

지식기반 시뮬레이션에 의한 컨테이너터미널 설계 방안

A Study on the Design of Container Terminal by
Knowledge-based Simulation

최용석* · 하태영**

Choi, Yong Seok · Ha, Tae Young

〈 목 차 〉

- I. 개 요
 - II. 기존 연구 고찰
 - III. 기존의 경험적 설계방법의 검토
 - IV. 지식기반 시뮬레이션 설계 방안
 - V. 결 어
-

Abstract : This study analyses the effectiveness of a Free listing system for seafood markets in producing areas. This study also addresses the previous discussions and reviews on the legal and institutional system on the Free listing system and analyses the changes in the seafood marketing in the producing areas.

This paper proposes a knowledge-based simulation for the design of port container terminal. Simulation is often used prior to the operation of the real world system as a mediator for a dynamic situation of container terminal. Therefore, simulation methodology has been recommended and chosen to design container terminal. Due to the complexity in container terminal, the simulation based on empirical knowledge is the most effective on the design of container terminal.

From a literature review of recent design study, most designs deal with empirical design based on various knowledge and historical data. And design process tries to integrate simulation methodology. To show

* 한국해양수산개발원 책임연구원

** 한국해양수산개발원 연구원

the efficiency of the knowledge-based design, we took into consideration two case reviews, which are ship waiting time and crane utilization. The simulated results are compared with the previous queueing model and the guideline for design of the berth. The result shows that the simulated results are more close to the real system.

The facilities provided in a typical container terminal are classified according to the three functions such as transfer, storage and consolidation. Facilities such as berth and apron, marshalling yard and gate, which perform the modal transfer function and the storage function.

The facilities for the knowledge-based design consist of berth, yard and gate. It is discussed how to apply the simulation method to design those facilities that are interrelated between input and output. This paper also deals with the design factors such as TEU/Box ratio, LPC(Lift per Call), C/C(Container Crane) productivity, and arrival rate in gate.

To design the container terminal using the knowledge-based simulation, we proposed several factors including time series factors, forecasted factors, vehicle routing, and traffic. The proposed design factors will be an effective tool to support the design of container terminal in terms of the knowledge-based simulation.

Key Word : knowledge-based simulation, container terminal, design, facility, queueing model.

I. 개 요

항만은 50년 이상 사용되는 사회간접자본의 성격을 지니므로 개발초기의 설계과정이 개발 항만의 성공여부에 많은 영향을 미친다. 특히 컨테이너터미널 개발은 항만의 기반시설 확충과 최신 하역설비의 도입 등을 포함하는 장기간의 대형사업으로서 개발의 투자위험을 감소시키기 위해서는 설계단계에서 경제성과 생산성을 감안한 터미널의 적정 규모가 판단되어야 한다. 터미널의 적정 규모는 컨테이너물동량이 선박 또는 외부트럭을 통해서 대형 또는 소량으로 유입될 때 적정의 서비스 수준을 유지하면서 하역작업을 최적으로 수행할 수 있는 터미널 능력을 의미하고 있다. 이러한 터미널 능력과 직접적으로 관련된 시설물로는 선박 접안시설인 안벽, 컨테이너 적재장소인 장치장 그리고 게이트 등이 있다.

컨테이너터미널 설계 중 상부시설 설계는 항만의 운영에 직접적인 영향을 미쳐 개발될 항만의 처리능력과 고객들에 대한 서비스 수준을 결정짓는 개발초기의 주요 고려사항이 된다. 항만의 모든 기능들을 고려하여 최적의 평면배치 설계를 이끌어냄으로써 하부기반시설 설계를 최적화시키고 컨테이너터미널 개발시 가장 적절한 투자비용과 운영비용을 산출하는 선행작업이기 때문에 항만개발에 있어서 가장 중요한 역할을 한다.

상부시설 설계는 개발대상 컨테이너터미널의 초기 계획단계에서 이루어지는 것이 아니라 대부분이 기본설계 중후반에 이루어져 왔다. 상부시설 계획 및 설계를 전문적으로 수행하는 기관이 없었기 때문에 초기 계획단계에서 상부시설 계획이 반영되지 못하고, 기본설계 중후반에 하부설계를 담당하는 설계업체에 의해 기존 컨테이너터미널 운영방식을 답습하는 방법으로 설계되었다.

이미 국외에서는 JWD(Jordan Woodman Dobson)와 HPC(Hamburg Port Consulting) 등은 시물레이션 방법을 이용한 상부시설 설계를 수행할 뿐만 아니라 자동화 하역시스템 개발에도 이러한 방법을 적용시키고

있는 상황이다.

또한 국외의 선형 업체들이 가지는 장점은 기존의 항만 운영경험과 경험적 지식들을 설계과정에 반영시키는 지식기반 설계(Knowledge-based Design)를 하면서 동시에 시뮬레이션에 이러한 경험적 지식을 접목하고 있다.

경험적 지식과 시뮬레이션 방법의 통합화는 먼저 시뮬레이션이 가지는 장점인 시계열적인 추세를 반영한 항만의 설계조건을 반영하는 것이다. 다양한 시나리오에 의한 피크시의 최대능력치 산출과정에 경험적 지식인 항만 운영경험상 일반화된 수치와 이론적 결과물을 반영하는 것이다. 또한 이러한 통합화를 시뮬레이션이 주도할 경우 다양한 의사결정 기준을 시나리오에 반영하여 대안별 분석결과를 의사결정자가 판단하도록 해주는 장점을 가지게 된다.

따라서 본 연구에서는 컨테이너터미널의 설계에서 경험적 지식과 시뮬레이션 방법의 통합화를 위해 지식기반 시뮬레이션의 타당성을 제기하고, 설계단계에서 각 설계대상별로 시뮬레이션할 경우 다루어야 할 경험적 지식들을 분석하였다. 이를 통하여 기존의 경험적 수치계산이 다양한 시나리오 분석의 한계와 시뮬레이션의 불확실성의 범위를 좁히기 위한 방안을 제시한다. 또한 과거부터 누적된 전문가의 지식을 바탕으로 의사결정을 효과적으로 하기 위한 방향을 제시하고자 한다.

II. 기존 연구 고찰

국내 항만개발에서 컨테이너터미널 설계의 초기작업은 안벽의 적정 처리능력을 산정하는 것이며, 초기 방식은 UNCTAD가 1973년에 발간한 “Berth Throughput”¹⁾과 1985년에 발간한 “Port Development”²⁾에서 제시한 내용을 근간으로 하였다. 그렇지만 해운여건의 급격한 변화와

1) UNCTAD, *Berth Throughput*, United Nations, 1973.

2) UNCTAD, *Port Development*, United Nations, 1985.

하역장비의 고성능화 상황과 비교할 때 UNCTAD가 제시하는 방식이 가지는 전제조건에 포함된 가정과 조사 당시 주변 상황은 현재 항만이 지니는 특성을 제대로 반영하지 못하는 실정이다.

또한 UNCTAD는 1992년에 발행된 “Port Development”에서 서비스 평가지표의 하나로 선박대기시간 비율을 제시하고 있다. 그러나 제시한 항만개발 계획용 선박대기시간 비율표에 의해 산출되는 적정 선석점유율의 기본가정과 전제조건이 현재의 상황과는 많은 차이를 보이고 있다.³⁾

그러나 국내에서는 아직도 UNCTAD에서 제시한 서비스 평가지표를 항만개발계획 수립시에 컨테이너터미널의 적정능력 산정에 이용하고 있다.

1999년도에 부산 신항만을 설계한 미국의 JWD사는 선박대기척수 비율을 적용하여 터미널 규모를 산정하기 위한 기준으로 삼았고, 시뮬레이션을 이용하여 적정능력을 산정하였다. 그리고 최근에 적용되는 적정능력의 판단기준인 최대수요가 발생했을 때 1% 이내의 대기율 허용한다는 조건도 제시하였다.⁴⁾

이와는 달리 독일의 HPC사는 선석의 적정능력 산출시에 입항여건에 대한 분석에 최선의 상황과 최악의 상황을 감안하여 현실적인 수용가능기준을 제시하는 방법을 사용하였다.⁵⁾

이러한 설계기준의 도출과 경험적 설계방법은 항만에 대한 기술적 자문 또는 운영경험의 체계적인 지식화 과정을 통해서 이루어진다고 할 수 있다.

최근에는 시뮬레이션이 컨테이너터미널의 운영과 성능을 향상시키기 위한 중요한 툴이 되었다.⁶⁾ 또한 시뮬레이션 방법의 적용범위에 따라

3) 양창호 외, “컨테이너터미널 선석처리능력 추정방안에 관한 연구”, 한국해양수산개발원, 2001.11.

4) Jordan Woodman Dobson, “Simulation Analysis Reports”, Pusan Newport Co., 1999.

5) HPC, *Planning Review for Busan New Port South Container Terminal*, Korea Port Engineering Co., 2004.

6) Günther, H. O. & Kim, K. H., “Container Terminals and Automated Transport Systems”, Springer, 2004.

전략적 시뮬레이션, 운영적 시뮬레이션, 전술적 시뮬레이션 등의 세가지 유형으로 구별된다.

첫째, 전략적 시뮬레이션은 컨테이너터미널의 효율성과 기대 비용 측면에서 시설배치(레이아웃)와 취급장비의 다른 유형을 연구하고 비교하는데 활용된다. 새로운 컨테이너터미널이 계획되거나 운영중인 컨테이너터미널의 시설물 또는 장비를 변경하고자 할 경우에 주로 사용된다. 또한 전략적 시뮬레이션 시스템은 다른 유형의 시설배치(레이아웃)와 다른 유형의 취급장비를 채택하고자 할 때 설계를 용이하게 해준다. 전략적 시뮬레이션의 주요 목표는 높은 성능(Performance)과 저비용(Low Costs)이 예상되는 시설배치와 취급장비에 대한 결정을 하는 것이다. 현실성을 맞추기 위해서 시뮬레이션 시스템은 운영중인 컨테이너터미널의 자료를 입수하거나 실현 가능성 있는 시나리오를 설계하도록 해야 한다.

둘째, 운영적 시뮬레이션은 다른 종류의 컨테이너터미널 로지스틱스와 최적화 방법들을 테스트하는 데 활용된다. 시뮬레이션의 범위가 대형 컨테이너터미널의 성장성을 수용하도록 해야 한다. 대형 컨테이너터미널의 운영과 로지스틱스는 이미 매우 복잡하며 로지스틱스 또는 최적화 방법에 대한 대안의 영향이 객관적인 방법으로 테스트되어야 한다. 그러므로 최적화 방법들이 실제 컨테이너터미널의 제어와 조종 시스템에서 활용되기 전에 시뮬레이션 환경에서 테스트된다.

