

트럭 도착 정보를 활용한 휴리스틱 기반 야드 크레인 스케줄링 방법

황성범 · 정석재 · 윤성욱[†]

A Study on the Heuristic-Based Yard Crane Scheduling Method Using Truck Arrival Information

Sung-Bum Hwang · Suk-Jae Jeong · Sung-Wook Yoon[†]

ABSTRACT

Literatures have considered mathematical model that change the job order of shipper for improving the operation time of yard crane. However, on the real site, it is impossible to change the job order decided according to the shipper's arrival order. Therefore, operation managers have been utilized the relatively simple strategy that job control is better but the process time of yard crane is longer due to the growth of yard crane's interference time and empty drive time. This study proposed a new yard-crane scheduling approach that decided the job order before the shipper's truck arrived the yard terminal. We utilize the Container Pre-Information Notice estimating the arrival time of truck. We developed the container terminal simulation model for validation of the effect of proposed scheduling approach. The results show that the proposed scheduling reduced the interference delay time and empty moving time of yard crane and shipper's truck delay time.

Key words : Container Pre-Information Notice, Yard crane scheduling problem, Simulation, Heuristic approach

요약

장치장 운영전략을 주제로 한 많은 선행연구들은 장치장에 도착한 트럭들을 대상으로 야드 크레인의 작업시간을 최소화할 수 있는 작업순서를 결정했다. 하지만 실제 현장에서는 이미 장치장에 도착한 트럭들의 작업순서를 바꾸는 것은 거의 불가능하며, 도착순서에 따라 작업을 처리해주는 비교적 단순한 전략을 주로 적용해왔다. 이 방식은 작업순서에 대한 혼잡을 줄일 수 있고 관리가 편하다는 장점이 존재하지만, 간섭대기시간과 공차시간의 증가로 작업시간이 증가하는 문제점이 있다. 본 연구에서는 트럭이 야드 장치장에 도착하기 이전에 트럭의 작업 순서를 결정하는 스케줄링 방법을 제안했다. 트럭 도착 이전에 작업을 할당해 주기 위해 트럭의 도착 예정 시간을 추정할 수 있는 Container Pre-Information Notice 정보를 활용하였다. 연구에서 제안하는 스케줄링 방법의 효과성을 검증하기 위해 실제 부산컨테이너터미널의 설비 레이아웃 및 데이터를 이용하여 현업의 방식과 본 연구의 스케줄링 방식을 비교하였다. 그 결과 크레인 작업 시간에 영향을 미치는 공차이동 및 간섭 대기시간이 감소하여 평균 작업 처리 시간이 감소한 것을 확인하였으며, 또한 내부트럭의 대기시간과 외부트럭의 체감 대기 시간이 감소하는 효과가 있었다.

주요어 : Container Pre-Information Notice, 야드크레인 스케줄링, 시물레이션, 휴리스틱

* 본 연구는 한국연구재단의 인문사회기초연구사업(NRF-2015S1A5A2A01010855)의 지원으로 수행되었습니다.

Received: 17 September 2019, Revised: 17 December 2019, Accepted: 24 December 2019

[†] Corresponding Author: SungWook Yoon

E-mail: giantguard@naver.com

Management Dept., Kwangwoon University, Seoul, Korea

1. 서론

국가 간 교역에서 해운물류는 절대적인 비중을 차지하고 있는 상황에서 세계 교역 물동량의 증가와 선박의 초 대형화 추세와 함께 해운물류는 꾸준하게 성장하고 있다 (Phan & Kim, 2015). 해운물류가 성장함에 따라 이를 처리하는 컨테이너 터미널들의 고객 유치에 위한 경쟁 또

한 심화되었으며, 터미널 내 생산성 향상을 위한 연구가 이루어지고 있다(Chen & Lu, 2013). 특히, 컨테이너 터미널의 생산성은 야드 크레인의 효율적인 운영전략에 따라 크게 영향을 받는다고 알려져 있으며(Cao & Lee, 2010), 실제로 현업에서도 컨테이너 터미널의 생산성을 향상시키기 위한 야드 크레인 운영 효율화 방안이 지속적으로 연구되고 있다(Chen & Lu, 2013).

