

컨테이너크레인 성능평가를 위한 시뮬레이터 설계 및 구현

원승환

한국해양수산개발원 해양물류연구부
(shwon@kmi.re.kr)

최상희

한국해양수산개발원 해양물류연구부
(shchoi@kmi.re.kr)

컨테이너 물동량 증가와 컨테이너선의 대형화에 따라서 항만 하역장비는 지속적으로 변화하고 있다. 본 연구는 항만 하역장비 가운데 컨테이너크레인의 기계적 생산성을 상세히 평가하기 위해 개발된 시뮬레이션 모델을 소개한다. 모델은 컨테이너크레인의 메커니즘으로 싱글 및 듀얼 트롤리 방식을, 스프레더 유형으로 싱글, 트윈, 탠덤 방식을 고려하고 컨테이너크레인의 규모와 속도 등에 관련된 세부 사양을 입력받아 기구학적 특성을 구현한다. 또한 외부의 물리적 제약으로 선박의 크기, 컨테이너의 적재위치와 무게를 고려한다. 본 모델은 다양한 입력변수가 파라미터(parameter)로 분리되어 실험 조건을 편리하게 설정할 수 있으며, 객체 지향적으로 설계·개발되어 향후 새롭게 개발되는 장비 유형이나 기존 장비의 변화를 유연하게 수용할 수 있다.

논문접수일 : 2009년 07월 30일 논문수정일 : 2009년 08월 30일 게재확정일 : 2009년 09월 05일 교신저자 : 원승환

1. 서론

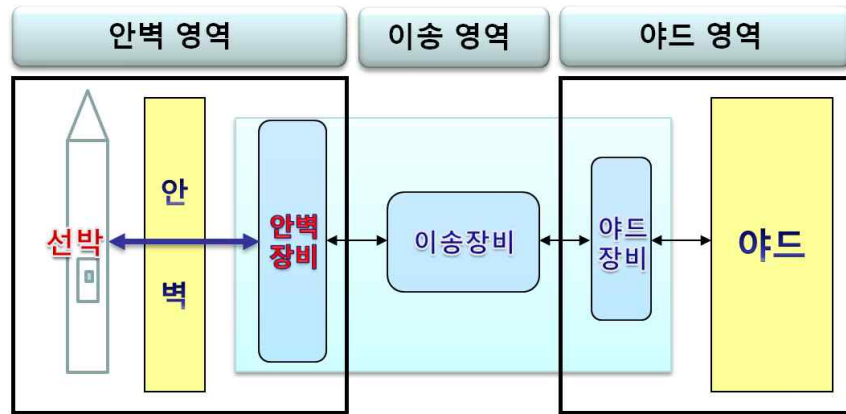
1.1 연구 배경 및 목적

국가 간의 교역규모가 증가함에 따라 항만을 둘러싼 물류 환경변화가 급속하게 일어나고 있다. 2008년 세계 컨테이너 물동량은 5억 4천만 TEU (twenty-foot equivalent unit)로서 2000년의 2억 3천만 TEU에 비해 2.3배 성장하였으며, 2013년까지 연평균 9% 내외의 성장률을 달성할 것으로 예측되고 있다(Drewry Shipping Consultants, 2008). 이에 따라 해상 운송업계에서는 시장지배력의 확대를 위한 선사간의 합종연횡을 통해 메가 캐리어(mega-carrier)가 등장했으며, 해상 운임에 대한 경쟁력을

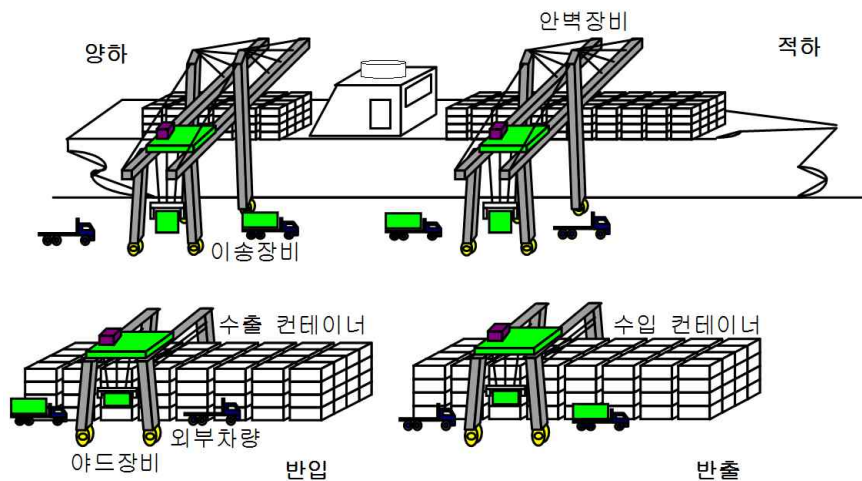
확보하기 위해 경쟁적으로 10,000 TEU급 이상의 초대형선 확보에 막대한 투자를 지속하고 있다.

이와 같이 지속적인 컨테이너 물동량의 증가와 컨테이너선의 대형화에 따라서 컨테이너 터미널은 생산성 증가에 대한 요구를 끊임없이 받고 있다. 각 터미널들은 컨테이너 하역장비의 성능향상과 운영의 최적화를 통해 경쟁 우위를 확보하고자 노력하고 있다. 컨테이너 터미널의 하역장비는 안벽장비, 이송장비, 야드장비로 구성된다. 안벽장비와 야드장비는 각각 안벽과 야드의 제한적인 작업 영역 내에서 컨테이너를 취급하고, 이송장비는 안벽과 야드 사이에서 컨테이너를 이동시킨다. <그림 1>은 컨테이너 터미널의 하역장비 구성과 컨테이너 흐름을 나타낸다.

* 본 연구는 국토해양부 “지능형 항만물류시스템 기술개발” 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.



<그림 1> 컨테이너 터미널의 하역장비 구성과 컨테이너 흐름



<그림 2> 컨테이너 터미널의 주요 작업

컨테이너 터미널에서는 <그림 2>와 같이 양·적하 작업과 반·출입 작업이 여러 장비에 의해 이루어진다. 양·적하 작업에서는 컨테이너들이 선박으로부터 야드로 양하 되거나 야드로부터 선박으로 적하되고, 반·출입 작업에서는 컨테이너들이 터미널 외부로부터 야드로 반입되거나 야드로부터 터미널 외부로 반출된다. 작업이 일어나는 동안에는 장비간의 연계가 반복적으로 발생된다. 따라서 터미널의 생산성을 높이기 위해서는 개별

장비의 성능 개선과 장비 간의 원활한 연계가 함께 이루어져야 한다.

본 연구에서 다루고자 하는 안벽장비는 선박으로부터 컨테이너를 내리거나 선박에 컨테이너를 싣는 기능을 담당한다. 이러한 기능은 컨테이너 터미널의 생산성을 결정짓는 1차적인 요인이 되므로 안벽장비의 성능 향상은 항만 전체 성능 향상의 기반이 된다. 본 연구에서는 대표적인 안벽장비인 컨테이너크레인의 개별 성능평가에 대해서 논한

다. 즉, 다른 장비와의 연계는 고려하지 않는다. 그러나 컨테이너크레인의 작업에 관련된 새로운 하역방식과 다양한 물리적 조건들을 상세히 다루게 된다. 개별 성능평가 모델은 장비의 기계적 성능에 대한 한계를 제시하며, 장비간의 연계와 터미널 운영상황을 반영하는 종합적인 성능평가 모델을 개발하기 위한 선행연구로서 중요한 의미를 갖는다.