셋째, 전술적 시뮬레이션은 컨테이너터미널의 운영시스템내로의 시뮬레이션 시스템의 통합을 의미한다. 운영의 변이가 운영에 대하여 병렬적으로 시뮬레이션 되며, 실제 운영에서 장애가 발생했을 때 처리 대안에 대한 조언들이 제공된다. 그런 다음 운영의 실제 데이터가 수집되어야 하고 운영에 따라 동시에 분석된다.

이상에서 살펴본 세가지 유형별 시뮬레이션에서 컨테이너터미널의 설계과정은 전략적 시뮬레이션에 해당하며, 높은 성능과 저비용으로 시설배치와 취급장비를 결정하고자 하는 목표를 달성하기 위해서 운영중인 컨테이너터미널의 자료를 입수하거나 운영경험을 반영할 필요가 있다. 따라서 설계를 얼마나 현실성있게 수행하는가는 경험적 지식을 시

물레이션에 충분히 반영하여 실현 가능성이 있는 시나리오로 설계하는 것이다.

국내의 컨테이너터미널 관련 시물레이션 연구는 대부분이 각 대학에서 연구용으로 개발한 시물레이션 모델의 개발 사례를 발표하고 있는 실정이다. 또한 컨테이너터미널을 대상으로 시물레이션 모델의 설계방법론 또는 설계연구를 수행한 연구결과를 발표하고 있다. 그러나 실제 개발 이후의 적용사례와 성능에 대한 연구는 많지 않으며, 설계 이후 개발을 완료하여 적용한 사례도 많이 발표되고 있지 않으므로 연구의 지속성과 현장 적용성이 떨어지는 한계를 가지고 있다.

기존에 컨테이너터미널 관련 시물레이션 연구를 살펴보면, 특정 컨테이너터미널 적용 연구, 일반화된 컨테이너터미널 적용 연구, 자동화 컨테이너터미널 적용 연구 등으로 나눌 수 있다.

특정 컨테이너터미널 적용 연구는 <표-1>의 자성대부두와 <표-2>의 신선대부두 적용 연구로 구분된다. 일반화된 컨테이너터미널 적용 연구는 <표-3>과 같이 운영분석 및 성능분석이 주요 연구 대상이었다. 자동화 컨테이너터미널 적용연구는 <표-4>와 같이 국내에 존재하지 않는 대상에 대해서 가정에 의한 시스템 정의로 시물레이션 연구가 진행되고 있다.

<표-1> 자성대부두를 대상으로 한 시물레이션 연구

저자	모델 내용	모델링 방법	유형
조덕운(1985)	터미널 운영 모수 결정으로 운영대안 비교 및 정책 분석	POS ⁷⁾	전략적
장성용, 박진우 (1988)	운영시스템 및 시설배치 결정 운영장비 최적 조합 실험	POS	전략적
유승렬(1997)	선석 하역시스템의 처리능력 분석	POS	전략적
임봉택 외 3인 (1998)	항만의 운영관점에서 물동량 변화에 따른 분석	POS	전략적

7) POS(Process Oriented Simulation)는 물류흐름에 따라 시물레이션 로직을 구현함.

〈표-2〉 신선타부두를 대상으로 한 시뮬레이션 연구

저자	모델 내용	모델링 방법	유형
윤원영 외 3인 (1998)	운영계획을 분석하기 위한 시뮬레이션 시스템 제시	OOS ⁸⁾	전술적
윤원영 외 3인 (2001)	객체지향 접근법을 사용한 시뮬레이터 설계 방법론 제시	OOS	-

〈표-3〉 일반 컨테이너터미널을 대상으로 한 시뮬레이션 연구

저자	모델 내용	모델링 방법	유형
김우선, 남기찬 (1998)	운영대안 분석을 위한 시뮬레이션 시스템의 모듈화 설계	POS	운영적
윤원영, 최용석 (1999)	객체지향 시뮬레이션 모델 제시 및 장비 운영 대안 분석	OOS	전략적
장성용 (1999)	선석배치 및 크레인 할당에 대한 운영정책 분석	POS	전략적
성경빈 외 3인 (2000)	터미널 운영 자료를 이용한 대안실험 및 모형 검증	DEVS	운영적
윤원영 외 3인 (2000)	객체지향 접근법을 사용한 시뮬레이터 설계 방법론 제시	OOS	-
윤원영 외 3인 (2001)	컨테이너 크레인 고장을 반영한 하역능력 추정에 관한 연구	OOS	운영적
최용석 (2004)	장비할당 전략에 따른 성능분석을 위한 척도제시	OOS	전략적

8) OOS(Object Oriented Simulation)는 객체지향 시뮬레이션으로 객체가 속성과 메소드(또는 로직)를 가지고 있음.

〈표-4〉 자동화 컨테이너터미널을 대상으로 한 시뮬레이션 연구

저자	모델 내용	모델링 방법	유형
장성용, 용운중 (1998)	자동화 컨테이너터미널 시뮬레이터 구상안 제시 및 예제 모델 분석	POS	전략적
배종욱 외 2인 (2000)	표면반응법을 이용한 수평배치 터미널의 버퍼장치장 장비규모 결정 연구	OOS	전략적
김갑환 외 4인 (2002)	자동화 컨테이너 야드의 운영규칙 연구	POS	운영적
윤원영 외 2인 (2003)	자동화 컨테이너터미널의 이적운영 규칙 연구	OOS	운영적
이용환 외 4인 (2003)	자동화 터미널의 AGV 시스템 운영방안 연구	OOS	운영적
하태영 외 2인 (2004)	자동화 터미널의 AGV 운영방안 평가연구	POS	운영적

위에서 살펴본 바와 같이 컨테이너터미널 대상 적용 연구와 자동화 컨테이너터미널의 운영에 대한 연구 등에서는 전략적 시뮬레이션과 운영적 시뮬레이션이 주로 수행되고 있으며, 시뮬레이션이 새로운 컨테이너터미널 개발을 위한 대안을 제시하는 기능을 가지고 있다.

현재는 국내에서도 컨테이너터미널의 운영경험과 축적된 자료에 의해서 다양한 평가지표의 활용 및 원시자료의 가공을 통한 이차 평가지표의 개발도 가능한 시점에 도달하였다.⁹⁾ 즉, 컨테이너터미널에 대한 운영실적이 1994년 이후 체계화된 평가지표로서 지속적으로 발표되고 있어 경험적 지식의 활용에 지장을 초래하지는 않는다. 그리고 시뮬레이션 방법의 컨테이너터미널에 대한 적용연구도 위에서 살펴본 것과 같이 1990년대 후반 이후에 지속적으로 이루어져 시뮬레이션 모델의 다양성을 갖추고 있다.¹⁰⁾

9) Choi, Y. S., "Simulation Study for Performance Measures of Resources in a Port Container Terminal", *International Journal of Navigation and Port Research*, Vol.28, No.7, 2004.

10) 양창호, 최용석, "컨테이너터미널 계획 시뮬레이션 개발방향 연구", 「해양정책 연구」, 제17권, 제2호, 2002.

Ⅲ. 기존의 경험적 설계방법의 검토

컨테이너터미널의 경험적 설계에서 과거의 주요 관심사는 안벽의 서비스수준인 선박 대기시간과 C/C(Container Crane) 하역능률이다. 따라서 여기서는 선박 대기시간과 크레인 하역능률에 대해서 기존의 경험적 설계방법에 대해서 시뮬레이션과 비교 검토하였다.

1. 선박 대기시간 분석

선석에서 선박의 대기시간을 분석하는 방법으로는 대기모형 공식에 의한 방법, UNCTAD에서 제시한 방법, 시뮬레이션에 의한 방법 등 크게 세가지 방법이 주로 사용된다. 본 연구에서는 비교를 위해서 4선석으로 운영되는 부산의 신선대부두를 대상으로 분석하였다.

먼저 선박 대기시간을 분석하기 위한 전제 사항은 다음과 같다. 컨테이너터미널에서 발생하는 선박의 대기는 집안시설인 선석의 부족 또는 배후의 장치장 부족에 의하여 발생할 수 있다. 따라서 선박의 체선현상은 안벽과 장치장을 고려한 다중경로·다중과정(Multiple Channel·Multiple Phase)의 대기행렬 모형이다.

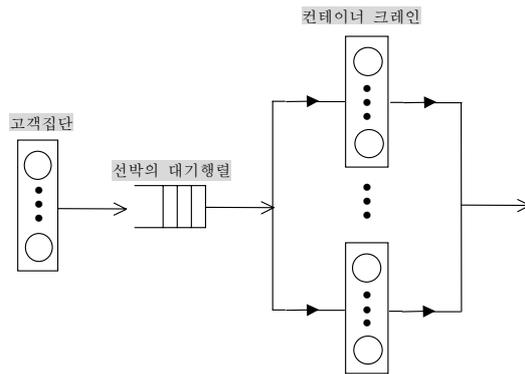
그러나 최근에는 새로운 컨테이너 터미널의 건설과 기존 시설의 확장으로 장치장 공간 부족으로 인한 체선현상은 거의 발생하지 않으므로 선석의 부족만을 고려한 다중경로·단일과정(Multiple Channel·Single Phase)을 가지는 대기모형으로 볼 수 있다. 그리고 야드 트랙터의 대기행렬은 작업을 할당받은 특정한 C/C와 TC(Transfer Crane)에 의해 각각 작업을 위한 대기가 발생하므로 단일경로·단일과정(Single Channel·Single Phase)을 가지는 대기모형이다.¹¹⁾

따라서 선박 대기모형의 경우 <그림-1>과 같이 터미널의 빈 선석이

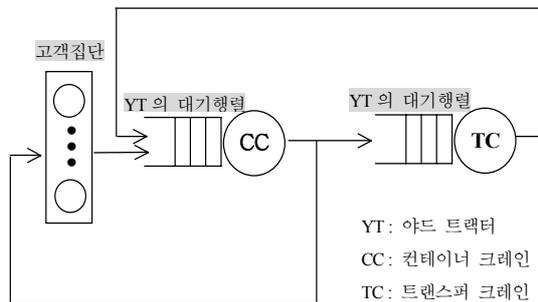
11) 윤원영 외, "컨테이너 터미널에서 컨테이너 크레인의 하역능률 추정에 관한 연구", 「IE Interfaces」, Vol.13, No.4, 2000.

있을 경우 즉시 접안하고, 빈 선석이 없을 경우 묘박지에서 대기행렬을 형성한다. 선석을 점유한 후에는 C/C에 의해 서비스를 받은 후 출항하게 되는 개방형 네트워크를 형성한다. 선박이 접안하여 C/C가 작업을 시작하게 되면 YT(Yard Tractor)가 도착하여 컨테이너를 싣고 장치장으로 운반하는 작업을 수행한다. 그리고 장치장에서 TC에 의해 작업을 받은 후 다시 다음 작업을 위해 C/C로 돌아오게 된다. 이때 C/C가 작업 중이면 대기행렬을 형성한다. <그림-2>와 같이 야드 트랙터는 일정수가 장치장과 선석간을 순환하게 되므로 폐쇄형 네트워크를 형성한다.