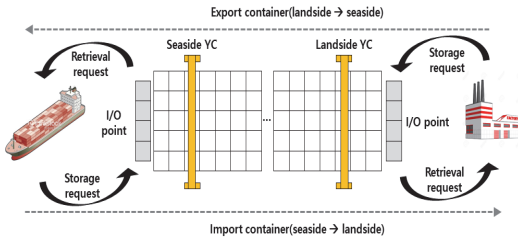


Fig. 1. Yard Crane in Container Terminal

일반적으로 Figure 1과 같이 터미널에서 처리하는 컨테이너는 수출 컨테이너와 수입 컨테이너로 분류된다. 수출 컨테이너의 경우 내륙에서 해상으로 이동하는 컨테이너로서 내륙에서 반입되어 야드 장치장에 적재된 후 선박으로 양하되는 프로세스를 거친다. 수입 컨테이너의 경우 해상에서 내륙으로 이동하는 컨테이너로서 선박에서 적하되어 야드 장치장에 적재된 후 내륙으로 반출된다. 수출입 컨테이너를 처리하는 하나의 야드 장치장에는 해상측과 육상측을 담당하는 두 대의 야드 크레인이 존재하며, 해상 측 야드 크레인은 선박에서 내리지거나 실리는 양적하 물량을 실은 내부트럭의 작업을 처리하고 육상 측 야드 크레인은 육상에서 반입되거나 반출되는 외부트럭의 작업을 처리한다. 내부 트럭과 외부 트럭의 작업은 독립적으로 처리되기 때문에 두 크레인 간의 안전거리 확보로 인한 작업 간섭이 불가피하며, 이로 인해서 작업시간이 증가하는 원인이 되기도 한다(Amir & Yu, 2014). 따라서 야드 크레인의 생산성은 야드 장치장에 도착한 야드 트럭의 컨테이너 저장 및 회수 위치에 따라 발생하는 야드 크레인 공차 이동 시간과 야드 크레인 간 간섭 대기 시간에 따라서 결정된다.

이와 관련된 선행연구에서는 야드 장치장에 도착해 있는 트럭들을 대상으로 야드 크레인의 작업시간을 최소화할 수 있는 야드 트럭의 작업 순서를 결정하는 문제를 다루어 왔다(Hu & Zhi-Hau, 2016). 하지만 이미 컨테이너 터미널에 도착해있는 외부트럭의 작업순서를 바꾸는 것은 화주들의 불만을 야기하기 때문에 대부분의 컨테이너

터미널에서는 도착 순서에 따라 작업을 처리해 주고 있다. 현업의 방식은 화주 소속인 외부트럭의 작업관리가 쉬울 뿐만 아니라 작업 순서에 대한 혼란을 줄일 수 있는 장점이 존재한다. 하지만 야드 크레인의 공차이동과 간섭 대기시간을 고려하지 못하기 때문에 야드 크레인 생산성을 저하시키는 문제를 내포하고 있다.

따라서 본 연구에서는 화주 소속의 외부트럭이 야드 장치장에 도착하기 이전에 공차 이동시간과 간섭 대기시간을 최소화할 수 있는 트럭의 작업순서를 결정하는 야드 크레인 스케줄링 방법을 제안한다. 본 연구에서 제안하는 야드 크레인 스케줄링의 핵심은 불확실한 외부트럭의 예상 도착시간을 기준으로 야드 크레인의 공차시간과 간섭 대기시간을 계산하여 이를 최소화 하는 외부트럭과 내부트럭의 작업 순서를 결정하는 것이다. 이를 위해서 컨테이너 예약 정보(COPINO)를 활용하여 불확실한 외부트럭의 도착시간을 추정했다.

