

컨테이너터미널 사용자비용을 최소로 하는 선석과 크레인의 최적구성에 관한 연구

윤 영 철* · 문 성 혁**

A Study on the Optimal Combination of Berth and Crane in Container Terminal

Y. C. Yun · S. H. Moon

Key Words : 항만시설(port facilities), 부산항(Pusan Port), 항만개발사업(port development project), 모선기항부두(hub port), 선석(berth), 크레인(crane), 선석점유율(berth occupancy rate), 최적구성(optimal combination), 의사결정변수(decision making variable), 대기행렬이론(queueing theory), 민감도분석(sensitivity analysis), 항만 비용(port cost)



Abstract

Recently, the traffic volume has been greatly increased partly because of high growth rate of domestic and world economy, and partly because of increased transshipment demand resulting from the destruction of Kobe port by earthquake early this year. So, container facilities in Pusan Port are under serious congestion. The congestion costs in connection with container traffic in Pusan Port is estimated to be 29.3 billion won in 1994. In 1995 the situation is still worsening.

PECT has continued to grow annually by 35% in cargo handling, hereby exceeding more than 31% of the total container volumes handled in Korea. The BOR(Berth Occupancy Rate) of container berths in PECT in 1994 is 75% reflecting extreme congestion in container traffic. The reason for such a serious congestion in PECT is the shortage of container handling facilities in comparison with ever-increasing cargo traffic.

In order to solve the provisional problem, the shortage of handling capacity, a model developed to optimize the operation of PECT is described and demonstrated. The model minimizes total port costs, including the costs of dock labour, facilities and equipment, ship, containers, and cargo.

The object of this study is, through the model results, mainly to determine the optimal combination of berths and cranes under various circumstances and to show that total costs per ship or unit of cargo served can be reduced by increasing the number of cranes per berth and berth utilization above present levels.

* 정회원, 한국해양대학교 대학원

** 정회원, 한국해양대학교 해사대학 해사수송과학과

Eventually, the results obtained with this model in PECT suggest that increase to 3 in the number of cranes per existing berth could reduce the need for major investments in berths and even reduce operating costs.

1. 序 論

오늘날 우리 경제는 전세계적으로 진행되고 있는 국제화 또는 세계화의 흐름속에서 대내적으로 상존하고 있는 임금상승요인을 극복하고, 대외적으로 가중되고 있는 개방압력에 대응하면서 후진개발국과 국제무역시장에서 치열한 경쟁을 이겨야하는 어려움에 직면하고 있다. 우리가 처한 이러한 어려운 현실을 고려할 때, 대외경쟁력을 회복할 수 있는 하나의 돌파구로서 각광을 받고 있는 물류체계의 합리화는 새로운 부가가치원으로서 매우 중요한 의미를 지닌다고 할 수 있을 것이다.¹⁾

그러나, 물류합리화를 위한 기업의 노력이 성과를 거두기 위해서는 물류기반시설의 정비가 무엇보다도 우선되어야 한다는 것이 우리 모두가 공통으로 인식하고 있는 바이다. 그리고 정비해야 할 물류기반시설중에서도 우리나라 수출입 컨테이너물동량의 95%를 취급하고 있는 부산항의 개발 및 정비문제는 대외수출상품의 경쟁력을 높인다는 관점에서 매우 중요한 의미를 지니며 동북아에 위치하고 있는 주요 항만에 벌어지고 있는 격심한 경쟁환경을 고려할 때 최우선적으로 다루어져야 할 과제중의 하나이다.

일반적으로 항만개발사업에는 리드타임(Lead Time)²⁾이 존재하여 그 계획부터 개장까지 보통 4~7년의 기간이 소요된다. 현재 가덕도 신항개발계획이 추진중이지만 완료시키지는 상당한

시일이 소요될 것으로 예상되며, 컨테이너 항만 시설의 투자비용은 고가이므로 항만개발사업이 완료되기까지는 현존 시설을 최대한로 활용하면서 항만의 2대 고객인 화주와 선주의 수요를 만족시키는 것이 바람직하다.

