

## 시뮬레이션을 이용한 컨테이너 터미널의 운영계획 평가\*

### An Evaluation of the Operation Plans for Port Container Terminal Using Simulation

윤원영\*\*, 안창근\*\*, 최용석\*\*, 김갑환\*\*

W.Y. Yun, C.G. Ahn, Y.S. Choi, K.H. Kim

#### Abstract

This paper describes the simulation study which evaluates operation plans of container terminal. The operation plans of container terminal consist of berth plan, load plan, unload plan, yard plan, and equipment plan. It is discussed how to apply the simulation method to evaluate those plans that are interrelated with each other. This paper also deals with the assignment and coordination problems of container-handling equipment such as container cranes, transfer cranes, yard tractors, and trailers used in the transportation of containers.

Simulation analysis is based on data about plans from the operation planning system through an interface program. It is discussed what we should get the statistics about container-handling equipment in the simulation.

\* 본 연구는 한국과학재단 지정 동아대학교 지능형 통합항만관리연구센터의 지원과 부산대학교 기성회재원 연구비의 지원으로 이루어졌음.

\*\* 부산대학교 산업공학과

## 1. 서론

우리 나라의 경제규모가 확대되고 무역량이 급격히 증가함으로써 해상을 통한 컨테이너 운송이 크게 증가하고 있다. 따라서 이를 지원하기 위한 기반 시설인 항만의 시설확충 및 운영 효율화에 대한 필요성이 증대되고 있다. 국내의 주요 컨테이너항인 부산항의 컨테이너 취급 물량은 1997년 525.8만 TEU(Twenty Equivalent Unit)의 컨테이너를 하역함으로써 컨테이너 처리 실적면에서 세계 5위의 자리를 차지하고 있으며, 이에 따라 컨테이너를 신속하고 원활하게 하역, 보관할 수 있는 컨테이너 터미널의 개발 및 확충이 진행 중에 있다.

현대의 컨테이너 터미널은 해상과 육상 수송간의 컨테이너를 가장 효율적으로 연계시켜 줄 수 있어야 하며, 이를 위해서 고도의 기술적 장비 및 인력을 확보함으로써 생산성의 향상과 함께 선사, 화주 등의 항만이용자에게 질 높은 서비스를 제공하는 것을 주목적으로 하고 있다. 또한 이러한 주목적을 달성하기 위해서 컨테이너 터미널의 구조, 장비, 정보 시스템 등의 향상을 지속적으로 도모하며, 터미널의 운영 절차를 개선시키려고 노력한다. 그러나 컨테이너 터미널의 운영 절차를 개선하는 문제는 현장에서 직접 시도하여 그 결과를 분석하기에는 시간과 비용이 많이 소모되므로 이를 효과적으로 행하기 위하여 시물레이션 방법을 이용한 연구가 경제적인 것으로 알려져 있다.

컨테이너 터미널의 성능분석을 위한 접근방법으로서의 시물레이션 방법의 사용에서, 모델링의 상세한 정도와 분석 내용에는 차이가 있으나 대기행렬 모형에서 보다 더 상세한 설계요소들을 다루고 있다는 공통점을 가지고 있다. 이러한 시물레이션을 이용한 접근방법에 대해서 국내외의 연구를 살펴보면 다음과 같다.

국내의 컨테이너 터미널에 관련된 시물레이션 연구는 여러 가지 목적을 가지고 다양한 시물레이션 언어로 수행되어 왔다.

조덕운[8]은 GASP-4 시물레이션 언어를 사용하여 터미널의 시스템 분석을 위한 시물레이션 모형을 개발하여 그 유용성을 보이고 나아가서 터미널 운영

변수의 실험을 위한 도구를 제공하고 있다. 장성용, 박진우[6]는 실제의 컨테이너 터미널을 대상으로 터미널 운영시스템 및 시설배치 결정을 위한 방법으로써 제안된 몇 가지 대안에 대하여 SIMAN 언어를 활용하여 시물레이션 모델을 개발하여, 한 대의 선박이 작업가능한 하나의 선석을 가정하여 컨테이너 운영장비의 최적 조합을 찾기 위한 연구를 수행하였다. 그리고 선석과 크레인의 최적 구성 문제를 다룬 윤영철, 문성혁[5]의 연구, 시물레이션을 이용한 항만의 하역능력 추정문제를 다룬 김창곤[4]의 논문 등이 있다.

국외의 시물레이션 연구에서는 고려되는 컨테이너 터미널 시스템의 유형은 다소 차이가 있지만 컨테이너 터미널의 성능분석이나 운영의 대안을 분석하고자 시물레이션을 이용하고 있다. Kozan[11]은 오스트레일리아의 레일유형의 컨테이너 터미널인 Acacia Ridge 터미널의 운영을 분석하기 위하여 휴리스틱 기법에 시물레이션을 결합한 연구를 하였고, Ramani[13]의 연구에서는 인도의 인디안 항만을 대상으로 C언어로 개발된 시물레이션 모델을 사용하여 운영 대안을 평가하였으며, 이 연구에서 고려한 장비는 국내의 TC(Transfer Crane)방식과 유사하며, 다음 사건 일정계획법(next event scheduling approach)을 이용하였다. Hayuth[9]의 연구에서는 항만 시물레이터의 개발을 위한 하드웨어와 소프트웨어 도구에 대한 조사와 이스라엘의 항구를 대상으로 한 C언어로 프로그램된 시물레이터를 소개하고 있다. Koh와 3인[10]은 컨테이너 터미널을 객체지향형 시물레이션으로 모델링하여 의사결정지원시스템과 결합시킨 연구를 하였다. 그리고 Park과 Noh[12]는 미국 알라바마의 모빌항(Port of mobile)을 이산사건 시물레이션(discrete-event simulation)으로 모델링을 하여 SLAM을 이용하여 분석하였다.