본 연구에서 제안하는 스케줄링 방식의 효과성을 검증하기 위해 실제 현업에서 사용하는 방식과 비교하였으며, 평균 작업처리 시간은 8%, 내부트럭 대기시간 21% 개선된 효과를 보였다. 외부트럭의 경우 평균 대기시간은 현업의 방식과 본 연구의 스케줄링 방식 모두 유사한 수준으로 나타났지만 그 편차가 줄어들어, 스케줄링 방식이 기존 방식보다 안정적인 서비스 수준을 가짐을 확인할 수 있었다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장 선행연구에서는 야드 크레인 스케줄링에 대한 선행연구를 살펴보고, 3장 터미널 프로세스에서는 컨테이너 터미널 및 야드 장치장의 레이아웃과 야드 크레인의 프로세스에 대해 설명한다. 4장 연구방법에서는 COPINO 정보를 활용한 야드 크레인 스케줄링 방법에 대해 제안하며, 5장에서는 시뮬레이션 입력 데이터와 모델검증에 대해 설명한다. 마지막 6장에서는 현업의 방식과 본 연구에서 제안하는 스케줄링 방식을 야드 크레인 생산성 지표와 트럭 생산성 지표를 기준으로 비교했다.

2. 선행연구

야드 크레인 스케줄링 문제는 장치장 내에서 작업하는 야드 크레인의 대수에 따라 단일 야드 크레인인 경우와 복수 야드 크레인인 경우로 분류 될 수 있으며, 복수 크레인의 경우 상호 교차 가능 여부에 따라 크레인 간 교차가 가능한 경우와 교차가 불가능한 경우로 분류 될 수 있다. 기존 많은 연구들은 야드 크레인의 설비 대수, 교차가능 여부를

고려한 수리모형을 제시했으며, 모형크기에 따라 최적화, 휴리스틱, 메타휴리스틱 등의 방법을 이용했다. 시물레이션을 이용한 야드 크레인 스케줄링 문제는 교차 불가능한 설비의 특성을 고려하여 해상측과 육상측 크레인이 공통으로 작업 할 수 있는 공통 작업구역의 효과성을 실험한 시물레이션 연구와 크레인의 간섭상황에서 우선순위 규칙을 통해 크레인 간섭 대기시간을 줄이는 연구 등이 있었다.

단일 야드 크레인 스케줄링 문제는 야드 장치장 내에 한 대의 야드 크레인이 작업하는 특성을 갖는다. 해상과 육상측에서 발생하는 저장 및 회수 주문을 한 대의 야드 크레인이 처리하며 장치장 내에서 단일 크레인이 작업하기 때문에 크레인의 간섭문제는 발생하지 않는다. 하지만 야드 크레인이 고장났을 때 주문들을 처리 할 수 있는 대체 야드 크레인이 없기 때문에 현실에서의 사용 가능성은 낮으며, 매우 간단한 레이아웃이라고 할 수 있다. 기존의 연구들 중 상당수는 단일 야드 크레인 스케줄링 문제를 비대칭 외판원 문제로 변형하여 풀었다. Amir & Yu(2014)는 야드 크레인 스케줄링 문제를 총 작업 처리 시간 최소화를 목적으로 외판원 문제로 변형시켰으며, 외판원 문제에서 발생하는 Subtour 문제를 해결하기 위해 휴리스틱 기반 알고리즘을 사용하였다.

복수 야드 크레인 문제는 동일 장치장에서 복수의 야드 크레인이 작업하는 경우로 크레인 간 교차가 가능 유무에 따라 문제를 풀기 위한 제약조건이 상이하다. 크레인 간 교차가 가능한 경우 각 야드 크레인의 크기가 상이하야 크기가 작은 크레인이 크기가 큰 야드 크레인을 통과하여 이동할 수 있다. 따라서 해상측 작업과 육상측 작업을 두 야드 크레인 모두 처리 할 수 있는 특징을 갖는다. 독일 함부르크의 Altenwerder 컨테이너 터미널이 상호 교차 가능한 크레인의 대표적인 예이다. Speer & John(2011)의 연구는 교차 가능한 야드 크레인을 대상으로 Branch and Bound 알고리즘을 활용한 작업 할당 방법을 제안하였으며, FIFO, 긴급작업 우선처리 방식과의 비교를 통해 효과성을 검증하였다.

