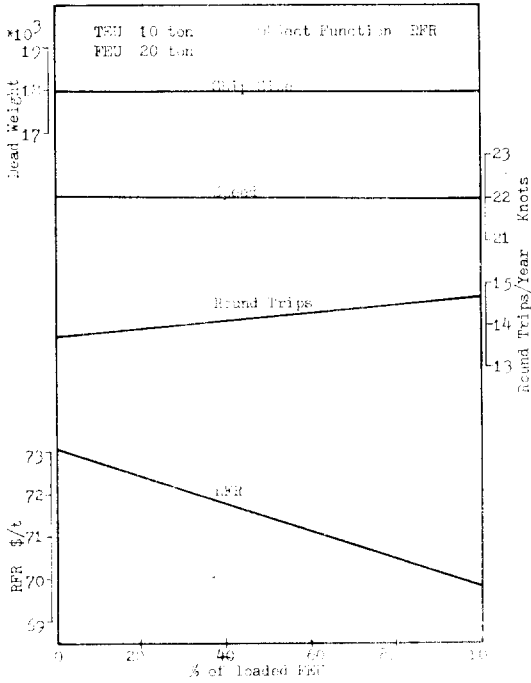


Fig. 7 Comparison of RFR by Variation of loaded FEU in Total Container at Ship

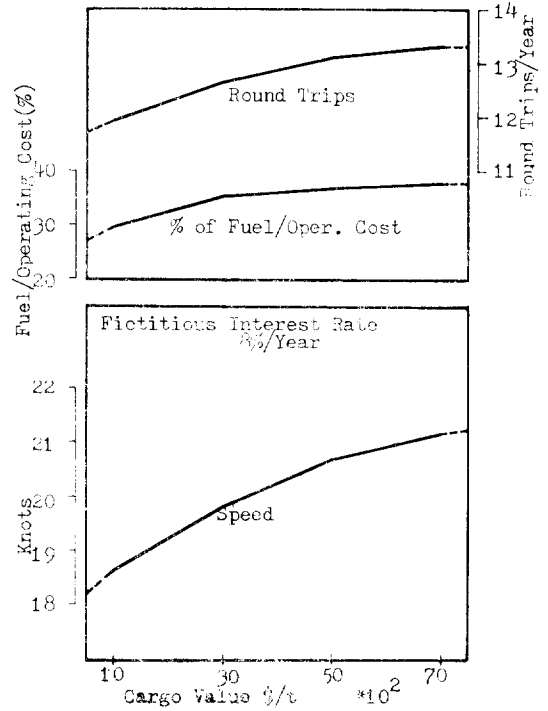


Fig. 9 Influence of Cargo Value on Optimum Speed of a Liner

많은 화물을 운반할 수 있게 되어 결과적으로 RFR이 감소하게 된다.

이것은 TEU와 FEU의 단위체적당 적재중량이 거의 비슷한 항로를 운항하는 세계 해운사들이 FEU를 선호하는 경향과 일치한다. [15]

5) Fig. 8은 앞의 계산에서 최적선의 속력이 하한속력인 22Kts에 수렴하는 현상을 조사하기 위하여, 제한 조건 가운데서 속력의 하한선을 철폐하고 각 속력에 대한 sensitivity analysis를 한 결과이다. Fig. 8에서와 같이 최소 RFR은 약 17.8Kts 근처에 있으므로 실제 운항속력이 최적속력보다 높음을 알수 있으며 이것은 해운사들의 물동량 확보에 대한 노력의 방안으로서 service 개선을 위한 경쟁결과인 것으로 보여진다.

6) Fig. 9는 Fig. 8에서와 같이 높은 속력으로 운항되는 원인을 검토하기 위하여 화물의 시간가치를 고려한 것으로 [16], 화물의 톤당가치 변화율을 가상의 연간이자율 8%로 하여 이값을 RFR에 추가하여 계산한 결과이다.