<그림-1> 선박의 대기모형



<그림-2> 야드 트랙터의 대기모형



1) 대기모형 공식에 의한 방법

컨테이너터미널의 선석을 서비스 시간 분포가 통계적 관측치의 평균과 같은 지수분포인 다중경로시설물로 고려하여 선박의 대기시간을 계산한 근사식¹²⁾은 식(1)과 같으며, <그림-1>의 다중경로·단일과정 시스템을 모델화한 것으로 W_q 의 앞부분은 단일과정에서의 대기시간이며, 뒷부분은 다중경로에서 모든 선석이 바쁜 경우의 확률을 나타낸다.

$$W_q = \frac{\rho}{\lambda(1-\rho)} \frac{a^n/N!}{a^n/N! + [(1-a/N) \sum_{n=0}^{N-1} a^n/n!]} \dots\dots\dots (1)$$

- W_q : 선박의 평균 대기시간
- λ : 선박의 평균 도착률(선박수/시간)
- μ : 평균 서비스율(선박수/시간)
- a : λ/μ
- N : 서비스 받는 창구의 수(선석 수)
- ρ : 이용률, $\lambda/(\mu*N)$

분석 대상 컨테이너터미널은 선석 수가 4개인 신선대부두이며, 2002년 선박들의 평균도착시간 간격은 5.766시간으로 시간당 0.1734척이 도착하였다. 이를 4개의 선석별로 도착시간 간격을 구하면 일량(ExpMean, 2)인 분포를 따르는 것을 알 수 있었다. 선석별 ExpMean은 13.9시간, 13.5시간, 16시간, 18.4시간이었다. 따라서 식(1)에 의해 선박의 평균대기시간을 구한 결과 1.2989시간이었다.

2) UNCTAD Port Development에서 제시한 방법

UNCTAD의 자료¹³⁾에 의하면 선박도착 시간간격은 지수분포, 하역시

12) 이철영, 문성혁, “항만운송시스템의 분석에 관한 연구”, 「한국항해학회지」, 제7권, 제1호, 1983.
 13) UNCTAD, *Port Development*, United Nations Publications, 1992, pp.219~222.

간은 얼랑-II분포에 가까운 것으로 추정하고 있다. 따라서 대기행렬이론에 의거하여 선박도착 시간간격과 하역시간의 분포가 각각 지수분포 및 얼랑-II분포인 경우의 선석 점유율과 선석수에 따른 평균 하역시간에 대한 평균 대기시간의 비율을 구하면, 신선대부두는 4선석이고 2002년도 평균 선석 점유율이 52.1%이므로 <표-5>의 UNCTAD 자료에서 평균 하역시간에 대한 평균 대기시간은 0.071시간이 된다.

<표-5> 평균 하역시간에 대한 평균 대기시간

선석 점유율	선석수						
	1	2	3	4	5	6	7
0.47	0.64	0.20	0.09	0.05	0.03	0.02	0.02
0.48	0.66	0.21	0.09	0.05	0.04	0.03	0.02
0.49	0.69	0.23	0.10	0.06	0.04	0.03	0.02
0.50	0.72	0.24	0.11	0.06	0.04	0.03	0.02
0.51	0.74	0.25	0.12	0.07	0.04	0.03	0.02
0.52	0.78	0.26	0.13	0.07	0.05	0.03	0.03
0.53	0.81	0.28	0.13	0.08	0.05	0.04	0.03
0.54	0.84	0.29	0.14	0.08	0.05	0.04	0.03
0.55	0.88	0.31	0.15	0.09	0.06	0.04	0.03
0.56	0.91	0.33	0.16	0.10	0.06	0.05	0.03
0.57	0.95	0.35	0.17	0.11	0.07	0.05	0.04

3) 시뮬레이션 모델에 의한 방법

<그림-1>과 <그림-2>의 대기모형을 시뮬레이션 모델로 프로그램화하여 10회 반복실험을 하여 구한 실험결과는 <표-6>과 같다. 10회 실험의 결과값에서 산정된 평균 선박 대기시간은 0.292시간이었다.

<표-6> 선박의 대기시간 실험 결과

구분	실험 회수										평균
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
대기시간 (시간)	0.293	0.069	0	0.069	1.091	0.632	0.538	0.231	0	0	0.292

2002년도 신선대부두의 경우 선박 평균 접안시간이 18시간, 체선율이 2.0%, 대기율이 1.6%였으며, 선박의 평균 대기시간은 0.288시간(18시간×0.016)이었다. 따라서 시뮬레이션 실험을 일정한 회수 이상 반복하는 것이 실제값에 더 근접한 값을 제공한다는 것을 알 수 있다.

대기모형 공식에 의한 방법은 선박의 도착과 서비스가 지수분포인 모형이므로 실제 선박의 도착이 지수분포를 따르지 않을 경우 실제값과 차이를 가지게 되며, UNCTAD의 자료는 지수분포와 얼랑-II분포로 추정된 방대한 자료를 제공하고 있지만 하역시간이 실제상황을 잘 반영하지 못하고 있다. 반면에 시뮬레이션 방법은 선박의 도착에 따라 하역작업을 수행하는 C/C와 YT의 작업상황을 묘사하여 더 상세한 상황을 반영한다고 할 수 있다.

2. 컨테이너 크레인의 하역능력 분석

안벽에서 선박대기시간과 함께 서비스지표로 많이 사용되는 C/C의 하역능력 분석은 Watanabe의 경험적 방법¹⁴⁾과 시뮬레이션 모형에 의한 결과를 비교하였다. Watanabe의 경험적 방법은 컨테이너터미널의 환경에 따라 계수를 결정할 수 있도록 해주면서 실제값에 매우 근사한 값을 제공하는 효과적인 방법이기 때문에 비교대상으로 선정하였다.

1) Watanabe의 컨테이너터미널 능력분석 수법

Watanabe는 컨테이너터미널 능력분석의 방법으로 컨테이너터미널 생산성에서 중요한 지표가 되는 C/C의 하역능력을 경험적 자료를 바탕으로 분석하여 식(2)와 같은 공식을 제시하였다.

$$E_c = \alpha \frac{60 * 60}{r_c T_c} \text{ (TEU/h)} \dots\dots\dots (2)$$

14) Watanabe, I., "Characteristics and Analysis Method of Efficiencies of Container Terminal-An Approach to the Optimal Loading/unloading Method", *Container Age*, March, 1991.

T_c : 이론적 사이클타임

α : 컨테이너 개수를 TEU로 환산하는 계수

r_c : 이론적 사이클타임과 실제 사이클타임을 수정하는 계수

식(2)에서 T_c 는 이론적 사이클타임, α 는 컨테이너개수를 TEU로 환산하는 계수, r_c 는 이론적 사이클타임과 실제 사이클타임을 수정하는 계수이다. 일반적으로 T_c 값은 크레인 제작자가 설계할 때 권상·하 속도, 트롤리 횡행속도 및 그들의 가감속 성능 등의 기준을 바탕으로 정격 하중의 컨테이너를 한개 하역하는 데 소요되는 사이클에 관해서 계산된 것으로 100초 전후로 추정하여 사용하므로 r_c 값을 1.2~1.6정도로 설정하여 사용한다.¹⁵⁾ 그러나 이론적 사이클타임에 기초하여 $r_c=1$ 로 하여

E_c 를 계산하면 시간당 30~40개로 되는데, 실제 하역작업에서는 해치 커버의 개폐, C/C의 주행, 장치장착 TC의 대기시간 등이 있으므로 하역 시작시간부터 종료시간까지의 하역능률을 확보하는 것은 불가능하다.

식(2)에서 E_c 값은 r_c 값이 1.2일 때 46.5TEU(30VAN), r_c 값이 1.6일 때 34.88TEU(24.44VAN)이었다. 따라서 E_c 값은 22.44VAN에서 30VAN 사이에서 경험적으로 결정하게 된다. 그러나 컨테이너 터미널마다 r_c 값은 다를 수 있으며, 각 터미널의 상황에 적절한 r_c 값의 결정은 상당기간의 운영경험이 필요하다. 따라서 컨테이너터미널에서는 이론적 사이클타임을 시간당 40개로 하여 컨테이너 하나 처리하는 데 114초가 소요되는 것으로 가정하고 하역능률을 산정하고 하역작업을 계획하게 된다.

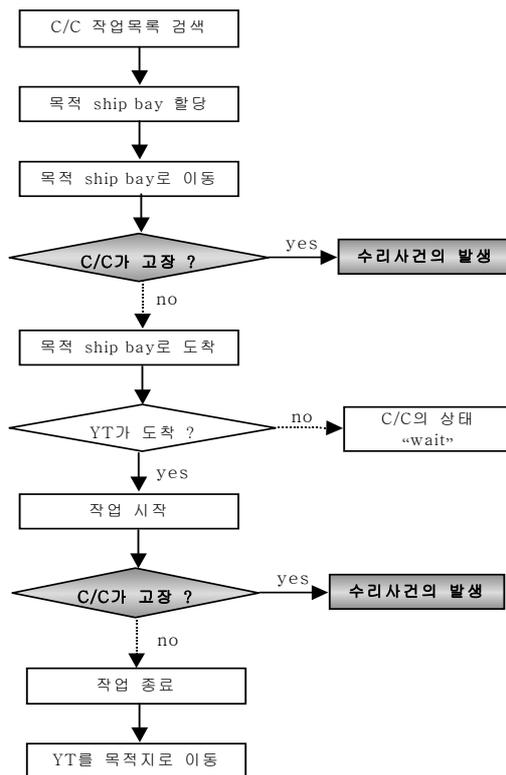
2) 시뮬레이션 모델에 의한 하역능률 산정

C/C의 하역능률을 산출하기 위해서 시뮬레이션 모델에서 반영한 운

15) 신선대 터미널에서 실제 C/C 작업시간을 관측한 결과 컨테이너 한개 처리시 평균 112.8초, 표준편차 31.2초인 정규분포를 따르는 것으로 나타났음.

영상황은 다음과 같다. 먼저, C/C가 양하작업을 할 때는 선입선출 방식으로 YT에게 작업을 할당한다. 그러나 적하작업을 할 때는 선박에 적하해야 할 순서가 이미 정해져 있으므로 선입선출이 아닌, 우선순위 방식으로 YT를 처리하게 된다. 따라서 C/C의 작업 흐름도는 <그림-3>과 같으며, C/C의 하역능률에 미치는 영향이 큰 고장사건을 반영하기 위해서 고장사건은 크레인의 이동과 작업을 지시받는 시점에서만 확인이 가능하며, 대기상태와 유힬상태에서는 고장사건을 관측할 수 없다고 가정하였다. 또한 고장과 수리시간은 지수분포를 따르는 것으로 가정하였다.¹⁶⁾

<그림-3> 컨테이너 크레인의 작업흐름도



16) 실제 C/C 고장에 대한 자료를 분석하여 경미한 고장(64%), 일반적 고장(32%), 치명적 고장(4%)으로 분류하여 수리시간을 반영하였음.