위에서 살펴본 시물레이션을 이용한 연구 외에도 컨테이너 터미널의 효율적인 운영을 위하여 계획단계에서 운영의 효율을 높이려는 연구도 이루어지고 있다. 김갑환과 박영만[3]은 수출 컨테이너의 장치 위치 결정에 무게를 고려하여 장치장 계획을 효율적으로 하기 위한 연구를 하였으며, 또한 김갑환, 김기영, 고창성[1]의 연구에서는 유전자 해법을 이용

하여 적하게 계획을 하는 방법론을 제시하였으며, 이러한 계획 방법론을 운영문제 해결에 반영한 의사결정 지원시스템이 김갑환 외 5인[2]에 의해서 개발되었다.

이러한 계획의 효율을 높여려는 연구 결과 또한 실제 컨테이너 터미널 계획의 작성단계에서 반영될 수 있으며, 실제 운영에 미치는 영향을 평가할 때 시물레이션 방법을 이용하는 것이 적합할 것이다.

따라서 본 연구에서는 컨테이너 터미널의 운영 계획을 평가하기 위하여 시물레이션 방법을 이용하며, 시물레이션에서는 대략적인 운영논리를 구현하여 단기간(보통 하루이내)내에 수행될 운영계획의 타당성을 점검할 수 있다. 시물레이션에서의 컨테이너 터미널 운영 계획의 이용 방법은 먼저 계획시스템의 데이터베이스로부터 단기계획의 자료를 읽어와 시물레이션에서 필요한 테이블(계획 정보를 시물레이션 자체 테이블에 저장)을 만든 후 데이터베이스와의 연결을 끊고 자체 테이블의 정보를 읽고 변경하면서 시물레이션을 수행하여 터미널의 작업이 계획대로 진행되는지를 점검할 수 있다. 그리고 컨테이너 터미널 계획의 효율성에 대한 평가는 시물레이션 실험결과로 제공되는 컨테이너 취급 장비들의 운영통계량으로 평가하며, 장비운영에 대한 간섭해결과 역할교환 등의 문제를 시물레이션에서 자체적으로 해결하는 로직을 가지도록 하였다.

그러므로, 계획 시물레이션에서 사용자는 현장과 동일한 환경을 갖춘 가상의 컨테이너 터미널에서 시스템이 정상적으로 운영되는지를 확인할 수 있다. 따라서 이 시물레이션 시스템을 이용하여 계획논리를 현장에 바로 적용하려고 할 때 예상하지 못했던 여러 상황이 의해서 생겨날 수 있는 문제점들을 개발단계에서 시물레이션을 통한 테스트를 거치게 됨으로써 그 완성도를 향상시킬 수 있다. 터미널 운영의 계획단계에서 계획된 컨테이너물량만을 생성시키면서 통합시스템의 공유 데이터베이스로부터 계획결과를 직접 읽어와 계획자가 예상한대로 작업이 진행되는지를 점검할 수 있도록 하였다.

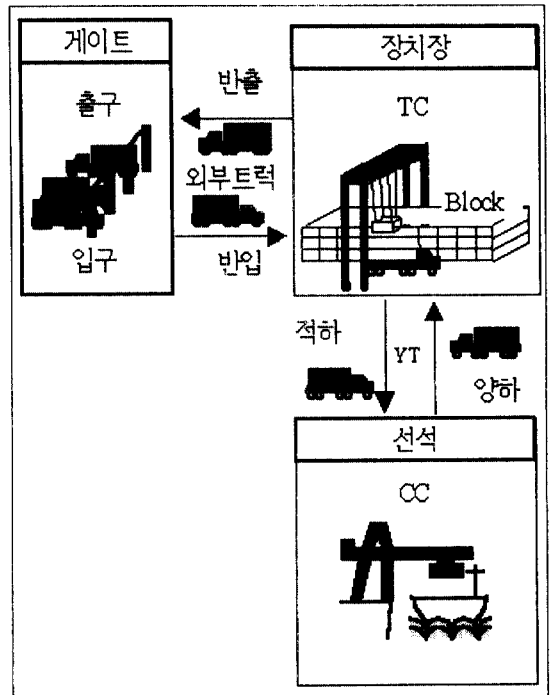
## 2. 대상 시스템 분석 및 통합시스템 구조

### 2.1 컨테이너 터미널 시스템 분석

부산항에 위치한 주요 컨테이너부두로는 자성대부두(BCTOC), 신선대부두(PECT), 우암부두(UCT), 감만부두(KCT) 등이 있으며, 최근의 컨테이너 터미널의 장비 운영방식이 Transfer Crane(TC)-Container Crane(CC)-Yard Truck(YT)연계수송체제를 따르고 있으므로 전형적인 TC-CC-YT연계수송체제로 운영되고 있는 신선대부두를 연구 대상으로 하였다.

본 연구에서 대상으로 하는 컨테이너 터미널인 신선대부두는 1997년 처리실적이 1,483,523TEU (Twenty foot Equivalent Unit)로 부산항 처리물량의 28.2%를 차지하는 주요한 컨테이너 터미널이다.

신선대부두에서 운영되는 컨테이너 터미널 시스템의 주요 시설물은 크게 외부 차량의 진입을 통제



<그림 1> 컨테이너 터미널 시스템

하는 게이트(Gate), 수출입 컨테이너를 보관하는 장치장(Container Yard), 선박에 컨테이너를 싣고 내리는 선석(Berth) 등의 세 부분으로 구성되어 있으며, 사용되는 장비로는 장치장에서 사용되는 트랜스퍼 크레인(TC), 선석에서 사용되는 컨테이너 크레인(CC), 장치장과 선석간을 이동하는 야드 트럭(YT), 그리고 터미널 외부에서 게이트를 통과하여 장치장과 게이트간을 이동하는 외부트럭 등이 있으며, 이를 그림으로 표현하면 <그림 1>과 같다.

