

■ 論 文 ■

# 컨테이너 터미널 중장기계획 수립을 위한 시뮬레이션 모형 개발

-안벽과 장치장 중심-

Simulation Models for Container Terminal Planning

**남 기 찬**

(한국해양대학교 물류시스템공학과 조교수)

**곽 규 석**

(한국해양대학교 물류시스템공학과 교수)

**신 재 영**

(한국해양대학교 물류시스템공학과 부교수)

**김 우 선**

(한국해양대학교 대학원)

## 목 차

- I. 서론
- II. 터미널 설계 문제 및 시뮬레이션 모형 개발의 주안점
  - 1. 터미널 운영 체계 및 설계 문제
  - 2. 시뮬레이션 모형 개발의 주안점
- III. 시뮬레이션 모형 설계
  - 1. 시뮬레이션 모형 구성
  - 2. 터미널 설정 모듈
  - 3. 시뮬레이션 모듈
- IV. 시뮬레이션 모형 개발
  - 1. 안벽 시뮬레이션
  - 2. 게이트 시뮬레이션
  - 3. 장치장 시뮬레이션
- V. 모형의 적용
  - 1. 가정 및 입력 자료
  - 2. 모델 설정
  - 3. 결과 및 평가
- VI. 결론
- 참고문헌

## 요 약

컨테이너 터미널은 게이트 시스템, 장치시스템, 이송시스템, 적양하시스템 등의 하부시스템으로 구성되어 있어서 시스템의 최적화가 요구되며, 운영에 있어서도 장비, 인력, 장치장 등 제한된 자원을 효율적으로 사용하는 것이 터미널 경쟁력 강화 측면에서 중요하다. 본 연구는 신항만 개발시 터미널 설계에 사용될 수 있는 시뮬레이션 모형을 제안하는 것이 목적이다. 문헌 조사를 통하여 기존 연구의 한계점을 도출하고 이를 보완하는 시뮬레이션 모형을 설계하고 모형을 개발하였다. 또한 가상의 터미널 개발을 가정하고 일부 모듈을 적용하여 신항만 개발시 요구되는 안벽길이, 안벽 크레인 수, 장치장 규모 등을 도출함으로써 제안된 시뮬레이션 모형의 활용 방안을 소개하였다.

• 본 연구는 1997년도 한국학술진흥재단 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

### I. 서론

컨테이너 터미널은 고가의 하역 장비와 터미널 운영시스템 등의 정교한 컴퓨터시스템을 필요로 하기 때문에 대규모 투자를 요한다. 또한 터미널은 게이트 시스템, 장치시스템, 이송시스템, 적양하시스템 등 다양한 하부시스템으로 구성되어 있어서 시스템의 최적화가 요구되며, 운영에 있어서도 장비, 인력, 장치장 등 제한된 자원을 효율적으로 사용하는 것이 터미널 경쟁력 강화 측면에서 중요하다.

터미널 배치 및 자원의 최적화는 터미널 개발 단계에서 시뮬레이션 기법을 이용한 설계를 통하여 해결할 수 있다. 터미널을 운영하는 과정에 있어서도 수요의 변화, 기항 선박 특성 변화, 게이트 유출입 트럭 특성 변화, 작업조 운영 변화 등의 환경 변화가 끊임 없이 발생하기 때문에 최적 운영을 유지하기 위해서는 수시로 운영 전반을 시뮬레이션 하는 작업이 필요하다.

이러한 필요성에 따라 컨테이너 터미널을 대상으로 시뮬레이션 모형을 개발하는 연구가 국내외적으로 꾸준히 이어져 왔다. 터미널 업무는 다양한 요소를 포함하고 있으며, 많은 요소들이 불확실성을 내포하고 있으나 터미널 시뮬레이션과 관련된 기존 연구 및 개발된 시스템은 대부분 복잡한 터미널 상황을 단순화하여 모형화하거나 그 범위가 특정 요소에 한정되어 있다.

컨테이너 터미널 시뮬레이션과 관련된 초기 연구로서는 Novaes(1972)와 Edmond(1976)를 들 수 있으며, Hwang(1978)의 연구에 의하여 체계화가 이루어졌다. 최근의 연구로서는 Ballis(1995, 1997), Yamato(1997) 등을 들 수 있으며, 실제 컨설팅 회사에서 시뮬레이션 시스템을 개발하여 터미널 설계에 이용하는 사례로서는 미국 컨설팅사인 JWD의 General Marine Terminal Simulation Model(GMTS)과 자동화 터미널인 네덜란드 ECT가 개발하여 활용하고 있는 Container Terminal Simulation(CTS) 등이 있다.

본 연구와 관련된 국내의 연구는 1980년대 중반부터 이루어져 왔으나(김현, 1988; 장성용 외, 1988; 임진수, 1991; 유승렬, 1997) 이들 연구는 시뮬레

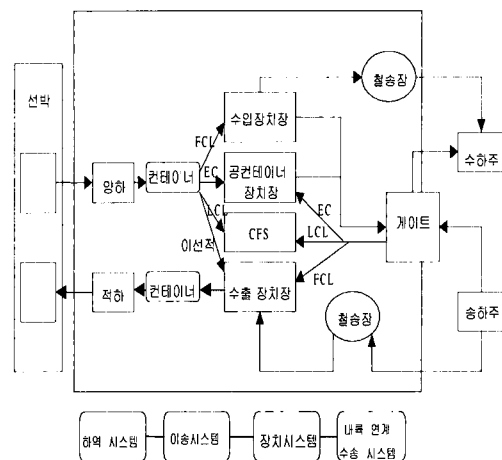
이션 방법을 이용한 터미널 능력 산정의 정의 및 기본적인 방법을 소개하거나 부분적으로 운영 실태를 평가하는 데 한정되며, 신항만 개발시 요구되는 안벽 길이, 안벽 크레인 수, 장치장 규모 등 설계 문제를 다루지는 못하였다. 또한 실제 터미널 계획 및 운영에 적용된 시스템은 없는 실정이다.

따라서 본 연구는 이전 연구의 결과를 바탕으로 하여 신항만 개발시 터미널 설계에 사용될 수 있는 시뮬레이션 모형을 제안하는 것이 목적이다. 구체적으로는 문헌 조사를 통하여 기존 연구의 한계점을 도출하고 이를 보완하는 시뮬레이션 모형을 설계하고, 일부 모듈을 적용하여 제안된 시뮬레이션 모형의 활용 방안을 소개한다.

### II. 터미널 설계 문제 및 시뮬레이션 모형 개발의 주안점

#### 1. 터미널 운영체계 및 설계 문제

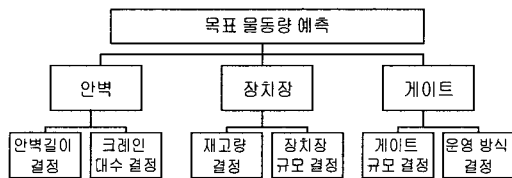
컨테이너 터미널은 육상 트럭의 유출입을 통제하는 게이트(gate), 수출 및 수입 컨테이너를 일시 보관하는 장치장, 선박이 접안하여 적양하 작업이 이루어지는 안벽(quay) 등으로 구성된다. 시스템적으로는 하역시스템, 이송시스템, 장치시스템, 내륙 연계 운송 시스템 등으로 구분할 수 있다(그림 1).