크레인 간 교차가 불가능한 문제의 경우 야드 크레인의 작업은 해상측 주문과 육상측 주문으로 나누어지며, 주문 발생 위치에 따라 야드 크레인의 작업 할당은 이미 결정되어 있다. 이 경우 교차가 불가능하다는 특성으로 크레인 간 간섭을 회피하는 제약이 필수적으로 고려되어야 한다. Hu & Zhi-Hau(2016)의 연구에서는 야드 크레인이 작업을 종료한 이후 I/O point로 복귀한다는 가정을 통해 저장과 회수작업이 동일한 작업 시작위치와 종료위

치를 갖도록 만들었다. 그들은 수리모형을 통해 저장작업과 회수작업의 구분이 사라지면서 크레인의 간섭이 발생하는 경우를 묘사하였으며, 간섭이 발생하지 않는 제약조건 하에서 크레인의 작업처리 시간을 최소화 하는 최적화 방법을 적용하였다. 하지만 이 방법의 적용은 작업 종료 후 무조건적인 I/O point 복귀가 실제 크레인 작업 동선과 거리가 멀다는 단점을 여전히 가지고 있다. Speer & Fisher(2016) 또한 Branch and Bound 알고리즘을 통한 야드 크레인 스케줄 생성방법을 제안했다. 그들은 내부트럭의 도착시점에 대한 정보의 불확실성 및 컨테이너 하차시간의 불확실성 등이 존재하는 상황에서 불확실성 수준에 따라 야드 크레인의 생산성이 어떻게 변화되는지를 분석했다. 또한 그들의 연구는 야드 크레인 교차 가능 및 불가능한 모든 상황에서 그 효과성을 시물레이션을 통해 검증하였다. Choe & Kim(2015)는 우선순위 결정방법을 통해 저장작업과 회수작업 뿐만 아니라 반출이 예상되는 컨테이너를 I/O point 가까이로 이동시키는 Re-marshalling 작업까지 포함한 스케줄링 방법을 제안했다. Carlo & Martinez(2015)는 크레인 간 간섭문제를 해결하기 위한 우선순위 규칙을 제안하고 효과를 분석했다. Gharehgozli & Zaerpour(2017)은 상호 교차가 불가능한 야드 크레인 설비에서 공통의 작업공간을 설정하고, 해당 공간을 실제 터미널에 적용했을 때의 효과를 분석했다.

앞서 언급된 기존 선행연구들은 다음과 같은 공통된 한계점을 지닌다. 첫째, 크레인의 작업순서 결정 시 터미널에 기 도착한 트럭들만을 고려하였다. 뿐만 아니라 작업순서 결정 시 외부트럭의 도착순서를 미반영하였다는 문제점을 지닌다. 컨테이너 터미널 소속인 내부트럭의 경우 터미널의 운영 효율화를 위해 작업순서를 조정하는 것은 문제가 되지 않는다. 하지만 화주 소속인 외부트럭의 경우 단순히 터미널 입장에서 작업순서를 조정할 수 없으며, 만약 작업순서를 조정 할 경우 화주들의 불만을 야기 할 수 있다. 둘째, 야드 크레인의 실질적인 작업 동선을 세밀하게 반영하지 못한다는 한계점을 갖는다. 대표적인 예로 야드 크레인의 작업을 수리모형으로 표현할 경우 하나의 작업을 끝낸 뒤 I/O point로 복귀한다는 가정이 필요하다. 이러한 가정은 실제 야드 크레인 간 간섭 문제의 복잡성을 무시하게 되며, 항상 I/O point로 복귀해야 한다는 가정은 실제 야드 크레인의 작업시간과는 왜곡된 결과를 초래할 수 있다.