<그림 1>과 같이 컨테이너 터미널에서의 작업 유형은 크게 반입(Receiving), 반출(Delivery), 양하(Unloading), 적하>Loading)의 네 가지 유형으로 나눌 수 있으며, 이러한 작업에 CC와 TC 같은 컨테이너 취급장비와 YT, 외부트럭 등의 컨테이너 운송장비가 사용되며, 이러한 장비들의 운영은 네 가지 작업 유형에 따라 다음과 같이 서로 연계되어 있다.

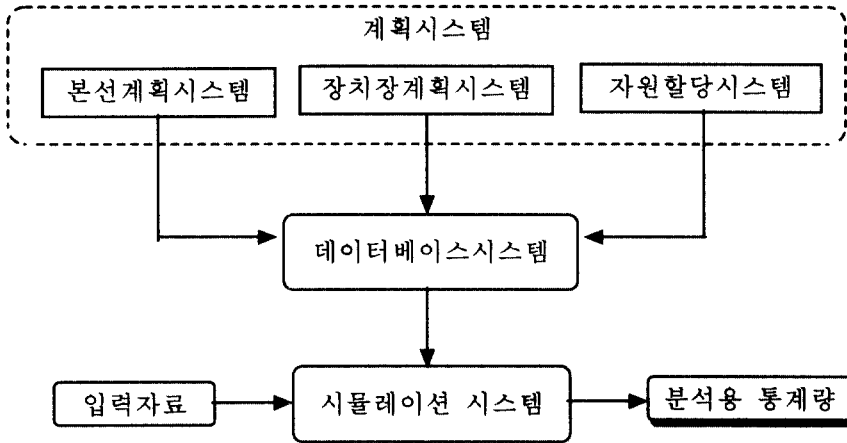
- (1) 반입 작업은 수출용 컨테이너를 실은 외부트럭이 게이트에 도착하여 본선적하계획에서 결정된 컨테이너의 장치위치를 받아서 그 위치로 이동하여 TC가 외부트럭에 실린 컨테이너를 장치위치에 옮겨 놓으면, 빈 외부트럭은 게이트를 빠져나간다. (사용장비 : TC, 외부트럭)
- (2) 반출 작업은 빈 외부트럭이 수입된 컨테이너 싣기 위해 게이트에 도착하여 수입 장치장 계획에서 반출위치를 받아서 작업위치로 이동한 후, TC가 컨테이너를 외부트럭에 옮겨 실으면 수입 컨테이너를 실은 외부트럭은 게이트를 빠져나간다. (사용장비 : TC, 외부트럭)
- (3) 양하 작업은 양하계획에서 작성된 CC의 작업순서목록에 따라 선박에 실린 수입 컨테이너를 CC가 YT에 옮겨 실으면, YT는 수입 컨테이너의 장치위치로 이동하고 TC가 컨테이너를 장치위치에 옮겨놓으면, 다시 할당된 CC의 작업장소로 이동한다. (사용장비 : TC, CC, YT)
- (4) 적하 작업은 YT가 수출 컨테이너의 장치위치로 이동하고 TC가 컨테이너를 YT에 옮겨 실으면, 할당된 CC의 작업장소로 이동하며, CC는 작업 목록 순서에 따라 컨테이너를 선박에 싣게 된다. (사용장비 : TC, CC, YT)

위에서와 같이 컨테이너 터미널의 운영절차는 대단히 복잡한 것이 일반적이며 이에 대한 표준적인 운영절차는 사실상 없다고 해도 과언이 아니다. 다만 컨테이너 터미널의 작업을 능률적이고 효율적으로 처리하기 위하여 사전에 치밀한 작업계획이 수립되어야 함은 물론 부문별로 유기적인 협조체제가 필요하기 때문에 이에 대한 표준적인 작업절차를 확립하는 것이 필수적이다[6]. 따라서 본 연구에서는 선선대부두의 운영절차를 위에서 분류한 네 가지 작업 유형에 선박의 접안계획에서부터 작업계획 및 작업수행을 포함한 운영절차에 포함시켜서 다음의 9단계의 과정으로 정의하였다.

- (1) 선석할당계획(Berth Allocation Plan)
- (2) 반입계획
- (3) 반입작업
- (4) 적하계획
- (5) 적하작업
- (6) 양하계획
- (7) 양하작업
- (8) 반출계획
- (9) 반출작업

## 2.2 통합시스템 구조

본 연구에서는 시물레이션을 실행하기 위해서 컨테이너 터미널의 운영에 필요한 선석할당계획, 반입계획, 적하계획, 양하계획, 반출계획, 장비계획 등의 계획데이터를 작성하는 계획시스템과 계획된 데이터를 관리하는 데이터베이스 시스템 그리고 시물레이션 시스템으로 구성된 통합시스템이 이용되며, 이 통합시스템은 김갑환 외 5인[2]이 개발한 의사결정지원시스템이다. 그러므로 선석할당계획, 적하계획, 양하계획 등을 작성하는 본선계획시스템과 수출장치장계획, 수입장치장계획을 작성하는 장치장계획시스템, 장비계획을 작성하는 자원할당시스템 등의 서브시스템이 데이터베이스시스템과 인터페이스되며, 데이터베이스에 작성된 데이터를 시물레이션 시스템에서 읽어와서 이 데이터를 입력으로 하여 시물레이션이 실행된다. 이러한 시물레이션 시스템을 포함한 통합시스템의 구조는 위 <그림 2>와 같다.



<그림 2> 통합시스템의 구조

<그림 2>와 같이 계획 시스템에서의 터미널 운영에 대한 계획데이터와 시물레이션 시스템의 입력자료 등을 입력받아 시물레이션을 수행하여 시물레이션 시스템에서 계획 분석용 통계량을 사용자에게 제공하게 된다.

을 하기 위해 1~3대의 CC가 투입되었을 때 각 CC가 작업해야 하는 본선의 영역(bay)을 지정하여 양하와 적하 시에 작업순서가 생성되도록 하는 계획이다.