<그림 1> 컨테이너 터미널 시스템

이러한 하부시스템과 관련하여 이루어지는 의사결정 문제는 일(日) 단위로 이루어지는 단기 운영 의사결정과 중장기 의사결정으로 나눌 수 있다. 운영 의사결정 문제는 터미널 운영계획 및 작업 통제와 직접 관련되며, 기존의 작업 방식 등의 적합성을 검증하는 것이다. 즉, 이것은 운영과 관련된 제반 사항에 대한 what if 분석에 해당한다.

중장기 의사결정 문제는 야드 배치 계획, 장비 소요 산정 및 배치 계획, 작업 인원 소요 산정 및 배치 계획 등을 포함하며, 이들은 신규 터미널을 건설하는 단계에서 터미널의 최적 설계 및 배치와 관련되며, 기존 터미널의 경우 운영 시스템의 교체 등 터미널 재개발(restructuring)과 관련이 된다. 특히 컨테이너 터미널의 초기 단계라고 말할 수 있는 70년대에 건설된 터미널들은 장비의 수명 주기가 다하거나 최신 시스템과 비교할 때 시스템의 효율성이 극히 낮을 수 있기 때문에 대규모 설비 전환을 하게 되는데 이때 신규 터미널과 유사한 중장기 의사결정 문제에 직면하게 된다. 신항만 개발시 요구되는 주요 설계 문제는 <그림 2>와 같이 정리할 수 있다.



<그림 2> 모듈별 주요 설계문제

## 2. 시뮬레이션 모형 개발의 주안점

전 절에서 서술한 것과 같이 중장기 계획 관점에서 터미널 의사결정은 안벽 소요 길이, 크레인 소요 대수, 장치장 배치, 게이트 규모 결정 등이다. 따라서 이를 지원하기 위한 시뮬레이션 모형은 이들을 현실적으로 반영할 수 있어야 한다. 그러나 관련 연구는 일부 컨설팅사에서 개발한 시스템을 제외하고는 대부분 복잡한 현실 문제를 단순화하여 시뮬레이션을 실시한 한계를 안고 있다. 특히, 현실 반영 측면에서는 선박 특성 반영, 장치장 특성 반영, 게이트 특성 반영 등이 주 문제가 된다. 따라서 이를 보다 현실적으로 반영하는 방안이 모색되어야 한다.

### 1) 선박 특성 반영

선박의 길이는 선박의 크기를 나타내는 대표적인 지표이며, 화물 적재 능력, 안벽 소요 길이, 하역 작업 소요 시간 등과 밀접하게 관련된다. 그러나 대부분의 기존 연구에서는 선박 길이, 선박 도착 패턴, 컨테이너 적양하 개수 등을 단순히 특정 확률분포를 따르는 것으로 처리함으로써 모형에 선박 관련 특성을 제대로 반영하지 못하였다. 이것은 크게 두 가지 요인에 기인한다. 첫째, 안벽을 일정 수의 선석(berth)으로 나누고 각 선석에는 한 척의 선박이 접안하는 것으로 가정하기 때문에 선박의 길이를 고려할 필요성이 없기 때문이다. 둘째, 대기 이론에 근거할 경우 기법의 특성으로 인하여 선박 길이를 감안할 수 없다.

선석 단위 개념은 이제 점점 사라져 가고 있으며, 특히 대형 터미널의 경우 선석을 구분하지 않고 안벽 전체를 하나의 운영체로 간주하여 선박 접안을 계획한다. 이러한 경우 기항하는 선박 길이는 점유 안벽 길이, 안벽 점유율 등을 산정하는 데 있어서 아주 중요한 요소가 된다. 특정 터미널과 관련된 실제 자료를 바탕으로 선박길이와 적양하 컨테이너 수, 적양하 컨테이너 개수와 안벽 크레인(Q/C) 할당 대수 등의 관계를 도출하여 시뮬레이션에서 필요로 하는 투입 자료를 산출하는 데 사용함으로써 보다 현실적인 모형을 개발할 수 있다.

### 2) Gate 특성 반영

게이트 특성은 게이트를 통과하는 화물의 특성을 의미한다. 즉, 공컨테이너, 적컨테이너 등의 컨테이너 종류를 구분하는 것이다. 이것은 컨테이너 종류에 따라서 게이트에서 소요되는 처리 시간이 달라지기 때문이다. 또한 게이트에 도착하는 트럭의 시간대별 분포와 도착 시간 간격 등이 게이트 소요 용량과 육상 트럭의 터미널내 정체 시간 등을 결정하는 주요 게이트 특성 요소이다.

실제 게이트의 상황은 상당히 복잡하며, 이를 어느 정도로 고려하느냐에 따라서 시뮬레이션 결과치의 현실성이 좌우된다. 보다 현실적으로 트럭의 특성을 구분하기 위해서는 위험화물(D&H) 비율, EDI 사용률, 게이트에서의 문제 발생 트럭 비율, 빈사시, 공컨테이너, 비규격 컨테이너 등의 분포를 고려해야 한다.

게이트 처리 소요 시간 역시 EDI 사용 여부에 따라 달라지기 때문에 이를 구분하여 설정할 필요가 있으며, 정보 전달 방법 역시 바코드 사용과 수작업에 의한 입력들이 구분되어야 한다. 또한 처리 단계별로 정보 전달, 컨테이너 검사 등을 구분하여 소요 시간을 설정할 필요가 있다.

운영 측면에 있어서 통상 점심식사 시간대에는 게이트 인원을 상당 부분 줄여서 운영을 하게 된다. 따라서 이에 따른 시간대별 트럭 도착 패턴이 적절하게 조절되고 이에 따른 결과들이 도출되어야 한다.

### 3) 장치장 특성

장치장 부분에서의 주요 고려 점은 장치구역 구분과 해상 및 육상으로부터 유출입되는 화물의 고려이다. 이 부분 역시 대부분의 연구들이 단순하게 처리한 부분이다. 보다 현실적인 모형을 개발하기 위해서는 일반적인 터미널 운영 방식에 맞게 수출, 수입, 공컨테이너, 냉동 컨테이너, 위험물 등을 구분하여 장치장을 설정하고, 안벽, 게이트, CFS, 철송장 등으로부터 이루어지는 컨테이너의 유출입을 동시에 고려할 필요가 있다.

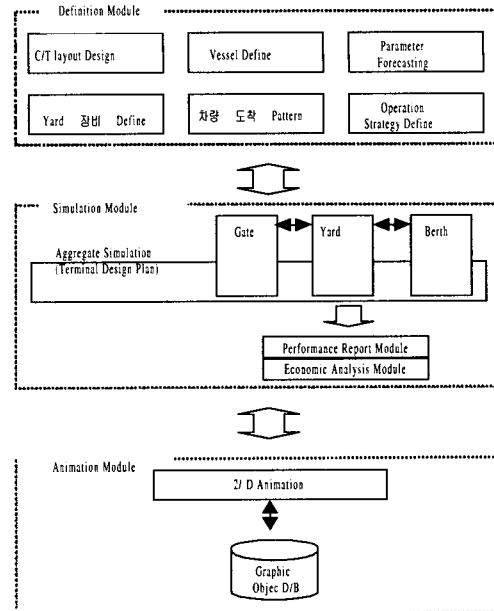
## III. 시뮬레이션 모형 설계

### 1. 시뮬레이션 모형 구성

시뮬레이션 시스템은 기본 입력 자료 생성을 위한 터미널 설정 모듈(definition), 시뮬레이션 로직(logic) 모듈 그리고 애니메이션 모듈로 나눌 수 있다. 이렇게 모듈을 분리 구축함으로써 가장 중심이 되는 시뮬레이션 로직과 터미널 상황에 따라 가변적인 각종 입력 자료 정의 모듈 및 그래픽 모듈을 독립적으로 구축하여 다양한 상황에 용이하게 적용할 수 있다.