이러한 관점에서 이 연구에서는 기존의 컨테이너 항만시설, 특별히 모선기항부두인 (주)동부산컨테이너터미널(Pusan East Container Terminal : PECT, 신선대부두, 이하 PECT라고 함)의 선석 및 크레인 운영을 최적화하는 모델을 도입하여, 선석과 크레인의 수를 조정함에 따라 항만에서의 사용자 비용이 어떻게 변화하는지를 분석·평가해 보고자 한다. 또한, 이를 기초로 하여 물류비용관점에서 선석당 크레인 수를 어느 수준으로 유지하는 것이 바람직한지를 조사하여 체선으로 인한 항만물류비용을 최소화하고, 항만개발사업 추진과정에 발맞추어서 현재 PECT의 효율을 극대화하고자 하는 것이 이 연구의 목적이다.

2. PECT에 대한 既存의 能力算定方法 調査³⁾

PRC보고서와 개정보고서의 방법은 유사하게 보이거나 그 내용상으로는 상이점이 있다. 그러나 크게 보면 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{안벽능력} &= (\text{크레인 수}) \times (\text{1년의 작업일수}) \\ &\quad \times (\text{크레인 작업시간율}) \times (\text{크레인 작업효율}) \times (\text{물동량 환산치}) \end{aligned}$$

- 1) 釜山商工會議所, “綜合物流體系 構築을 爲한 港灣機能強化方案”, 懸案課題研究 7, 1994.1, p.128.
- 2) ‘기획에서 제품화까지 걸리는 시간’ 즉, 항만의 경우에는 항만계획(Port Planning)에서부터 건설후 운영을 시작(Commissioning)하는 시점까지를 말함.
- 3) 이 연구에서는 PECT의 능력산정에 대한 연구를 소개하는데 있어서 안벽(Quay)능력산정에 관한 내용을 위주로 하였음. 기존의 연구는 1988년 4월에 발간된 PRC Engineering社의 “釜山港 3段階 컨테이너 開發埠頭 : 컨테이너터미널運營研究 (Pusan Port 3rd Phase Development Project : Container Terminal Operations Study)” 보고서(PRC보고서) 및 1989년 2월에 발간된 부산컨테이너운영공사의 “釜山港 3 段階 컨테이너埠頭, 變更設計 및 背後道路 實施設計 用役” 보고서(개정보고서)의 내용을 소개하기로함.

Table 2.1 Comparison of Variables in the Formula of Berth Capacity

구 분	PRC 보고서	개정 보고서
연간 작업일수(일)	365	360
선석점유율	0.60	0.55
선박이동계수	0.90	-
크레인가동률	0.79	0.74 x 0.80
크레인능력(회 시간)	30.0	40.5(=45x0.9)
크레인간섭계수	0.9	0.9
TEU/BOX 비율	1.57	1.57
평균접안시간	12.0	13.5
접안시간	1.25	-
평균대기시간	-	1.5

이상과 같은 기존의 PRC보고서와 개정보고서는 크레인 상호간섭에 의한 효율저하를 일부는 고려하였지만 선박당 작업 크레인수가 증가함에 따라 안벽의 길이연장 등이 없이도 연간처리능력이 거의 비례적으로 증가한다는 모순을 안고 있다. 그리고 각 변수의 값이 안벽능력계산을 위한 수단일 뿐 그 이외의 다른 의미, 특히 변수간에 어떠한 관계가 있으며 변수의 변화가 물류비용에 어느 정도로 영향을 미치는지는 알 수가 없었다.

따라서, 상기보고서에서 권고하고 있는 선석수가 적정한지를 평가해보고 여러 변수들에 영향을 미치는 기본변수라 할 수 있는 현재의 적정 선석수 및 크레인수를 구하여 기존의 안벽능력을 더욱 더 실제적으로 산정할 수 있도록 하고, 나아가 물류비용관점에서 변수간의 관계를 분석할 필요가 있게 되었다.