1.2 기존 연구

윤원영 등(2001)은 컨테이너크레인의 하역능력을 추정하기 위하여 시뮬레이션 모델을 사용했다. 모델은 컨테이너크레인의 고장을 반영했고 대기행렬 모델이 포함되어 있다. 실험을 통해 선박 및 야드 트랙터의 대기 시간, 컨테이너크레인의 활용도, 선석 점유율 등을 산출하여 분석하였다. 이 연구는 터미널 전체의 성능평가에 초점을 두어 본 연구와 같이 컨테이너크레인의 상세한 기구학적 특징과 물리적 제약이 반영되지는 못했다.

Bhimani and Sisson(2002)은 컨테이너선의 대형화에 따라서 요구되는 컨테이너크레인의 성능에 대하여 논하였다. 12,000 TEU 선박의 재항시간(turnaround time)을 6,000 TEU 선박의 재항시간과 유사한 수준으로 유지하기 위하여 컨테이너크레인에 요구되는 생산성과 사양이 분석되고, 생산성을 향상시킬 수 있는 새로운 개념들이 소개되었다. 컨테이너크레인의 대표적인 유형별로 생산성을 제시하였으나 구체적인 절차와 근거는 제시되지 않았다.

하태영·최용석(2005)은 네 가지 유형의 컨테이너크레인에 대한 하역 생산성을 평가했다. 분석 대상이 된 유형은 싱글 트롤리, 듀얼 트롤리, 더블 트롤리, 수직 순환식이다. 각 유형에 대하여, 작업 메커니즘을 분석하여 기계적 생산성을 계산하고 시뮬레이션 모델을 통해 순 생산성을 산출했다. 기계적 생산성을 계산하기 위하여 유형별로 메커니즘

을 구분·분석한 점에서는 본 연구와 유사하지만, 본 연구는 컨테이너의 크기 및 무게 분포, 선박의 적재계획, 멀티 리프트 적용, 선박의 크기 변화 등 컨테이너크레인의 성능에 영향을 주는 물리적 제약을 추가적으로 고려하였다.

Lind et al.(2007)은 탠덤 스프레더가 적용된 컨테이너크레인의 구조, 생산성, 운영 관련 이슈, 사양, 구성 요소 등을 논하였다. 생산성 분석에서는 모든 컨테이너의 크기를 40피트로 가정하고 모든 취급에서 40피트 두 개를 동시에 처리할 수 있다고 가정하여, 컨테이너크레인의 생산성을 기존 생산성의 2배로 제시하였다. 이에 비해 본 연구는 컨테이너의 크기와 탠덤 스프레더의 처리 제약 등을 변동 가능한 요인으로 다루었다.

원승환·최상희(2007)는 싱글 스프레더가 적용된 컨테이너크레인의 성능을 가정한 후, 트윈 스프레더와 탠덤 스프레더의 적용 효과를 분석적인 방법에 의해 제시하였다. 트윈 리프트 적용률과 취급횟수 감소비율을 인자(factor)로 정의한 후, 다양한 수준에서 생산성을 분석하였다. 그러나 컨테이너크레인의 생산성에 영향을 미치는 근원적인 인자를 통해 생산성이 도출되지 못한 한계를 가진다.

본 연구 이전까지 이루어졌던 컨테이너크레인의 개별 성능평가에서는 장비의 규모와 기구학적인 사양만이 사용되어 그 성능은 확정적인 값으로 계산되었다. 본 연구에서는 선택된 시나리오에 따라서 컨테이너의 크기, 무게, 적재계획(stowage plan) 등을 다양하게 생성하여 성능을 평가해보고자 한다. 시나리오는 컨테이너크레인의 메커니즘, 스프레더의 유형, 대상 선박의 크기 등의 조합으로 이루어진다. 이러한 시나리오에 따른 다양한 상황에서 성능을 평가하는 도구로 시뮬레이션을 선정하여, 컨테이너크레인 성능평가용 시뮬레이션 모델을 개발하고자 한다.

<표 1> 컨테이너크레인 성능평가를 위한 시뮬레이션 모델의 변수 비교

변수	기존의 모델	본 논문의 모델
<ul style="list-style-type: none"> 장비 규모 기구학적 사양 메커니즘 다양화 	반영함	반영함
<ul style="list-style-type: none"> 컨테이너 크기 분포 컨테이너 무게 분포 선박 적재계획 스프레더 유형 다양화 작업 선박 다양화 	반영 안 함	반영함

1.3 논문 구성

논문의 제 2장에서는 시뮬레이션 모델의 설계 내역을, 제 3장에서는 구현된 시뮬레이션 시스템을 소개한다. 제 4장에서는 시뮬레이션 시스템을 통해 실험된 결과와 분석이 제시되고, 마지막으로 제 5장에서 결론을 맺는다.

2. 시뮬레이션 모델 설계

본 논문에서 제시하는 시뮬레이션 모델의 가장 큰 특징은 컨테이너크레인의 성능에 영향을 미치는 요소들 중 기존의 모델에서 고려하지 않은 여러 요소들을 상세히 반영하였다는 점이다. <표 1>은 기존의 모델에서 다루었던 변수와 본 논문의 모델에서 다루는 변수를 비교하여 나타낸다. 기존 대부분의 모델에서는 주어진 컨테이너크레인의 규모, 사양, 메커니즘을 사용하여 기계적인 성능을 계산하였다. 또한, 컨테이너 터미널 전체의 성능평가 모델에서는 컨테이너 크레인의 규모, 사양, 메커니즘 등을 직접 고려하지 않고 경험적인 시간의 분포를 사용하기도 하였다(윤원영 등, 2001). 컨테이너크레인의 성능 관련 변수를 가장 상세하게 다루었던 하태영·최용석(2005)의 모델은 본 논문의 모델에서 고려한 변수 가운데 장비

<표 2> 시뮬레이션 모델의 주요 입력 항목

범주	항목
사양	<ul style="list-style-type: none"> 메커니즘 스프레더 유형 정격 부하 트롤리 속도 및 가속도 호이스트 속도 및 가속도 아웃리치 및 백리치 레일 게이지
작업 조건	<ul style="list-style-type: none"> 적재계획 선박 유형 컨테이너 크기 분포 컨테이너 무게 분포 에이프런 작업 레인

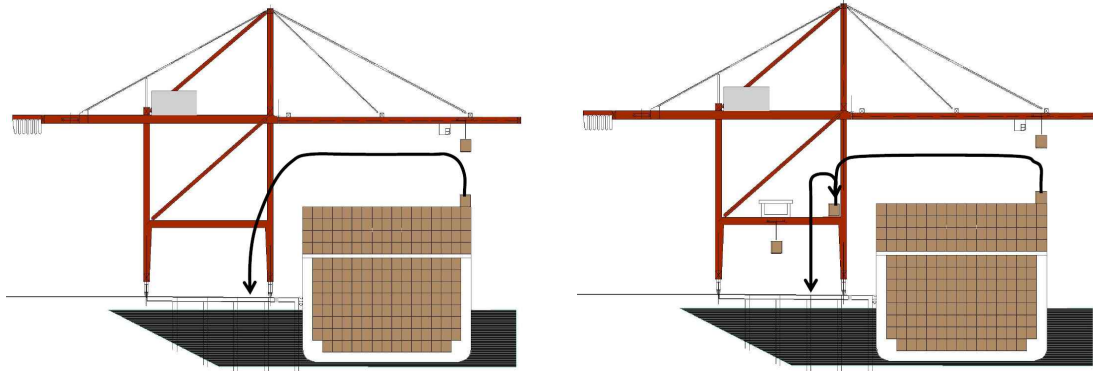
규모, 기구학적 사양, 메커니즘의 다양화까지를 포함하였다.