### 3. 컨테이너 터미널의 계획

컨테이너 터미널의 9단계 운영절차에서의 계획은 선석할당계획, 적하계획, 양하계획, 반입계획, 반출계획이며, 계획자료의 이용 면에서 이를 다시 정의하면, 선석계획, 적하계획, 양하계획, 반입계획과 반출계획을 포함한 장치장계획, 그리고 실제 운영에 필요한 장비계획으로 나눌 수 있다.

#### 3.1 선석계획

선석계획에서는 입항선박에 대한 기준정보를 관리하고 터미널의 선석을 배정하는 선석할당과 선석이 할당된 선박에 대해서 본선하역장비를 할당하고 각 장비별로 작업일정을 작성하는 본선하역장비 할당 및 작업계획으로 구성된다.

입항선박의 선석이 할당되면, 본선하역장비를 할당하는데 이때 CC의 작업순서(work schedule)를 계획한다. 이 계획은 선박이 접안하였을 때 본선작업

#### 3.2 양하계획

양하계획은 컨테이너 터미널에 입항하는 선박에서 CC를 사용하여 내리는 컨테이너 작업순서 또는 선박내에서 옮겨 실게 되는 shifting작업의 작업순서를 결정한다. 선박에 적재된 컨테이너의 양하순서의 작성은 선박의 접안 방향에 따른 CC의 이동 편의성과 CC의 장비 교체가 가능한 한 적게 발생되도록 순서를 결정함으로써 작업의 효율성과 생산성을 높일 수 있다. 일단 작성된 양하순서는 각 CC별로 전체적인 순서가 정해지며 이 순서가 CC의 작업순서목록이 된다.

#### 3.3 적하계획

적하계획은 터미널운영에서 가장 정확성이 요구되는 계획이며 모선별, 항로별, 해치별, 목적지별로 작업계획이 수립되어야 하며 부정확한 계획의 수립은 컨테이너의 재조작을 야기시킨다. 현재 컨테이너 터미널에 입항하는 선박에 선사가 지정한 위치에 지

정된 특성의 컨테이너를 싣는 것에 관한 계획으로써 이 계획에 의해 CC의 본선 적하작업 및 장치장 작업이 이루어지게 된다. 이때 고려되는 내용으로는 선사가 지정해온 선박의 위치별 컨테이너 정보와 CC의 작업일정(work schedule), 그리고 장치장 컨테이너 정보가 사용된다. 적하계획에서 작성되는 내용은 CC의 작업일정, 베이플랜, 적하순서목록 등이다.

### 3.4 장치장계획

장치장 계획은 장치장을 구성하는 블록을 기준으로 수출블록에 대한 수출장치장 계획과 수입블록에 대한 수입장치장 계획으로 구분된다.

#### 수출장치장 계획

수출장치장 계획은 수출용 컨테이너에 대해서 놓여질 수출장치장의 특정 장치위치를 계획하는 것으로 수출용 컨테이너를 실을 선박의 물량을 어느 블록(yard block)에 배정할 것이냐 하는 장치공간 할당과 장치공간이 정해진 선박의 컨테이너에 대하여 어느 베이(yard bay)에 장치할 것이냐 하는 장치지점 할당으로 나눌 수 있다.

선박별 장치공간 할당은 접안한 선박이 선석을 떠나므로 해서 발생하는 빈 공간을 사용하기 위해 선박의 출발시점마다 재계획하여 장치장의 동적인 상황을 반영하도록 하여야 한다. 즉 가까운 공간에 같은 선박에 적재될 컨테이너를 많이 장치함으로써 장치장 하역장비(TC)의 운행거리를 줄이고 접안선석 가까운 공간에 배치함으로써 운반장비(YT)의 운행거리를 줄일 수 있다.

장치지점 할당은 계획시점에서의 장치장의 상태를 탐색하여 할당하며, 입항시점이 가까운 선박에 우선권을 부여하고 되도록 동일한 베이에는 동일 그룹의 컨테이너를 배치시키고 다음으로는 장치장 하역장비의 작업상황이 유리한 베이를 선정하여 장치 계획을 수립한다.

#### 수입장치장 계획

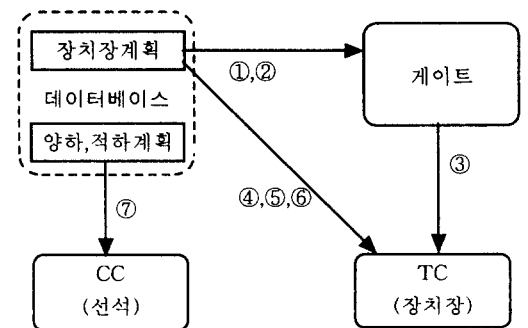
수입장치장 계획은 터미널에 입항하는 선박의 수입용 컨테이너에 대해서 장치될 블록과 베이를 배정하는 것이다. 이때 장치장의 공간효율과 반출작업시에 발생하는 재작업을 고려해야 한다. 대상 선박

에 배정된 하역장비별로 양하할 물량을 수용할 수 있는 저장공간을 확보해야 한다. 선박의 접안시점 직전마다의 장치장 현황과 기존의 대략적 능력계획 정보를 참조하여 수입장치장에서 정책적 장치높이를 결정하고 작업소요시간, 작업간섭, 장비의 작업 용이성 등을 고려하여 각 블록별 및 각 베이별 평가치를 산출하여 장치가능공간을 산정한다. 장치공간을 최대한으로 활용하고 고단적재에 따른 재작업의 발생 가능성을 최소화시키고 장비의 작업 용이성을 고려함으로써 하역시간을 단축하며 또한 반출작업에서 외부트럭의 대기시간을 줄일 수 있다.

### 3.5 계획데이터의 처리

계획시스템에서 계획된 데이터 중 시물레이션에 사용하는 장치장계획, 양하계획, 적하계획을 읽어와서 다음의 기능을 구현하도록 하였다.