터미널 설정 모듈은 실제 터미널 상황을 최대한 반영하는 것이 목적이며, 터미널 배치와 하역 장비(T/C, S/C, G/C 등) 등 제반 터미널 상황을 그래픽과 입력 화면을 통하여 생성한다. 시뮬레이션 모듈은 게이트 시뮬레이션, 장치장 시뮬레이션, 안벽 시뮬레이션 등으로 나누어서 모형을 구축한다. 애니메이션 모듈은 시뮬레이션의 결과를 동영상으로 처리하는

기능을 담당한다. 이러한 시뮬레이션 시스템의 구성도는 <그림 3>과 같다.



<그림 3> 시뮬레이션시스템 구성도

### 2. 터미널 설정 모듈(Definition Module)

터미널 설정 모듈은 터미널에 따라 가변적인 터미널 특성 및 장비 특성 등을 손쉽게 모형에 반영하기 위한 모듈로서 터미널 배치도 입력(C/T layout design), 선박발생기(vessel generator), 트럭 발생기(truck.generator), 운영전략(operation.strategy), 파라메타 예측(parameter forecasting), 하역 장비 설정(handling mode define) 등으로 구성된다 <표 1>.

이 가운데 가장 중요한 모듈은 선박발생기와 트럭 발생기이다. 이 부분은 해상과 육상으로부터 컨테이너 화물이 유출입되는 지점으로서 시뮬레이션에 큰 영향을 미치는 부문이다. 그러나 기존 연구에서 가장 단순하게 처리한 부분이기도 하다. 선박 발생기는 기항이 예상되는 선박들의 실제 길이, 적양하 컨테이너 수, 선박당 할당되는 안벽 크레인 대수, 요일별 실제 선박 도착 비율 등을 구체적으로 설정한다. 예상되는 연간 처리량을 기준으로 하여 선박당 평균 하역 컨테이너 수의 분포와 난수를 이용하여 도착 선박 수를 도출하고 도착 분포 또는 도착 패턴을 기

준으로 하여 피크 주(week)에 도착하는 선박의 특성을 도출한다.

트럭 발생기는 실제 게이트 상황을 최대한 반영하는 것으로서 반입 및 반출 트럭 종류별 분포, 도착 트럭의 반출 패턴, 빈 사시 반출 현황, 위험화물 비율, EDI 사용률, 게이트에서 문제 발생 트럭 및 문제 발생시 평균 지체 시간, 컨테이너 종류별 처리시간 등을 포함한다.

〈표 1〉 설정 모듈 내용

하부 모듈	주요 내용
Terminal Layout Design	- 터미널 형태 생성 - 장치장 블록 구분 - 장비 위치 및 트랙 생성 - 내부 도로 생성
Vessel Generator	- 선박 길이 결정 - 적양하 컨테이너 수 결정 - 안벽 크레인 할당 대수 결정 - 요일별 시간대별 선박 도착 결과
Truck Generator	- 반출입 트럭 종류별 분포 - 위험화물(D&H) 비율 - 문제 발생 트럭 및 평균 지체시간 - EDI 사용 및 비사용 분포 - 게이트 처리시간 및 확률
Operation Strategy	- 장비, 인원, 선박, 물동량, 게이트, 서비스 수준 등 대안
Parameter Forecasting	- 제반 확률적 특성
Handling Mode Define	- 장비 사양 및 생산성

### 3. 시뮬레이션 모듈

시뮬레이션 모듈은 안벽 시뮬레이션, 게이트 시뮬레이션, 장치장(yard) 시뮬레이션 등으로 구성되며, 각 모듈의 투입물과 산출물은 〈표 2〉와 같다.

안벽 시뮬레이션은 총물동량 혹은 예측 물동량을 기준으로 하여 이를 처리하는 데 소요되는 안벽 길이 및 안벽 크레인(quay crane)의 대수를 도출하는 것이 주목적이다.

게이트 시뮬레이션은 목표 물동량 혹은 안벽 길이를 대상으로 최적 게이트 규모를 도출하는 것이 주목적이다. 시뮬레이션 결과의 주안점은 진입·진출부의 필요 대기 공간, 진입·진출 트럭의 평균 소요시간(mean overall time)이며, 대기 분석 결과는 피크 시 대기 트럭 대수 및 길이로 나타난다.

장치장 시뮬레이션은 특정 물동량에 대한 장치장 컨테이너 재고(inventory)를 도출하고 이를 장치하는 데 필요한 장치장 규모 및 하역 시스템(handling mode)을 산정하는 것이 주 목적이다.

〈표 2〉 시뮬레이션 모듈의 투입 자료 및 산출물

모듈	투입자료	산출물
Berth Simulation	- 연간 물동량 - 선박 기항 일정 - 선박 도착 간격 - 선박 길이 및 하역물량 - 선박당 Q/C 할당 대수	- 총 안벽 길이 - 총 크레인 수 - 크레인 이용률
Gate Simulation	- 게이트 배치 및 운영 특성 - 처리 소요시간과 확률분포 - 시간당 유출입 트럭수 - 트럭 종류 분포	- 게이트 수 및 이용률 - 트럭 회전 시간 - 대기 길이
Yard Simulation	- 연간 물동량 - 평균 장치일수 - 장치장 이용효율 - 평균 장치 단적 수 - 하역 장비 사양 및 생산성	- 컨테이너 재고 - 소요 장치장 면적 - 제반 민감도 분석

## IV. 시뮬레이션 모형 개발

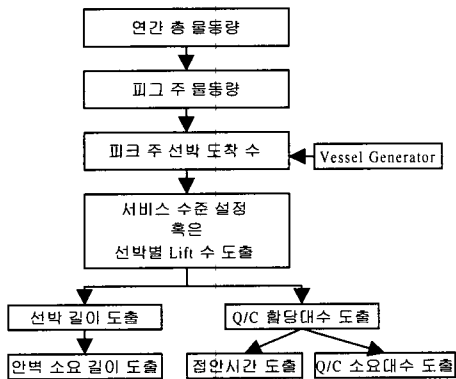
### 1. 안벽 시뮬레이션 모형

안벽 시뮬레이션은 연간 총 물동량 혹은 예측 물동량을 기준으로 하여 피크(peak) 주의 물동량을 도출하고 설정 모듈의 선박 발생기(vessel generator)를 통하여 피크 주의 물동량을 처리하는 데 필요한 피크 주의 선박 도착 수를 도출하게 된다. 이어서 시간당 하역 컨테이너 수로 나타나는 서비스 수준을 설정하거나 각 선박별 하역 컨테이너 수를 난수와 누적 분포도를 이용하여 발생시킨다. 기존 선박 길이와 평균 하역 컨테이너 수의 관계를 통하여 선박 길이를 도출하고 시간대별 선박 도착 간격에 따른 도착 선박의 길이를 누적하여 안벽 소요 길이를 도출하게 된다.