시뮬레이션 모델의 설계는 입력 사양 정의, 작업 절차 정의, 작업 진행 모니터링 방식 정의, 산출 통계량 정의 순으로 이루어졌다. <표 2>는 시뮬레이션 모델의 주요 입력 항목들을 사양과 작업 조건으로 구분하여 나타낸다. 컨테이너크레인의 사양만으로도 제한적인 기계적 생산성의 도출이 가능하지만 본 모델에서는 작업 조건을 물리적 제약으로 반영하여 작업 환경에 따른 성능 변화를 분석할 수 있도록 하였다. 이후에서는 사양 관련 입력 정의, 작업 조건 관련 입력 정의, 작업 절차 정의, 작업 진행 모니터링 방식 정의, 산출 통계량 정의 순으로 상세히 설명된다.

2.1 사양 관련 입력 정의

2.1.1 메커니즘

컨테이너크레인의 메커니즘은 싱글 트롤리와 듀얼 트롤리 중에서 선택 가능하다. <그림 3>은 컨테이너크레인의 두 가지 메커니즘을 나타낸다. 듀얼 트롤리는 작업 사이클을 둘로 나누므로 싱글 트롤리에 비해 사이클 타임을 줄이는 장점이 있다. 그러나 실제 적용에서는 생산성 측면의 효과보다,



(a) 싱글 트롤리 (b) 듀얼 트롤리
 <그림 3> 컨테이너크레인의 메커니즘(Bhimani and Sisson, 2002)



(a) 싱글 스프레더



(b) 트윈 스프레더



(c) 탠덤 스프레더

<그림 4> 컨테이너크레인의 스프레더 유형별 컨테이너 취급(ECT web site; Bhimani and Sisson, 2002; Lind et al., 2007)

트롤리의 작업 구분에 따른 자동화 측면이 부각된다. 즉, 싱글 트롤리의 경우에는 컨테이너 하역 작업에 관련된 여러 작업자들이 에이프런에 위치하여 이송장비의 자동화가 어렵지만, 듀얼 트롤리의 경우에는 작업자들이 포탈 빔에 설치된 플랫폼에 위치 가능하므로 이송장비의 자동화에 유리한 대안으로 여겨진다.

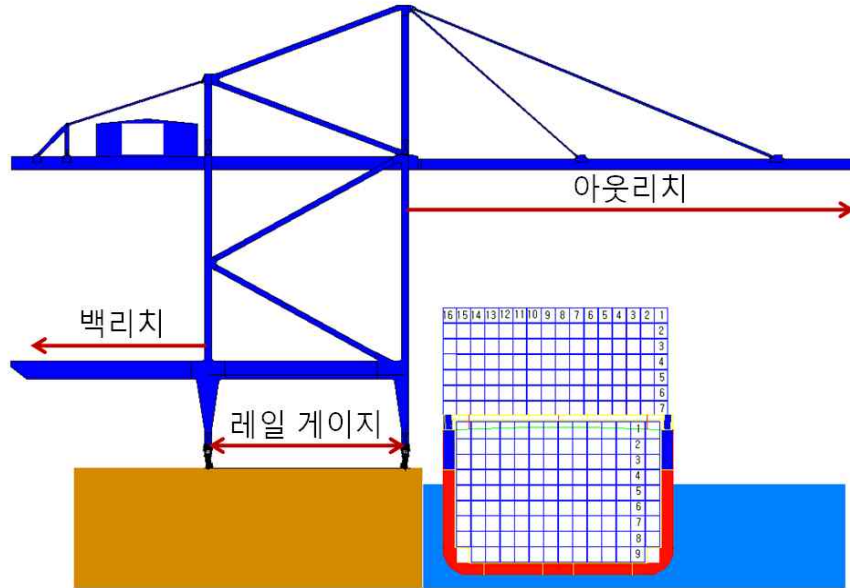
2.1.2 스프레더

스프레더는 싱글, 트윈, 탠덤 리프트 중에서 선택 가능하다. 싱글 스프레더는 컨테이너 크기에 상관없이 한 번에 하나의 컨테이너를 처리하지만, 트윈 스프레더는 한 번에 20피트 컨테이너 2개, 탠덤

스프레더는 한 번에 20피트 컨테이너 4개 혹은 40 피트 컨테이너 2개까지를 동시에 처리 가능하다. 그러나 실제로 동시에 처리할 수 있는 컨테이너의 개수는 컨테이너크레인의 정격 부하, 취급 컨테이너의 무게, 선박의 적재계획에 영향을 받게 되므로, 모델에서는 이와 같은 인자들을 고려하여 동시에 취급하는 컨테이너의 개수를 결정한다. <그림 4>는 컨테이너크레인의 스프레더 유형별로 컨테이너를 취급하는 모습을 보여준다.

2.1.3 기타 사양

컨테이너크레인의 기타 사양에는 취급 능력에



<그림 5> 컨테이너크레인의 규모 관련 입력 항목

관련된 것과 규모에 관련된 것이 있다. 취급 능력에 관련된 사양은 정격 부하, 트롤리 속도, 호이스트 속도 등이 있다. 정격 부하는 컨테이너크레인이 한 번에 취급할 수 있는 컨테이너의 최대 하중으로 입력되며, 스프레더 유형별(싱글, 트윈, 탠덤)로 나누어 입력된다. 호이스트 속도는 부하와 무부하로 나누어 입력된다.

컨테이너크레인의 규모는 작업 가능 영역을 결정하며 성능에도 영향을 미친다. <그림 5>는 컨테이너크레인의 규모 관련 입력 항목들을 나타낸다.

2.2 작업 조건 관련 입력 정의

2.2.1 적재계획

적재계획은 선박의 베이(bay) 별로 각 저장 위치에 싣고 내려지는 컨테이너들을 지정한다. 모델에서는 적재계획을 직접 입력하거나 임의로 생성할 수 있다. 멀티 리프트 스프레더를 사용할 때 적

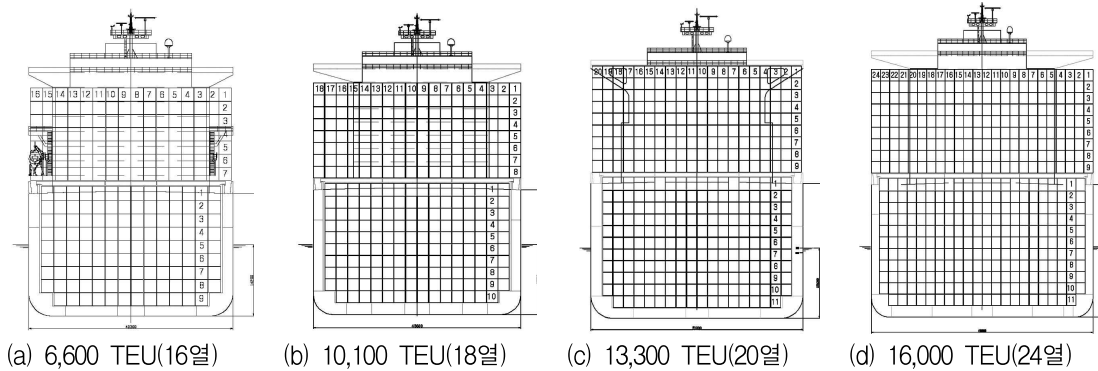
재계획은 동시에 처리 가능한 컨테이너 개수를 결정하는 중요한 인자가 된다. 즉, 적재계획이 잘 작성되어야만 멀티 리프트 스프레더의 적용 효과가 극대화된다.