실험 대상 컨테이너터미널의 경우 2003년도 순작업 시간당 처리한 평균 컨테이너 개수는 27.3VAN이었고, 본 시뮬레이션 모델에 실험 결과를 요약하면, <표-7>과 같이 C/C의 총 작업시간에 대한 총 고장시간의 비율이 평균 0.35%이고, C/C의 평균 가동률이 64.7%인 상황에서 하역능률은 평균 27.66VAN이었다. 따라서 실제값인 27.3과 큰 차이를 보이지 않은 것으로 나타났다.

그러므로 실제 컨테이너터미널의 운영상황을 반영하여 물류흐름을 로직화하여 시뮬레이션 모델을 수립하고 영향인자인 C/C의 고장시간을 고려한다면 실제값에 가까운 추정치를 얻을 수 있다. 단 시뮬레이션은 실험 반복 회수를 늘려 안정적인 값을 확보하는 것이 필요하다. 이러한 방법을 통하여 Watanabe의 경험적 방법에서 모수로 처리되는 부분을 시뮬레이션에서 고려하여 현실성 있는 값을 구할 수 있었다.

<표-7> 컨테이너 크레인 하역능률 실험 결과

결과 항목	실험 회수										평균
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
총고장시간/총작업시간 (단위 : %)	0.15	0.40	0.44	0.46	0.15	0.15	0.55	0.04	0.09	0.24	0.35
가동률 (단위 : %)	61	59	63	63	70	63	69	68	67	61	64.7
하역능률(순작업) (단위 : VAN)	27.67	27.67	27.75	27.64	27.64	27.67	27.66	27.67	27.66	27.65	27.66

IV. 지식기반 시뮬레이션 설계 방안

1. 컨테이너터미널의 설계 범위

1) 설계 대상 시설물 정의

컨테이너터미널의 시설물은 컨테이너의 처리와 직접 관련된 시설인

게이트, 야드, 선석 이외에도 부가적인 시설물들이 사용되며, 이들 시설물들이 설계에서 고려될 경우에는 기능에 따른 분류가 필요하다. <표-8>과 같이 시설물들의 기능을 이송기능, 저장기능, 독립기능에 따라 분류해 보면, 이송기능을 수행하는 안벽, 야드, 게이트는 컨테이너 물류에 따른 상세한 분석이 필요하며, 안벽, 야드, 게이트는 이송을 위한 장비가 사용되므로 소요시설 규모와 함께 소요장비 규모의 산출을 위한 시뮬레이션 분석이 필요하다. 저장기능을 담당하는 마샤링 야드와 공 컨테이너 야드는 시설물의 규모를 결정하기 위해 시뮬레이션 분석이 필요하다. 독립기능을 하는 CFS는 면적의 산출이 필요하다. 기타 시설물들은 컨테이너 취급과 관련된 부가기능을 수행하므로 이송기능과 저장기능에 필요한 시설물과 장비의 규모가 결정됨에 따라 규모가 결정되게 된다.

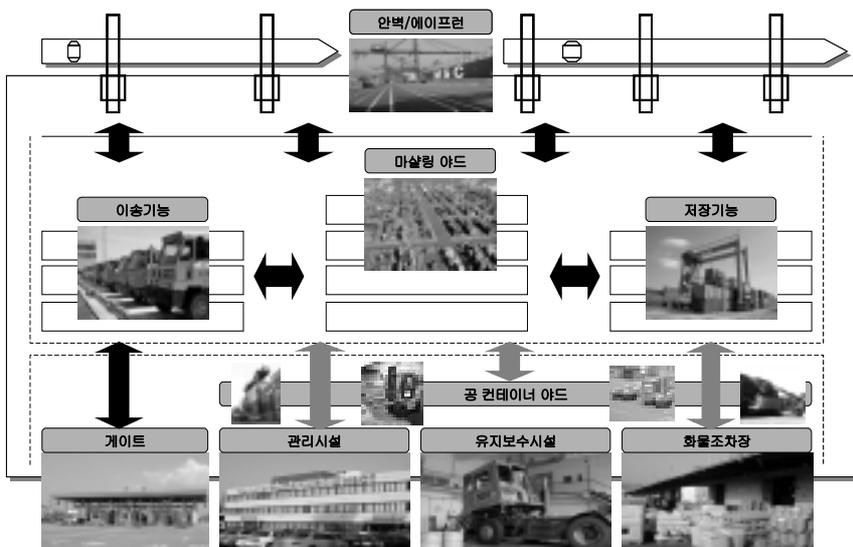
<표-8> 컨테이너터미널의 주요 시설물과 기능

시설물 \ 기능	이송기능	저장기능	독립기능
안벽과 에이프런	○		
마샤링 야드	○	○	
게이트	○		
컨트롤 타워	○		
관리 빌딩과 유지보수장	△	△	△
공 컨테이너 야드		○	
CFS(Container Freight Station)			○
장비용 유지보수시설	△	△	△
동력시스템	△	△	△
변전소	△	△	△
컨테이너 세척장	△	△	
컨테이너 수리장		△	

*: ○는 컨테이너 취급 주기능 수행, △는 지원 기능 수행.

<표-8>에서 분류된 컨테이너터미널의 시설물과 기능간의 관계를 도식화하면 <그림-4>와 같다. 즉 이송과 저장 기능을 하는 시설물(안벽, 야드, 게이트 등)이 초기에 먼저 결정되어야 하며, 백업기능을 수행하는 기타 시설물이 결정된다. 그런 다음 저장기능을 하는 공컨테이너 장치장이 결정된다. 따라서 이송과 저장기능을 하는 시설물의 소요규모 산정을 위해 시물레이션 방법이 적용되며, 지원기능의 기타 시설물은 산정된 물동량과 시설규모 및 소요인력에 따라 산출된다.

<그림-4> 컨테이너터미널 시설물과 기능간의 관계



2) 컨테이너터미널의 시스템적 정의

시설물과 기능간의 관계가 설정되면, 다음으로 컨테이너 물류측면에서 시스템적 정의가 필요하다. 컨테이너터미널 설계의 대상을 시스템적으로 정의하는 것은 경험적 지식과 시물레이션 방법을 통합화하기 위한 선행단계이기 때문이다. 일반적인 시스템 분석에 많이 이용되던 방법인 대기행렬네트워크(Queueing Network)는 시스템을 체계적으로 묘사하

고 서비스를 위한 고객의 도착과 출발을 묘사하면서 고객 서비스를 위한 서버(Server)를 정의하는 것이다. 컨테이너터미널의 경우는 고객이 개별 컨테이너와 개별 컨테이너를 다량 실은 컨테이너 선박이 되며, 서버는 게이트 입출구, C/C, TC가 된다. 그리고 고객이 서버에게서 서비스를 받는 장소가 장치장과 선석이며, 고객은 수입과 수출과정에 따라 역방향으로 서비스를 받게 된다.

게이트, 장치장, 선석 등의 단위 시스템의 경우 입출력모델을 단순화할 경우 대기행렬모형으로 묘사가 가능하며, 통계적인 의사결정변수를 적용할 수 있다. 그러나 컨테이너터미널을 통합된 하나의 시스템으로 고려할 경우에는 폐쇄형 대기행렬네트워크와 개방형 대기행렬네트워크가 혼재하는 복합 대기행렬네트워크(Mixed Queueing Network)를 형성한다.¹⁷⁾ 컨테이너터미널의 물류흐름을 컨테이너 위주로 표현한 복합 대기행렬네트워크는 <그림-5>와 같다.¹⁸⁾

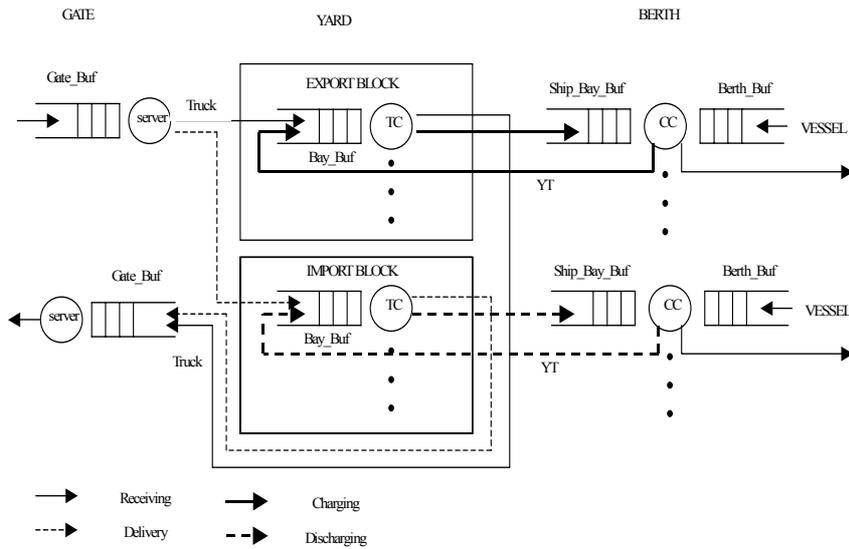
정의된 시스템은 주요 관측치인 서버의 수와 자원의 규모를 최적화 모형에 의한 방법으로는 해법을 제시할 수 없으므로 발견적 기법(Heuristic Method)에 의한 해법을 제시하는 것이 일반적이며, 컨테이너터미널 전체에 대한 문제에 대해서 부분적인 규모의 결정에는 전문가의 경험에 의한 의사결정이 이루어지며, 시뮬레이션을 적용할 경우에도 결정해야 될 의사결정 사항들이 내부적인 로직으로 처리되어 사용되고 있다.¹⁹⁾ 시뮬레이션과 관련된 기존 연구들은 참고문헌 “컨테이너터미널 계획 시뮬레이션 개발방향 연구”에서 참조할 수 있다.

17) Legato, P. & Mazza R. M., “Berth Planning and Resources Optimization at A Container Terminal via Discrete Event Simulation”, *European Journal of Operational Research*, Vol.133, No.3, 2001.

18) 각 시설물간의 흐름은 컨테이너이며, 컨테이너를 실은 차량과 선박이 대기행렬을 형성함. 또한 4가지 작업유형별로 다른 흐름과 장비가 적용됨.

19) 컨테이너터미널 관련 시뮬레이션 연구에서 운영분석과 계획분석이 많이 이루어졌으며, 운영분석에서 다루는 컨테이너터미널의 묘사 및 대안분석과 계획분석에서 다루는 성능분석이 컨테이너터미널 설계를 위한 부분적인 결과를 제공하고 있다.

<그림-5> 컨테이너터미널의 복합 대기행렬네트워크



2. 지식기반 설계 사항

컨테이너터미널의 각 영역별 서브시스템을 안벽, 선석, 게이트, 장치장으로 구분하고, 각 서브시스템별로 대기행렬 모형, 입출력관계 설정, 경험적 지식의 반영사항 등을 설명하며, 이를 통하여 시뮬레이션 적용에 용이하도록 설계과정을 정형화한다.