본 연구에서는 선행 연구의 한계점을 극복하고자 터미널에 미도착한 외부트럭까지를 포함한 작업순서를 결정하고자 한다. 이를 위해 미도착 트럭의 도착 예상 시간이

고려되었다. 외부트럭의 도착시간을 추정하기 위해 해당 트럭의 출발시간 정보가 필요하므로 컨테이너 예약 정보 (Copino : Container Pre-Information Notice)를 활용하였다. 물론 현업에서도 COPINO 정보를 이용하여 트럭의 예상 도착시간을 추정할 수 있으나, 해당 트럭이 예상 도착시간 내에 도착하지 못한 경우 발생하는 비효율성으로 해당 정보를 거의 이용하지 않고 있다. 또한 기존 최적화 기반 선행연구에서 야드 크레인의 움직임이 단순화되어 있던 것에서 벗어나 야드 크레인의 작업 이동경로를 현실적으로 반영했다. 본 연구에서는 야드 크레인의 작업 경로와 외부트럭의 도착 불확실성을 고려하여 야드 크레인의 작업순서를 결정하는 방법을 제안했으며, 자세한 스케줄링 방법은 3장에서 설명한다.

3. B 항만 컨테이너 터미널 프로세스

본 연구는 실제 부산컨테이너터미널(Busan New Container Terminal, BNCT)의 레이아웃을 활용하였다. 터미널의 레이아웃은 Figure 2와 같이 장치장이 선석과 수직인 형태로 배치되어 있는 수직 컨테이너 터미널이다. 이러한 형태는 장치장과 선석이 수직으로 배치됨에 따라 안벽 크레인과 야드 크레인을 연결해주는 내부트럭과 야드 크레인과 게이트를 연결해주는 외부트럭의 이동 동선이 짧다는 장점이 있다. 하지만 야드 크레인이 선석과 게이트 부근까지 이동해야 한다는 단점이 있어 수직 컨테이너 터미널 레이아웃에서 야드 크레인 스케줄링은 터미널의 생산성을 결정하는 중요한 문제라고 할 수 있다.

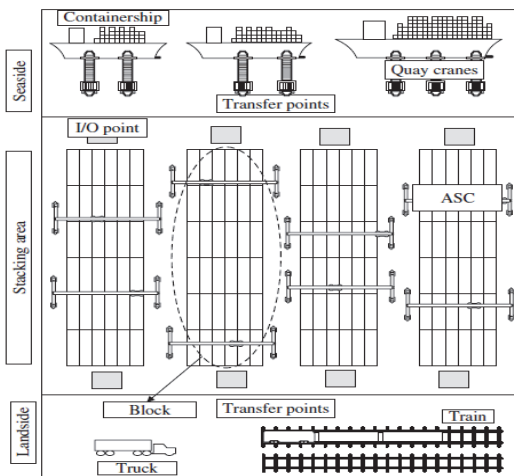


Fig. 2. Vertical Container Terminal

3.1 야드 장치장

야드 크레인의 작업 공간인 야드 장치장은 Figure 3과 같이 컨테이너 임시 저장 공간으로써 Bay, Row, Tier로 구성되어 진다. 현재 BNCT는 37 Bay 10 Row 크기의 장치장을 운영하고 있고, Bay와 Row로 구성된 각 Stack에는 최대 6층까지 컨테이너가 적재될 수 있다. 장치장의 양 끝에는 트럭과 야드 크레인이 컨테이너를 교환하는 장소인 Input Output point(I/O point)가 존재하며, 장치장에 도착한 트럭은 I/O point에서 야드 크레인에게 컨테이너를 넘겨주거나 야드 크레인으로부터 컨테이너를 넘겨받기 위해 대기한다.

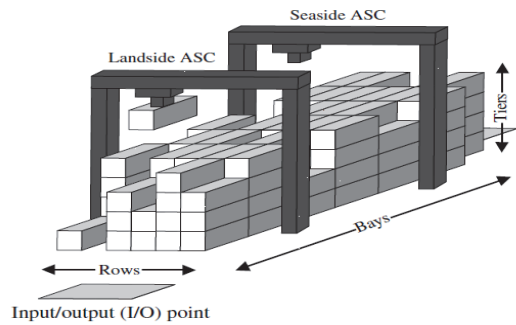


Fig. 3. Yard block Layout

3.2 야드 크레인 작업 프로세스

야드 크레인은 Figure 4와 같이 Bay를 이동하는 크레인과 Row를 이동하는 트롤리, Tier를 이동하는 스프레더로 구성되어 진다. 야드 크레인의 크레인과 트롤리는 동시에 이동할 수 있으며, 스프레더는 크레인과 트롤리가 정지된 상태에서 움직일 수 있다.