2.2.2 선박 유형

선박의 크기가 증가하면 컨테이너크레인의 작업 사이클이 증가되므로 단위 시간당 처리 개수는 줄어든다. 모델에서는 최근의 초대형선 개발 동향을 반영하여 선박 유형을 4개 중에서 하나 선택하도록 하였다. 선택 가능한 선박 유형은 6,600 TEU(16열), 10,100 TEU(18열), 13,300 TEU(20열), 16,000 TEU(24열) 이다. <그림 6>은 4가지 선박 유형의 단면도를 나타낸다.

2.2.3 컨테이너 크기 및 무게 분포

컨테이너 크기의 분포는 20피트 컨테이너와 40



<그림 6> 시뮬레이션 모델의 선박 유형

<표 3> 컨테이너 무게의 경험 분포

20피트 컨테이너		비율 (%)	40피트 컨테이너		비율 (%)
하한	상한		하한	상한	
2톤	4톤	2.97	4톤	8톤	20.64
4톤	8톤	11.13	8톤	12톤	29.17
8톤	12톤	7.39	12톤	16톤	23.02
12톤	16톤	8.10	16톤	20톤	10.03
16톤	20톤	24.66	20톤	24톤	7.88
20톤	24톤	39.44	24톤	28톤	6.24
24톤	28톤	6.31	28톤	32톤	3.02

피트 컨테이너의 비율로 입력되고, 컨테이너 무게의 분포는 무게 구간별 비율로 입력된다. 적재계획이 직접 입력될 경우에는 이러한 분포가 사용되지 않으며, 적재계획을 임의로 생성할 경우에 분포를 사용하게 된다. <표 3>은 컨테이너 무게 분포의 예를 나타낸다. 데이터는 P 컨테이너 터미널의 3개월 처리 실적을 통해 수집되었다. 컨테이너의 표준 무게는 '적' 컨테이너 기준으로 20피트는 20.32톤, 40피트는 30.48톤으로 알려져 있으나 실제 처리되는 컨테이너의 무게와는 차이가 있음을 알 수 있다. 모델에서는 개별 컨테이너의 크기와 무게에 따라

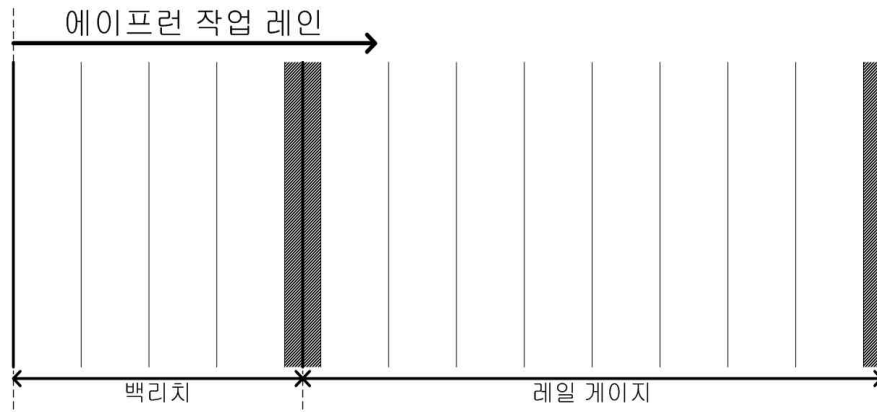
서 멀티 리프트 스프레더가 처리하는 컨테이너 개수를 결정하므로, 현실적인 상황이 상세히 반영된다.

2.2.4 에이프런 작업 라인

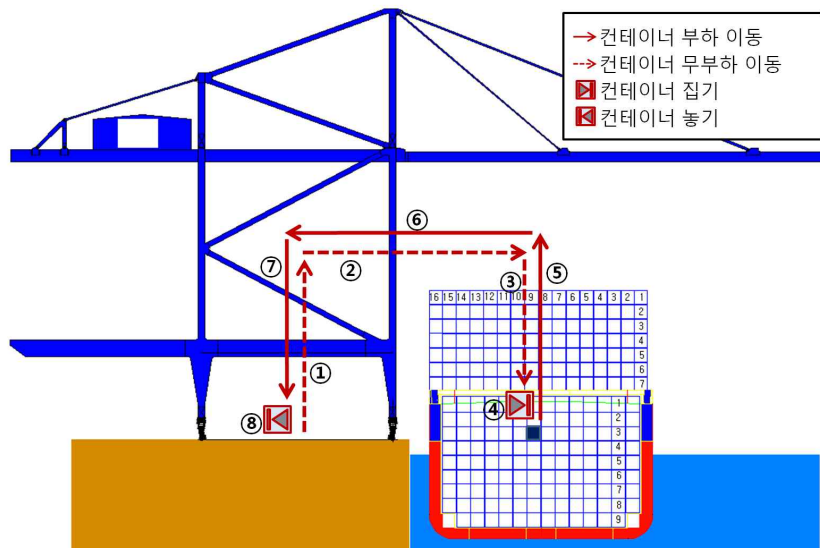
에이프런의 작업 레인은 컨테이너크레인과 이송장비가 컨테이너를 주고받는 지점을 나타낸다. 이곳의 위치는 컨테이너크레인의 작업 사이클에 영향을 주기 때문에 모델에 반영될 필요가 있다. <그림 7>과 같이 에이프런에서 이송장비의 작업 레인은 차선으로 구분된다. 일반적으로 에이프런 상에서 이송장비의 교통을 원활히 하기 위하여, 하나의 컨테이너크레인이 모든 작업 레인을 사용하지 않고 각 컨테이너크레인에게 몇 개씩의 작업 레인이 사전에 할당된다. 모델에서 에이프런의 작업 레인은 <그림 7>에서와 같이 백리치의 육측 끝을 기준으로 해측으로 떨어진 거리로 입력된다.