또한 안벽 크레인을 도출하기 위해서는 적양하 컨테이너 수와 실제 할당되는 크레인의 수 관계를 이용하여 위에서 도출된 각 선박별로 하역 컨테이너 수에 해당하는 크레인을 할당하게 된다. 크레인의 시간당 생산성(lifts/hour)을 가정하여 하역 소요 시간을 도출한 뒤 안벽에 접안하고, 이안하는 시간을 추가하여

각 선박별 접안 시간을 도출하게 된다. 각 선박에 할당되는 크레인의 대수를 누계하여 피크 주에 필요한 크레인 대수를 얻게 된다.

이때 항만의 일일 작업 시간, 선박당 이접안 소요 시간, 작업 시간당 제트리 크레인의 생산성 등을 설정한다. 분석 과정은 <그림 4>와 같다.



<그림 4> 안벽 시뮬레이션 과정

2. 게이트(gate) 시뮬레이션

게이트 시뮬레이션은 주어진 총 물동량에서 피크 일의 게이트 통과 물동량을 도출하고 컨테이너 종류별 비율, 컨테이너를 적재하고 터미널에 진입하였다가 컨테이너를 적재하고 진출하는 트럭의 비율 등을 감안하여 컨테이너 종류별 일일 유출입 트럭 대수를 산출하게 된다. 이어서 시간대별 도착 비율을 적용하여 시간대별 컨테이너 종류별 트럭 대수를 산출한다.

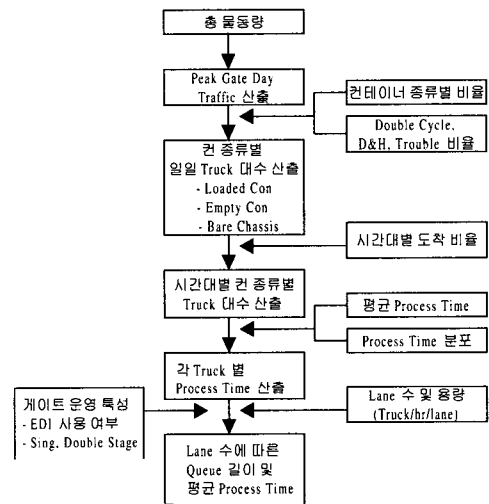
게이트를 통과하는 데 소요되는 평균 시간과 이의 분포를 이용하여 각 트럭별 게이트 통과 소요 시간 (process time)을 산출하며 일정 수의 게이트 차선과 용량을 가정하여 각 차선 수에 따른 대기 길이 및 평균 처리 시간을 도출하게 된다. 이때 EDI 사용 비율 등 실제 터미널 운영 특성을 다양하게 반영하게 된다. 게이트 규모를 도출하는 것 외에 점심시간 동안 터미널을 폐쇄하는 방안과 부분적으로 개장하는 방안 등 다양한 게이트 운영 방안을 평가할 수도 있다.

시뮬레이션 결과의 주안점은 진입·진출부 필요 대기 공간, 진입·진출 트럭의 평균 소요시간(mean overall time)이며, 대기 분석 결과는 피크시 차선

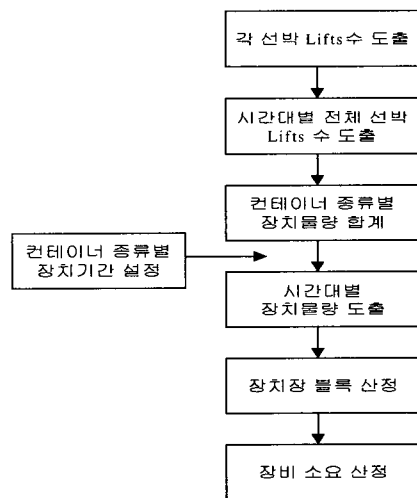
(lane)별 대기 길이로 나타난다. 이때 각 차선마다 일정 길이의 대기 공간을 가정하게 된다.

3. 장치장 시뮬레이션

수입 물동량의 경우 안벽 시뮬레이션에서 도출된 각 선박별 하역 컨테이너 수를 바탕으로 하여 시간대별 컨테이너 종류별 장치 물량을 집계하고 컨테이너 종류별 평균 장치 기간(dwell time) 분포를 적용하여 24시간마다 장치 기간이 경과된 컨테이너를 장치



<그림 5> 게이트(gate) 시뮬레이션 과정



<그림 6> 수입 컨테이너 장치 시뮬레이션 과정

물량에서 제외시켜 간다. 모든 도착 선박에 대하여 이러한 과정을 반복하고 최종적으로 시간대별로 장치 물량을 합산하여 인벤토리를 얻게 된다.

도출된 재고를 바탕으로 하여 소요 장치장 면적을 산출하고 필요한 장비 대수를 도출한다. 이때 장비 사양에 따라 정해진 장치 블록(block)의 일정 규격을 기준으로 한다.

### V. 모형의 적용

제 4장에서 제시된 시뮬레이션 모형 설계에 따라 시뮬레이션 전문 언어인 AweSim(Pritsker, et al, 1997)을 이용하여 안벽, 장치장, 게이트를 대상으로 하여 모형을 개발하였다. 각 모듈별로 다양한 분석을 수행하였으나 지면상 가정 및 투입자료의 양이 많은 게이트 부분(남기찬 외, 1998 참조)은 생략하고 안벽과 장치장 부분의 주요 분석 내용을 제시한다. 적용은 신항만을 건설할 때 예상되는 물동량을 기준으로 이를 처리하는 데 필요한 제반 터미널 자원을 도출하는 것이다. 즉, 안벽 시뮬레이션의 경우 주어진 연간 예상 물동량을 처리하는 데 필요한 안벽 길이와 안벽 크레인 대수를 도출하며, 장치장 시뮬레이션은 연간 물동량에 따른 터미널 장치 컨테이너 총 수(inventory)를 도출하고 이를 처리하는 데 필요한 장치장 소요 블록을 도출한다.

#### 1. 가정 및 입력 자료

##### 1) 안벽

항만의 연간 처리량을 3개의 시나리오로 하여 170만, 225만, 265만 개의 컨테이너로 가정하고, 기항 선박 당 평균 하역 컨테이너 수(lifts)는 기존 부산항과 아시아 주요항을 기준으로 하여 667, 1000, 1333 개의 컨테이너로 가정한다. 그리고 피크 주에 도착하는 평균 선박 수는 연간 물동량을 52주로 나누어서 주당 평균 컨테이너 수를 도출한 후 피크 계수 1.2를 곱하고 이를 기항 선박당 평균 하역 컨테이너 수로 나누어서 구한다. 선박 도착 분포는 피크의 경우 일주일 간 기항하는 전체 선박의 40%가 이들에 집중되는 것으로 가정한다. 선박 도착 시간 간격은

일반적으로 특정 확률 분포를 따르는 것으로 가정하지만 본 연구에서는 평균 도착 시간 간격에  $\pm 6$  시간을 확률적으로 적용하였다.

각 선박의 예상 적양하 컨테이너 수는 부산항과 아시아 주요항의 자료로부터 도출된 누적분포(mean lifts 분포)와 0~1 사이의 난수를 이용하여 구하게 된다(남기찬 외, 1998). 그리고 도출된 하역 컨테이너 총 수가 주어진 물동량과 차이가 클 때는 난수를 다시 발생시켜서 위의 과정을 반복하여 조정한다.