3. 船席과 크레인의 最適構成을 위한 모델 : PECT의 경우

항만시설의 이용주체와 항만시설의 운영주체 사이의 균형을 분석하기 위한 방법의 하나로써 제반 의사결정변수(예를 들면, 선석수 및 크기, 크레인수, 장치장 규모 등)에 관련된 모든 변수

를 비용으로 나타내는 모델을 적용하였다. 여기서 비용이라 함은 선석, 크레인, 작업인부, 장치장, 선박, 컨테이너용기와 화물의 비용을 의미하며, 그 비용의 합을 최소로 함으로써 이해관계자들 즉 화주, 선주, 항만운영자, 정부기관 등의 이익을 최대화할 수 있도록 하였다.

이 연구에서는 효율적인 선석운영이나 생산성 향상에 관한 여러가지 분석중에서 Paul Schonfeld와 Osama Sharafeldien⁴⁾의 모델을 PECT에 적용하여, 기존의 선석당 크레인수를 변화시킴으로써 적당비용이나 처리화물의 단위 비용을 줄일 수 있는가를 검증하고자 한다.

3.1 모델의 設定

컨테이너부두의 설계와 운영을 최적화하기 위해서는 그 대상이 되는 여러 요소 즉, 선석, 크레인, 장치장, 작업인부, 선박, 컨테이너 그리고 화물간의 손익을 고려할 필요가 있다. 어떤 항만과 그 항만을 구성하는 여러 요소들을 효율적으로 운영한다고 할 때에는 얼마간의 체선이 있다는 사실을 전제로 한다. 일반적으로 선박도착률, 컨테이너하역(또는 이송)률, 그리고 매 선박에서 처리되는 컨테이너수는 모두 확률적인 변수이므로 선박이 선석배정을 기다리는 동안에 불가피하게 체선현상을 유발하게 된다. 이때 선박과 화물의 지연으로 인한 비용과 시설물 이용료 사이에 하나의 비용합수를 만들어 낼 수가 있다.

그 총비용은 다음의 6가지로 구성된다.

$$C_{TC} = C_b + C_r + C_y + C_l + C_s + C_u \dots\dots\dots (3.1)$$

- C_{TC} : 시간당 총시스템비용(원/시간)
- C_b : 시간당 총선석비용(원/시간)
- C_r : 시간당 총크레인비용(원/시간)
- C_y : 시간당 총장치장비용(원/시간)
- C_l : 크레인작업자의 시간당 총노동비용(원/시간)

4) P. Schonfeld and O. Sharafeldien, "Optimal Berth and Crane Combinations in Containerports," *Journal of the Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol.III, No.6, Nov., 1985, pp.1060 - 1072.

3.2 變數의 定義와 計算值

기초 분석시에 이용되는 변수의 값은 Table 3.1에 나타나 있는데, 이는 1994년 1년간의 통계 자료로부터 구한 것으로서 어떤 변수에 대해서는 자료의 신빙성이 미흡하여 추정에 의할 수 밖에 없었다. 모델이용자들은 구체적인 적용을 위해서 보다 더 최적의 값을 입력시키고 민감도 분석을 행하여 변수값의 변화가 의사결정에 어떠한 영향을 미치는가를 확인해 볼 필요가 있다.

4. 모델의 結果 및 敏感度分析

다음의 여러 결과들은 Excel을 이용하여 먼저 Datasheet에 각 변수에 대한 값을 지정하고, Graphsheet에 표를 만들어서 Excel내의 Visual Basic 프로그램을 이용하여 각 변수의 변화에 따른 민감도분석을 행함으로써 얻었다.

Fig. 4.1에서는 6가지의 기본적인 비용요소들이 선석당 크레인수 n 에 따라서 어떻게 다양하게 변하는지를 나타낸다. 이들 비용요소 중에서 노동비용, 크레인비용 등은 n 에 비례하고 있으

며, 반면에 선박비용, 컨테이너 및 화물비용 등은 반비례하고 있기 때문에 평균비용 즉 AC는 U형 함수로 나타난다. 즉 AC는 크레인 이용대수가 너무 적을 경우에는 선박과 컨테이너 자체의 비용에 의해 좌우되며, 반대로 크레인 이용대수가 너무 많을 경우에는 부두노동비용에 의해 좌우된다는 것을 의미하고 있다. 그리고 AC는 선석당 크레인이 3기일 때 최소가 됨을 나타내고 있다. 만일 선석당 크레인수가 2기를 초과하거나 그 미만인 경우에 대해서 민감도 분석을 행하면 Fig. 4.1과 같다.