2.3 작업 절차 정의

시뮬레이션 모델에서는 컨테이너크레인의 운동을 수직(호이스트)과 수평(트롤리)으로 구분한다. 각 운동은 구간이 충분한 경우에는 가속, 등속, 감속의 과정을 거치며, 운동 구간이 짧은 경우에는



<그림 7> 에이프런 작업 레인의 예

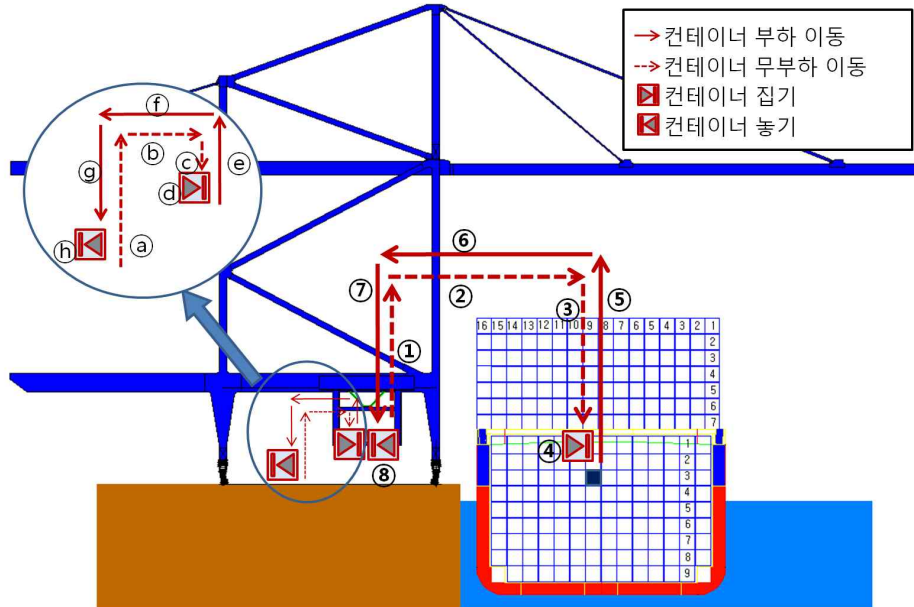


<그림 8> 싱글 트롤리 컨테이너크레인의 작업 사이클

가속, 감속의 과정만 거친다. 구간에 따라서 수직 및 수평 운동이 단독으로 일어나는 구간이 있고, 수직과 수평 운동이 동시에 발생하여 포물선 운동이 생기는 구간이 있다.

컨테이너크레인은 동일한 작업을 반복하여 수

행하므로 작업 사이클을 사용하여 설명한다. <그림 8>은 싱글 트롤리 메커니즘의 양하 작업을 나타낸다. 먼저 선박 내에서 작업해야 할 컨테이너의 위치를 확인한 후, 트롤리가 해당 위치로 이동하기 위해 상승(①), 수평(②), 하강(③) 운동을 수행한

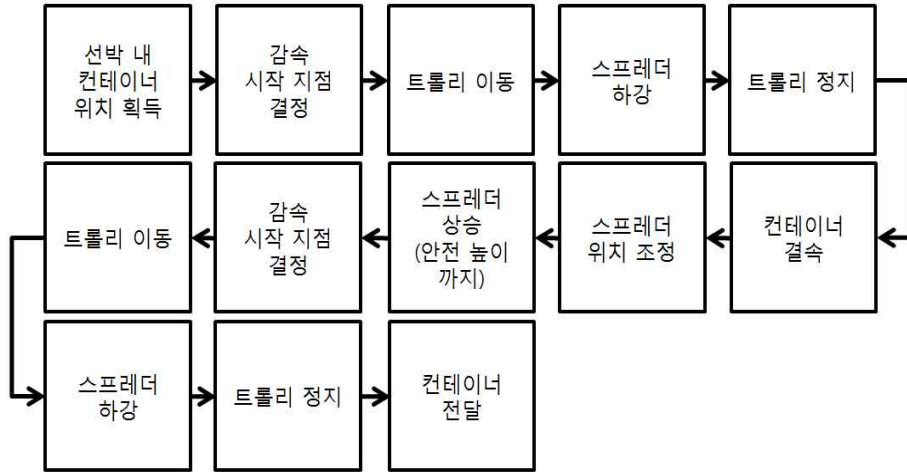


<그림 9> 듀얼 트롤리 컨테이너크레인의 작업 사이클

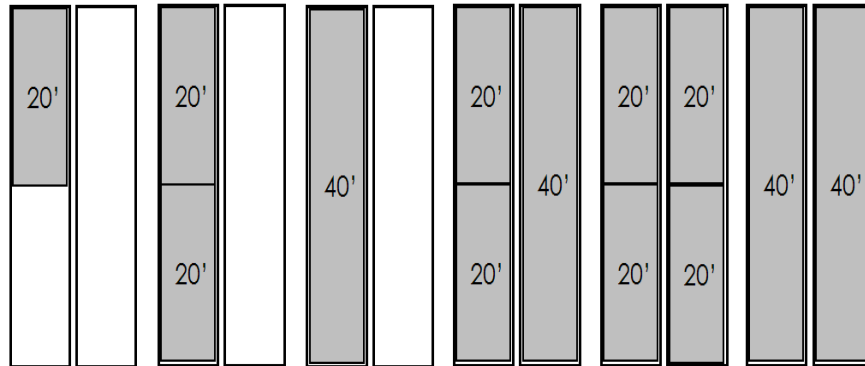
다. 컨테이너 위치에 도착하면 컨테이너를 집기 위하여 정확한 위치를 잡고 컨테이너를 집어서 고정한다(④). 컨테이너를 집은 후에는 컨테이너를 내려놓을 위치를 확인하여 트롤리는 상승(⑤), 수평(⑥), 하강(⑦) 운동을 수행한다. 이송장비와의 연계지점에 도착하면 컨테이너를 내려놓기 위하여 정확한 위치를 잡고 고정 상태를 제거한다(⑧). 적하 작업은 이와 반대의 순서로 진행된다. <그림 9>는 듀얼 트롤리 메커니즘의 양하 작업을 나타낸다. 듀얼 트롤리 방식은 두 개의 트롤리가 작업을 나누어서 동시에 진행한다. 즉, 메인 트롤리는 버퍼 영역과 선박 사이를 담당하고(①~⑧), 세컨드 트롤리는 이송장비와 버퍼 영역 사이를 담당한다(a~h). 각 트롤리의 운동은 싱글 트롤리 방식과 동일하다.

시뮬레이션 모델에서 작업의 진행은 작업 절차의 정의에 의해 구현된다. <그림 10>의 작업 절차

는 컨테이너 양하 작업을 기준으로 하였다. 먼저 작업 순서에 따라 처리할 컨테이너의 위치를 파악한다. 컨테이너의 위치가 정해지면 감속을 시작할 위치를 미리 결정하여 센서를 위치시킨다. 이제 트롤리의 위치에 따라 이동을 하기 시작하고 스프레더는 하강하게 된다. 트롤리가 감속을 시작해야 하는 센서에 도달하면 속도를 줄이기 시작하여 트롤리의 운동은 정지된다. 트롤리가 정지된 상태에서 컨테이너는 스프레더에 결속되며 위치를 잡는 시간만큼 대기한다. 대기 후 스프레더의 작업에 간섭이 생기지 않는 안전 높이까지 상승한 후 트롤리의 운동은 재개된다. 마찬가지로 이송장비 쪽에서 감속을 시작할 위치를 미리 결정한 후 감속을 통해 트롤리의 운동이 정지된다. 최종적으로 컨테이너가 이송장비에게 전달된다. 적하 작업의 경우, 작업 절차가 반대로 진행된다.



<그림 10> 시뮬레이션 모델의 작업 절차



<그림 11> 트롤리 평면도의 예

2.4 작업 진행 모니터링 방식 정의

작업 진행 상황을 시각적으로 확인하기 위하여 <그림 8>, <그림 9>와 같이 컨테이너크레인의 측면도와 선박의 단면도를 활용하고 그 위에 트롤리와 컨테이너의 위치 이동이 표현된다. 멀티 리프트의 경우에는 측면에서 리프트 상황을 완전히 표현할 수 없으므로 <그림 11>과 같이 트롤리의 평면도(top view)를 보조적으로 표현한다.