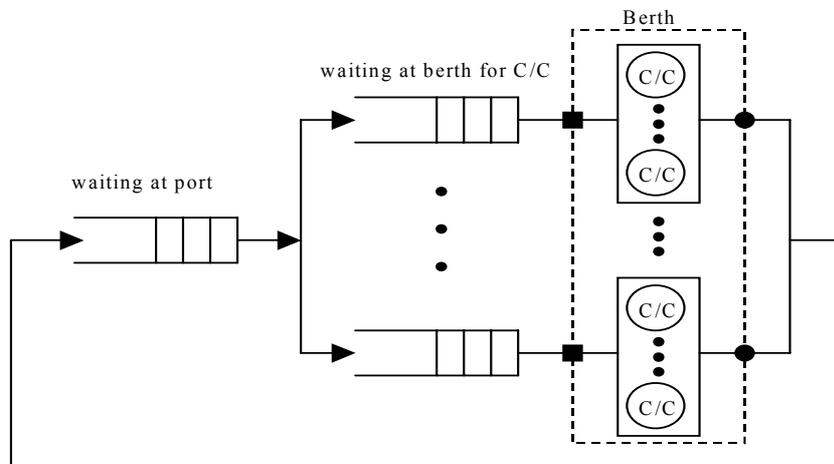
1) 안벽 모형화

(1) 입출력 관계

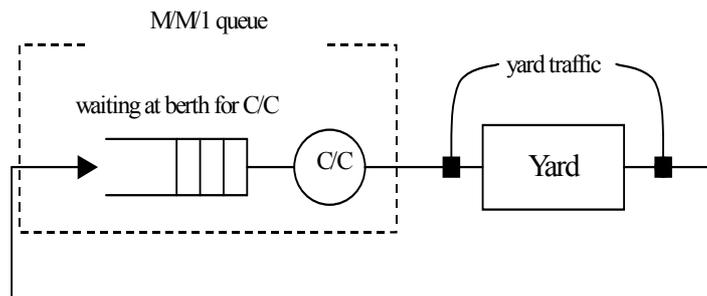
컨테이너선의 도착과 출발과정을 이용하여 안벽 모형을 분석하기 위한 대기행렬은 <그림-6>과 같다. 먼저, 컨테이너터미널 도착, 선석 집안, 하역작업 후 이안의 순서로 이루어지며, 서버는 선석별로 할당된

C/C가 된다. 또한 접안 이후의 개별 선석 모형은 C/C의 생산성과 적정 소요 대수 결정을 위한 모형으로 <그림-7>과 같은 대기행렬을 가지며, C/C의 작업을 위한 대기행렬에 YT의 장치장간 이동을 포함하고 있다.

<그림-6> 안벽 모형



<그림-7> 선석 모형



<그림-6>의 안벽 모형에서 주요 사건은 선박의 컨테이너터미널 도착, 선석 접안, C/C의 작업을 주요 사건으로 하며, 불확실성은 대기라인에서 상황에 따라 발생한다. 안벽 모형에서 출력 요소는 선박의 대기시

간, 선석별 대기시간, C/C의 대기시간 등이며, 이러한 결과물을 생성하기 위한 입력 요소는 선박의 도착률, 접안/이안 소요시간, 할당된 C/C 대수 등이다.

또한 <그림-7>의 선석 모형에서 야드 트래픽(Yard Traffic)이 포함된 것은 선석과 장치장간 거리에 따라 YT 선회시간 및 YT의 C/C 대기시간이 달라지기 때문이다. 그리고 C/C 앞에서의 YT의 대기는 M/M/1 Queue로 모형화되지만 시뮬레이션에 의해서 경험적 분포를 따르게 된다.

<표-9> 안벽 모형의 입출력 관계

입력 요소	대기라인	출력 요소
선박의 터미널 도착률	터미널 도착 대기라인	선박의 대기시간
선석 접안/이안 소요시간	선석 도착 대기라인	선석별 대기시간
선석에 할당된 C/C대수	선석에 대한 선박의 대기라인	C/C의 대기시간

<표-10> 선석 모형의 입출력 관계

입력 요소	대기라인	출력 요소
선석과 장치장간의 거리	C/C앞 대기라인	YT의 C/C 대기시간
C/C의 작업시간	C/C의 속성에 반영	C/C 생산성
YT운행 장치장 시간	YT도착지점의 대기라인	YT의 선회시간

안벽 모형에서 필요한 입력정보는 선박정보, 화물정보, 시설정보, 장비정보 등이며, 선박정보는 입항예정 컨테이너선을 선형으로 구분하기 위한 LPC(Lift per Call), 선장, 선박도착 변동시간 등이 필요하며, 화물정보는 연간물동량, TEU/Box 비율, 화물구성비율 등이 필요하고, 시설정보는 안벽의 길이이며, 장비정보는 C/C의 생산성과 YT의 선회시간 등이다.

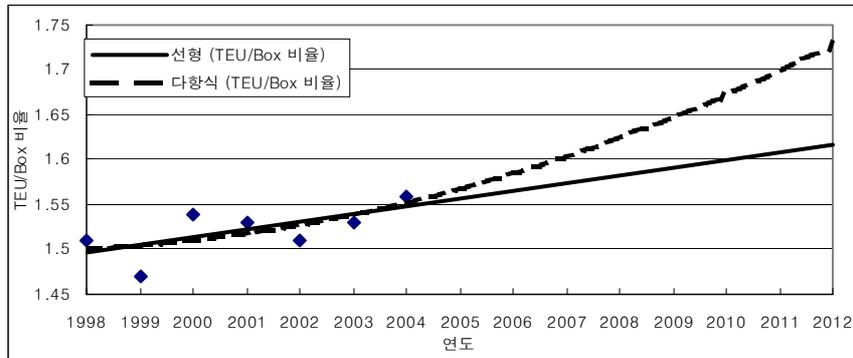
설계가 미래에 대한 예측을 포함하여야 하므로 이러한 정보들 중에서 TEU/Box 비율과 LPC, C/C 생산성은 시계열적인 분석에 의해서 목표

년도에 대한 추정치를 반영하는 것이 중요하다.

(2) TEU/Box 비율

TEU/Box 비율의 추정은 선박의 작업물량을 결정짓는 요소이므로 과거의 경험자료를 바탕으로 추정하는 것이 필요하다. 2004년도에 부산항 컨테이너터미널의 경우 1.56이며, 과거 1998년부터 2004년까지의 실적치를 바탕으로 추세를 반영한 결과, 선형적인 추세에서는 2010년경에 1.6에 도달할 전망이며, 다항식에 의한 결과는 1.65를 넘을 것으로 추정된다. 그러나 이러한 단순한 과거의 운영실적치에 대한 회귀분석으로 미래를 추정하는 것 이외에도 설계대상 항만의 특성이 반영되어야 한다. 즉 2004년 현재 한진감만, 허치슨감만, 한진감천 터미널이 각 1.64, 1.66, 1.64의 비율을 보이고 있어 미주항로가 많을수록 TEU/Box비율이 높고, 유럽항로가 많을수록 낮아지는 항로별 특성에 따라 좌우되고 있다.

<그림-8> TEU/Box 비율의 회귀분석



(3) LPC

LPC는 선박의 대형화에 따라 선박별 평균물량인 LPC가 증가될 것으로 예상되지만 부산항에서 선박당 하역량이 가장 많은 신선대 터미널의

운영현황을 증가세가 뚜렷한 2001년 이후를 살펴보면, 총처리물량, 총접안선박, 선석점유율 등의 항목은 상승세를 보이지만 선박당 평균하역량은 2002년 이후 수치에서는 감소세를 보이고 있다. 따라서 국내에서 가장 큰 대형터미널인 신선대 터미널이 신규터미널의 설계시 벤치마킹의 대상이 되고 있지만 선박당 평균하역량에서는 최근의 선박 대형화와 이에 따른 하역물량 증가세를 정확히 반영하지는 않고 있다.

〈표-11〉 신선대 터미널의 운영현황

항목 \ 연도	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
총처리물량(천TEU)	1,196	1,177	1,282	1,320	1,528	1,786	2,065
총접안선박(척)	1,036	899	869	980	975	1,142	1,402
선석점유율(%)	47.5	42.7	51.2	45.9	52.1	60.4	67.8
선박당평균하역량(TEU)	1,154	1,309	1,475	1,347	1,567	1,564	1,473

이상에서 살펴본 TEU/Box 비율과 LPC는 안벽 작업에서 중요한 변수로 작용하여 안벽 모형에서 정의한 대기라인에 변동요인으로 작용한다. 또한 선박도착에서 등간격 도착과 피크시를 감안한 도착을 고려할 경우 피크 상황에서 최악의 경우, 즉 선박의 지연이 연속적으로 발생할 경우 선박의 연속적 접안대기가 정규작업시간을 어느 정도 초과하는지에 대한 변동요인의 반영은 시뮬레이션의 다양한 시나리오 분석에서 반영되어야 할 것이다.

(4) C/C 생산성

C/C의 생산성은 기계적인 생산성, 순작업 생산성, 총작업 생산성 등에 대한 분석이 반영되어야 한다. C/C의 기계적인 생산성은 장비의 1회 사이클을 기준으로 시간당 약 45회의 왕복회수를 가지게 된다. 그러나 이 수치는 1회 사이클에서 발생하는 단순한 기계적인 동작에 의한 C/C

생산성이다. 국내에서 사용중인 싱글트롤리 크레인의 경우 C/C 생산성이 기계적 생산성의 91%선에서 결정되며,²⁰⁾ 기계적 생산성이 시간당 45lifts/h일 때 순작업 생산성은 약 41lifts/h가 된다. 또한 본선 하역작업을 수행할 경우 C/C 생산성은 해치이동, 해치커버 제거, 선내이적 처리 시간 등에 소요되는 시간을 포함하며, 총작업 생산성에는 Break Bulk 작업, 크레인 고장 등의 부가적인 시간도 포함되기 때문에 실제로는 더 낮은 값을 가지게 된다. 따라서 시뮬레이션을 통해서 순작업 생산성과 총작업 생산성 사이에서 목표 생산성값이 주어지게 된다.