Fig. 4.2와 Fig. 4.3은 평균비용과 총비용이 여러가지의 선박도착률에 따라 어떻게 변하는지를 나타낸다. 평균 및 총비용곡선은 모두 U형이다. Fig. 4.3에서 총비용은 선박도착률이 증가함에 따라 지속적으로 증가하고 있으나 Fig. 4.2에서의 평균비용은 선박도착률이 시간당 0.08척이 될 때까지는 감소하다가 0.081척이 될 때 증가함을 알 수 있다. 그리고 현재의 선박도착률 0.132척에서는 선석당 크레인수를 3기로 했을 때 평균비용을 41,000,000 원까지 최소화할 수 있음을 알 수 있다. U형의 비용곡선의 왼쪽경사

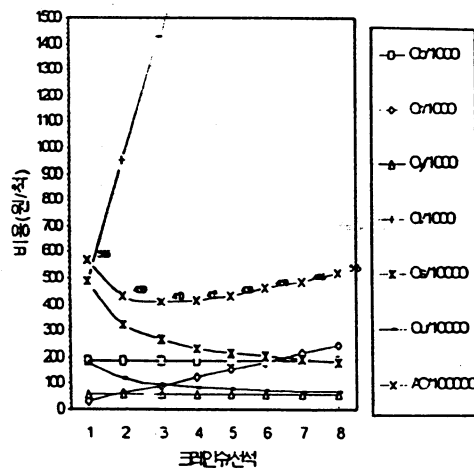


Fig. 4.1 Variation of Average Cost Components with Number of Cranes for PECT(3 Berths/Terminal)

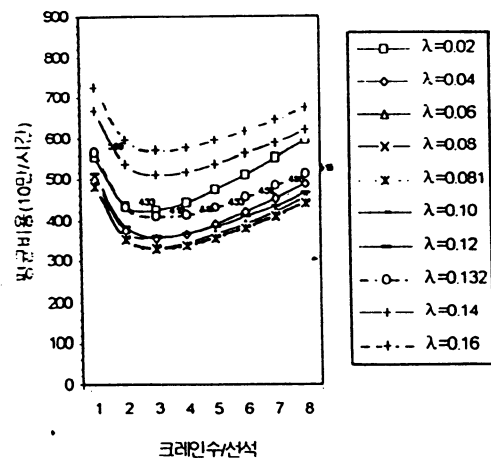


Fig. 4.2 Average Costs for Various Ship Arrival Rates and Number of Cranes / Berth(3 Berths / Terminal)

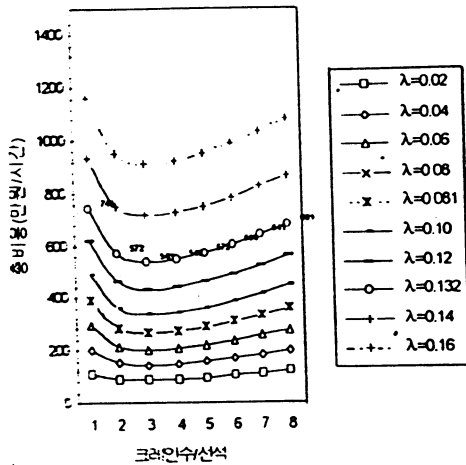


Fig. 4.3 Total Costs for Various Ship Arrival Rates and Number of Cranes / Berth (3 Berths / Terminal)