또한, 작업 진행 상황을 수치적으로 확인하기 위

하여 컨테이너 처리량, 트롤리 이동 사이클 횟수, 리프트 유형별 처리횟수 등을 누적하여 표현한다.

2.5 산출 통계량 정의

시뮬레이션을 통해 산출되는 통계량으로는 컨테이너 총 처리량, 생산성, 트롤리 move당 평균 처리량, 트롤리 사이클 타임, 리프트 유형별 누적 처리횟수와 비율 등이 있다. <표 4>는 산출 통계량의 세부 항목을 나타낸다.

<표 4> 시뮬레이션 산출 통계량의 항목 및 단위

항목	단위
컨테이너 총 처리량	move 박스 TEU
생산성	move/시간 박스/시간 TEU/시간
1move당 평균 컨테이너 취급 개수	박스/move
사이클 타임	초
리프트 유형별 move 수	move
리프트 유형별 비율	%

3. 시뮬레이션 시스템 구현

시뮬레이션 시스템은 Windows를 기반으로 *Tecnomatrix*의 *Plant Simulation 8.1*을 사용하여 구현하였다. *Plant Simulation*에는 모델링과 인터페이스를 위한 기본 라이브러리, 보다 상세한 모델링을 위한 객체지향 언어(*SimTalk*)가 포함되어 있고, 이를 통한 계층적인 모델링이 가능하므로 객체지향적인 클

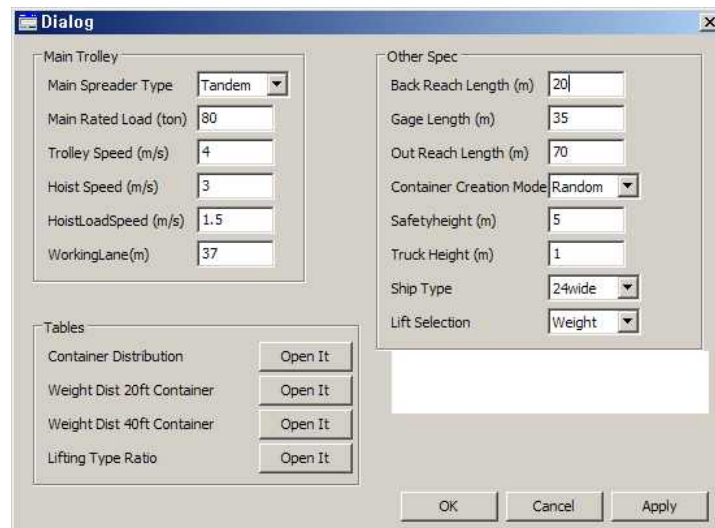
래스 라이브러리를 지속적으로 구축해 갈 수 있다.

3.1 데이터 입력

시뮬레이션에 사용되는 데이터는 대화창을 통해 입력된다. <그림 12>는 싱글 트롤리 컨테이너크레인의 데이터 입력창을 나타낸다. 데이터 입력은 rated load, backreach length 등과 같이 수치로 직접 입력하는 방식과 spreader type, ship type 등과 같이 사전에 정의된 유형 중에서 선택하는 방식이 있다. 또한 container distribution, weight distribution 등은 테이블의 형태로 입력한다. 듀얼 트롤리 컨테이너크레인의 데이터 입력 창은 <그림 12>에 세컨드 트롤리의 입력사항이 추가된다. <그림 13>은 컨테이너 크기 분포 입력 테이블과 20피트 컨테이너 무게 분포 입력 테이블을 나타낸다.

3.2 작업 진행 모니터링 및 통계량 산출

시뮬레이션 실행 단위는 선박의 한 배 전체에



<그림 12> 시뮬레이션 시스템의 데이터 입력 창

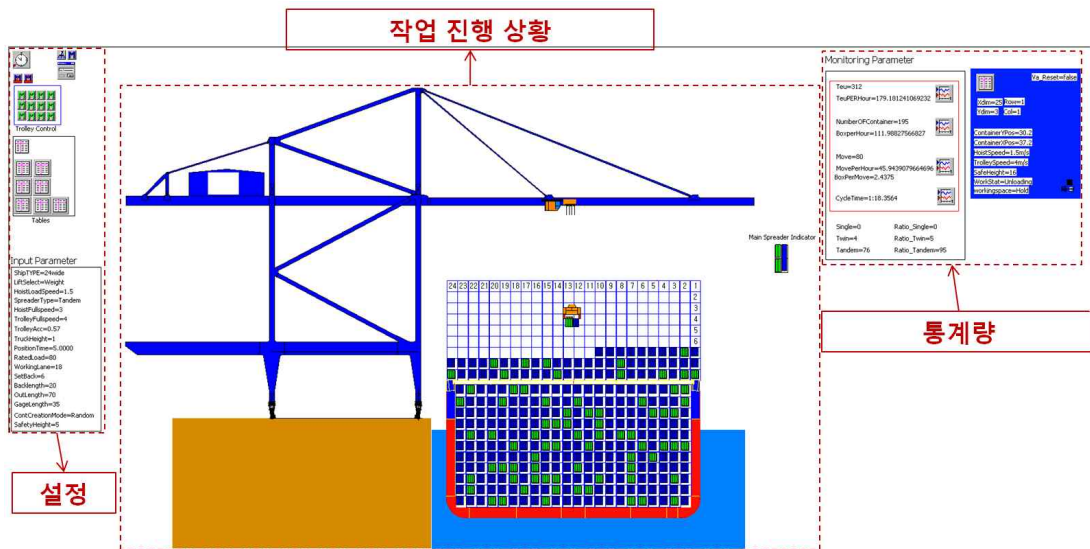
	string 0	real 1	real 2
string		Value	Frequency
1	40ft Container	0.00	60.00
2	20ft Container	1.00	20.00

(a) 컨테이너 크기 분포

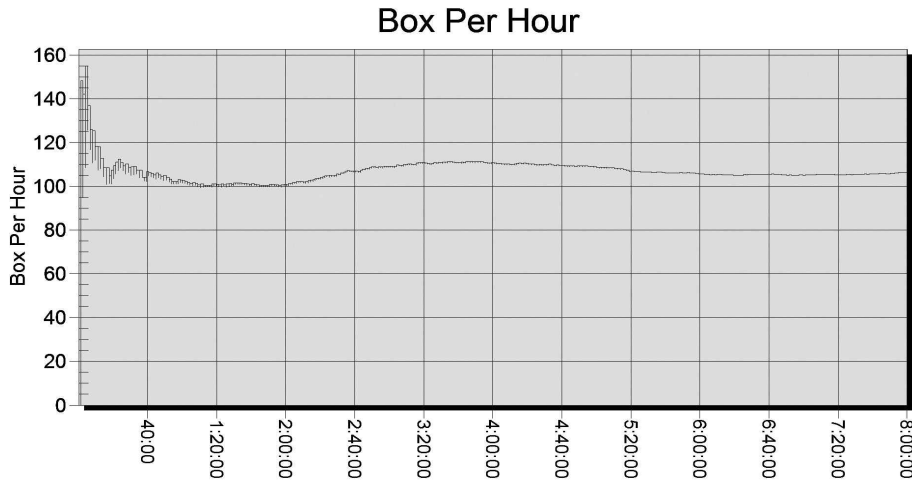
	real 1	real 2	real 3
string	LeftBound	RightBound	Frequency
1	2.00	4.00	2.97
2	4.00	8.00	11.13
3	8.00	12.00	7.39
4	12.00	16.00	8.10
5	16.00	20.00	24.66
6	20.00	24.00	39.44
7	24.00	28.00	6.31