- ① 컨테이너의 반입시간 생성
- ② 컨테이너의 반출시간 생성
- ③ 외부트럭의 생성
- ④ TC작업목록 생성 및 재작성
- ⑤ TC의 반입, 반출작업시 최인접트럭 운선규칙 적용
- ⑥ 장비간의 간섭발생시 역할 교환
- ⑦ CC의 작업순서목록의 작성



<그림 3> 시물레이션에서 계획 데이터의 사용

위의 7가지 기능을 시물레이션에서 구현하기 위한 데이터 사용은 <그림 3>과 같으며, ⑤, ⑥의 경

우 외부트럭과 YT의 대기시간을 줄이고 장비의 하역시간을 단축시키는 등 실제 현장의 작업상황을 반영하기 위해 중요한 역할을 한다.

#### 4. 장비 운영 방법

시물레이션 실행 중에 장비의 운영에서 해결해야 할 문제는 TC의 반입, 반출작업시 최인접트럭 우선규칙 적용과 장비간의 간섭발생시 장비의 역할 교환이다. TC에 작업물량이 할당되면 TC가 스스로 다음 작업을 판단하여야 하며, TC가 다음 작업을 판단하는 로직으로 최인접트럭 우선규칙을 사용한다. 즉, 현재 작업위치에서 가장 가까운 곳에 있는 작업을 다음 작업으로 수행하도록 한다. 반면에 양하작업과 적하작업의 경우는 TC운영규칙이 계획된 작업순서대로 작업을 수행한다.

##### 4.1 최인접트럭 우선규칙

반입작업과 반출작업에서는 TC가 한 열을 담당하므로 한 열내에서는 TC에 최인접트럭 우선규칙을 적용하고 양하작업과 적하작업에서는 TC가 CC에 할당되므로 고려하지 않는다. TC에 최인접트럭 우선규칙을 적용하는 과정은 다음과 같다.

먼저 한 대의 TC가 임의의 블록에 있을 때, YT와 외부트럭이 작업위치 블록에 진입하면, YT와 외부트럭의 작업위치가 TC의 작업목록에 기록되고 TC는 이들 목록 중에서 다음 작업 위치를 결정하기 위해서 현재 작업중인 TC의 위치에서 TC의 다음 작업위치들과의 거리를 뺀 TC의 이동거리를 계산한 후, TC의 현재 작업위치에서의 이동거리들을 오름차순으로 정렬하면 가장 상위의 것이 가장 거리가 가까운 다음 작업위치로 결정되며, 정렬된 작업위치

순으로 TC가 작업을 하게 되며, 새로 YT나 외부트럭이 블록에 진입할 때마다 작업위치 순서의 목록은 갱신된다.

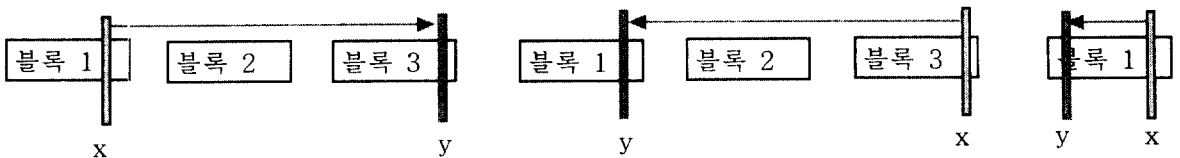
최인접트럭 우선규칙이 적용되는 상황을 그림으로 표현하면 <그림 4>와 같다. 우선 한 블록내에서 차량과 장비가 작업을 할 수 있는 지점은 25개(베이)로 구성되며, 블록간의 간격은 4베이를 차지한다고 가정한다.

- x : 현재 작업 중인 TC의 위치
- y : TC의 다음 작업위치
- z : 현재 위치와 다음 작업위치와의 거리
- K : 블록들의 열(row)방향으로의 거리차이

<그림 4>의 a)와 같이 현재 TC가 위치한 작업 중인 위치가 1번 블록의 x이고 다음 작업위치가 3번 블록의 y인 경우와 <그림 4>의 b)와 같이 현재 TC가 위치한 작업중인 위치가 3번 블록의 x이고 다음 작업위치가 1번 블록의 y인 경우, 그리고 <그림 4>의 c)와 같이 x와 y가 동일 블록내에 있는 경우의 세가지를 고려할 수 있다. 이 세가지의 경우에 대해서 다음의 조건식을 실행하여 x에서 y까지의 이동거리를 계산한다.

```

if x < y (TC의 다음 위치가 오른쪽일 경우)
then
    z = (25 - x) + 25(K - 1) + 4K + y
elseif x > y (TC의 다음 위치가 왼쪽일 경우)
then
    z = x + 25(K - 1) + 4K + (25 - y)
else (TC의 다음 위치가 동일 블록내일 경우)
    z = ABS(x - y)
end
    
```



a) <그림 4> 최인접트럭 우선규칙이 적용되는 상황

위의 조건식을 이용하여 YT나 외부트럭이 도착 할 때마다 각 차량의 작업위치인 z값들을 구하여 그 값들을 오름차순으로 정렬하면 가장 상위의 것이 가장 거리가 가까운 다음 작업위치로 결정되며, 이 순서대로 작업을 할당하면 최인접트럭 우선규칙을 적용할 수 있다.

#### 4.2 TC의 간섭해결

TC의 경우 장치장 내에서 작업을 하다 보면 다른 작업을 수행하고 있는 TC와 간섭이 발생하게 된다. 장비들간의 간섭이 발생하게 되면 작업의 지연이 발생하게 된다. 만일 터미널 내에서 이러한 간섭 문제를 해결하지 않을 경우 외부트럭의 대기시간이 길어져서 터미널 서비스율을 저하시킨다. 특히, 인접한 블록 내에서 TC장비 여러 대를 운영하다 보면 TC들간의 간섭이 발생하며, 이러한 TC들간의 간섭이 발생하는 상황은 두 가지이며, 첫 번째 경우는 먼저 작업위치에 도착한 TC가 작업을 마칠 때까지 나중에 도착한 TC가 대기하는 경우이고, 두 번째 경우는 TC가 기다려도 간섭이 해결되지 않을 때 TC들간의 역할을 교환해야 한다. TC간의 역할교환(role exchange)은 두 대의 TC가 서로 지나쳐 가야하므로 충돌이 일어나는 시점에서 교환하도록 한다. 이 때 두 대의 TC가 가지고 있는 서로의 작업목록을 교환한다. 그리고 본선작업에 할당된 TC의 경우는 해당 TC가 할당된 CC의 장비번호를 교환하게 한다.