〈표-12〉 C/C 생산성 산출

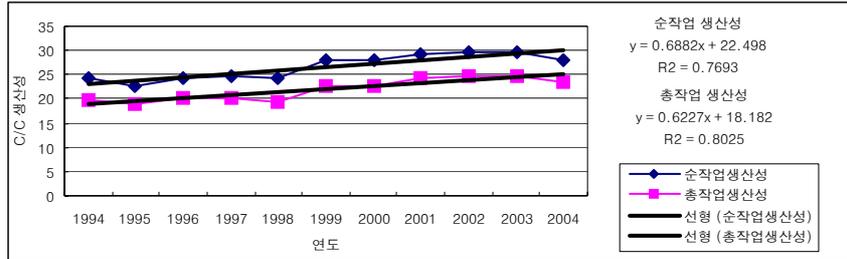
구 분	작업시간	생산성	산출근거
기계적 생산성	80sec/lift	45lifts/h	기계적 사이클타임만 고려
순작업 생산성	96sec/lift	41lifts/h	해치간 이동, 해치커버 제거, 선내이적 고려
실작업 생산성	-	목표 생산성	시뮬레이션 결과
총작업 생산성	114sec/lift	의사결정변수	Break Bulk 작업, 크레인 고장, 작업교대시간

설계시에는 목표 생산성을 달성하기 위해서 의사결정변수인 총작업 생산성을 설정하여야 하며, 이는 C/C의 사양과 관련이 있으나 미래 시점에 필요한 생산성을 예측하여야 한다. 먼저 과거의 실적치를 살펴보면, 선형적인 증가세를 가정할 경우 순작업 생산성은 1994년 23.18lifts/h에서 2004년 30.07lifts/h로 총작업 생산성은 18.80lifts/h에서 25.03lifts/h로 증가한 것을 알 수 있다. 결국 1994년부터 2004년까지 시간당 약 6~8개가 증가한 것이다(<그림-9> 참조).²¹⁾

20) 미국 Liftech사의 Crane Sim 모델에서 순생산성 산정시 적용하는 기준값임.

21) 한국컨테이너부두공단, 「컨테이너화물 유통추이 및 분석」, 각년도.

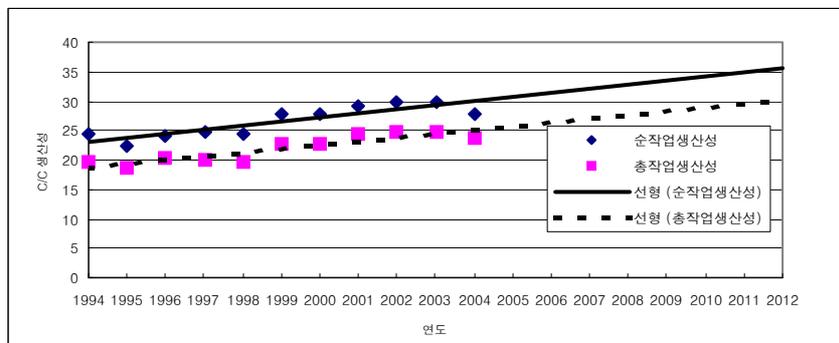
<그림-9> 부산항 컨테이너터미널의 C/C 생산성 변화 추이



과거의 운영실적을 바탕으로 향후 2012년 시점의 C/C 생산성을 예측 하면 다음 <그림-10>과 같다. <그림-10>과 같이 선형회귀식에서 보인 상관계수와 다항식에 의한 회귀식에서 보인 상관계수가 거의 동일하므로 회귀분석에 의한 추정에서는 순작업 생산성 상관계수 0.7693, 총작업 생산성 상관계수 0.8025 전제하에 성장추이를 살펴보았다. C/C 생산성 향상 정도를 현재와 같은 추세로 노후장비 교체 및 신규장비 투입을 해 나간다면 자연성장모델 가정하에서는 2012년경에 순작업 생산성은 약 35lifts/h, 총작업 생산성은 약 30lifts/h에 도달할 전망이다.

그러나 C/C 생산성을 자연성장모델을 가정하여 분석하였지만 부산항 6개 컨테이너터미널의 평균치를 적용한 것이며, 신규 컨테이너터미널이 대형 터미널인 점을 감안한다면 C/C 생산성은 더 높은 수치가 될 전망이다.

<그림-10> C/C 생산성 성장추이

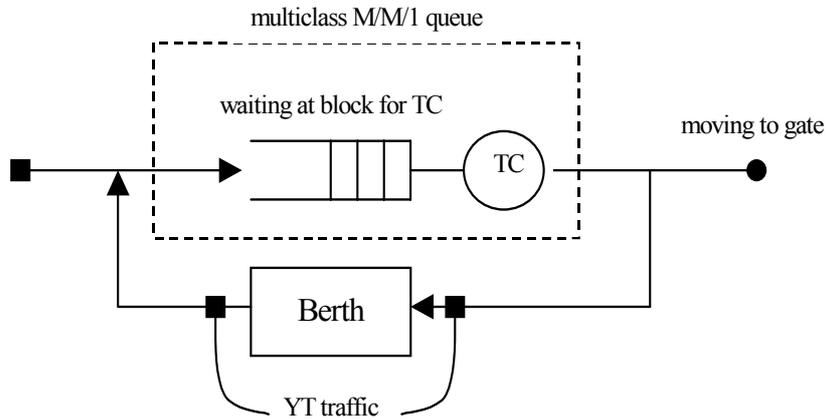


2) 장치장 모형

(1) 입출력 관계

장치장 모형은 서버인 TC가 고정고객인 YT와 일시고객인 외부트럭을 서비스하는 것이다. 외부차량의 경우 게이트에서의 도착분포와 게이트와 야드의 작업지점간 거리가 반영되어 내부 동선에 따른 트래픽을 형성하며, YT는 일정 대수가 터미널 내부를 운행하는 것으로 안벽에서의 C/C 작업과 내부 동선에 의해 도착률이 결정된다. TC 대기라인에서는 YT가 본선작업의 서비스를 위해서 외부차량보다 높은 우선순위를 가지면서 서비스를 받는다. 따라서 장치장 모형의 주요 입출력요소는 <그림-11>과 같이 YT와 외부트럭의 다중클래스(Multiclass) M/M/1 Queue를 형성하며, YT가 높은 우선순위를 가진다.

<그림-11> 장치장 모형



〈표-13〉 장치장 모형의 입출력 관계

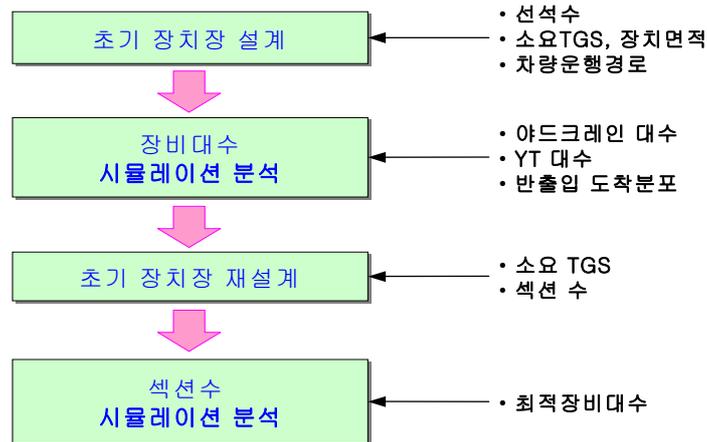
입력 요소	대기라인	출력 요소
게이트와 장치장간의 거리	TC앞 대기라인	외부차량의 대기시간
선석과 장치장간의 거리	TC앞 대기라인	YT의 TC 대기시간
TC의 작업시간	TC 속성에 반영	TC 활용도
차량의 운행 경로 및 시간 수출입 블록의 Layout	차량 도착지점에 대기라인	대기시간을 차량에 반영 외부차량의 장치장 체제 시간
TC대기라인 우선순위	TC앞 대기라인 우선순위결정(YT>외부차량)	

〈표-13〉의 출력요소에서 TC 활용도와 외부차량과 YT의 TC앞 대기시간이 장치장 모형에서 분석해야 할 TC의 개수 결정에 반영될 수 있다. 또한 외부차량의 장치장 내에서의 대기시간 및 개별 TC의 활용도도 분석할 수 있다.

(2) 설계절차

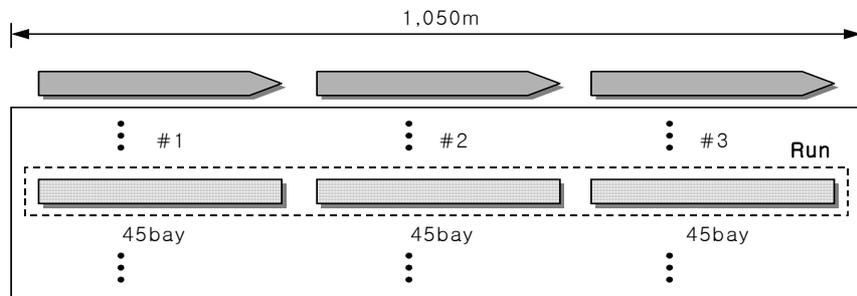
장치장 모형에서 주요 결정사항은 시설물인 야드의 규모 산정 및 배치와 장비인 TC 및 YT의 소요규모를 결정하는 것이며, 하부설계와의 연계성을 위해서 차량의 통행량과 동선의 결정이 필요하다. 그러므로 의사결정변수가 선후관계를 가지도록 설계절차를 가져가야 하며, 이를 단계별로 표현하면 <그림-12>와 같다.

〈그림-12〉 장치장의 단계별 설계절차

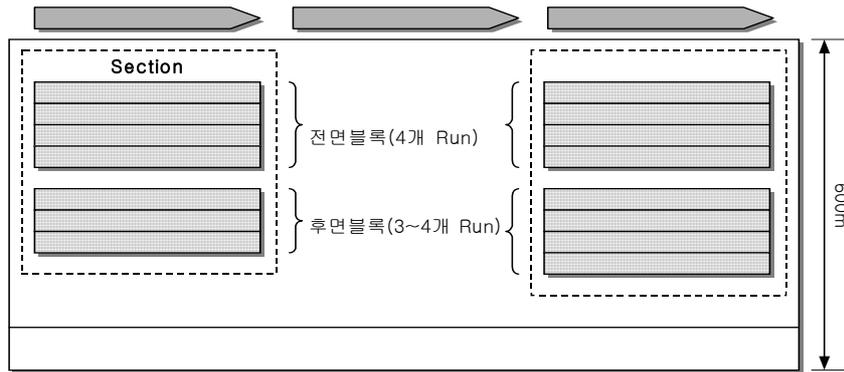


단계별 설계절차의 결정사항을 보기 위해 안벽길이 1,050m, 야드 폭 600m인 컨테이너터미널의 장치장을 설계하는 과정을 예를 들어서 설명한다. 먼저, 초기 장치장 설계는 안벽에서 결정된 선석수에 야드의 초기 배치형태를 결정하는 소요TGS와 장치면적에 의해서 결정되며, 초기 장치장 설계에서는 <그림-13>, <그림-14>와 같이 수평방향(Run)과 수직방향(Section)의 장치장 블록 배치 기준을 결정하게 되며, 이를 토대로 시뮬레이션에 의한 장비대수 분석을 통하여 장치장 하역장비인 TC와 YT의 대수를 산출하게 된다.