(b) 20피트 컨테이너 무게 분포

<그림 13> 시뮬레이션 시스템의 데이터 입력 테이블



<그림 14> 시뮬레이션 시스템의 실행 화면



<그림 15> 생산성 모니터링 그래프(박스/시간)

대한 양하 작업과 적하작업을 순서대로 수행하는 것이다. <그림 14>는 싱글 트롤리 메커니즘 모델의 실행 화면이다. 화면의 좌측에 시뮬레이션 제어, 입력 데이터, 메소드(method)와 관련된 개체들이 위치하고, 화면의 중앙과 우측에 작업 진행 모니터링과 통계량이 표시된다. 화면 중앙에는 작업 진행 상황이 시각적으로 표현되는데, 컨테이너크레인 측면도, 선박 단면도 위에 트롤리와 컨테이너의 이동이 애니메이션으로 표시되고, 트롤리의 리프트 상황이 보조적인 평면도로 표시된다. 화면의 우측에는 수치적인 작업 진행 상황과 산출 통계량이 표시된다.

또한, 생산성(move/시간, 박스/시간, TEU/시간)과 사이클 타임에 대해서는 시간 경과에 따른 값의 변화를 모니터링 할 수 있다. <그림 15>는 시간당 처리 개수에 대한 생산성 모니터링 화면을 나타낸다.

4. 수치 실험결과

4.1 실험 조건 및 모델 검증

실험에 사용된 컨테이너크레인의 사양은 <표 5>

와 같다. 싱글 트롤리 메커니즘의 경우, 세컨드 트롤리의 사양은 사용되지 않는다.

작업 리스트를 만들기 위하여, 컨테이너 크기 및 무게 분포를 사용하여 적재계획을 임의로 생성하였다. 컨테이너 크기 분포는 40피트 60%, 20피트 40%로 하고, 무게 분포는 <표 3>의 값을 사용하였다. 멀티 리프트는, 컨테이너크레인의 정격 부하와 컨테이너의 무게를 비교하여 가능한 경우 최대한 적용하도록 하였다.

선박 크기를 10, 100TEU로 설정한 후 각 실험 조건별로 10회씩 반복 실험을 한 후 얻어진 생산성(박스/시간)의 평균은 <표 6>과 같다. 싱글 트롤리, 싱글 스프레더 컨테이너크레인의 기계적 생산성은 시간당 50박스 내외로 알려져 있으므로(최용석 등, 2007) 실험으로부터 얻어진 결과는 현실성이 있다고 판단된다. 또한 현재의 컨테이너 크기 분포(40피트 60%, 20피트 40%) 하에서 멀티 리프트를 통해 얻을 수 있는 이론적인 효과에도 부합됨을 알 수 있다. 싱글 리프트는 컨테이너의 크기에 상관없이 항상 1move당 1박스를 처리하지만,

<표 5> 컨테이너크레인 사양 관련 입력 데이터

항목		값
메인 트롤리	정격 부하	50톤(싱글) 65톤(트윈) 80톤(탠덤)
	트롤리 속도	240m/분
	호이스트 속도	90m/분(부하) 180m/분(무부하)
세컨드 트롤리	정격 부하	50톤(싱글) 65톤(트윈) 80톤(탠덤)
	트롤리 속도	150m/분
	호이스트 속도	35m/분(부하) 70m/분(무부하)
백리치		20m
레일 게이지		35m
아웃리치		70m

멀티 리프트를 100% 적용한다고 가정하면 평균적으로 트윈 리프트는 1.25박스/move, 탠덤 리프트는 2.5박스/move를 처리할 수 있다(원승환 · 최상희, 2007). 물론 컨테이너 크기의 분포가 변경되면 lmove당 처리 개수(박스)도 달라진다.

4.2 시나리오 구성

추가적인 실험을 위해 컨테이너크레인의 메커니즘 2종류, 적용 스프레더 유형 3종류, 선박 크기 4종류를 조합하여 총 24가지의 시나리오를 구성하였다. <표 7>은 조합된 시나리오를 나타낸다.

4.3 실험결과 분석

각 시나리오별로 10회씩 반복 실험하여 생산성(박스/시간)을 산출해보았다. <표 8>은 각 시나리오별 생산성의 평균과 표준 편차를 나타낸다.

메커니즘 변화에 따른 생산성 향상 효과를 파악

<표 6> 실험으로부터 얻어진 평균 생산성(박스/시간)

메커니즘 스프레더	싱글 트롤리	듀얼 트롤리
싱글	48.89	52.54
트윈	61.52	67.03
탠덤	121.75	131.59

하기 위하여 시나리오 1~12와 13~24의 평균 생산성을 각각 비교해 보았다. 듀얼 트롤리 메커니즘은 싱글 트롤리에 비해 약 8%의 생산성 향상 효과가 있었다. 트윈 스프레더 적용에 따른 생산성 향상 효과를 파악하기 위하여 시나리오 1~4와 5~8, 13~16과 17~20의 평균 생산성을 각각 비교해 보았다. 트윈 스프레더는 싱글 스프레더에 비해 약 27%의 생산성 향상 효과가 있었다. 마찬가지로 탠덤 스프레더 적용에 따른 생산성 향상 효과를 파악하기 위하여 시나리오 1~4와 9~12, 13~16과 21~24의 평균 생산성을 각각 비교해 보았다. 탠덤 스프레더는 싱글 스프레더에 비해 약 149%의 생산성 향상 효과가 있었다.

이러한 값들은 듀얼 트롤리 및 멀티 리프트를 적용했을 때 얻을 수 있는 이론적인 효과의 상한을 나타낸다. 특히 멀티 리프트의 효과는 분석적인 방법에 의한 결과(원승환 · 최상희, 2007)에 근접함을 알 수 있다.

한편, 듀얼 트롤리와 멀티 리프트를 통해서는 생산성이 증가하였지만 선박의 크기 증가에 따라서는 생산성이 감소하였다. 선박 크기가 커지면 트롤리의 운동 거리가 길어지므로 생산성은 떨어지게 된다. 6,600TEU 선박에 비해 16,000TEU 선박의 처리 생산성은 약 10% 감소하였다. 따라서 초대형선이 일반화 될 경우, 컨테이너크레인의 기존 생산성을 유지하기 위해서는 장비의 기능 개선이나 운영 효율화가 필요함을 알 수 있다.