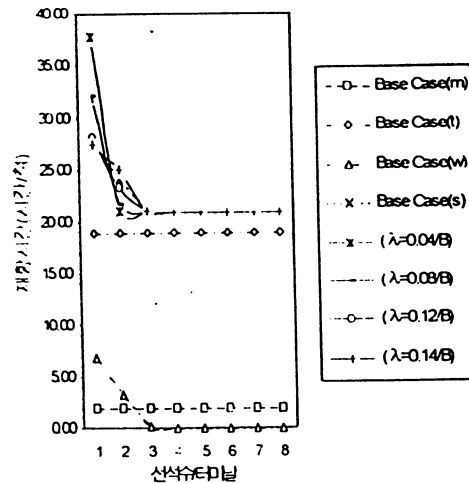


Fig. 4.5 Ship Times in Port for Various Number of Berths / Terminal and Ship Arrival Rates (2 Cranes / Berth)

면은 오른쪽보다 더 급한데 이는 너무 적은 경우보다는 많은 크레인을 이용하는 것이 더 경제 적임을 뜻한다.

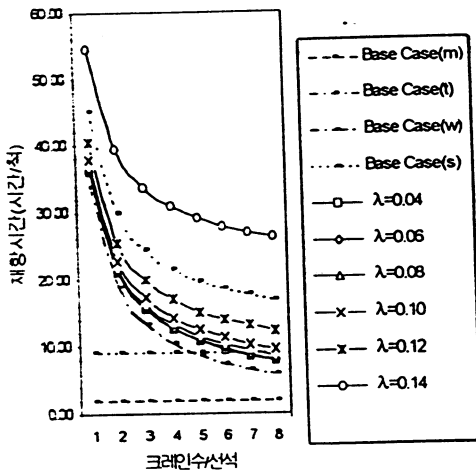


Fig. 4.4 Ship Times in Port for Various Number of Cranes / Berth and Ship Arrival Rates (3 Berths / Terminal)

Fig. 4.4와 Fig. 4.5는 선박의 접이안시간과 선석에서 컨테이너를 이송한 평균시간(평균적 양화시간), 선석배정을 받기 위해 대기행렬을 이루어 지연된 시간(선박대기시간), 그리고 이 시간들의 총합이 되는 재항시간을 나타낸다.

Fig. 4.4에서는 현재 3선석에서 선석당 크레인 수가 다양하다고 할 때, 반면에 Fig. 4.5에서는 선석당 크레인수는 2기이고 선석수가 다양하다고 할 때의 재항시간의 변화를 나타낸다. 크레인수와 선석수의 변화는 각각 적양화작업시간과 선박대기시간을 줄이는 방향으로 영향을 미치므로 결국 선박이 항만에서 체류하는 시간을 얼마나 줄일 수 있는가를 나타낸다.

Fig. 4.6에서 Fig. 4.12까지는 여러가지 상황에 따라 최적 크레인수와 평균비용이 어떻게 변하는가를 나타내고 있다.

Fig. 4.6은 크레인의 상호간섭과 작업시간을 변화시킬 경우 평균비용의 변화를 나타낸다. 여러 가정을 적용해서 선석당 크레인수가 현재의 2기를 초과하더라도 오히려 평균비용을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

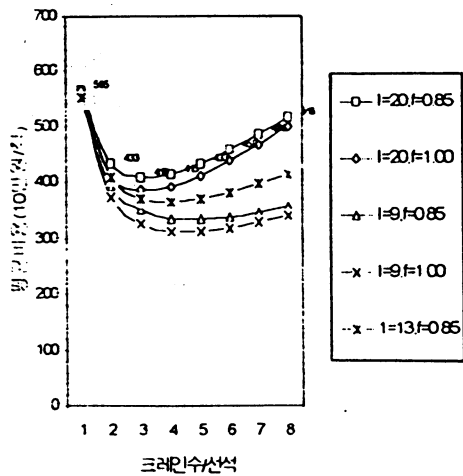


Fig. 4.6 Variation of Average Costs for Various Labor Shift and Crane Interference Assumptions (3 Berths / Terminal)