각 선박당 하역 작업에 할당되는 안벽 크레인 수는 부산항과 아시아 주요항의 자료를 바탕으로 2~5기까지 설정하였다. 각 Q/C의 생산성은 시간당 25개 컨테이너로 하며, 할당되는 Q/C가 1대씩 늘어날 때마다 장비간에 일어나는 간섭률 0.9를 적용한다. 일일 작업 시간은 하루 24시간으로 하고, 선박의 이접안 시간을 각각 1시간으로 가정하며, 접안 선박간 유지해야 하는 거리는 20m로 한다.

선박길이 결정은 난수와 누적분포에 의해서 이루어져야 하나(III장 참조) 선박 길이와 컨테이너 하역 수의 관계를 나타내는 자료의 부족으로 인하여 <표 3>과 같이 5가지로 가정하였다.

<표 3> 컨테이너 처리 수(lifts)에 따른 선박길이 구분

lifts 수	500 이하	500~1000	1000~1500	1500~2000	2000 이상
선박길이	150m	190m	230m	270m	300m

##### 2) 장치장 운영 및 입력자료

유출입되는 수출 컨테이너와 수입 컨테이너의 종류별 비율 및 장치 기간은 부산항의 자료와 아시아 주요항의 자료를 바탕으로 하여 각각 <표 4>, <표 5>와 같이 가정한다.

<표 4> 컨테이너 종류별 장치장 유출입 비율 (단위:%)

	수입 컨테이너	수출 컨테이너	
적	79.97	적	73.19
공	9.70	공	16.12
이선적	2.55	제유통	1.14
냉동	7.79	냉동	9.55

주 : 96, 97년도 부산항 수입·수출 화물 비율.

〈표 5〉 유출입 컨테이너별 장치시간 분포(%)

장치 기간 (일)	수입 적·공 컨테이너	수출 적·공 컨테이너	이전적 컨테이너	수입냉동 컨테이너	수출냉동 컨테이너	재유통공 컨테이너
1	23.0	21.9	-	10.0	30.0	10.0
2	15.5	43.4	-	25.0	30.0	10.0
3	16.8	20.7	10.0	30.0	20.0	10.0
4	21.2	8.1	15.0	25.0	20.0	10.0
5	15.7	3.0	25.0	10.0	-	10.0
6	4.3	1.5	25.0	-	-	10.0
7	2.2	0.6	15.0	-	-	10.0
8	0.7	0.8	5.0	-	-	10.0
9	0.3	-	5.0	-	-	10.0
10	0.1	-	-	-	-	10.0
11	0.2	-	-	-	-	-

주 : 90년도 BCTOC 실적치.

수입 컨테이너는 1996, 1997년도의 부산항의 자료를 기준으로 하여 전체 총 적양하 컨테이너의 48.75%로 가정 한다. 이에 따른 각 대안별 수입 컨테이너의 수는 전술한 대안별 선박당 하역 컨테이너 수에 수입 컨테이너 비율을 적용하여 각 대안별 선박당 평균 수입 컨테이너 수를 도출하고 여기에 피크시선박 도착 분포에 따른 선박수를 곱하여 수입 총 물동량을 구한다 〈표 6〉.

수출 컨테이너는 게이트로부터 반입되는 컨테이너와 철송을 이용하여 반입되는 컨테이너의 합이다. 게이트 반입 물량은 피크 일의 도착 컨테이너를 기준으로

하여 유입 차량의 52.1%가 장치장에 적·공 컨테이너를 반입하는 것으로 가정하여 산출하고, 철송 물량은 비환적 화물량에 철송 이용 화물 비율 10%를 곱하여 구한다〈표 6〉.

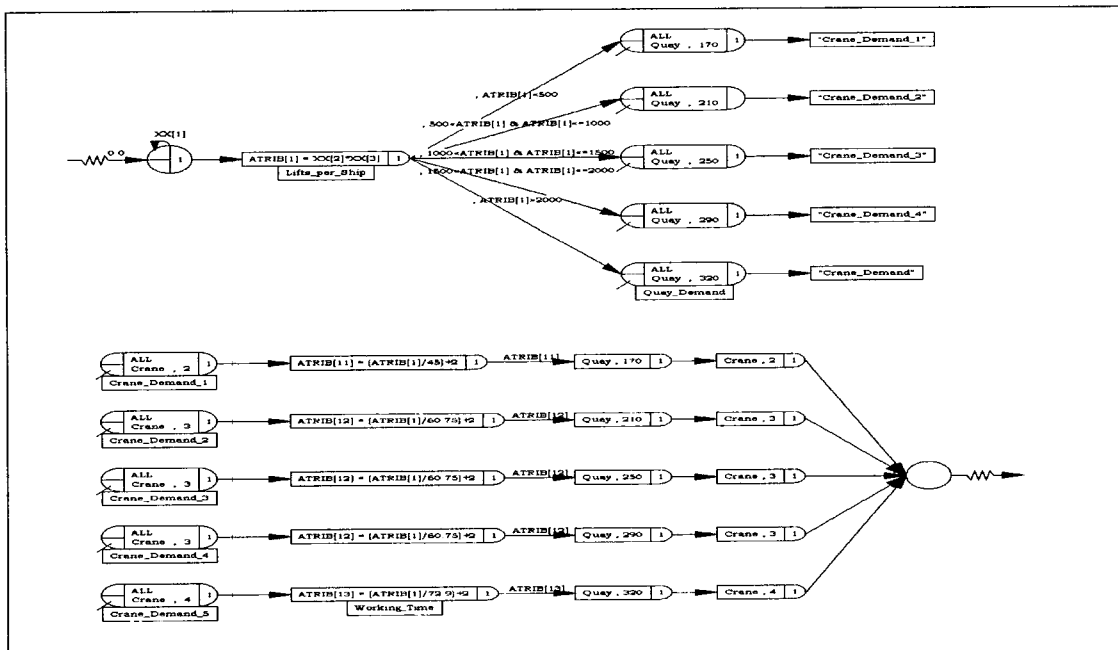
소요 장치장 규모를 산정하기 위하여 피크시의 장치장의 평균 사용률을 60%로 하고, 20피트와 40피트 컨테이너를 20피트로 환산하는 계수 TEU/lifts의 비율을 1.5로 하며, 장치 단적수는 3.5로 가정한다.

〈표 6〉 대안별 평균 수입 및 수출 화물 발생량

대안	수입(개/선박)	수출(개/일)	
	안벽	게이트	철송
1	325	2255	374
2	486	2983	495
3	647	3511	582

## 2. 모형 설정

시뮬레이션 모형은 John Wiley & Sons, Inc.에서 개발된 시뮬레이션 언어 AweSim을 이용하여 개발하였다. AweSim은 Visual SLAM을 이용한 환경에서 확률적, 이산적 시뮬레이션이 가능하도록 만들어졌으며, 최



〈그림 7〉 안벽 시뮬레이션 모델 구성



신 버전은 GUI 환경에서 입출력이 이루어지고 모듈별 통합 능력이 뛰어나며 그래픽 애니메이션 기능이 보완된 특성이 있다.

