

이송장비 풀링(Pooling)과 우선순위 규칙(Dispatching rule) 조합에 따른 컨테이너 터미널 생산성 효과분석

천서영 · 윤성욱 · 정석재[†]

The Effect Analysis on the Container Terminal Productivity according to Combination of YT Pooling and Dispatching Rules

Seoyoung Chun · SungWook Yoon · Sukjae Jeong[†]

ABSTRACT

Today, container terminals are fiercely competing to attract an increasing number of containers. As a way to improve terminal productivity, this study proposes two dispatching rules for yard truck allocation priorities. First, Multi-Attribute Dispatching Rule(MADR) is an allocation method to calculate the weighted sum of multiple factors affecting container terminal productivity and priority them. Especially, the workload of the quay crane was considered one of the factors to reduce the residence time of the ship. Second, Cycling Dispatching Rule(CDR) is the effective way to increase the number of double cycles that directly affect terminal productivity.

To identify the effects of combinations of pooling and dispatching, a comparative experiments was performed on 8 scenarios that combined them. A simulation environment has been developed for experiments and the results have demonstrated that the combination of terminal level pooling and Multi-attribute Dispatching could be an excellent combination in KPIs consisting of GCR and delayed departure of ships, etc.

Key words : Pooling, Multi-attribute Dispatching, Container terminal simulation, Double cycle

요약

오늘날 컨테이너 터미널은 증가하는 물동량을 유치하기 위하여 치열한 경쟁을 펼치고 있다. 이에 본 연구는 컨테이너 터미널의 생산성 향상을 위한 노력의 일환으로 두 가지 야드 트럭 우선순위 규칙(Dispatching rule)을 제안하였다. 첫 번째 Multi-attribute Dispatching은 컨테이너 터미널 생산성에 영향을 미치는 복수 요인들의 가중합으로 구성된 할당 방법이며, 선박의 체류시간을 감소시키기 위하여 안벽 크레인의 작업량을 고려하였다. 두 번째 Cycling Dispatching은 터미널 생산성 개선에 가장 큰 영향을 미치는 Double cycle 횟수를 증가시키기 위한 할당 방법이다. 또한 본 연구는 풀링(Pooling)과 우선순위 규칙(Dispatching rule)이 터미널 생산성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 풀링과 우선순위 규칙을 조합한 8가지 시나리오를 구성하였다. 실험은 실제 컨테이너 터미널의 데이터를 이용하여 시물레이션을 구현하였다. 실험 결과, 풀링과 우선순위 규칙 그리고 둘의 교호작용이 생산성에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 8가지 시나리오 중에서는 터미널 기준 풀링과 Multi-attribute Dispatching의 조합이 GCR, 선박 출항지연시간 등 KPI 지표에서 우수한 결과를 보임을 확인하였다.

주요어 : 풀링, 다속성 디스패칭, 컨테이너 터미널 시물레이션, 더블 사이클

* 본 연구는 한국연구재단의 이공분야기초연구사업(NRF-2018R1D1A1B07050455)의 지원으로 수행되었습니다. 이 논문은 2018학년도 광운대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

Received: 3 May 2019, Revised: 4 September 2019,

Accepted: 17 September 2019

[†] Corresponding Author: Sukjae Jeong

E-mail: sjjeong@kw.ac.kr

Management Dept., Kwangwoon University, Seoul, Korea

1. 서론

세계화와 인터넷의 발달로 인해 더 좋은 품질과 더 저렴한 가격의 물건을 구매하려는 소비자가 급격히 증가하고 있다. 컨테이너 무역은 이러한 소비가 가능하도록 뒷받침하고 있으며, 항만의 중요성은 점차 커지고 있는 상황이다. 실제로 전 세계 컨테이너 무역량은 전체 해상

무역량의 17.1%, 총 1억 4천 8백만 TEU(Twenty-foot equivalent units)를 기록하였다. 작년 대비 6.4% 더 상승하였으며 2011년 이후 가장 급격히 증가한 것이다(UNCTAD, 2018).

이러한 해상 물동량을 유치하기 위하여 항만 간 치열한 경쟁이 전개되고 있다. 터미널 운영사들은 더 많은 선박 유치를 목표로 하역능력을 향상시키기 위해 노력한다.

운영적인 측면에서 컨테이너터미널의 경쟁력은 얼마나 신속하게 선박하역을 수행할 수 있는가에 달려있다. 이를 위하여 터미널의 안벽 크레인(quay crane, QC), 야드 트럭(yard truck, YT), 야드 크레인(yard crane, YC) 등의 장비의 효과적인 운행 방안을 모색하여야 한다.

특히 야드 트럭은 터미널의 유일한 이송 장비로서 운행방법에 따라 작업의 대기시간 증가를 야기한다. 안벽 크레인과 야드 트럭이 컨테이너를 교환할 때, 양하작업 시 안벽 크레인이 선박에서 컨테이너를 꺼내 육지쪽으로 운반하였으나 야드 트럭이 도착하지 않을 경우 그 부재로 인해 안벽 크레인은 대기하게 된다. 마찬가지로 적하 작업 시 안벽 크레인이 육지쪽으로 이동하였으나 아직 작업 순서에 해당되는 컨테이너를 실은 야드 트럭이 없을 경우에는 안벽 크레인은 야드 트럭을 대기한다. 이렇게 발생하는 대기시간은 선박 대기시간 및 선박 체류시간에 영향을 미친다.

이러한 대기시간은 야드 트럭을 제 시간에 필요한 위치에 컨테이너를 운반함으로써 감소시킬 수 있다. 즉 야드 트럭의 효과적인 운행은 안벽 크레인의 생산성 향상은 물론 컨테이너 터미널의 생산성을 향상도 꾀할 수 있다. 따라서 컨테이너 터미널에서 야드 트럭 배차문제는 매우 중요한 문제로 대두되고 있다.

본 연구는 안벽 크레인과 야드 크레인 사이에서 컨테이너를 운반하는 이송장비인 야드 트럭 배차문제에 대해 살펴보고자 한다. 컨테이너 터미널에서 야드 트럭을 배차하는 과정은 두 단계로 이루어진다. 우선, 풀링(Pooling) 방식을 결정한다. 풀링은 안벽 크레인에 다수의 이송장비를 하나의 그룹으로 지정하여 운영하는 것이다. 풀(Pool) 구성을 결정하고 난 후 우선순위 규칙(Dispatching rule)에 따라 풀(Pool)에 속한 작업 중 하나를 야드 트럭에 할당시간으로 할당한다. 따라서 야드 트럭 배차 문제는 풀링과 우선순위 규칙에 대한 연구로 구분할 수 있다.

기존 연구를 살펴보면 풀링(Pooling)은 풀링의 적용 효과와 풀 구성 전략과 관련된 연구가 진행되었다(정창운 & 신재영 (2012); Nguyen and Kim (2013); 차상현(2014)).

우선순위 규칙에 대한 기존 연구는 Kim and Bae (2004),

Bish 등(2007), Briskorn 등(2007), Petering (2010), Dulebenets (2016)에서 수행하였으며, 야드 트럭 할당을 위한 다양한 우선순위 규칙(Dispatching rule)을 제시하였다.

그러나 컨테이너 터미널에서 중요하게 평가되는 선박 체류시간 감소에 관한 배차 연구의 수는 많지 않았다. 따라서 본 연구는 선박 체류시간 감소에 주요한 영향을 미치는 복수 요인들을 종합적으로 고려한 우선순위 규칙을 제안한다. 또한 Double cycle을 증가시키기 위한 우선순위 규칙을 제안하고 이를 시뮬레이션을 이용해서 그 효과를 검증한다.

지금까지 풀링 방법과 다양한 우선순위 규칙이 제시되어 왔으며, 비교 실험을 통해 제안된 방법들의 효과성을 입증해 왔다. 하지만 이들 간의 조합이 생산성에 미치는 영향에 대한 분석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구에서 제시되었던 풀링 방법과 우선순위 규칙을 검토하고, 8가지 조합 시나리오를 구성하여 풀링과 우선순위 규칙이 터미널 생산성에 미치는 효과를 분석해 보고자 한다.

Briskorn 등(2007), Bish 등(2007), Petering (2010), Petering (2011), Dulebenets (2016) Dragović 등(2017) 등 컨테이너 터미널과 관련한 많은 선행연구들은 시뮬레이션을 이용하여 연구를 진행하였다. 그러나 대규모의 터미널 전체를 구현하는 것은 매우 어려운 일이기 때문에 많은 선행연구에서도 선박의 대수, 블록의 개수, 외부 트럭의 여부 등 시뮬레이션을 제한적으로 구현하고 있다. 따라서 본 연구에서는 컨테이너 터미널 전체를 통합한 수준의 시뮬레이션 모델을 구현하고 안벽 크레인 생산성(GCR), 선박의 출항지연시간 등 KPI(key performance indicator) 지표를 통해 시나리오 분석을 수행하고자 한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 야드 트럭 배차문제와 관련된 선행연구를 검토하고, 3장에서는 컨테이너 터미널 프로세스를 설명한다. 4장에서는 본 연구에서 제시하는 풀링 방식과 우선순위 규칙에 대하여 설명한다. 5장에서는 ARENA를 이용한 시뮬레이션 모델에 대하여 설명한다. 6장에서는 분석을 위한 실험 설계 및 결과에 대해서 논의하며, 마지막으로 7장에서는 연구결과를 토대로 연구의 시사점 및 한계점 등을 조명한다.