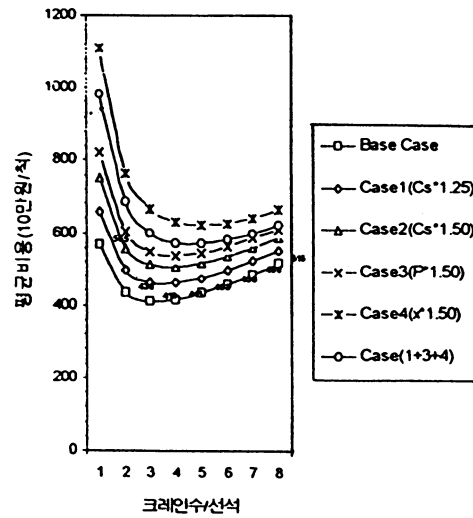


Fig. 4.8 Sensitivity of Average Costs to Ship related Variables (3 Berths / Terminal)

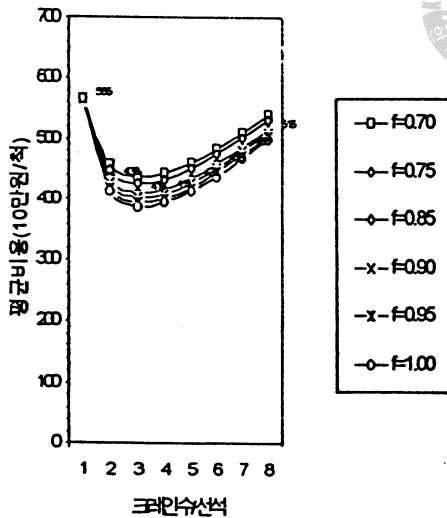


Fig. 4.7 Sensitivity of Average Costs to Crane Interference Exponent l (3 Berths / Terminal)

Fig. 4.7은 크레인 상호간섭이 감소(간섭지수 l 값이 증가)함에 따라서 비용이 감소함을 나타

낸다. Fig. 4.6과 마찬가지로 선석당 크레인수가 3기일 경우에 평균비용이 최소가 됨을 알 수 있다.

Fig. 4.8은 선박에 관련된 변수의 값이 커짐에 따라 평균비용이 얼마나 증가하는가를 나타낸다. Case2와 Case3를 보면 평균비용은 선박비용이 50%증가할 경우 보다도 적양하량이 50%증가할 경우에 더욱 더 증가한다. 그리고 선박비용과 적양하량을 증가시킴에 따라 최적 크레인수도 증가함을 알 수 있다.

Fig. 4.9는 선석, 크레인, 그리고 장치장비용을 각각 50% 증가시킬 경우에 평균비용과 최적 크레인수의 변화를 나타낸다. Fig. 4.8에서의 선박 및 화물비용에 관련된 요소를 변화시킬 경우와 비교해 볼 때 Fig. 4.9의 곡선간격은 매우 조밀하다. 이는 평균비용은 선박 및 화물비용의 변화에 더욱 민감하다는 것을 의미한다.

Fig. 4.10은 노동비용과 화물비용의 변화에 따른 평균비용의 변화를 나타낸다.



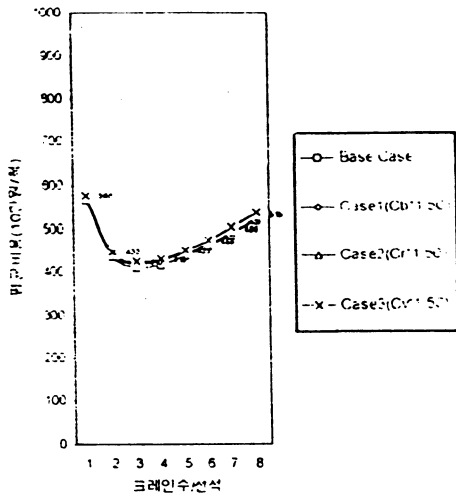


Fig. 4.9 Sensitivity of Average Costs to Port Facilities Variables (3 Berths / Terminal)