### 5. 시물레이션 실험 및 결과

#### 5.1 실험환경

신선대부두의 운영을 위한 단기 계획안을 시물레이션 하기 위해서 실제 시설물과 장비의 사양을 사용하였으며, 처리해야할 데이터의 양이 많고 프로그램 크기가 커지므로 시물레이션 언어는 워크스테이션용 SIMPLE++를 사용하고, 데이터베이스 시스템(DBMS)은 Informix를 사용하여 워크스테이션에서 실행되도록 하였다.

신선대부두의 시설물로는 게이트는 9개의 입구와 3개의 출구를 가지며, 선석부에는 3개의 선석을 가지며, 컨테이너 장치장은 수출 블록 30개와 수입 블록 26개로 구성되며, 한 블록은 25개의 베이(Bay)이며, 한 배이는 6열로 4단적까지 할 수 있다.

컨테이너는 20피트, 40피트 2종류를 사용하며, 비율은 45%:55%이며 20피트 컨테이너를 1TEU로 하여 40피트 컨테이너는 2TEU로 하였다. 따라서 컨테이너를 한 블록에 장치할 수 있는 최대 장치 용량은 600TEU이다.

시설물의 사양에 필요한 입력 데이터를 요약하면, 위 <표 1>과 같다.

장비는 24대의 TC, 6대의 CC, 24대의 YT 그리고 외부트럭은 필요한 수량 만큼 사용하며, 장비의 속도와 작업시간은 위 <표 2>와 같다.

<표 1> 시설물에 대한 입력 데이터

게이트		컨테이너 장치장		선석	
입구 수	9 개	수출블록 수	30 개	접안선석 수	3 개 2 개
출구 수	3 개	수입블록 수	26 개	선석당 할당된 CC의	
서비스 시간	UN(20초, 30초)	블록당 베이수	25 개	대수	

<표 2> 장비에 대한 입력 데이터

장비구분	TC	CC	YT	외부트럭
속도(km/h)	8.04	2.7	20	20
작업시간	N(87초, 19.3초)	N(112.8초, 31.2초)		
장비 대수	24	6	24	필요수량



<표 1>과 <표 2>의 입력 데이터를 입력하여 단  
기계획기간을 6시간으로 하여 시뮬레이션을 수행하  
였다.

실험을 통하여 획득한 누적 시간 속성값들을 계산하  
여 통계량을 구할 수 있다.

### 5.2 실험 통계량 및 결과

본 연구에서는 컨테이너 터미널의 운영을 위한  
단기 계획안을 평가하기 위한 통계량으로 장비의 활  
용도를 포함한 장비통계량을 사용한다. 계획의 효율  
성 여부는 장비의 대기, 유휴, 이동 등의 장비 효율  
과 밀접한 관계가 있으므로 장비의 세부적인 시간요  
소들을 통계량 항목으로 선정하였다.

TC와 CC의 통계량 계산을 위해서 장비에 대해  
서 정의된 시간 속성은 다음과 같으며, 시뮬레이션

$T$  : 전체 시뮬레이션 시간

$U_i$  :  $i$ 장비의 활용도(Utilization)

$O_i$  :  $i$ 장비의 누적 작업시간비율

(Loading time + Unloading time)

$M_i$  :  $i$ 장비의 누적 이동시간(Travel time) 비율

$W_i$  :  $i$ 장비의 누적 대기시간(Waiting time) 비율

$I_i$  :  $i$ 장비의 누적 유휴시간(Idle time) 비율

통계량 항목은 각 장비별 특성을 고려하여 다음

<표 3> TC장비의 통계량

TC 번호	장비활용도 (%)	작업시간비율 (%)	이동시간비율 (%)	대기시간비율 (%)	유휴시간비율 (%)
201	24.38	5.89	18.49	0.00	75.62
204	13.15	3.89	9.25	0.00	86.85
205	99.80	0.00	9.93	89.86	0.20
206	98.42	12.63	2.86	82.93	1.58
211	8.33	0.00	8.33	0.00	91.67
212	10.53	1.65	8.88	0.00	89.47
213	77.79	6.98	4.78	66.04	22.21
214	96.79	8.75	5.14	82.90	3.21
215	4.14	0.00	4.14	0.00	95.86
216	33.92	14.73	15.70	3.50	66.08
217	87.53	1.55	15.95	70.02	12.47
218	100.00	3.75	11.03	85.23	0.00
219	16.83	9.87	6.97	0.00	83.17
220	8.33	0.00	8.33	0.00	91.67
221	100.00	5.34	3.54	91.11	0.00
222	11.66	7.82	3.85	0.00	88.34
223	8.33	0.00	8.33	0.00	91.67
224	9.05	1.28	7.77	0.00	90.95
225	2.82	0.57	2.25	0.00	97.18
226	15.60	4.43	4.59	6.58	84.40
227	32.17	14.51	17.66	0.00	67.83
228	83.44	0.15	8.29	75.00	16.56
229	16.38	4.38	12.00	0.00	83.62
230	100.00	15.11	21.47	63.42	0.00

<표 4> CC의 통계량

CC 번호	장비활용도 (%)	작업시간비율 (%)	이동시간비율 (%)	대기시간비율 (%)	유휴시간비율 (%)
101	100.00	31.03	9.17	59.80	0.00
102	100.00	15.99	7.22	76.79	0.00
104	100.00	28.29	5.26	66.45	0.00
105	100.00	12.31	4.97	82.72	0.00
107	100.00	43.75	10.12	46.12	0.00
108	100.00	11.37	4.90	83.73	0.00

과 같이 정의한다.