2. 선행연구

컨테이너 터미널에서 야드 트럭 배차문제와 관련된 연구는 크게 풀링(Pooling)에 관한 연구와 우선순위 규칙

(Dispatching rule)과 관련한 문제로 나눌 수 있다.

풀링은 컨테이너 터미널에서 야드 트럭이 할당될 수 있는 배차 범위를 나타낸다. Nguyen and Kim (2013)은 야드 트럭 이동거리를 감소시키는 풀을 형성하는 휴리스틱 알고리즘을 제안하고 다른 다양한 풀(pool) 구성 전략과 비교하였다. 동일한 우선순위 규칙을 적용한 상태에서 시뮬레이션을 이용하여 분석한 결과, 풀을 가장 확장시킨, 모든 안벽 크레인의 풀을 적용할 때 안벽 크레인 총 대기시간이 가장 낮은 결과를 나타냈다.

차상현(2014)은 실제 터미널의 생산성 데이터 이용하여, 풀링을 적용한 경우 생산성이 더욱 높게 나타나는 것을 확인하였다.

이송장비 배차와 관련한 선행연구는 다음과 같다. Kim and Bae (2004)는 자동화 터미널에서 항후 작업의 위치와 시간에 대한 정보를 활용한 AGV의 Look-Ahead Dispatching 방법을 고안하였다. 휴리스틱 알고리즘(heuristic algorithm)의 성능을 다른 우선순위 규칙인 Shortest Travel Time(STT), Earliest Due Date(EDD), Revised Shortest Imminent Operation Rule(r-SI)의 성능과 비교하였다. 그 결과 지연 시간의 총 합이 15% 감소되었다.

Briskorn 등(2007)은 자동화 컨테이너 터미널에서 AGV에 작업을 할당하는 새로운 우선순위 규칙으로 Inventory-based Dispatching을 제안하고 이를 Due-time-based Dispatching과 비교하였다. Inventory-based Dispatching의 기본 아이디어는 야드 트럭 할당 대수를 기반으로, 할당 대수가 작은 AGV를 할당하는 것이다. 이때 양하작업과 적하작업의 작업 단계가 다르기 때문에 적하작업에 가중치(LPM)를 두어 값을 조정하며, 여러 야드 트럭을 여러 작업에 할당(n×n assignment problems)할 때 최적의 솔루션을 찾기 위해 헝가리안 메소드(Hungarian method)를 이용하였다. 시뮬레이션을 이용하여 분석한 결과, Inventory-based Dispatching의 평균 안벽 크레인 생산성(GCR)이 Due-time-based Dispatching보다 3% 증가한 것으로 나타났다. 또한 안벽 크레인 작업 순서의 유연성이 전체 터미널 성능에 미치는 영향을 실험하였다.

Petering (2010)은 지금까지 컨테이너 터미널의 야드 트럭 배차 시스템에 대한 가장 포괄적인 시뮬레이션 분석을 수행했다. Petering (2010)은 컨테이너 터미널 시뮬레이션을 개발하여, Dual Load가 가능한 환경에서 야드 트럭 시스템을 평가하는 4가지 실험을 진행했다. 1) GCR에 영향을 주는 야드 트럭 우선순위 규칙과 풀링 방식을 비교한 실험에서는 Inventory-based Dispatching의 GCR

이 Due-time-based Dispatching보다 약 4.3% 높게 나타났다. 또한 야드 트럭의 풀링의 범위를 더 확장시킬수록 더 좋은 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 조별 운행방식에서 터미널 범위로 확장 시켰을 때 GCR이 2% 정도 향상될 수 있음도 보였다. 그밖에도 2) Inventory-based Dispatching을 완화한 방식을 실험하였고 3) 야드 트럭에 이중 적재함으로써 안벽 크레인의 작업속도가 빨라지게 되는 효과를 확인하였다. 4) 야드 트럭 배차 타이밍에 대한 실험을 진행하였다.

김정민(2011)은 단순 규칙 기반 배차의 근시안적 특징으로 인해 다양한 성능 지표를 만족시키지 못하는 한계가 있으므로 이를 극복하기 위하여 복수 규칙 기반 배차를 제안하였다.

Dulebenets (2016)는 가장 단순하고 기본적으로 사용되는 5가지 우선순위 규칙들을 컨테이너 터미널에 적용하여 비교하였다. 그리고 각 우선순위 규칙에 최적인 야드 트럭 대수와 안벽 크레인 대수를 민감도 분석을 통하여 도출하였다.

3. 컨테이너 터미널 프로세스

선박이 도착하면 선석에서는 안벽 크레인이 선박으로부터 컨테이너를 내리거나(양하) 컨테이너를 싣는(적하) 작업을 수행한다. 블록에서는 야드 크레인이 컨테이너를 블록에 적재 및 적출 작업을 수행한다. 야드 트럭은 선석의 안벽 크레인과 장치장의 야드 크레인 사이에서 컨테이너를 운반한다.

야드 트럭 배차 연구에서 컨테이너 터미널의 확률적이고 불확실한 요소들은 야드 트럭의 배차를 어렵게 만든다. 터미널은 많은 확률적인 요소들이 존재한다(Petering, 2010). 컨테이너 터미널 운영의 특징을 정리해보면 첫째, 야드 트럭의 이동 속도는 작업자의 스타일, 운영상의 문제 및 터미널의 실시간 장치장 내 교통 상황에 따라 달라진다. 뿐만 아니라 안벽 크레인과 야드 크레인의 작업 시간은 편차가 크게 나타나는데, 큰 편차가 발생하는 이유는 (1) 야드 크레인 작업자가 컨테이너를 블록에 정밀하게 배치할 때 발생하는 시행착오, (2) 야드 크레인 작업자의 숙련도 차이, (3) 야드 크레인과의 소통하는 야드 트럭 작업자의 숙련도 수준 등 때문이다.

둘째, 외부 트럭의 도착으로 인해 작업량(workload)이 시간에 따라 불균일한 분포로 나타난다.

셋째, 안벽 크레인의 작업 수행 순서에 대한 유연성이 제한되어 있다. 즉, 작업 순서를 변경할 수 없으며 미리

결정된 작업 순서에 따라 작업한다. 양하작업의 경우 작업 수행 순서에 유연성을 갖지만 적하 컨테이너의 경우 특정 순서에 해당 컨테이너를 요구하기 때문에 유연성이 제한된다. 따라서 야드 트럭이 순서대로 안벽 크레인에 도착하지 않으면 터미널 생산성이 저하 될 수 있다.

넷째, 주요한 작업 처리를 차지하는 야드 크레인과 안벽 크레인의 작업 처리속도가 다르다. 야드 크레인의 최대 처리 속도는 안벽 크레인의 30 lift/hour보다 훨씬 느린 약 16 lift/hour이다. 따라서 하나의 안벽 크레인을 처리하기 위해서는 더 많은 야드 크레인이 필요하다.

다섯째, 터미널은 야드 트럭간의 혼잡을 방지하기 위하여 동선을 일방통행으로 제한한다. 이러한 제약으로 인해 이동 거리의 편차가 크게 나타난다.

이러한 특징들은 야드 트럭의 다음 위치나 작업완료 시간 등을 추정하는 것을 어렵게 만든다. 만약 부정확한 배차로 인해 작업의 지연이 발생할 경우 안벽 크레인과 야드 크레인에 미치는 영향은 지대하며, 이는 컨테이너 터미널 생산성 저하로 이어지게 된다. 따라서 이러한 상황 속에서도 효율적이며 강건한 배차 방법을 찾는 것은 쉽지 않다.

4. 야드 트럭 배차 방법

4.1 풀링(Pooling)

풀링은 야드 트럭에 작업을 배차하는 첫 단계로, 풀링은 안벽 크레인에 다수의 이송장비를 그룹으로 지정하여 운영하는 방식을 의미한다.

과거 컨테이너 터미널에서는 Fig. 1(a)와 같이 선박작업 시 각 안벽 크레인별로 야드 트럭을 5~6대 투입하는 조별운행 방식(Dedicated operation)으로 운영하였다. 조별운행 방식으로 운영 시 야드 트럭은 할당된 안벽 크레인의 작업만을 수행할 수 있다.

그러나 현재는 제한된 대수의 장비들을 효과적으로 배분하고 운영하기 위해 Fig. 1(b)과 같이 다수의 안벽 크레인과 다수의 야드 트럭을 하나의 그룹으로 구성하는 풀링을 적용하여 하역생산성을 높이고 있다.

풀링(Pooling)이 적용된 경우 야드 트럭의 운영 효율을 높일 수 있도록 다른 안벽 크레인 작업에 배정될 수 있다. 예를 들어 고정 할당된 안벽 크레인(조별 운행방식)의 작업 대신 현재 위치에서 가까운 안벽 크레인(풀링)의 작업에 할당됨으로써 공차이동시간이 감소되는 효과를 얻을 수 있다.