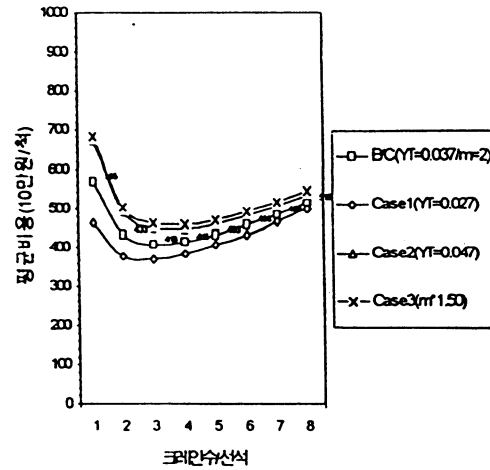


Fig. 4.11 Sensitivity of Average Costs to Ship Time Variables (3 Berths / Terminal)

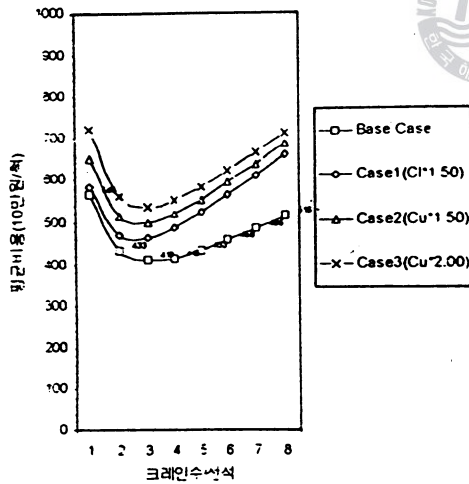


Fig. 4.10 Sensitivity of Average Costs to Dock Labor and Container Variables (3 Berths / Terminal)

Fig. 4.11은 크레인의 수 뿐만 아니라 크레인 자체의 회전율을 변화시키거나 접이안시간을 늘렸을 경우의 평균비용의 변화를 나타낸다.

Table 3.1에서 크레인회전율을 계산할 때 Manual상의 시간당 크레인의 작업개수는 46TEU였으나, 실무적으로는 VAN(TEU를 1.55~1.56으로 나눈 값)의 개념으로 작업하고 있기 때문에, 1994년의 크레인의 시간당 순작업개수를 27.4VAN으로 구하여 1 VAN에 소요되는 시간이 131.4초 즉, 0.037시간이 됨을 나타내었다. 크레인 회전률이 증가함에 따라 평균비용과 최적 크레인수가 감소함을 알 수 있다.

Fig. 4.12에서는 시간당 선박도착률에 대해서 선석과 크레인을 어떻게 구성하는 것이 평균비용을 최소화 할 수 있는가를 종합적으로 나타내었다. 비용측면에서 현재의 3선석으로는 선박도착률이 시간당 0.08척이거나 크레인이 3기일 때 선석이용률이 최적임을 알 수 있다. 그리고 선석당 크레인수가 3기일 때 대부분의 선박도착률에 대해서 유리하나 선박도착률이 0.12척이상일 경우부터는 오히려 1선석이 추가되는 것이 유리하다. 선석수가 4선석일 경우에는 선박도착률이 0.14척일 때 최적이며, 선석수가 5선석 이상일 경우에는 선박도착률이 0.14척이 될 때까지는 2기의 크레인을 갖춘 경우가 3기의 크레

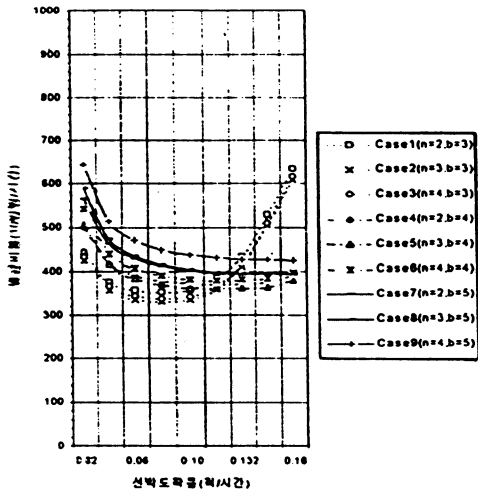


Fig. 4.12 Average Costs for Various Berth and Crane Combinations

인을 갖춘 경우보다는 비용면에서 유리하게 나타난다.