Fig. 9에서와 같이 화물의 톤당가치가 증가할수록 최적속력은 증가하나, 해운사의 평균 최적운항속력인

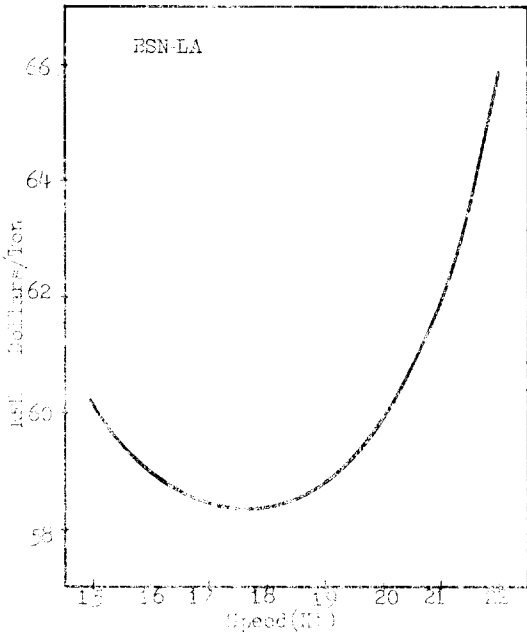


Fig. 8 Comparison of RFR due to Speed Change

22Kts에는 미치지 못하고 있다. 이것은 해운사의 service 속력이 너무 높음을 나타내는 것이다.

4.3. 결 론

1) 선박의 sea time에 대하여 port time의 비율이 증가할수록 항구의 크레인 용량은 최적선에 영향을 크게 미친다.

2) 항구의 크레인 용량의 증가가 최적선에 미치는 영향은 크레인 용량이 어느 정도까지 증가하고 나면 거의 없어진다.

3) 적하율이 증가하면 선박의 크기는 감소한다.

4) 선박의 컨테이너 적재비율 가운데서 FEU점유 비율이 증가할수록 service를 개선 할 수 있다. 즉, 항차수가 증가한다.

5) 정기선의 service 속력은 경쟁을 고려하지 않을 경우의 최적속력보다 훨씬 높다.

4.4. 고 찰

선박의 컨테이너 적재량을 추정하는데 이용된  $Cbd$ 는  $Cbd$ 로 바꾸어 추정하는 것이 더 합리적일 것이다.

$$Cbd = \frac{\text{main deck 까지의 volume}}{L \times B \times D}$$

컨테이너선에서 중요하게 작용하는 GZ 곡선과 발라스트양을 고려하여 계산하면 좀더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이며, FEU의 실제 적재하중은 TEU의 적재하중에 비하여 보통 1.5배 정도가 되므로 Fig. 7의 결과는 이에 맞추어 마력을 계산함과 동시에 하역시간의 단축을 고려하여 계산함이 더욱 바람직 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] D.S. Miller "The Economics of the Containership Subsystem" MT, Apr. 1970.  
 [2] J. Kuvas "Transport Capacity and Economics of Containerships from a Production Theory Point

of View," RINA, 1975.

[3] H. Bonford "Measures of Merit for Ship Design" MT, 1970.  
 [4] I.L. Buxton "Engineering Economics and Ship Design" BSRA, 1976.  
 [5] G.M. Watson "Some Ship Design Method" RINA, 1977.  
 [6] J. Carreyette "Preliminary Ship Cost Estimation" RINA, Jul. 1978.  
 [7] A.W. Gilfillan "The Economic Design of Bulk Cargo Carriers" RINA, 1969.  
 [8] J.K. Mcneal "A Method for Comparing Cost of Ships due to Alternative Delivery Intervals and Multiples Quantities" SNAME, 1969.  
 [9] 이 동곤 "경제성 기준에 의한 컨테이너 선단의 최적설계" 부산대학교, 1983.  
 [10] S. Erichsen "Optimizing Containerships and their Terminal" SNAME, 1972.  
 [11] Elbatouti "Structural Analysis of a Containership Steel Model and the Comparison with the Test Result" SNAME, 1976.  
 [12] T. Kakamura "On the Character of a Containership" NADE, 1980.  
 [13] J. Holtrop, G.G.J. Mennen "An Approximate Power Prediction Method" ISP, July 1982.  
 [14] L.K. Kupras "Optimizing Method & Parametric Study in Precontracted Ship Design" ISP, 1976.  
 [15] E.T. Laing "Containers and their Competitors-The Economics of Deep Sea General Cargo Shipping in the 1970's" Marine Transport Centre, Univ. of Liverpool, Jan. 1975.  
 [16] K.Y. Lee "Economic Ship Design for Variable Operating Conditions" PRADS, Oct. 1983.