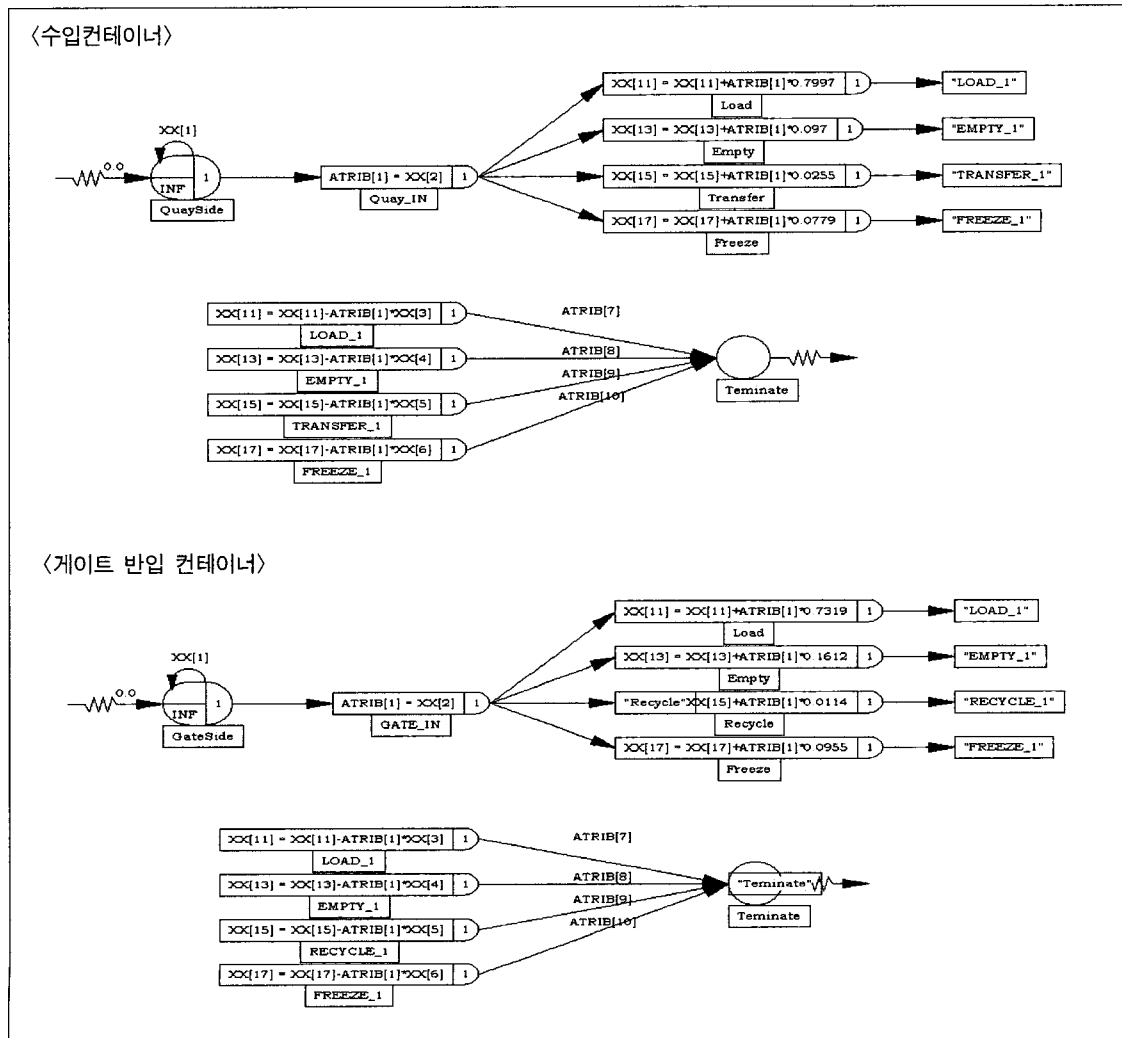
전술한 시뮬레이션 과정과 가정 및 입력 자료를 이용하여 개발된 안벽 및 장치장 모형을 AweSim Network Model로 단순화하여 나타내면 각각 <그림 7>, <그림 8>과 같다.

1) 안벽

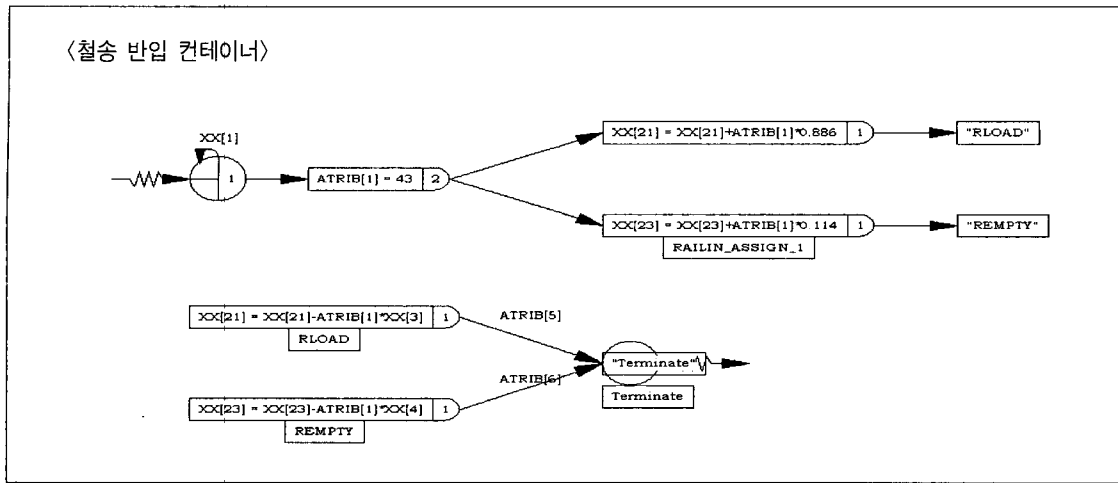
안벽 시뮬레이션은 연간 물동량과 피크 주의 물동량을 기준으로 하여 도출된 피크 주 선박도착을 기준으로 한다. XX[1]의 시간 간격으로 도착 선박이 발생하면 아시아 주요항과 부산항의 자료로부터 도출된

적양하 컨테이너 수의 누적분포(적양하 개수/평균 적양하 개수) XX[2]와 난수값 XX[3]을 적용하여 각 선박의 적양하 컨테이너 수의 값인 ATTRIB[1]이 결정된다. 이 속성값과 투입 자료를 이용하여 선박별 소요 안벽길이와 소요 크레인 수를 도출하며, 적양하 컨테이너 수를 소요 크레인 수와 생산성으로 나누어서 작업 소요 시간을 구하고 여기에 이·접안에 소요 접안시간이 경과하면 해당 선박은 점유한 크레인과 안벽을 반환하고 시뮬레이션에서 사라진다.

시뮬레이션 수행 시간 동안 안벽 점유 길이 및 시간, 안벽 크레인 할당 대수 등의 자료가 축적되고 정리되어서 피크시의 최대 소요 안벽 길이와 최대 소요 크레인 수를 도출한다.