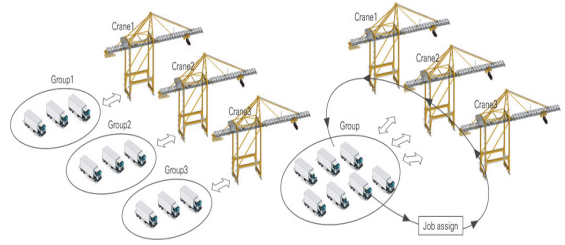


Fig. 1. (a) Dedicated operation (b) Pooling

야드 트럭의 평균 이동시간은 선석과 블록간의 거리 > 블록과 블록간의 거리 > 선석 간의 거리 순으로 작아진다. 따라서 선석에서 블록으로 이동이 잦은 조별 운행방식보다 다른 안벽 크레인의 작업을 처리 할 수 있는 풀링의 경우 이동거리가 적어진다.

즉, 조별 운행방식은 동일한 작업유형을 연속으로 수행하는 Single cycle이 자주 발생한다. 풀링은 야드 트럭은 다른 유형의 작업을 처리할 기회가 생기기 때문에 다른 유형의 작업을 연속으로 처리하는(양하-적하, 적하-양하) Double cycle 발생 가능성이 증가한다.

공차이동시간의 감소는 차량이 다른 작업을 처리할 수 있는 여유를 제공함으로 야드 트럭을 보다 효율적으로 운용할 수 있다.

4.1.1 선박 기준 풀링

선박 기준 풀링은 동일한 선박의 작업을 처리하는 안벽 크레인과 야드 트럭을 하나의 풀(pool)로 형성하는 것이다.

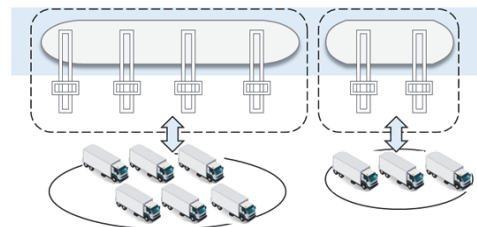


Fig. 2. Ship level Pooling

Fig. 2와 같이 동일한 선박을 작업하는 안벽 크레인 4대와 야드 트럭 6대는 하나의 풀로 형성된다.

4.1.2 터미널 기준 풀링

터미널 기준 풀링은 현재 터미널에 작업 중인 모든 안벽 크레인과 모든 야드 트럭들을 하나의 풀(Pool)로 형성

하는 것이다. Fig. 4와 같이 안벽 크레인 6대와 야드 트럭 9대는 하나의 풀로 형성된다.

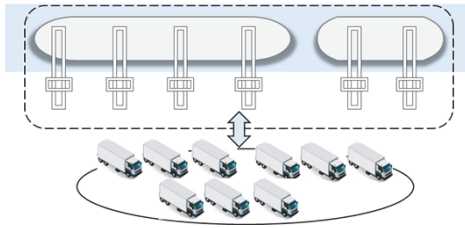


Fig. 3. Terminal level Pooling

선박 기준 풀링과 차이점은 터미널 기준 풀링이 더 많은 안벽 크레인의 작업을 할당 받을 수 있기 때문에 작업 후보들 가운데 더 좋은 결정을 내릴 수 있게 된다.

이는 Double cycle 횟수로 파악 할 수 있는데 Double cycle 발생 구간은 Fig. 4와 같이 터미널 기준 풀링을 적용할 때 Double cycle 발생 구간이 보다 넓게 나타난다.

Fig. 4는 Double cycle 발생할 수 있는 구간을 나타내며, 가로축은 선석, 세로축은 시간, 막대는 안벽 크레인을 의미한다. 선박 기준 풀링을 적용할 때 Double cycle 발생할 수 있는 구간은 선박의 안벽 크레인이 양/적 다른 유형의 작업을 수행할 때 뿐이다. 반면 터미널 기준 풀링은 선박에 상관없이 양적하 작업이 동시시간대에 발생하면 Double cycle이 발생할 수 있다.

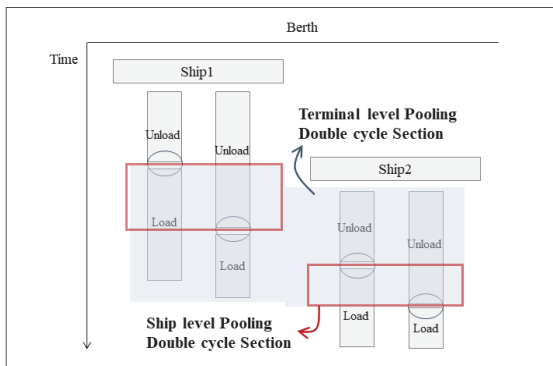


Fig. 4. Double cycle generation section

4.2 우선순위 규칙(Dispatching rule)

풀(pool) 구성이 결정된 후, 우선순위 규칙(Dispatching rule)에 따라 최종적으로 한 작업이 결정된다.

이송장비의 작업 할당(Dispatching)은 이동이 필요한 물량과 차량을 서로 할당하는 프로세스이다. 물량의 이동

요청이 있을 경우 다음 두 가지 상황이 발생 가능하다. (1) 하나 이상의 이송장비가 유휴 상태이고 즉시 사용 가능하거나, (2) 모든 이송장비가 사용 중이어서 사용할 수 없는 때이다.

컨테이너 터미널의 경우 증가시킬 수 있는 야드 트럭 수가 제한되어 있으며 야드 트럭의 이용률은 높게 나타난다. 또한 야드 트럭의 수보다 물량이동의 요청 수가 더 많기 때문에 컨테이너 터미널의 이송장비 할당 문제는 주로 실시간 할당 방식으로 다뤄지고 있다(Carlo 등 2014). 따라서 본 연구는 야드 트럭이 유휴해진 순간 실시간으로 작업을 할당하는 방식을 기본 전제로 하여 4가지 우선순위 규칙에 대한 실험을 진행하였다.

또한 안벽 크레인의 작업 순서는 유연성이 제약되기 때문에 작업 리스트의 순서가 빠른 작업부터 수행되어야 한다. 따라서 우선순위 규칙을 적용할 때, 야드 트럭이 선택할 수 있는 작업 후보들은 각 안벽 크레인의 작업 리스트 중 가장 긴급한 작업들이다. 본 연구에서는 야드 트럭이 작업 후보들 가운데 하나를 우선순위 규칙을 통해 할당받도록 하였다.

4.2.1 Due-time-based Dispatching

Due-time-based Dispatching은 작업의 due-time을 고려하여 배차하는 것이다. due-time은 안벽 크레인이 작업을 처리하기 위하여 컨테이너 교환지점에 도착하는 예상 시간이다. 따라서 야드 트럭에게 Due-time은 작업을 처리하기 위하여 공차 상태(양하작업) 또는 컨테이너를 적재한 상태(적하작업)로 안벽 크레인에 도착해야 하는 마지노선 시간이 된다.

야드 트럭은 제 시간에 안벽 크레인에 도착해야 한다. 조기 도착했을 시에는 안벽 크레인이 아직 준비되지 않았기 때문에 야드 트럭이 기다려야 하고 시간을 낭비하게 된다. 반대로 야드 트럭이 늦게 도착할 시에는 안벽 크레인이 야드 트럭을 기다려야 한다.

안벽 크레인과 야드 트럭의 도착시간 차이를 최소화하기 위해서 Eq. (1)과 같이 earliness-tardiness 목적식을 이용한다.

$$c_{ja} = \begin{cases} \alpha_E(d_j - f_j^q) + \alpha_c e_{ja} & \text{if } f_j^q < d_j \\ \alpha_T(f_j^q - d_j) + \alpha_c e_{ja} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

J 는 작업 j 의 set이고 α_E 와 α_T 는 Earliness, Tardiness, 공차이동시간의 가중치이다. d_j 는 안벽 크레인이 작업을

시작하는 Due-time 시간이고 f_j^q 는 야드 트럭이 안벽 크레인에 도착하는 시간이다. d_j 와 f_j^q 은 추정값으로 계산된다. e_{ja} 는 야드 트럭 α 이 작업 J 을 처리하는데 발생하는 공차이동시간이다. 이렇게 야드 트럭 α 가 J 작업을 처리하는 비용은 c_{ja} 로 나타낼 수 있다.

$$f_j^q = e_{ja} + h_{YC} + t_{ja} \quad (2)$$

f_j^q 는 작업의 종류에 따라서 계산하는 방법이 달라진다. 양하의 경우에는 $f_j^q = e_{ja}$ 이고 적하의 경우는 Eq. (2)와 같이 야드 크레인의 작업시간 h_{YC} 과 블록에서 안벽 크레인까지 이동하는 시간이 포함된다.

Due-time-based Dispatching은 Earliness 가중치보다 Tardiness 가중치를 더 높게 설정한다. 안벽 크레인이 대기하지 않고 작업하게 함으로써 하역속도를 높일 수 있도록 한다.

4.2.2 Inventory-based Dispatching

Inventory-based Dispatching은 안벽 크레인에 할당된 야드 트럭 수를 이용하여 할당한다. Brickson (2007)은 안벽 크레인을 고객으로, 해당 안벽 크레인의 작업을 처리중인 모든 야드 트럭을 그 재고로 보았다. 상품이 필요한 고객(안벽 크레인)에게 상품(야드 트럭)을 제공하는 것으로 생각하여 가장 재고가 작은 안벽 크레인에 유희한 야드 트럭을 할당하게 된다.

재고가 작다면 그만큼 안벽 크레인에 야드 트럭이 배차되지 않아 안벽 크레인이 대기할 가능성이 생긴다. 따라서 재고가 가장 작은 안벽 크레인에 할당한다. 안벽 크레인들의 대기열에 재고가 떨어지지 않게끔 지속적으로 할당하는 것이 중요하다.