이상과 같은 분석을 통해 알 수 있는 사실은 기존의 선석에 크레인수를 증가시키는 것이 선석에 대한 대규모의 투자비용을 줄일 수 있고, 나아가 항만운영비용을 줄일 수 있으며, 그리고 크레인수의 증가로 인해 적양하시간이 감소함에 따라 선석배정을 기다리는 선박의 대기시간도 줄이게 됨을 알 수 있다.

5. 結 論

물류체계의 합리화를 위한 기업의 노력이 성과를 거두기 위해서는 물류기반시설, 특별히 항만시설의 정비가 무엇보다도 우선되어야 한다는 것이 우리 모두가 공통으로 인식하고 있는 바이다.

현재 가덕도 신항개발계획이 추진중이지만 완료시까지는 상당한 시일이 소요될 것으로 예상되며, 컨테이너항만시설의 투자비용은 고가이므로 항만개발사업이 완료되기까지는 현존 시설을 최대한으로 활용하면서 항만의 2대 고객인 화

주와 선주의 수요를 만족시키는 것이 바람직하다.

이러한 관점에서 이 연구는 기존의 컨테이너항만시설, 특별히 모선기항부두인 PECT의 선석 및 크레인 운영을 최적화하는 모델을 도입하여 체선으로 인한 항만물류비용을 최소화하고, 항만개발사업 추진과정에 발맞추어서 현재 PECT의 효율을 극대화하고자 하였다.

이 연구에서 얻은 결과들을 통해서 선석당 크레인수를 현재의 2기에서 3기로 증대시킴으로써 총시스템비용을 줄일 수 있고, 그로 인해 선석의 효율을 극대화시킬 수 있다는 사실을 확인할 수 있었다.

그러나, 이 연구에서 실행한 민감도분석(Sensitivity Analysis)은 다분히 실험적인 방법이기 때문에 거기에는 많은 제약이 따를 수밖에 없으며, 보다 더 정확한 출력데이터를 얻기 위해서는 입력데이터의 질이나 규모에 많은 주의 기울여야 할 필요가 있다.

앞으로의 연구과제는 크레인 증설에 따른 선석운영의 효율을 극대화시키는 것과 병행하여 장치장의 제반 요소를 보다 더 구체적으로 모델화하고 최적화하는 것일 것이다. 왜냐하면, 컨테이너 터미널에서 장치시간이 감소하게 되면 장치장의 규모와 비용을 줄일 수 있고, 보관중인 컨테이너에 대한 시간비용(감가상각비 또는 이자)을 줄일 수 있으며 장치장내에서의 평균 화물운반 길이를 단축시킬 수가 있기 때문이다.

參 考 文 獻

1. (株)東釜山컨테이너터미널, 「1994年 統計資料」, 1995.
2. _____, 「第 5 期 決算報告書」, 1995.
3. 文成赫, “港灣開發의 世界的인 趨勢와 우리 的 對策”, 海洋韓國, 第250號, 1994.
4. 釜山商工會議所, “綜合物流體系 構築를 爲한 港灣機能強化方案”, 懸案課題研究 7, 1994.

5. 李哲榮·文成赫, “港灣運送시스템의 分析에 關한 研究”, 韓國航海學會誌, 第7卷, 第1號, 1983.
6. 林鎮秀·朴炳演, 「컨테이너터미널能力算定에 關한 研究」, 海運産業研究院, 政策資料 045, 1991.
7. 海運港灣廳, 「컨테이너貨物 流通推移 分析」, 1995.
8. _____, 「船舶 入出港 및 移船 動靜표」, 1994.
9. _____, 「釜山港 3段階 開發社業工事誌」, 1992.
10. _____, 「釜山港 4段階 開發 實施設計 : 基本計劃 檢討 및 基本設計」, 1991.
11. PRC Engineering Inc.(1988), Pusan Port 3rd Development Project : Container Terminal Operations Study.
12. Schonfeld, P. and Sharafeldien, O.(1985), “Optimal Berth and Crane Combinations in Containerports,” Journal of the Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.III, No.6.