<그림 8> 장치장 시뮬레이션 모델 구성 (continued)



<그림 8> 장치장 시뮬레이션 모델 구성

2) 장치장

장치장 시뮬레이션은 안벽과 게이트 및 철송장을 통하여 유출입되는 컨테이너를 수출과 수입으로 구분하고 이를 다시 컨테이너 속성별로 구분하여 24시간 기준 장치 현황을 파악하고 피크 주의 평균치를 수용하는 데 소요되는 장치장 면적을 산정한다. 안벽 시뮬레이션 결과 발생한 컨테이너 수에 수입 컨테이너 비율을 적용하여 수입 컨테이너 수를 도출하며, 이에 <표 4>의 컨테이너 속성 비율을 적용하여 속성별 컨테이너 개수 XX[11], XX[13], XX[15], XX[17]을 산출하여 컨테이너 속성별로 누적한다.

<표 5>의 장치 시간 분포를 이용하여 매 24시간마다 각 컨테이너 속성별로 ATRIB[7], ATRIB[8], ATRIB[9], ATRIB[10]의 장치 시간을 거쳐 ATRIB[1]에 속성별로 매일 XX[3], XX[4], XX[5], XX[6] 비율로 컨테이너는 모델에서 소멸한다. 수출 컨테이너의 경우 <표 6>의 일일 반입 컨테이너를 기준으로 하여 게이트 시뮬레이션(<그림 5> 참조)에 의한 반입 컨테이너와 철송을 통한 반입 컨테이너를 통해서 시간별로 도착한 컨테이너 ATRIB[1]이 생성되고 수입 컨테이너와 동일한 방법으로 각 컨테이너 속성별로 장치 시간이 지나면 모델에서 소멸된다.

소요 장치장 규모는 최대 장치 물량을 대상으로 소요 블록(block: 열 x bay x 3.5단) 수를 단위로 하여 도출하며, 블록 규격은 장치장 하역 장비의 기본 사양인 컨테이너 6열 배열과 길이 방향 22 컨테이너 그리고 높이 방향 3.5단을 기준으로 한다.

3. 시뮬레이션 결과

안벽 시뮬레이션은 피크 주의 168시간을 대상으로 하고 장치장 시뮬레이션은 20주를 대상으로 하며, 처음 10주는 장치장의 안정화를 위한 기간으로 하고 나머지 10주를 대상으로 결과를 도출하였다.

1) 안벽

<표 3> 하역 컨테이너 수에 따른 선박 길이 구분을 이용해서 선박 발생기(III장 참조)에 의해서 발생된 선박 패턴을 바탕으로 하여 주어진 물동량을 처리하는데 소요되는 안벽의 길이 및 이용도와 안벽 크레인(Q/C) 소요 대수 및 이용률을 도출하였다(<표 7>).

<표 7> 안벽 소요 길이 및 Q/C 소요 대수

비고 대안	Q/C 소요(대)			안벽 소요(m)		
	평균	표준 편차	최대 이용	평균	표준 편차	최대 이용
1	12.749	5.465	27	1100	536	2660
2	18.236	6.362	34	1539	724	3490
3	22.038	7.611	37	1838	921	4170

Q/C 소요 대수는 대안 1의 경우 최대 27대, 평균 13대가 필요하며, 대안 2의 경우 최대 34대, 평균 19대가 소요된다. 대안 3의 경우 최대 소요 대수 37대이고 평균 23대의 Q/C가 필요하다. 각 대안별 최대 소요 안벽 길이는 각각 2660m, 3490m, 4170m이다.

이러한 결과를 바탕으로 하여 실제 터미널 설계시 주어진 물동량을 처리하는 데 필요한 안벽 길이와 안벽 크레인 대수를 결정할 수 있다. 적정 길이 및 대수는 적정 서비스 수준을 결정하고 최대 소요치에 이

를 적용하여 결정한다.

2) 장치장 시뮬레이션

전술한 안벽, 게이트, 철송 부문의 컨테이너 발생과 각 컨테이너별 장치 기간을 이용해서 야드의 평균 및 최대 장치량과 그에 따른 필요 블록 수를 도출하였다(표 8). 대안 1, 2, 3의 평균 수출 적 컨테이너 수는 각각 4,524, 5,985, 7,043개이며, 최대 장치량은 각각 7,803, 10,313, 12,116개이다. 대안별 총 컨테이너 수, 즉, 최대 장치장 재고량은 각각 19,499, 27,179, 33,841개이다.

산출된 장치장 재고량을 수용할 수 있는 소요 장치장 규모는 장치장 하역 장비 RMGC(Rail Mounted Gantry Crane)나 RTGC(Rubber Tired Gantry Crane)의 기본 사양인 컨테이너 6열 배열을 기준으로 하고 길이는 22bay, 25bay, 28bay 등을 대안으로 하며, TEU/lift 환산 계수 1.5와 평균 장치단적수 3.5단 그리고 장치장 평균 가용률을 60%로 가정하여 소요 블록(block: 열 x bay x 3.5단) 수를 도출하였다(표 9).

소요 블록(block)의 수는 대안 1의 경우 22bay, 25bay, 28bay에 대하여 각각 62블록, 57블록, 51블록이며, 대안 2의 경우 각각 91블록, 80블록, 70블록이다. 대안 3의 경우는 각각 114블록, 100블록, 90블록이 필요하다.

대안별 블록의 길이는 각각 144.5m, 164.2m, 183.9m이며, 폭은 트럭 통로(roadway)를 포함하여 22.5m이기 때문에 이를 감안하면 순수 장치장 면적이 도출된다. 실제 설계에서는 통로폭과 내부 도로, 지원 건물 면적 등을 감안하여 터미널 총 면적을 도출한다.

〈표 8〉 대안별 컨테이너 터미널 장치량

대안	평균	표준편차	최소	최대	
1	수출 적	4524	1386	2442	7803
	수출 공	927	302	465	1646
	수출 냉동	57	21	25	108
	수출 재유통	1085	322	321	1857
	수입 적	4332	1150	72	6465
	수입 공	525	140	9	784
	수입 이선적	138	37	2.3	206
	수입 냉동	421	112	7	630
<b>합 계</b>	<b>12009</b>		<b>3346</b>	<b>19499</b>	
2	수출 적	5985	1832	3204	10313
	수출 공	1226	400	612	2176
	수출 냉동	76	28	33	143
	수출 재유통	1435	426	424	2456
	수입 적	6478	1720	107	9668
	수입 공	786	209	13	1173
	수입 이선적	207	55	3.5	308
	수입 냉동	631	168	10.5	942
<b>합 계</b>	<b>16824</b>		<b>4407</b>	<b>27179</b>	
3	수출 적	7043	2157	3769	12116
	수출 공	1443	471	720	2558
	수출 냉동	89	33	39	168.5
	수출 재유통	1689	501	499	2891
	수입 적	8629.5	2291.5	143	12879
	수입 공	1047	278	17	1562
	수입 이선적	275	73	4.5	411
	수입 냉동	841	223	14	1255
<b>합 계</b>	<b>21056</b>		<b>5205</b>	<b>33841</b>	

〈표 9〉 대안별 소요 장치 블록

수출입	대안	1			2			3		
		22bay	25bay	28bay	22bay	25bay	28bay	22bay	25bay	28bay
수출	적&공	26.50	25.96	23.18	39.02	34.34	30.66	45.92	40.41	36.08
	냉 동	0.31	0.27	0.24	0.41	0.36	0.32	0.48	0.42	0.38
	재유통	5.87	5.17	4.61	7.77	6.83	6.10	9.14	8.04	7.18
수입	적	23.44	20.63	18.42	35.05	30.85	27.54	46.70	41.09	36.69
	공	2.84	2.50	2.23	4.25	3.74	3.34	5.67	4.99	4.45
	이선적	0.75	0.66	0.59	1.12	0.99	0.88	1.29	1.31	1.17
	냉 동	2.28	2.00	1.79	3.41	3.00	2.68	4.55	4.00	3.58

#### 4. 시뮬레이션 결과의 평가

전술한 시뮬레이션 결과치의 객관성을 검증하기 위한 한 방안으로서 최근 외국 용역사가 수행한 터미널 설계의 결과치와 주어진 물동량을 대상으로 단순계산을 통하여 도출된 결과치를 비교하였다(단순계산 공식은 금중수, 1998 참조). 물동량은 본 연구에서 가정한 대안 2의 225만개의 컨테이너를 기준으로 하였으며, 장치기간 및 장치장 이용률 등에 다소 차이가 있어서 비례적으로 이를 조정하여 비교가 가능하게 하였다 <표 10>.