〈그림-13〉 장치장 수평방향(Run 당) 블록 배치



<그림-14> 장치장 수직방향(Section 당) 블록 배치

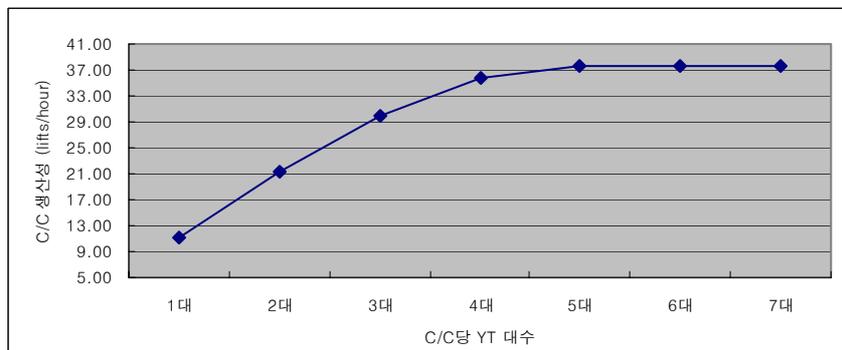


(3) 장비대수 분석

장비대수 분석은 안벽장비와 조별 작업을 담당하는 YT의 적정 장비 대수를 우선 결정한 후 이를 토대로 야드 장비 적정대수를 산출하는 과정으로 진행된다.

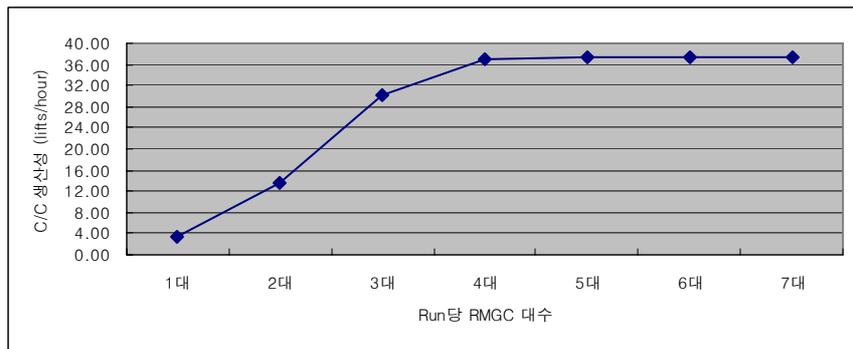
YT 적정대수는 C/C당 YT 투입대수 시나리오를 구성하고 시뮬레이션을 통하여 산출하며 일반적으로 <그림-15>와 같이 투입대수가 증가할수록 C/C의 생산성이 증가하는 형태를 가지며, C/C당 YT 대수로 적합한 대안은 5대로 판단될 수 있다.

<그림-15> YT 투입대수에 따른 C/C 생산성

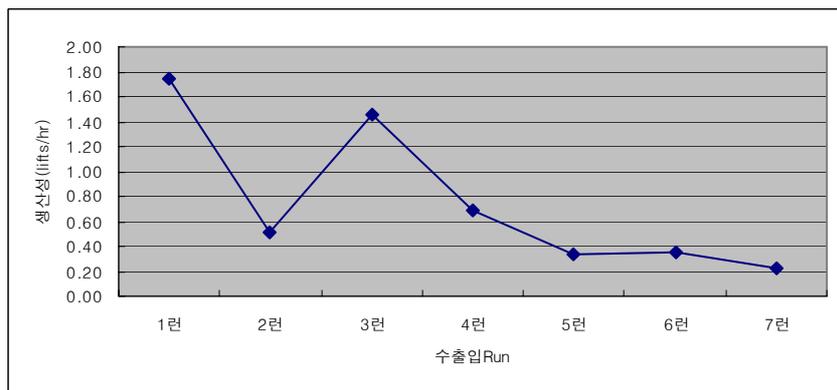


YT의 적정대수가 결정된 후에 이를 기준으로 야드 장비의 적정대수를 산출한다. 야드 장비의 적정대수는 터미널의 장치장 하역시스템의 구조에 따라 차이가 있는데, RMGC(Rail Mounted Gantry Crane)를 사용하는 장치장의 경우 블록의 Run당 작업대수를 증가시켜, 투입대수변화에 따른 C/C의 생산성 향상 변화를 고려하여 적정대수의 RMGC를 결정하며, <그림-16>의 예와 같이 증가세가 뚜렷한 Run당 4대가 적합한 RMGC 야드장비 대수가 된다.

<그림-16> RMGC 투입대수에 따른 C/C 생산성 변화 그래프



<그림-17> RMGC 추가 투입시 C/C 생산성 향상 효과

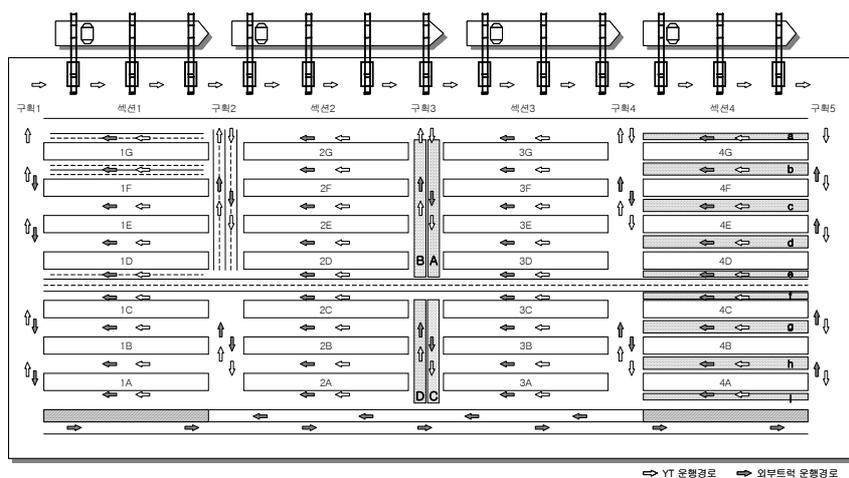


이상의 장비대수 분석에서 YT와 야드장비 적정대수가 산출되면, 또 다시 이를 기초로 하여 초기 장치장을 재검토 하는 초기장치장 재설계 과정을 거친다. 이 과정에서는 산출된 최적 장비대수를 이용하여 초기 장치장의 섹션수가 최적설계인지를 검증해 보는 단계로서 섹션수를 변화시켜 가며 시뮬레이션 분석을 수행하고, 최적의 섹션수를 결정하게 된다.

이상의 과정을 종합해 보면 장치장 설계 과정은 평면배치를 위한 초기장치장 설계 및 초기장치장 재설계의 2단계와 적정장비대수를 결정하기 위한 YT 적정대수 및 야드장비 적정대수 산출 시뮬레이션 분석의 2단계가 결합된 설계과정을 통하여 최종의 설계과정으로 요약된다.

이러한 일련의 설계과정을 통해서 장치장에 대한 최종 설계는 다음 <그림-18>과 같은 배치안이 작성되며, 확정된 배치안을 가지고 시뮬레이션 분석을 통하여 YT와 외부차량의 통행량을 측정할 수 있다. 터미널 내 차량 통행량 분석은 원활한 차량흐름을 위해 구획별 차량라인수를 결정하는 데 유효하게 사용될 수 있으며, 또한 이러한 통행량과 차량라인수는 터미널의 하부설계인 토목부문 기반공사에서 필요로 하는 지반암밀도 및 포장두께의 결정에도 확장성 있게 적용될 수 있다.

<그림-18> 장치장 배치와 차량의 동선



3) 게이트 모형

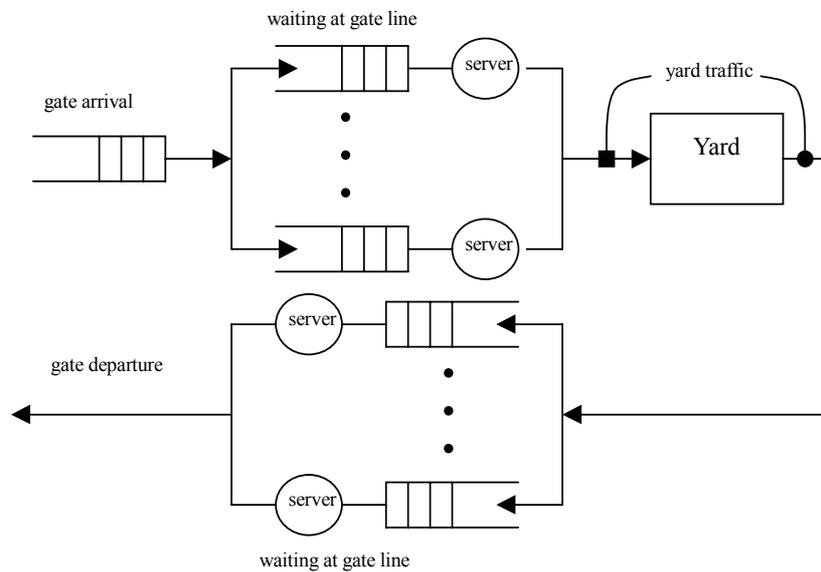
(1) 입출력 관계

게이트 시설을 시뮬레이션으로 분석하는 목적은 반출·입 게이트 레인수 및 야드 내 게이트 통과트럭 대기영역 규모를 산정하는 것이다. 주요 분석 대상은 게이트 대기 트럭의 길이와 대기영역의 대기 길이를 분석하여 게이트 입출구 활용도, 입출구 대기열의 길이 등 게이트 시설의 서비스 수준을 만족하는 레인수를 결정하는 것이다.

게이트 모형의 최적 게이트 구성을 위해서 게이트 작업을 묘사하기 위한 대기행렬 모형을 구성하면 <그림-19>와 같다.

<그림-19>

게이트 모형



<그림-19>의 게이트 모형에서 게이트 대기행렬에서 주어지는 입력 요소와 대기라인의 현상, 출력요소들의 관계를 정의하면 <표-14>와 같다.