Inventory-based Dispatching은 안벽 크레인에 할당된 야드 트럭의 대수 즉, 재고를 계산하는 단순한 방법으로 좋은 결과를 도출할 수 있다.

Inventory-based Dispatching은 재고를 측정할 때 값을 보정해주는 LPM(loading preference multiplier)을 사용한다. 각 안벽 크레인에 할당되어 있는 전체 야드 트럭의 대수로 측정하는 것은 쉬운 방법이나 작업의 유형에 따라서 프로세스가 다르기 때문에 적합하지 않다. 실제로 컨테이너 터미널에서 안벽 크레인에 도착하기까지 걸리는 시간은 Fig. 5와 같이 작업 유형에 따라서 달라진다. Fig. 5(a)처럼 양하작업은 바로 안벽 크레인으로 향하지만 적하작업은 Fig. 5(b)와 같이 블록의 야드 크레인을

거쳐 안벽 크레인에 도착한다. 따라서 적하작업이 안벽 크레인에 도착하기까지 더 오랜 시간이 걸린다.

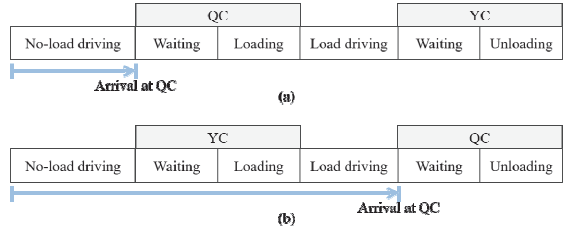


Fig. 5. (a) Yard truck unloading process
(b) Yard truck loading process

LPM을 이용하여 양하작업을 하는 야드 트럭 대수를 보정한다. 즉 양하작업 야드 트럭 대수에 LPM을 곱함으로써 적하작업 야드 트럭 대수와 균형을 맞출 수 있다.

Table 1은 Inventory-based Dispatching의 예시이다. 음영으로 칠해진 컨테이너 작업은 이미 할당된 작업을 의미하고, 나머지는 아직 할당되지 않은 작업이다. 컨테이너 번호는 작업의 순서를 나타내고 U는 Unload 양하를, L은 Load 적하를 나타낸다. 따라서 1번 안벽 크레인의 야드 트럭 할당 대수는 2대 이다.

이러한 상황에서 LPM이 달라짐에 따라 야드 트럭의 할당이 달라진다. LPM이 1일 때는, 양하작업과 적하작업은 동일한 대수로 판단된다. 따라서 재고가 가장 작은 야드 트럭은 2번이나 3번 안벽 크레인으로 할당된다. 그러나 LPM이 3일 때는 재고가 가장 작은 2번 안벽 크레인으로 할당된다. 2번과 3번은 한 대가 할당되어 있지만, 1번 안벽 크레인의 작업은 양하작업이기 때문에 재고가 3이 되고, 4번 안벽 크레인의 작업이 적하작업이기 때문에 1이 된다.

최적의 LPM 값은 터미널의 크기 장비의 수에 따라서 다르게 결정되기 때문에 본 연구에서는 각 시나리오 환경에 적합한 LPM 값을 찾기 위하여 타부서치를 수행하였다.

4.2.3 Multi-attribute Dispatching

앞서 Due-time-based Dispatching은 안벽 크레인의 작업시간, 야드 크레인의 작업시간을 추정하기 때문에 부정확한 배차가 발생할 수 있다. 즉, 예상치 못한 대기시간이 발생할 가능성이 있다. 예를 들면 야드 크레인의 예상 작업시간을 작업 평균시간인 2.7분이지만 실제 시뮬레이션에서는 6분이 발생하였을 경우 약 3분의 추가 대기시간이 발생하게 된다.

Table 1. Work list and Inventory value of Quay crane

	QC1	QC2	QC3	QC4
QC work list	76U	71L	65U	68L
	77U	72L	66U	69U
	78U	73L	67U	70U
	79U	74L	68U	71U
LPM=1	2	1	1	3
LPM=3	6	1	3	7

또한 Inventory-based Dispatching의 경우 안벽 크레인에 할당된 야드 트럭 대수라는 단일한 요인만을 고려하기 보다는 더 정밀한 배차를 위해서는 다양한 요인들을 고려할 필요성이 있다.

따라서 본 연구에서는 시간을 추정함으로 인한 영향을 최소화 하고 야드 트럭 할당대수 뿐만 아니라 안벽 크레인의 작업량을 고려한 새로운 우선순위 규칙을 제안한다. 본 연구에서 제안하는 Multi-attribute Dispatching은 Table 2와 같이 컨테이너 터미널 생산성에 영향을 주는 3가지 요인을 제시하고 이들을 조합한 목적식을 통해 하나의 작업을 선택하도록 한다.

Table 2. Factors of Multi-attribute Dispatching

Factor	Description
A1	Preferring a high-residual workload on the Quay crane
A2	Preferring small yard truck allocations in the Quay crane
A3	Preferring to work with shorter no-load travel time

1) 안벽 크레인의 잔여 작업량이 많은 작업 선호

첫 번째 요인은 안벽 크레인의 잔여 작업량이다. 컨테이너 터미널에서 가장 중요한 것은 선박이 선박의 모든 작업을 빠르게 처리하고 출항할 수 있도록 만드는 것이다. 선박의 체류시간이 중요한 이유는 체류시간이 감소할 경우 터미널의 선박 입항 회전율을 높일 수 있고 그로 인해 더 많은 선사를 유치할 수 있게 된다. 선박회사 또한 선박의 활용도가 높아진다는 이점을 갖게 된다.

선박은 모든 안벽 크레인의 작업이 끝났을 때 출항이 가능하다. 주목해야 할 점은 가장 늦게 끝나는 안벽 크레인의 작업이 중요하다라는 것이다. 다른 안벽 크레인의 작업이 모두 끝나더라도 잔여작업 남은 단 하나의 안벽 크레인이 있다면, 선박은 터미널을 떠나지 못하게 된다. 따라서 잔여 작업이 많은 안벽 크레인은 빠르게 처리되어야 할 것이다.

안벽크레인은 차지하는 공간의 크기와 상호 간섭 문제로 인하여 단일 선박에 동시에 작업할 수 있는 크레인의 수는 제한적이며, 이 때문에 안벽 크레인 마다 처리하는 물량은 차이가 있다. 선박 체류시간 감소를 위해서는 개별 안벽 크레인의 잔여 작업량을 고려하여야 한다.

Multi-attribute Dispatching은 선박 체류시간을 감소시키기 위해서 안벽 크레인의 잔여 작업량을 파악하고 잔여 작업량이 많은 안벽 크레인에 대하여 더 많은 야드 트럭을 할당되도록 한다.

Multi-attribute Dispatching은 선박 체류시간을 감소시키기 위해서 안벽 크레인의 잔여 작업량을 파악하고 잔여 작업량이 많은 안벽 크레인에 대하여 더 많은 야드 트럭을 할당되도록 한다.

Fig. 6은 한 선박을 작업하는 3대 안벽 크레인을 나타낸다. 색칠되어 있는 작업량까지 완료된 상황이고 선박을 처리하기 위해서는 안벽 크레인1~3의 작업이 종료되어야 한다. 현재 2번 안벽 크레인은 가장 많은 작업량을 가지고 있고 1번 안벽 크레인은 작업이 느리게 처리되고 있다. 느리게 처리되고 있는 1번 안벽 크레인을 천천히 작업하게 되더라도 전체적인 작업 종료를 고려한다면 잔여 작업량이 가장 많은 2번 안벽 크레인에 야드 트럭을 할당하여 빠르게 물량을 처리 할 수 있도록 하여야 할 것이다.

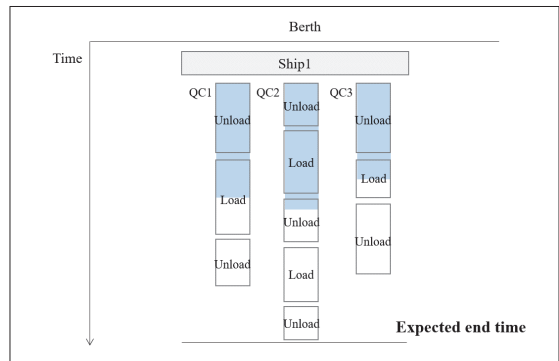


Fig. 6. Residual workload of ship

2) 안벽 크레인의 야드 트럭 할당대수가 적은 작업 선호
안벽 크레인 중 할당 대수가 작은 안벽 크레인의 작업을 할당시킴으로써 야드 트럭 대수를 고르게 배차시킨다. 양적하 작업시 안벽 크레인이 야드 트럭이 오지 않아 대기하는 시간을 줄이기 위해서는 야드 트럭 대수의 편차가 커지지 않도록 할당하는 것이 중요하다. Brickson (2007)의 Inventory-based Dispatching와 같이 LPM을 적용하여 계산한다.

하지만 첫 번째 요인인 잔여 작업이 많은 안벽 크레인

에 더 많은 야드 트럭을 할당하는 것과 야드 트럭 할당대수 균형을 맞추는 것이 두 가지 요인은 trade-off 관계에 있기 때문에 두 요인간의 적절한 균형점을 찾는 것이 중요할 것이다.