<표 10> 시뮬레이션 결과 비교(대안 2 기준)

		본 연구	P항 설계 <sup>1)</sup>	단순 계산
물동량(컨테이너)		225만	225만	225만
안벽	안벽소요(m)	3,490 (109%)	3,195 (99.8%)	3,200 (100%)
	Q/C 소요(대)	34 (113%)	33 (110%)	30 (100%)
장치장	Inventory (컨테이너)	46,859 (108%)	57,757 (133%)	43,269 (100%)
	장치장 규모(block)	223 (108%)	275 (133%)	206 (100%)
게이트	반입(차선 수)	13	12	14
	반출(차선 수)	7	8	7

주 : 1) Pusan Newport Co., Ltd.(1998).

장치장의 경우 본 연구에서는 장치 기간을 수출 컨테이너는 2.4일 수입 컨테이너는 3.2일, 피크시의 장치장 이용률 60%를 가정하였으며, P항의 경우 장치기간 7일 피크시의 장치장 이용률 75%를 바탕으로 하였기 때문에 본 연구에서 도출된 수치에 장치기간과 장치량을 비례적으로 가산하여 두 결과치의 비교가 가능하게 하였다. 비교 결과 장치장을 제외하고 차이의 범위가 13% 이내로서 비교적 양호한 결과임을 알 수 있다. 그러나 시뮬레이션 결과의 객관성을 확보하기 위해서는 추후 실제 터미널 자료를 이용한 각 모듈별 추가적인 검증이 있어야 할 것이다.

#### VI. 결론

본 연구는 컨테이너 터미널의 중장기 의사결정을 지원할 수 있는 거시적 시뮬레이션 모형을 제시하고

일부 모듈을 이용하여 신규 터미널 개발을 가정하여 이를 적용하였다. 특히 기존 연구들이 복잡한 터미널 상황을 단순화하여 모형을 개발한 점을 개선하기 위하여 실제 터미널 상황을 최대한 반영할 수 있는 모형의 설계에 초점을 두었다.

그 동안 국내에서 수행된 관련 연구들이 신항만 개발과 관련하여 필요한 설계 문제를 다룰 수 없는 점을 감안하여 제안된 모형의 일부 모듈을 이용하여 주어진 총 물동량을 기준으로 적정 안벽, 장치장, 게이트 관련 자원의 소요를 도출함으로써 터미널 설계에 활용 방안을 소개하였다. 모형을 적용한 결과 실제 터미널 설계시 요구되는 기본적인 요소들을 도출할 수 있었으며, 단순 수계산에 따른 결과와 최근 수행된 한 신항만 설계 결과와 비교한 결과 유사한 결과를 얻었다.

이러한 결과들을 종합할 때 본 연구는 기존 국내 연구들의 한계를 극복하여 신규 터미널 개발에 사용할 수 있는 기능을 포함한 것으로 평가된다. 그러나 시뮬레이션 모형의 객관성을 확보하기 위해서는 향후 실제 터미널 자료를 대상으로 한 세부적인 검증의 과정이 필요하며, 시뮬레이션 결과는 투입 자료의 객관성에 좌우되기 때문에 보다 현실적인 입력 자료를 축적할 수 있는 데이터 베이스 구축 등이 추가되어야 할 것이다. 또한, 터미널 설계와 관련된 기본적인 모듈은 개발하였으나 4장에서 제시된 설계에 따라 세부적인 서브 모듈들이 추가될 필요성이 있다. 특히, 이송 장비의 적정 규모 산정 등을 위하여 장치장 배치를 좌표점으로 표현하고 다양한 상황을 검토할 수 있는 민감도 분석 모듈의 개발이 필요하다. 시뮬레이션 결과를 영상으로 확인할 수 있는 애니메이션 기능이 역시 추가될 필요가 있다.

#### 참고문헌

1. 금중수(1998), "목포 신항만의 터미널 운영시스템에 따른 CY 소요면적 산정에 관한 연구", 한국항만학회지 12권 1호, pp.35~46.
2. 김현(1988), "시뮬레이션에 의한 부산 컨테이너 터미널의 체계적인 방안", 한국해양대학교 석사학위 논문.
3. 남기찬, 광규석, 신재영, 김우선(1998), "컨테이

- 너 터미널 증장기 계획 수립을 위한 시뮬레이션 모형 개발”, 한국해양대학교 부설 물류연구센터 Working Paper pp.98~101.
4. 유승렬(1997), “시뮬레이션에 의한 컨테이너 물류 시스템의 분석에 관한 연구”, 한국해양대학교 석사 학위 논문.
  5. 임진수(1991), “컨테이너 터미널 능력산정에 관한 연구”, 해운산업연구원.
  6. 장성용, 박진우(1988) “시뮬레이션 기법을 이용한 컨테이너 터미널의 운영시스템 결정” 산업공학 제 1권, 제1호, pp.49~62.
  7. Ballis, A. Abacoumkin, C.(1995), “A Container Terminal Simulation Model with Animation Capabilities,” *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 30. No. 1, pp.37~57.
  8. Ballis, A. Golias, J. Abakoumkin, C.(1997), “A comparison between conventional and advanced handling systems for low volume container maritime terminal,” *Marit. Pol. MGMT.*, Vol. 24, No.1, pp.73~92.
  9. Edmond, E.D.(1976), “Operating Capacity of Container Berths for Scheduled Services by Queue Theory,” Dock and Harbor Authority, November, 1976.
  10. Hwang, C. C., 1978, “Analysis of Container Port through System Simulation,” Ph. D dissertation, North Carolina State University, Raleigh, N. C.
  11. Novaes, A.G.N.(1972), “An Appraisal of Queueing Model for the Solution of Port Capacity.Problem, Commodity. Transportation. and.Economic.Development.Laboratory, M.I.T., Cambridge, Mass.
  12. Pritsker, A. Allan, (1974), *The GASP-IV Simulation Language*, John Wiley and Sons, New York.
  13. Pritsker, A. Allan, (1997), *Simulation with Visual SLAM and Awesim*, John Wiley and Sons, New York.
  14. Pusan Newport Cc., Ltd.(1998), *Pusan Newport Container Terminal Planning Study, Final Report.*
  15. Yamato, H. Koyama, T. Fushimi, A. Tsunoda, T.(1997), “An Analysis and Design of the Container Terminal Based on the Simulation” International Maritime Conference.