TC와 CC의 경우 상차/하차(loading/unloading) 작업시간과 다음 작업장소로의 이동시간(travel time), 작업이 할당되어 차량의 도착을 기다리는 시간(waiting time), 작업이 할당되지 않은 순수 유휴시간(idle time) 등으로 구성되며, 장비의 활용도와 장비의 유휴시간은 다음과 같이 산출한다.

$$U_i = \frac{O_i + M_i + W_i}{T} \text{ for all } i$$

$$I_i = 1 - U_i \text{ for all } i$$

TC와 CC는 작업특성상 작업시간을 구성하는 시간요소가 위에서 정의된 것과 같이 동일한 시간요소들을 가진 장비로 간주한다. 장비에 대한 작업계획을 분석하기 위해서 장비번호별 시간 속성을 구하면 구체적인 장비의 작업상황을 분석할 수 있다. <표 3>은 실험결과로 얻은 TC의 통계량이며, TC #211, #215, #220, #223, #224, #225는 활용도가 10%이하로 낮게 나타나 유휴시간비율( $I_i$ )이 90%이상인 되어 작업이 많이 없었던 것을 알 수 있다. 특히 TC #211, #215, #220, #223은 실제 컨테이너 취급 작업은 일어나지 않았으며, 단순히 TC간의 간섭을 해결하기 위한 이동시간만이 측정되었다. 또한 TC #218, #221, #230은 활용도가 100%인데 이것은 작업부하가 이들 장비에 집중되었다는 것을 알 수 있다. 따라서 <표 3>의 통계량을 통해서 TC장비들의 작업부하의 수준과 수행된 작업의 유형들을 시간비율로 분석할 수 있다.

<표 4>는 CC의 통계량으로 활용도가 전부 100%인 것은 3개 선석에 모두 선박이 접안하고 있어 CC의 작업이 계속 진행되었다는 것을 알 수 있다. 특히, CC #107과 #108은 3번 선석에 할당되었는데 작업시간비율과 대기시간비율에서 차이가 많으

<표 5> YT의 통계량

장비번호	이동시간비율(%)	대기시간비율(%)
304	83.68	16.32
309	89.40	1.60
319	66.64	33.36
323	91.77	8.23
325	91.97	8.03
310	87.66	12.34
321	91.40	8.60
324	91.76	8.24
315	92.21	7.79
314	91.55	8.45
316	94.16	5.84
312	26.37	73.63
326	13.53	86.47
327	83.99	16.01
303	26.59	73.41
311	24.24	75.76
328	86.11	13.89
305	13.16	86.84
308	92.62	7.38
317	75.41	24.59
322	90.74	9.26
320	69.02	30.98
313	91.46	8.54
318	71.80	28.20

므로 CC의 작업순서목록 작성시 양하, 적하계획에서 두 대의 CC에 컨테이너물량을 할당할 때 부하를 균등하게 주지 않은 것을 알 수 있다.

YT의 통계량은 YT의 운영 속성에 따라 작업을 위해 이동하는데 소요되는 이동시간(travel time)과 대기에 소요되는 대기시간(waiting time)으로 나누어 전체 시뮬레이션시간에 대한 시간비율을 구할 수 있다. 따라서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T = M_i + W_i \text{ for all } i$$

위 식을 이용하여 YT의 이동시간비율과 대기시간비율을 구한 것이 <표 5>와 같다.

외부트럭의 통계량은 시스템내에서의 서비스 받은 외부트럭의 수, 평균 소요시간, 최소 소요시간, 최대 소요시간 등을 구하여 반출계획 및 반입계획의 효율과 시스템의 상황을 분석할 수 있다. 다음 <표 6>은 외부트럭에 대해서 얻어진 통계량이며, 시간단위는 만 분의 1초 단위까지 표현하였다.

<표 6> 외부트럭의 통계량

통계량 항목	결과값
총차량대수	312 대
총소요시간	2:03:34.32.2191
최소 소요시간	3:41.8098
평균 소요시간	9:55.1033
최대 소요시간	19:53.3060

<표 6>과 같이 시뮬레이션 시간동안 총 312대의 외부트럭이 사용되었으며, 312대의 외부트럭의 컨테이너 터미널 내에서의 총소요시간은 약 2일 3시간 34분 32초이며, 외부트럭의 컨테이너 터미널 내에서의 평균 소요시간은 9분 55초였으며, 최소 소요시간과 최대 소요시간은 각각 3분 41초 8, 19분 53초 3이었다.

실험결과로 얻어진 각 장비별 통계량을 요약하기 위하여 평균값을 구하면 <표 7>과 같다. <표 7>

<표 7> 요약 통계량

장비 항목	TC	CC	YT	외부트럭
활용도(%)	44.14	100.00		
작업시간비율(%)	5.14	23.79		
이동시간비율(%)	9.15	6.94	72.39	
대기시간비율(%)	29.86	69.27	27.61	
유휴시간비율(%)	55.86	0.00		
평균 소요시간				9:55.1033

에서 TC의 평균 활용도는 44.14%, CC의 평균 활용도는 100%, TC의 평균 대기시간비율은 29.86%, CC의 평균 대기시간비율은 69.27%인 것을 알 수 있으며, YT의 평균 이동시간비율대 평균 대기시간비율은 72.39:27.61이었고, 외부트럭의 시스템내에서의 평균소요시간은 약 9분 55초가 소요되었다.

## 6. 결론

본 연구에서는 컨테이너 터미널의 운영 계획을 평가하기 위해서 시뮬레이션 방법을 이용하였으며, 계획의 평가방법으로는 시뮬레이션의 결과로써 주어지는 장비의 통계량을 사용하였다.