3) 공차이동시간이 짧은 작업 선호

세 번째 요인은 공차이동시간이다. 현재 야드 트럭의 위치에서 다음 컨테이너를 싣기 위하여 공차로 이동하는 공차이동시간이 작은 곳으로 할당시킴으로써 야드 트럭의 이용률을 높일 수 있다.

Multi-attribute Dispatching은 야드 트럭이 목적식의 값이 최소인 하나의 작업을 선택한다. Table 3과 같이 3가지 고려요인의 가중치 합으로 이루어진 목적식은 Eq. (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 cost = & w_1 (1 - A1(\text{잔여작업량 비율})) \\
 & + w_2 (A2(\text{YT 할당대수 비율})) \\
 & + w_3 (A3(\text{공차이동시간 등수 비율}))
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

가중치들의 합은 1이며, 각 요인들은 차량 대수, 작업 개수, 이동 시간으로 단위가 통일되어 있지 않기 때문에 값을 0~1 사이의 값으로 정규화하여야 한다.

잔여 작업량의 정규화는 잔여 작업량의 비율로 계산한다. 선박을 기준으로 선박의 모든 잔여작업량 대비 해당 안벽 크레인의 잔여 작업량으로 계산한다. 잔여 작업량이 높으면 다른 안벽 크레인들에 비해 잔여 작업량이 많다는 것을 의미한다. 목적식의 점수 합이 최소인 작업을 선택하는 최소화 문제이기 때문에 1에서 잔여 작업량 비율을 뺀 값을 최종 잔여 작업량 값으로 사용한다.

야드 트럭 할당대수를 정규화하기 위해서는 전체 야드 트럭 대수 대비 안벽 크레인에 개별적으로 할당된 야드 트럭 대수의 비율로 계산한다. 야드 트럭 대수는 작업 종류에 따라서 재고 값을 보정하기 위하여 Inventory-based Dispatching의 LPM을 곱한 수정된 야드 트럭 할당대수 값을 구한다. 그리고 정규화는 풀에 속해있는 전체 야드 트럭 재고 값 대비 해당 안벽 크레인의 재고 값의 비율로 계산한다.

공차이동시간은 정규화하기 어렵기 때문에 공차이동 시간을 등수로 구하고 등수를 다시 비율로 환산하였다.

Table 3은 터미널 기준 풀링 상태에서 Multi-attribute Dispatching을 적용한 상황을 예로 든 것이다. 잔여작업 개수, 야드 트럭 할당대수 그리고 공차이동시간의 가중치는 각 17%, 73%, 10%로 적용하고 목적함수를 계산하였

다. 그 결과, 야드 트럭은 가장 작은 목적함수 값을 보인 4번 안벽 크레인의 작업을 할당받게 된다.

이렇게 컨테이너 터미널의 야드 트럭 운영에 영향을 미치는 요인들을 가지고 종합적인 판단을 내림으로써 더 개선된 야드 트럭 할당이 가능하다.

Table 3. Example of Multi-attribute Dispatching

Factor		QC1	QC2	QC3	QC4
A1	Number of Remaining jobs	105	70	210	150
	Normalization	0.2	0.13	0.39	0.28
	①Weight	0.97	0.98	0.93	0.95
A2	Assigned number of YT	1(U)	3(L)	2(U)	1(L)
	Inv(LPM=3)	3	3	6	1
	Normalization	0.23	0.23	0.35	0.19
	②Weight	0.17	0.17	0.25	0.14
A3	No-load travel time	3.81	3.15	2.14	3.4
	Rank	4	2	1	3
	Normalization	1	0.5	0.25	0.75
	③Weight	0.1	0.05	0.025	0.75
Total(①+②+③)		1.24	1.2	1.21	1.17

4.2.4 Cycling Dispatching

Petering (2010), Nguyen and Kim (2013), Carlo 등 (2014) 등 풀링과 관련한 선행연구에서는 풀(pool) 범위를 확대시켰을 때, 더블 사이클 횟수가 증가하고 그로인해 더욱 좋은 결과를 얻는 것으로 서술하였다. 따라서 본 연구에서는 이러한 더블 사이클의 횟수를 증가시키기 위한 우선순위 규칙을 제안한다.

작업 유형은 양하작업과 적하작업으로 구분 할 수 있다. 제한된 수의 야드 트럭은 이러한 작업을 연속적으로 수행한다. 따라서 총 4가지 사이클로 구분할 수 있으며, 양하-양하와 적하-적하의 연속적인 작업은 Single cycle, 양하-적하, 적하-양하의 작업은 Double cycle이다.

야드 트럭의 평균 이동시간은 선석과 블록간의 거리 > 블록과 블록간의 거리 > 선석의 안벽 크레인간의 거리 순으로 작아진다. 따라서 무조건 선석에서 블록으로 이동하여야 하는 Single cycle보다 Double cycle로 작업할 때 상대적으로 공차이동시간이 감소된다.

Cycling Dispatching은 적하-양하 발생횟수를 증가시키고자 한다. Double cycle 중 양하-적하 사이클은 블록에서 다른 블록으로 이동하는데 블록간 이동 시간은

편차가 크기 때문에 양하-적하 사이클 횟수 증가에 집중하였다.

Cycling Dispatching은 적하 후에 양하를 고정적으로 처리시키는 방법으로 적하-양하 cycle의 횟수를 증가시킨다. Cycling Dispatching의 작업 할당 단계는 다음과 같다.

- 1단계: 가까운 두 개의 안벽 크레인을 묶어서 하나의 그룹을 생성한다. (안벽 크레인1~2, 안벽 크레인3~4, 안벽 크레인5~6)
- 2단계: 이전 작업의 유형을 확인한다. 이전에 적하작업을 처리했다면 3단계로 그렇지 않으면 4단계로 이동한다.
- 3단계: 해당 그룹 내 안벽 크레인의 미할당된 가장 긴급한 작업이 어떤 작업이 있는지 검색한다. 양하작업이라면 바로 작업을 할당한다. 안벽 크레인 2대 모두 적하작업이라면, 4단계로 이동한다.
- 4단계: 설정한 pool을 기반으로 하여 안벽 크레인 중 하나의 작업을 야드 트럭이 가장 적게 할당된 안벽 크레인에 할당된다(3.2.3 Inventory-based Dispatching 참조).

Fig. 7과 같이 야드 트럭이 1번 안벽 크레인의 적하작업을 마치고 다음 작업을 할당 받는다면, 그룹에 속한 1번 안벽 크레인의 미할당된 작업이 양하작업이기 때문에 야드 트럭은 1번 안벽 크레인의 양하작업에 할당된다.

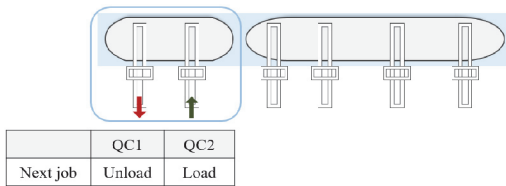


Fig. 7. Explain of Cycling Dispatching

5. 시뮬레이션 모델링

5.1 주요 가정사항

컨테이너 터미널을 구현하기 위하여 시뮬레이션 패키지인 ARENA 15.0을 사용하였다. 시뮬레이션 모델 설계 시 수립한 가정 사항과 데이터는 Table 4 and 9이며, 구현된 시뮬레이션 모델의 애니메이션은 Fig. 9와 같다.

Table 4. Experimental environment

Setting element	Setting value
Quay crane	6 QCs / Process time TRIA(0.5,2,3,5)
Block	14 Blocks
Yard crane	28 YCs / Process time TRIA(0.5,2.5,8)
Yard truck	33 YTs
Outside truck	Arrival distribution EXPO(1.3)
Job quantity	3ships / Total 4,177 Containers (Unload 1,637/ Load 1,346/ Transshipment 1,180)

- 컨테이너 터미널 시뮬레이션 모델은 선석과 블록이 평행하게 배치되어 있는 아시안 레이아웃(Asian layout)이며, 야드 트럭의 동선은 Fig. 8과 같다.

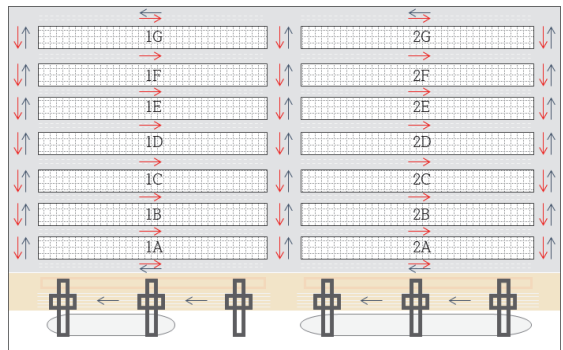


Fig. 8. Yard truck movement path

- 안벽 크레인은 작업 리스트에 따라 컨테이너를 양 '적하고 한 번에 하나씩 컨테이너를 작업한다고 가정하였다. 안벽 크레인이 작업을 처리하는 데 걸리는 시간은 TRIA(0.5, 2.0, 3.5) 분으로 설정하였다. 이 분포는 평균 2분을 의미하므로, 안벽 크레인의 대기시간이 발생하지 않는다고 가정할 경우, 최대 GCR은 시간당 약 30개이다.
- 야드 크레인이 하나의 컨테이너를 처리하는 데 걸리는 시간은 TRIA(0.5, 2.5, 8.0)이다. 컨테이너의 위치에 따라 매우 가까울 경우 짧은 작업시간을 보이며, 맨 아래 있는 컨테이너를 꺼낼 경우 위의 컨테이너들을 rehandle하는 시간이 발생한다. 이러한 점 때문에 큰 편차의 작업시간을 갖도록 설정하였다.
- 컨테이너의 저장 위치는 저장 가능한 용량을 가진 스택이 여러 곳에 있는 경우 해당 스택을 처리하는

야드 크레인의 작업량(workload)이 최소인 곳에 할당된다.