<표-14> 게이트 모형의 입출력 관계

입력 요소	대기라인	출력 요소
게이트 입구 수 차량 도착률	게이트 입구 대기라인	게이트 입구 대기시간
게이트 입구 서비스 시간	게이트 입구 라인별 대기라인 라인선택은 FIFO	게이트 입구 서비스율 터미널 진입시간 차선 이용률
게이트 출구 수와 도착 시간	게이트 출구 대기라인	게이트 출구 대기시간
게이트 출구 서비스 시간	게이트 출구 라인별 대기라인 라인선택은 FIFO	게이트 출구 서비스율 터미널 체제시간

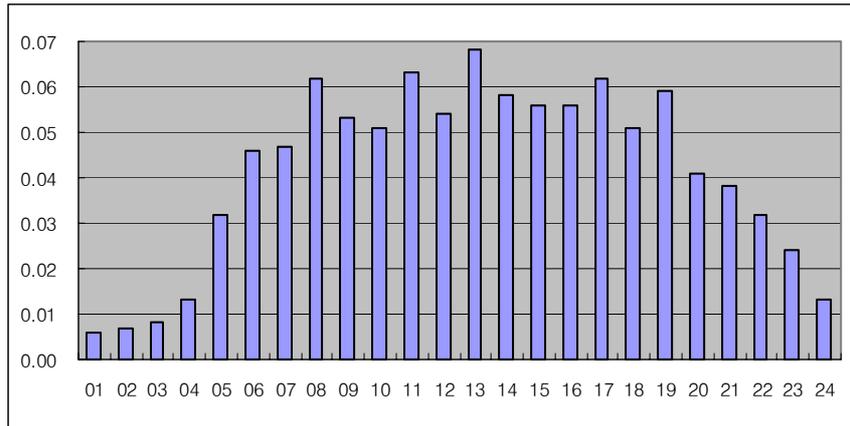
<표-14>의 입력요소가 주어질 때 대기라인에서의 현상을 반영하여 다양한 출력 통계량을 얻을 수 있다. 이를 분석하여 최적 게이트를 구성하기 위한 게이트 입출구 수를 산정할 수 있을 것이다.

(2) 차량 도착률

게이트 모형에서 주요 의사결정변수는 게이트 입출구의 라인수와 차량대기 길이의 결정이다. 여기에 필요한 운영자료는 차량의 도착률이며, 일일도착률과 시간대별 도착률이 반영되어야 하며, 시간대별 도착률은 다음 <그림-20>과 같이 실제 컨테이너터미널의 운영값을 활용할 수 있다. 그러나 게이트 입구 도착률은 경험적인 분포를 이용하여 결정할 수 있지만 출구 도착률은 차량의 터미널 내부 통행과 야드작업에 의해서 많은 편차가 발생하므로 시뮬레이션 분석을 통해서 보완되어야 한다.

따라서 게이트의 출구 도착률은 야드 작업을 반영하기 위해 장치장 모형과 연동이 되어야 한다. 이를 위해서 앞서 결정사항인 장치장 평면 배치와 차량의 동선이 반영되도록 하는 것이 필요하다.

〈그림-20〉 외부차량의 게이트 도착에 대한 경험적 분포



V. 결 어

본 연구에서는 컨테이너터미널 건설의 초기작업인 상부시설물의 설계단계를 대상으로 실제 설계를 위한 과정에서 과거의 경험적 지식과 함께 시뮬레이션 방법이 가지는 현실성을 검토하며, 컨테이너터미널의 설계 중 각 영역별 경험적 지식에 대한 이용방안을 제시하였다.

먼저, 기존 연구의 고찰을 통해 기존의 경험적 설계에서 제시하고 있는 기준과 시뮬레이션을 설계에 적용할 경우의 적용범위에 대해서 경험적 지식의 필요성을 분석하였다.

기존의 경험적 설계에서 주요 관심사였던 선박 대기시간과 크레인 하역능률에 대해서 기존의 방법과 시뮬레이션 방법과의 차이점을 분석하고 실제값과의 비교를 하였다. 특히 선박 대기시간은 대기모형 공식에 의한 방법과 UNCTAD의 방법에 비해서 시뮬레이션 방법은 더욱 현실적인 결과값을 보였고, 크레인의 하역능률은 경험적 방법에서 모수로 처리되는 부분을 시뮬레이션 방법을 통해서 현실성 있는 값을 구할 수

있음을 보였다.

현실성 있는 결과값에 기초하여 설계를 하기 위해서 설계 대상이 되는 컨테이너터미널의 시설물과 기능간의 관계를 먼저 정의하고, 이송, 저장 기능의 안벽, 장치장, 게이트에 대해서 경험적 지식을 정형화하여 이용하기 위해서 시스템적으로 복합 대기행렬네트워크로 정의하였다. 또한 복합 대기행렬네트워크를 체계적으로 분석하기 위해서 안벽, 장치장, 게이트 등의 영역별로 대기행렬모형을 묘사하고 설계시 반영해야 할 분석내용을 설명하였으며, 기존의 설계방법보다는 경험적 지식을 반영하는 것으로 지식기반 시뮬레이션을 구현해 나가기 위한 방향을 제시하였다.

항만의 설계는 미래의 수요를 반영하기 때문에 관련된 환경변수의 적합한 추정값을 적용하는 것이 중요하다. 안벽의 경우는 미래의 선박 작업물량과 C/C 생산성을 추정하는 것이 시뮬레이션 이전에 이루어져야 하며, 장치장의 경우 차량의 트래픽과 동선이 고려된 배치가 이루어져야 하며, 게이트는 터미널 내부의 상황을 반영하여 입출구에 대한 설계가 이루어져야 한다. 따라서 컨테이너터미널의 설계시 시뮬레이션 적용 이전에, 경험적인 지식을 가공하거나 미래의 예측치를 추정하여 지식화하는 과정을 통해서 더욱 현실성있는 설계를 수행할 수 있을 것이다.

또한 경험적인 지식을 시뮬레이션 방법에 포함시켜 지식기반 설계를 하기 위해서는 현재 운영중인 컨테이너터미널의 운영실적에 대한 자료들을 활용하여 설계에 반영하기 위한 다양한 분석이 선행되어야 하며, 항만 건설 및 운영에 대한 책임을 가지고 있는 의사결정자의 입장에서는 대상 항만에 대한 미래 수요를 반영하는 경험적 지식을 설계단계에서 충분히 고려하여야 할 것이다.

참고문헌

1. 김갑환 · 왕승진 · 박영만 · 양창호 · 김영훈, “자동화 컨테이너 터미널에서의 장치장 운영 시뮬레이션 연구”, 「학술대회 논문집」, 한국경영과학회/대한산업공학회, 2002.
2. 김우선 · 남기찬, “컨테이너 터미널의 운영 개선을 위한 시뮬레이션 시스템 설계”, 한국항만학회, 「98추계학술대회논문집」, 1998.
3. 배종욱 · 양창호 · 김갑환, “표면반응법을 이용한 자동화 컨테이너 터미널의 버퍼 장치장에서의 장비 규모 결정”, 한국항만학회, 「2000 추계학술대회논문집」, 2000.
4. 성경빈 · 정희균 · 박용욱 · 이철영, “DEVS 형식론을 이용한 컨테이너 터미널의 객체지향 시뮬레이션에 관한 연구”, 「한국항만학회지」, 제14권, 제1호, 2000.
5. 양창호 · 김창곤 · 배종욱, 「컨테이너터미널 선석처리능력 추정방안에 관한 연구」, 한국해양수산개발원, 2001.
6. 양창호 · 최용석, “컨테이너터미널 계획 시뮬레이션 개발방향 연구”, 「해양정책연구」, 제17권, 제2호, 2002.
7. 유승렬, “시뮬레이션에 의한 컨테이너 물류시스템의 분석에 관하여”, 석사학위논문, 한국해양대학교, 1997.
8. 윤원영 · 안창근 · 최용석 · 김갑환, “시뮬레이션을 이용한 컨테이너 터미널의 운영계획 평가”, 「한국시뮬레이션학회지」, 제7권, 제2호, 1998.
9. 윤원영 · 이주호 · 최용석, “시뮬레이션을 이용한 자동화 컨테이너터미널의 이적운영규칙에 관한 연구”, 「한국시뮬레이션학회지」, 제12권, 제3호, 2003.
10. 윤원영 · 최용석 · 송진영 · 양창호, “컨테이너 터미널에서 컨테이너 크레인의 하역능률 추정에 관한 연구”, 「IE Interfaces」, Vol.14, No.1, 2001.
11. 윤원영 · 최용석 · 이명길 · 최용석, “객체지향접근법을 사용한 컨테이너 터미널 시뮬레이터의 설계”, 「IE Interfaces」, Vol.13, No.4, 2000.
12. 이용환 · 박은경 · 박태진 · 류광렬 · 김갑환, “그리드 단위의 제어에 기반한 자동화 터미널의 AGV 시스템 운영 방안”, 「한국항해항만학회

- 지」, 제27권, 제2호, 2003.
13. 이철영 · 문성혁, “항만운송시스템의 분석에 관한 연구”, 「한국항해학회지」, 제7권, 제1호, 1983.
 14. 임봉택 · 이재원 · 성경빈 · 이철영, “시물레이션에 의한 컨테이너 터미널 물류시스템의 분석에 관한 연구(BCTOC를 중심으로)”, 「한국항해학회지」, 제12권, 제2호, 1998.
 15. 장성용, “시물레이션 기법을 이용한 컨테이너 터미널의 자원할당 전략에 관한 연구”, 「한국시물레이션학회지」, 제8권, 제4호, 1999.
 16. 장성용 · 박진우, “시물레이션 기법을 이용한 컨테이너 터미널의 운영시스템 결정”, 「산업공학」, 제1권, 제1호, 1988.
 17. 장성용 · 용운중, “자동화컨테이너터미널의 설계 및 운용 최적화를 위한 시물레이션 기법의 적용”, 한국시물레이션학회, 「1998년 추계학술대회 논문집」, 1998.
 18. 조덕운, “컨테이너항 전산 모의실험 모형의 개발”, 「대한산업공학회지」, 제1권, 제2호, 1985.
 19. 하태영 · 최용석 · 김우선, “시물레이션을 이용한 자동화 컨테이너 터미널의 AGV 운영평가”, 「한국항해항만학회지」, 제28권, 제10호, 2004.
 20. 한국컨테이너부두공단, 「컨테이너화물 유통추이 및 분석」, 각년도.
 21. Choi, Y. S., “Simulation Study for Performance Measures of Resources in a Port Container Terminal”, *International Journal of Navigation and Port Research*, Vol.28, No.7, 2004.
 22. Günther, H. O. & Kim, K. H., *Container Terminals and Automated Transport Systems*, Springer, 2004.
 23. HPC, *Planning Review for Busan New Port South Container Terminal*, Korea Port Engineering Co., 2004.
 24. Jordan Woodman Dobson, *Simulation Analysis Reports*, Pusan Newport Co., 1999.
 25. Legato, P. & Mazza R. M., “Berth Planning and Resources Optimization at A Container Terminal via Discrete Event Simulation”, *European Journal of Operational Research*, Vol.133, No.3, 2001.
 26. UNCTAD, *Berth Throughput*, United Nations Publications, 1973.

27. UNCTAD, *Port Development*, United Nations Publications, 1985.
28. UNCTAD, *Port Development*, United Nations Publications, 1992.
29. Watanabe, I., "Container Terminal Planning - A theoretical Approach", *World Cargo News*, 2001.
30. Watanabe, I., "Characteristics and Analysis Method of Efficiencies of Container Terminal - An Approach to the Optimal Loading/unloading Method", *Container Age*, March, 1991.
31. Yun, W. Y. and Choi, Y. S., "A Simulation Model for Container-Terminal Operation Analysis Using Object-Oriented Approach", *International Journal of Production Economics*, 1999.