마지막으로 각 시나리오별 생산성의 표준 편차

<표 7> 시뮬레이션 실험 시나리오

시나리오	메커니즘	스프레더	선박 크기	시나리오	메커니즘	스프레더	선박 크기
1	싱글 트롤리	싱글	6,600TEU	13	듀얼 트롤리	싱글	6,600TEU
2			10,100TEU	14			10,100TEU
3			13,300TEU	15			13,300TEU
4			16,000TEU	16			16,000TEU
5		트윈	6,600TEU	17		트윈	6,600TEU
6			10,100TEU	18			10,100TEU
7			13,300TEU	19			13,300TEU
8			16,000TEU	20			16,000TEU
9		탠덤	6,600TEU	21		탠덤	6,600TEU
10			10,100TEU	22			10,100TEU
11			13,300TEU	23			13,300TEU
12			16,000TEU	24			16,000TEU

<표 8> 실험으로부터 얻어진 생산성(박스/시간)

시나리오	평균	표준 편차	시나리오	평균	표준 편차
1	50.64	0.10	13	54.49	0.08
2	48.89	0.07	14	52.54	0.08
3	47.31	0.08	15	50.72	0.09
4	45.86	0.07	16	49.20	0.29
5	64.09	1.19	17	69.73	0.81
6	61.52	0.99	18	67.03	0.58
7	59.51	0.87	19	64.83	0.48
8	57.98	0.60	20	62.20	0.59
9	126.38	1.16	21	135.38	1.97
10	121.75	1.21	22	131.59	1.44
11	117.75	1.06	23	126.78	0.84
12	113.93	1.61	24	121.74	1.04

를 살펴본다. 싱글 스프레더(시나리오 1~4, 13~16)의 경우에는 랜덤하게 생성된 적재계획에 따른 생산성의 차이가 시간당 0.3박스 이내이지만, 멀티 리프트 스프레더(시나리오 5~12, 17~24)의 경우

에는 시간당 0.5~2박스로 나타났다. 즉, 멀티 리프트 스프레더는 싱글 스프레더에 비해 적재계획의 영향을 더 많이 받는다는 것을 알 수 있다. 따라서 멀티 리프트를 적용할 경우, 적재계획이 잘 수립되어

야만 높은 생산성 향상 효과를 얻을 수 있을 것이다.

5. 결론

지금까지 컨테이너크레인의 이론적 성능을 정밀하게 평가하기 위한 시뮬레이션 모델과 구현된 시스템에 대하여 살펴보았다. 본 시뮬레이션 모델은 최근에 부각되고 있는 컨테이너크레인의 메커니즘 유형과 스프레더 유형을 다양하게 반영하고 있으며 컨테이너 크기 분포, 컨테이너 무게 분포, 선박 적재계획, 작업 선박 규모 등의 물리적 제약들을 현실적으로 반영하였다. 개발된 시뮬레이션 시스템은 사용자에게 편리한 인터페이스를 제공하므로, 컨테이너크레인의 규모와 사양, 작업 조건들을 쉽고 빠르게 변화시킬 수 있다. 이를 통해 장비의 성능을 정확하고 신속하게 평가할 수 있으므로, 장비의 설계 변수 선정에 유용하게 활용될 수 있다. 특히 장비의 기계적 성능 평가는 장비로부터 얻을 수 있는 최대 성능을 제시하므로, 컨테이너 터미널을 설계할 때 장비의 사양과 규모를 결정하는데 활용될 수 있다.

본 연구는 시뮬레이션 모델 설계, 시스템 구현 및 검증에 초점을 맞추었으므로 다양한 실험을 수행하지는 못하였다. 후속 연구에서는 모델이 고려하는 다양한 입력 사항을 활용하여 여러 가지 의미 있는 결과를 도출할 수 있을 것이다.

또한 본 연구의 모델을 기반으로 컨테이너 터미널 전체의 운영 상황을 반영하는 모델이 개발된다면, 컨테이너크레인의 성능을 보다 현실적으로 추정할 수 있을 것이다. 이를 통해 장비의 설치 이전에 가상의 환경에서 터미널의 생산성을 예측할 수 있으며, 컨테이너 터미널의 운영에 관련된 여러 규칙들을 평가할 수 있는 테스트베드으로도 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- 원승환, 천봉경, 전수민, 이병권, 장동원, 조환규, 김갑환, “컨테이너 터미널 설계를 위한 의사결정 지원시스템”, *한국지능정보시스템학회 논문지*, 12권 4호(2006), 91~107.
- 원승환, 최상희, “멀티 리프트가 가능한 컨테이너 크레인의 생산성 분석”, *한국항해항만학회 춘계학술대회 논문집*, 1권(2007), 447~452.
- 원승환, 최상희, “컨테이너크레인 개발자를 위한 대안 선정 절차”, *한국항해항만학회지*, 32권 8호(2008), 621~628.
- 윤원영, 최용석, 송진영, 양창호, “컨테이너터미널에서 컨테이너 크레인의 하역능력 추정에 관한 시뮬레이션 연구”, *IE Interfaces*, 14권 1호(2001), 67~78.
- 최용석, 양창호, 최상희, 원승환, “고효율 컨테이너 크레인의 개념 모델 및 적용효과 분석”, *해양정책연구*, 22권 2호(2007), 123~158.
- 하태영, 최용석, “고성능 안벽크레인의 터미널 하역 생산성 비교분석”, *한국항해항만학회지*, 29권 6호(2005), 547~553.
- 한국컨테이너부두공단 포탈정보, *컨테이너지식창고*, <http://portal.kca.or.kr>, 2007.
- Bhimani, A. K. and M. Sisson, “Increasing quayside productivity”, *2002 Pan Pacific Conference*, 2002.
- Drewry Shipping Consultants, *Annual Container Market Review and Forecast-2008/09*, Drewry, London, 2008.
- ECT web site, <http://www.ect.nl>.
- Lind, D., J. K. Hsieh and M. A. Jordan, “Tandem-40 dockside container cranes and their impact on terminals”, *PORTS Conference*, American Society of Civil Engineers, 2007.

Abstract

Design and Implementation of the Simulator for Evaluating the Performance of Container Cranes

Seung Hwan Won · Sang-Hei Choi

According to the increase of container flows and the appearance of large-sized container vessels, the container handling equipment in ports is evolving continuously. This research introduces the simulation model for evaluating in detail the mechanical productivity of container cranes. The model considers a single trolley and dual trolleys as the mechanism of a container crane and a single lift, a twin lift, and a tandem lift as the spreader type of it. Additionally, the detail specifications such as the dimension and the speed of a container crane are inputted and the kinematic characteristics of it are simulated. The model also considers the size of a vessel, the storage position of containers in the vessel, and the weight of containers as external physical constraints. Experimental conditions can be configured conveniently because various parameters in the model are separated. Moreover, the model can accommodate flexibly new equipment types and the changes of the existing equipment because it is designed and developed in object-oriented concept.

Key Words : Container Crane, Simulation, Mechanical Productivity, Container Terminal, Performance Evaluation

* Shipping, Port and Logistics Research Department, Korea Maritime Institute

저자 소개



원승환

현재 한국해양수산개발원 해양물류연구부 연구원으로 재직 중이다. 부산대학교 산업공학과에서 학사, 석사, 박사 학위를 취득하였다. 주요 연구분야는 물류시스템의 개념 설계, 운영 계획 최적화, 성능평가 시뮬레이션, 객체지향 분석 및 설계 등이다.



최상희

현재 한국해양수산개발원 해양물류연구부 부연구위원으로 재직 중이다. 고려대학교 토목환경공학과에서 학사, 연세대학교 도시공학과에서 석사학위를 취득하였으며 고려대학교 산업경영공학과에서 박사과정 중에 있다. 주요 연구분야는 항만운영, 항만시스템, 항만하역장비 및 첨단항만 R&D 등이다.