위에서 언급한 가정 사항들을 기반으로 하여 컨테이너 터미널 시뮬레이션 모델을 설계하였다. 터미널에서 선박의 모든 작업이 완전히 처리된 후 시뮬레이션이 종료되도록 설정하였다.

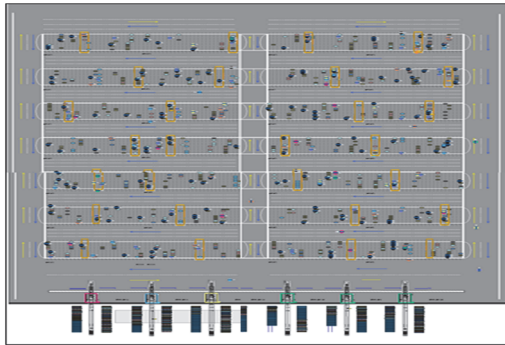


Fig. 9. Animation of Simulation model

각 우선순위 규칙을 적용할 때 가중치를 설정하여야 한다. 본 연구에서는 타부서치를 이용하여 각 시나리오마다 GCR을 극대화시키는 가중치를 찾고 그 값을 이용하였다. 각 시나리오에서 사용된 가중치는 Tables 5, 6, 7 and 8과 같다.

Table 5. Input variable of Due-time-based Dispatching

Scenario NO.	Input variable	Symbol	Value
Scenario1	Earliness weighting	α_E	0.38
	Tardiness weighting	α_T	0.23
	no-load travel time weighting	α_M	0.39
Scenario5	Earliness weighting	α_E	0.37
	Tardiness weighting	α_T	0.25
	no-load travel time weighting	α_M	0.38

Table 6. Input variable of Inventory-based Dispatching

Scenario NO.	Input variable	Symbol	Value
Scenario2	Loading weighting	LPM	4.3
Scenario6	Loading weighting	LPM	4.1

Table 7. Input variable of Multi-attribute Dispatching

Scenario NO.	Input variable	Symbol	Value
Scenario3	Yard truck number weighting	w_1	0.7
	Residual number of jobs weighting	w_2	0.2
	no-load travel time weighting	w_3	0.1
	Loading weighting	LPM	4.1
Scenario7	Yard truck number weight	w_1	0.73
	Residual number of jobs weighting	w_2	0.16
	no-load travel time weighting	w_3	0.1
	Loading weighting	LPM	4.1

Table 8. Input variable of Cycling Dispatching

Scenario NO.	Input variable	Symbol	Value
Scenario4	Loading weighting	LPM	4.5
Scenario8	Loading weighting	LPM	4.5

5.2 모델 타당성 검증

시뮬레이션 수행 기간 동안 모델의 신뢰성, 적합성 및 향후 모델의 예측력, 즉 강건성(robustness)을 평가하기 위하여 본 연구에서는 의태분석을 수행하였다. 의태분석 방법을 적용하기 위해 시뮬레이션 수행 결과와 실제 작업 결과를 이용하여 MAPEs(mean absolute percentage errors)를 통해 모델의 타당성을 검증하였다. MAPE 추정치는 일반적으로 Eq. (4)와 같이 계산된다.

$$MAPE = \frac{1}{n} \times \sum_{t=1}^n \left| \frac{Y_t^A - Y_t^P}{Y_t^A} \right| \times 100\% \quad (4)$$

여기서 Y_t^A 는 실제 컨테이너 터미널의 선박 체류시간을 의미하며, Y_t^P 는 시뮬레이션의 선박 체류시간을 의미한다. MAPE의 결과가 3%이하이면 예측력이 뛰어나고(excellent), 5%이하이면 우수하며(good), 8%이상이면 그 모델의 예측력은 받아들일 수 없는 것(not acceptable)으로 보는 것이 일반적인 MAPE에 대한 해석이다. 본 연구의 시뮬레이션 모델 MAPE는 평균 2.9로 채택가능 범

Table 9. Working order data for KKUS ship

No.	Ship Name	Type	Class	Status	Quay Crane	Load	Lane Number	POD	Queue
1	KKUS	Dry	T/I	Full	QC6	Unload	26	2	26H-U
2	KKUS	Dry	T/I	Full	QC6	Unload	26	2	26H-U
3	KKUS	Dry	T/I	Full	QC6	Load	11	1	26H-L
4	KKUS	Reefer	T/I	Full	QC6	Load	11	1	26H-L
5	KKUS	Reefer	T/I	Full	QC6	Load	11	1	26H-L
6	KKUS	Dry	T/I	Full	QC6	Load	11	1	26H-L
.
.
.
46	KKUS	Dry	Import	Full	QC6	Unload	29	100	22H-U
47	KKUS	Reefer	T/I	Full	QC6	Unload	26	2	22H-U
48	KKUS	Dry	T/I	Empty	QC6	Unload	26	2	22H-U
49	KKUS	Reefer	Export	Empty	QC6	Load	11	3	22H-L
50	KKUS	Dry	Export	Empty	QC6	Load	11	3	22H-L
51	KKUS	Dry	T/E	Empty	QC6	Unload	26	2	22H-U
.
.
.
63	KKUS	Dry	T/E	Full	QC6	Load	11	3	10D-L
64	KKUS	Dry	T/E	Full	QC6	Load	11	3	10D-L
65	KKUS	Dry	Import	Full	QC6	Unload	29	100	10H-U
66	KKUS	Dry	T/E	Empty	QC6	Unload	26	2	10H-U
67	KKUS	Tank	T/E	Empty	QC6	Unload	26	2	10H-U
68	KKUS	Tank	T/E	Empty	QC6	Unload	26	2	10H-U

위 내에 존재한다. 이는 시뮬레이션 모델이 실제 컨테이너 터미널을 충분히 반영하고 있다고 하겠다.

6. 시나리오 구성 및 실험 결과

6.1 시나리오 구성

본 연구의 목적은 풀링 방식과 우선순위 규칙을 조합한 시나리오 중 결과가 우수하게 도출되는 최고의 조합 시나리오를 찾는 것이다.

시나리오 구성은 기존의 2가지 풀링 방식(선박 기준 풀링, 터미널 기준 풀링)과 기존의 연구에서 벤치마킹한 2가지 우선순위 규칙(Due-time-based Dispatching, Inventory-based Dispatching) 그리고 본 연구에서 제안하는 새로운 2가지 우선순위 규칙(Multi-attribute Dispatching, Cycling Dispatching)을 사용하였다. 2가지 풀링 방식과 4가지

우선순위 규칙 조합한 총 8가지 시나리오는 Table 10과 같다.

총 8가지 시나리오 조합에 대한 시뮬레이션 모델링을 진행하고 주요 데이터를 추출하였다. 35번 반복 수행된 데이터를 이용하여 통계분석을 수행한다. 결과적으로 이러한 일련의 단계를 거쳐 터미널 생산성을 높이는 최선의 조합 시나리오를 확인 할 수 있다.

6.2 주요 평가지표(KPI) 및 실험 결과

컨테이너 터미널의 생산성은 다양한 성능 지표를 기준으로 평가된다. 그 중 가장 주요한 평가 지표는 안벽 크레인 생산성(gross crane rate, GCR)이다. 이는 안벽 크레인의 시간 당 평균 작업 수를 의미하는 것으로 GCR 값이 높을수록 터미널은 효율적으로 운영되고 있다고 평가된다.

Table 10. Scenario Design

Scenario NO.	Pooling	Dispatching rule
Scenario1	Ship level Pooling	Due-time-based Dispatching
Scenario2	Ship level Pooling	Inventory-based Dispatching
Scenario3	Ship level Pooling	Multi-attribute Dispatching
Scenario4	Ship level Pooling	Cycling Dispatching
Scenario5	Terminal level Pooling	Due-time-based Dispatching
Scenario6	Terminal level Pooling	Inventory-based Dispatching
Scenario7	Terminal level Pooling	Multi-attribute Dispatching
Scenario8	Terminal level Pooling	Cycling Dispatching

$$GCR = (\text{모든 안벽 크레인의 총 작업수}) / (\text{모든 안벽 크레인의 총 작업시간}) \quad (5)$$

본 연구에서는 GCR과 함께 선박 출항지연시간을 터미널의 생산성을 평가하는 지표로 활용하고자 한다. 선박 출항지연시간은 안벽 크레인에 대기가 없는 이상적인 상황보다 얼마나 출항이 지연되었는지 평가하는 것이다. 이상적인 체류시간은 안벽 크레인의 처리능력에서 가장 작업량이 많은 안벽 크레인의 작업량을 곱하여 계산한다. 가장 작업량이 많은 안벽 크레인의 작업이 끝나야만 선박이 떠날 수 있기 때문에 그 작업량을 곱하였다. 계산 방법은 Eq. (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{선박 출항지연시간} &= \text{선박 체류시간} \quad (6) \\ &\quad - (\text{안벽 크레인의 평균 처리능력}) \\ &\quad \times (\text{가장 작업량이 많은 안벽 크레인의 작업량}) \end{aligned}$$

6.2.1 시나리오 결과

시나리오 분석 결과, 최상의 시나리오는 Table 11과 같이 터미널 기준 풀링 방식과 Multi-attribute Dispatching을 조합한 7번 시나리오로 나타났다. 시나리오 7과 6의 GCR에 대하여 통계분석을 수행한 결과 유의확률이 P < 0.001이하로 둘의 차이가 유의하게 나타났다. 평균 GCR이 가장 높게 나타났고 선박 출항지연시간은 가장 적게 나타났다. 컨테이너 터미널은 동일한 장비와 인력을 사용

하여 많은 작업을 수행할 수 있으므로 평균 GCR이 높을수록 터미널의 활용도가 높아진다.