계획 시스템의 데이터베이스에서 계획데이터만 읽어오면 시뮬레이션에서 장비운영에 필요한 운영 논리를 적용하여 시뮬레이션 할 수 있으며, 계획데이터를 사용할 경우, 시뮬레이션은 실제 터미널의 사양을 그대로 입력하여야 하며, 터미널의 작업유형인 반입, 반출, 양하, 적하 등의 작업을 운영절차로 하는 시뮬레이션 처리절차 또한 구현하여야 한다. 시뮬레이션에서 자체 논리로 구현되어야 할 부분은 장비의 서비스율에 영향을 주는 TC간의 간섭해결과 역할교환이며, TC의 작업은 외부트럭, YT, CC 등

의 작업과 연계되어 있으므로 TC의 작업지연을 줄일 수 있도록 TC간섭해결과 역할교환을 자체 논리로 구현하였다.

시물레이션 실험결과로써 주어지는 장비통계량을 분석하여 계획의 효율성을 분석할 수 있는데, 특히 TC와 CC는 장비번호별로 작업, 이동, 대기, 유휴 등의 시간요소별 비율을 구할 수 있으므로 할당된 장비별로 특정 작업의 지연이나 활용도 등을 분석하여 양하계획과 적하계획을 효율을 알 수 있다. 또한 YT의 경우는 특정 CC에 할당되므로 YT의 이동시간과 대기시간의 비율로서 TC와 CC의 작업부하를 알 수 있다. 외부트럭의 경우 시스템내에서의 서비스시간을 제공하므로 장치장에서 TC작업의 지연이나 정체 상황 등을 분석하여 장치장계획의 효율을 알 수 있다.

따라서 계획 시물레이션은 사용자에게 현장과 동일한 환경을 갖춘 가상의 컨테이너 터미널을 제공하며, 터미널 운영의 계획단계에서 예상한 적정물량만을 생성시키면서 통합시스템의 공유 데이터베이스로부터 계획결과를 직접 읽어와 계획자가 예상한대로 작업이 진행되는지를 점검함으로써 시스템이 정상적으로 운영되는지를 확인할 수 있다. 또한 개발된 계획 시물레이션을 이용하여 계획논리를 현장에 바로 적용하려고 할 때 예상하지 못했던 여러 상황에 의해서 생겨날 수 있는 문제점들을 개발단계에서 시물레이션을 통한 테스트를 거치게 됨으로써 그 완성도를 향상시킬 수 있다. 그러므로 컨테이너 터미널의 운영을 위한 계획을 시물레이션 방법으로 평가함으로써 효율적인 컨테이너 터미널 운영 계획을 수립할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- [1] 김갑환, 김기영, 고창성, “컨테이너 터미널에서의 유전자 해법을 이용한 적하계획법”, 대한산업공학회지, 제23권, 제4호, pp.645-660, 1997.
- [2] 김갑환, 김홍배, 윤원영, 김종훈, 권봉재, 조지운, “컨테이너 터미널의 효율적 운영을 위한 의사결정시스템”, 산업공학, 제11권, 제1호, pp.105-118, 1998.
- [3] 김갑환, 박영만, “무게를 고려한 수출 컨테이너 장치위치 결정법”, 대한산업공학회지, 제22권, 제4호, pp.753-770, 1996.
- [4] 김창곤, “전용부두에서의 화물 유통량을 고려한 하역능력 검토”, Ocean Research, 제14권, 제1호, pp.53-62, 1992.
- [5] 윤영철, 문성혁, “컨테이너 터미널 사용자 비용을 최소로 하는 선석과 크레인의 최적 구성에 관한 연구”, 한국항만학회지, 제9권, 제2호, pp.39-49, 1995.
- [6] 장성용, 박진우, “시뮬레이션 기법을 이용한 컨테이너 터미널의 운영시스템 결정”, 산업공학, 제1권, 제1호, pp.49-62, 1988.
- [7] 전일수, 김학소, 김범중, 「우리나라 컨테이너 항만의 국제경쟁력 제고방안에 관한 연구」, 해운산업연구원, 1993.12
- [8] 조덕운, “컨테이너항 전산 모의실험 모형의 개발”, 대한산업공학회지, 제11호, 제2권, pp.173-187, 1985.
- [9] Hayuth, Y., Pollatsch, M.A., and Roll, Y., “Building A Port Simulator”, *Simulation*, Vol.63, No.3, pp.179-189, 1994.
- [10] Koh, P.H., Goh, L.K.J., Tan, S.L. and NG, K.L., “A Decision Support System for Container Port Operations”, *New Directions in Simulation for Manufacturing and Communications*, pp.451-457, 1994.
- [11] Kozan, E., “Increasing the Operational Efficiency of Container Terminals in Australia”, *Journal of the Operational Research Society*, Vol.48, pp.151-161, 1997.
- [12] Park, C.S., Noh, Y.D., “A Port Simulation Model for Bulk Cargo Operations”, *Simulation*, Vol.48, No.6, pp.236-246, 1987.
- [13] Ramani, K.V., “An Interactive Simulation Model for the Logistics Planning of Container Operations in Seaports”, *Simulation*, Vol.66, No.5, pp. 292-300, 1996.

## ● 저자소개 ●

**윤원영**

1982년 서울대학교 산업공학과 학사  
 1984년 한국과학기술원 공학석사  
 1988년 한국과학기술원 공학박사  
 현 재 부산대학교 산업공학과 교수  
 관심 분야 신뢰성 및 보전성 공학, 시뮬레이션

**안창근**

1995년 부산대학교 산업공학과 학사  
 현 재 부산대학교 산업공학과 석사과정  
 관심 분야 시뮬레이션, 물류관리

**최용석**

1993년 창원대학교 산업공학과 학사  
 1995년 부산대학교 산업공학과 공학석사  
 현 재 부산대학교 산업공학과 박사과정  
 관심 분야 시뮬레이션

**김갑환**

1977년 서울대학교 산업공학과 학사  
 1979년 한국과학기술원 공학석사  
 1987년 한국과학기술원 공학박사  
 현 재 부산대학교 산업공학과 교수  
 관심 분야 물류관리, 생산관리