시나리오 7번과 2번의 총 선박 출항지연시간이 작게 나타나는데, Multi-attribute Dispatching이 안벽 크레인의 할당 대수 균형을 고려할 뿐만 아니라 잔여 작업량을 고려하기 때문에 선박체류시간이 작게 나타났음을 알 수 있다.

Table 11. Results of GCR and Ship Departure Delay Time by Scenario

Scenario NO.	GCR	Half width	Total Ship Departure Delay Time
7	27.521	0.05	3.17
6	27.256	0.04	4.77
3	27.123	0.04	3.47
2	27.066	0.04	5.4

6.2.2 풀링 결과

2가지 풀링 방식의 결과는 다음 Table 12와 같다. 터미널 기준 풀링이 평균 안벽 크레인 생산성과 선박 지연시간에 대하여 더 좋은 결과를 보였다. 터미널 기준 풀링은 모든 안벽 크레인을 대상으로 하기 때문에 더 많은 후보들 중 가장 효율적인 작업을 선택할 수 있게 되며, 자연스럽게 더블 사이클 횟수가 증가한 것으로 나타났다. 총 발생한 더블 사이클 횟수는 선박 기준 풀링은 평균 853.4회 전체 작업 사이클의 32%를 차지했으며, 터미널 기준 풀링은 평균 1161.4, 전체의 31%를 차지했다.

Table 12. Results of GCR and Ship Departure Delay Time in Pooling

Pooling	GCR	Total Ship Departure Delay Time	No-load time (min)	Total Double cycle number
Ship level Pooling	26.826	5.159	2.63	853.4 (23%)
Terminal level Pooling	27.001	4.811	2.55	1161.4 (31%)

6.2.3 우선순위 규칙 결과

5가지 우선순위 규칙의 최종결과는 Table 13과 같다. 본 연구에서 제안하는 Multi-attribute Dispatching의 평균 GCR이 27.322로 가장 높게 나타났다. 또한 평균 선박 출항지연시간은 Inventory-based Dispatching에 비해

크게 감소된 3.32시간으로 나타났다.

Inventory-based Dispatching과 Multi-attribute Dispatching은 나머지 우선순위 규칙보다 더 좋은 GCR을 나타냈다. 총 선박 출항지연시간은 Multi-attribute Dispatching이 Inventory-based Dispatching보다 34% 감소하였다. Multi-attribute Dispatching은 단일 요소인 야드 트럭 할당 대수만을 고려하는 Inventory-based Dispatching을 보완하여 공차 이동거리와 안벽 크레인마다 남아있는 작업 물량을 고려함으로써 낮은 선박 출항 지연시간과 높은 평균 GCR을 나타냈다.

Fig. 10은 안벽 크레인의 처리시간을 나타낸다. 1번 안벽 크레인의 작업 종료시간은 늦춰졌지만 전체적인 작업 종료 시점을 보았을 때 선박의 체류시간은 감소되는 효과가 나타났다.

또한 Multi-attribute Dispatching은 Double cycle 횟수가 높은 양상을 보였다. 3가지 요인 중 공차이동시간이 낮은 곳을 선호하는 영향으로 인하여 총 Double cycle 횟수가 가장 많게 나타났으며, 공차이동시간도 가장 낮게 나타났다.

Table 13. Results of GCR and Ship Departure Delay Time in Priority rule

Dispatching rule	GCR	Total Ship Departure Delay Time	QC average wait time (min) (Unload/Load)	YT average wait time (min)	Total Double cycle number
Due-time-based	26.568	5.25	0.257 (0.06/0.63)	3.774	634 (17%)
Inventory-based	27.161	5.086	0.208 (0.05/0.48)	4.017	969.6 (26%)
Multi-attribute	27.322	3.32	0.193 (0.06/0.44)	4.52	1220.3 (33%)
Cycling	26.604	6.283	0.253 (0.07/0.58)	4.323	1205.7 (32%)

Table 13에서 Due-time-based Dispatching은 Inventory-based Dispatching과 Multi-attribute Dispatching보다 낮은 GCR을 나타냈다. 또한 안벽 크레인이 적하작업 때 야드 트럭을 기다리는 대기시간이 한 작업당 0.63으로 높게 나타난다. 안벽 크레인은 처리하는 작업 물량이 많기 때

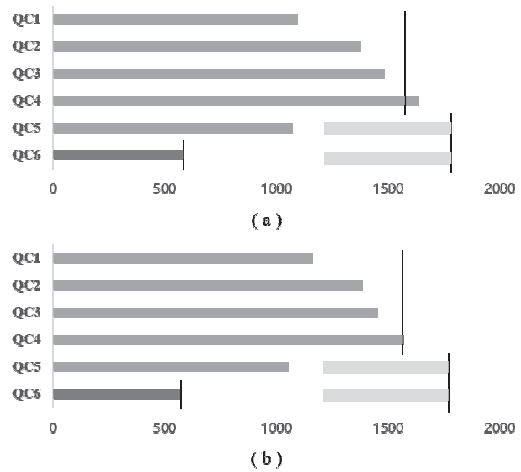


Fig. 10. Working hours of Quay crane (a) multi-attribute Dispatching (b) Inventory-based Dispatching

문에 총 대기시간은 매우 커지게 된다. 이는 부정확한 배차가 발생한 것을 반증한다.

Cycling Dispatching은 강제적으로 적하 후 양하작업을 할당하기 때문에 야드 트럭 할당대수의 일시적인 불균형이 발생한다. 예를 들면 한 안벽 크레인이 적하작업을 연속적으로 처리하고 그룹 내 다른 안벽 크레인이 양하작업을 연속적으로 수행할 때 그 안벽 크레인으로 야드 트럭이 몰리게 된다. 하나의 안벽 크레인으로 몰리게 되면 나머지 일부 야드 트럭으로 다른 모든 안벽 크레인을 처리하게 되기 때문에 GCR은 낮아진다.

Cycling Dispatching 1단계에서는 가까운 두 개의 안벽 크레인을 하나의 그룹으로 설정하는데, 이 그룹을 확장시켰을 경우 영향을 확인하기 위하여 추가적인 실험을 진행하였다. 그 결과 Table 14와 같이 안벽 크레인 대수를 증가시킬수록 Double cycle 횟수는 증가하였으나, 양하작업으로 몰리는 현상이 발생한다. 따라서 안벽 크레인 그룹을 6대로 확장하였을 때 양하작업시 야드 트럭이 안벽 크레인을 대기하는 시간은 6.94분으로 크게 증가하였고 평균 GCR이 23.173으로 낮아지는 양상을 보였다.

우선순위 규칙이 터미널 생산성에 미치는 영향을 살펴보면, 각 안벽 크레인 마다 야드 트럭 대수를 균형있게 할당하는 것이 중요함을 알 수 있다. Cycling Dispatching에서 보인 것처럼 할당 대수 불균형은 안벽 크레인 생산성에 좋지 않은 영향을 미쳤다. 반면 안벽 크레인의 야드 트럭 할당 대수의 균형을 고려하는 Inventory-based Dispatching과 Multi-attribute Dispatching은 높은 GCR을 보인다.

Table 14. Result of Group change of Cycling Dispatching (about Scenario 4)

Group of QC	GCR	Total Ship Departure Delay Time	QC average wait time (min)	YT average wait time (min) (Unload/Load)	Total Double cycle number
Close 2QCs	26.596	6.25	0.25	4.38 (3.13/5.64)	1395.1 (38%)
3QCs	25.406	8.08	0.36	4.88 (4.18/5.59)	1513.7 (41%)
6QCs	23.173	16.11	0.59	5.77 (6.94/4.6)	1800.3 (48%)

또한 Double cycle 횟수를 단일 목적으로 야드 트럭을 배치하는 것은 안벽 크레인 생산성 증가에 부정적인 영향을 미칠 것이라 보여진다.

6.2.4 풀링과 우선순위 규칙 조합에 따른 터미널 생산성 효과분석

안벽 크레인 생산성에 대하여 풀링 방식과 우선순위 규칙이 미치는 영향을 알아보기 위하여 통계 분석을 수행하였다. 8가지 시나리오의 GCR을 가지고 분산 분석을 수행한 결과, Table 16과 같이 풀링 방식과 우선순위 규칙의 주효과와 교호작용 효과 모두 유의확률 $P < 0.001$ 이하로 GCR에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

평균적으로 Table 12와 같이 터미널 기준 풀링을 적용할 때 더 높은 안벽 크레인 생산성을 보이고 있으나, Table 15와 같이 Multi-attribute Dispatching은 풀을 확장시켰을 때 다른 우선순위 규칙들보다 안벽 크레인 생산성이 눈에 띄게 증가하는 양상을 보이고 있다. 이는 더 많은 후보 작업이 있을 때 시너지 효과가 나타남을 알 수 있다.

반면 Cycling Dispatching은 풀의 확장에 따른 안벽 크레인 생산성이 약간 증가하였으나 편차 내에 존재하였으며, 통계분석을 수행한 결과 유의확률이 0.668로 나타났다. 야드 트럭의 공차이동시간을 중점적으로 고려할 경우 풀링 방식에 따른 차이는 없는 것으로 나타났다.

따라서 야드 트럭 배치 시, 무조건 풀의 확장을 고려할 것이 아니라 어떤 우선순위 규칙과 어떤 풀을 생성할지 조합을 통해 고려할 필요성이 있다.

Table 15. GCR result according to Pooling

Pooling	Dispatching rule	GCR	Deviation
Ship level Pooling	Inventory-based	27.066	0.04
Terminal level Pooling	Inventory-based	27.256	0.04
Ship level Pooling	Multi-attribute	27.123	0.04
Terminal level Pooling	Multi-attribute	27.521	0.05
Ship level Pooling	Cycling	26.656	0.05
Terminal level Pooling	Cycling	26.613	0.06

Table 16. ANOVA Results for GCR in All Scenarios

	Sum of Squares	df	Mean square	F	Sig.
Corrected Model	34.778	7	4.968	140.288	.000
Intercept	202822.736	1	202822.736	5727042.045	.000
Dispatching rule	31.075	3	10.358	292.484	.000
Pooling	2.152	1	2.152	60.751	.000
Dispatching rule*Pooling	1.552	3	.517	14.605	.000
Error	9.633	272	.035		
Total	202867.147	280			
Corrected Total	44.411	279			

7. 결론

본 연구에서는 컨테이너 터미널의 생산성을 향상시키기 위하여 야드 트럭의 2가지 우선순위 규칙을 개발하였다. 연구 내용을 요약하면 다음과 같다. 첫 번째 Multi-attribute Dispatching은 컨테이너 야드 트럭의 할당 시 고려되어야 하는 3가지 요인을 선정하고 이를 종합하여 할당하는 것이다. 안벽 크레인의 대기시간을 감소시키기 위한 야드 트럭 할당대수와 야드 트럭의 이동 거리를 감소시키는 공차이동시간, 마지막으로 선박 체류시간에 영향을 미치는 잔여 작업량을 고려하였다. 두 번째 Cycling Dispatching은 더블 사이클을 증가시켜 야드 트럭의 공차이동시간을 감소시키고자 하였다.

이러한 2가지 우선순위 규칙을 포함한 2가지 풀링 방식과 4가지 우선순위 규칙의 총 8가지 조합 시나리오 중 가장 우수한 결과의 시나리오가 무엇인지 안벽 크레인 생산성(GCR)과 선박 출항지연시간 등 주요 평가지표를 통해 평가하였다. 분석 방법은 다음과 같다. 8가지 시나리오에 대한 시뮬레이션 모델을 구현하고 최종적으로 시나리오별 평가지표 결과에 대한 통계 분석을 수행하였다.

그 결과, 8가지 시나리오 중 터미널 기준 풀링과 Multi-attribute Dispatching을 조합한 시나리오가 안벽 크레인 생산성이 증가하고 선박 출항지연시간이 감소되는 결과가 나타났다. 이는 터미널 기준 풀링을 적용하여 더 많은 작업 후보가 생겨나고 그중 더 좋은 선택을 할 수 있게 되었으며, Multi-attribute Dispatching을 통해 현재 상황을 종합적으로 판단하여 적절한 작업에 배차되었기 때문이다.

우선순위 규칙을 평가한 결과, 안벽 크레인에 할당된 야드 트럭 대수를 균형적으로 배차하는 것을 고려하는 규칙들이 예상 도착 시간을 추정하여 계산하는 규칙에 비해 상대적으로 더 좋은 결과를 보였다. 이는 확률적인 컨테이너 터미널에서 불확실한 시간을 추정하는 것보다 할당된 야드 트럭 대수를 고려하는 것이 더욱 효과적임을 알 수 있다.

또한 풀링과 우선순위 규칙의 조합의 효과를 분석한 결과, 조합에 따라 생산성에 미치는 영향이 달라지기 때문에 둘의 조합을 중점으로 야드 트럭 배차 방식을 결정하여야 한다.

본 연구의 한계점 및 향후 연구 방향은 다음과 같다. 본 연구는 야드에서 발생할 수 있는 점검이나 교차상황, 야드 트럭의 혼잡으로 인한 속도 변화와 같은 교통상황, 작업자 교대시간 등 세밀한 장치장의 상황은 반영하지 못하였다. 새로운 우선순위 규칙은 본 연구에서 실험한 조건에서 우수성이 입증하였으나, 다양한 컨테이너 터미널 환경에서 실험을 통해 안정적으로 작동할 수 있는지 추후 확인하여야 할 것이다. 장비의 대수 및 종류, 작업시간, 장치장 크기 등과 같은 조건의 영향을 받기 때문에 추가적인 영향 요소에 대해서 동일한 결과를 얻을 수 있는지에 대한 추가적인 연구진행이 필요하다.

또한 야드 트럭 배차는 안벽 크레인 작업 계획 그리고 컨테이너 저장 위치를 결정하는 방법에 영향을 받기 때문에 다른 운영 계획과 통합된 연구가 필요하다.

References

- Bish, E. K., Chen, F. Y., Leong, Y. T., Nelson, B. L., Ng, J. W. C., & Simchi-Levi, D. (2007). "Dispatching vehicles in a mega container terminal." In *Container terminals and cargo systems*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 179-194.
- Briskorn, D., Drexl, A., & Hartmann, S. (2007). "Inventory-based dispatching of automated guided vehicles on container terminals." In *Container terminals and cargo systems*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 195-214.
- Carlo, H. J., Vis, I. F., & Roodbergen, K. J. (2014). "Transport operations in container terminals: Literature overview, trends, research directions and classification scheme", *European Journal of Operational Research*, Vol. 236, No. 1, pp. 1-13.
- Chung, C. Y., & Shin, J. Y. (2012). "Efficient Yard Tractor Control Method for the Dual Cycling in Container Terminal", *Journal of Korean Navigation and Port Reserch*, Vol. 36, No. 1, pp. 69-74.
- Dragović, B., Tzannatos, E., & Park, N. K. (2017). "Simulation modelling in ports and container terminals: literature overview and analysis by research field, application area and tool", *Flexible Services and Manufacturing Journal*, Vol. 29, No. 1, pp. 4-34.
- Dulebenets, M. A. (2016). "A new simulation model for a comprehensive evaluation of yard truck deployment strategies at marine container terminals", *Open Science Journal*, Vol. 1, No. 3.
- Kim, J., * · Choe, R., Park, T., & Ryu, K. R. (2011). "Optimizing dispatching strategy based on multicriteria heuristics for AGVs in automated container terminal", *Journal of Korean Navigation and Port Reserch*, Vol. 35, No. 6, pp. 501-507.
- Kim, K. H., & Bae, J. W. (2004). "A look-ahead dispatching method for automated guided vehicles in automated port container terminals", *Transportation science*, Vol. 38, No. 2, pp. 224-234.
- Nguyen, V. D., & Kim, K. H. (2013). "Heuristic algorithms for constructing transporter pools in container terminals", *IEEE Transactions on*

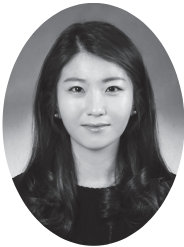
Intelligent Transportation Systems, Vol. 14, No. 2, pp. 517-526.

Petering, M. E. (2010) “Development and simulation analysis of real-time, dual-load yard truck control systems for seaport container transshipment terminals”, OR spectrum, Vol. 32, No. 3, pp. 633-661.

Petering, M. E. (2011) “Decision support for yard

capacity, fleet composition, truck substitutability, and scalability issues at seaport container terminals”, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 47, No. 1, pp. 85-103.

UNCTAD, (2018) (United Nations Conference on Trade and Development) Review of Maritime Transport 2018, United Nations publication.



천 서 영 (syoung067@naver.com)

2017 광운대학교 경영학과 학사

2019 광운대학교 경영학과 석사

2019~ 현재 광운대학교 경영학과 박사 과정

관심분야 : Simulation and Operation, Port Operation Strategy



윤 성 욱 (giantguard@naver.com)

2013 광운대학교 경영학과 학사

2015 광운대학교 경영학과 석사

2019 광운대학교 경영학과 박사

2019~ 현재 광운대학교 산학협력단 연구원

관심분야 : Simulation and Operation, Closed loop supply chain, Marketing strategy, Airport optimization



정 석 재 (sjjeong@kw.ac.kr)

2002 해양대학교 물류시스템공학과 학사

2004 연세대학교 산업시스템공학과 석사

2009 연세대학교 산업시스템공학과 박사

2010~ 현재 광운대학교 경영학과 교수

관심분야 : Supply Chain Management, Simulation, Operation Research