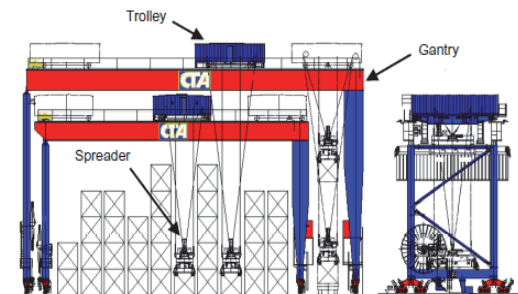


Fig. 4. Yard Crane Device

야드 크레인은 선박에서 양하되거나 게이트로부터 반입된 컨테이너를 장치장에 저장하는 저장주문과 장치장에 저장되어 있던 컨테이너를 선박으로 적하하거나 게이

트로 반출시키는 반출주문을 처리한다. 이 때 Figure 5와 같이 저장주문의 경우 I/O point에서 트럭으로부터 컨테이너를 넘겨받아 장치장 내부에 저장하기 때문에 작업 시작위치는 I/O point, 작업 종료위치는 장치장 내부이다. 회수주문의 경우 장치장 내부에 있는 컨테이너를 I/O point에서 대기하고 있는 트럭에게 넘겨주기 때문에 작업 시작위치는 장치장 내부, 작업 종료위치는 I/O point가 된다.

현재 BNCT의 야드 크레인 설비는 동일 레일을 이용하여 크레인들이 이동하기 때문에 상호 교차가 불가능하다. 따라서 해상측 야드 크레인이 육상측 I/O point에서 컨테이너를 넘겨주거나 받을 수 없으며 마찬가지로 육상측 야드 크레인이 해상측 I/O point에서 컨테이너를 주고 받을 수 없다. 이런 교차 불가능한 설비의 특성으로 인해 선박에서 양하되거나 선박으로 적하되는 내부트럭의 작업은 해상측 야드 크레인이 처리하며, 게이트에서 반입되거나 게이트로 반출되는 외부트럭의 작업은 육상측 야드 크레인이 처리하는 특징을 갖는다.

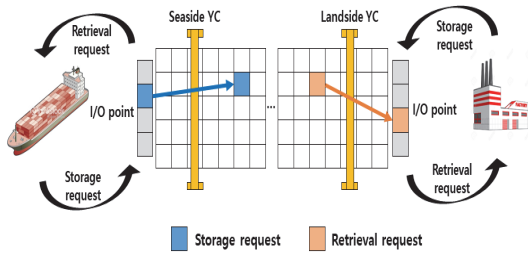


Fig. 5. Work Type of Yard Crane

야드 크레인이 하나의 주문을 처리하는데 있어 발생하는 공차이동 시간은 이전 작업 종료위치로부터 컨테이너 상차 위치까지 소요되는 시간으로 그 시간은 이전 작업의 종료 위치와 현재 작업의 시작위치에 따라 결정된다. 공차이동 시 크레인과 트롤리의 동시 이동이 가능하기 때문에 크레인 이동시간과 트롤리 이동시간 중 최대값을 갖게 된다. 컨테이너 상차시간은 컨테이너를 상차하기 위해 스프레더가 상하로 움직이는 시간으로, 상차할 컨테이너가 위치한 Tier에 의해 결정된다. 작업위치 이동시간은 상차한 컨테이너를 작업위치로 이동시키기 위해 소요되는 시간으로 공차이동 때와 마찬가지로 크레인 이동시간과 트롤리 이동시간 중 최대값을 갖는다. 마지막으로 크레인 하차시간은 컨테이너를 작업위치에 놓기 위해 스프레더가 상하로 움직인 시간으로, 컨테이너가 위치해야 하는 Tier에 의해 그 시간이 결정된다.

이를 정리하면 크레인 공차이동은 이전 작업의 종료위

지에서 다음 작업의 시작위치까지 소요되는 시간으로 크레인의 작업순서에 따라 변화한다. 반면 컨테이너 상차시간, 작업위치 이동시간, 크레인 하차시간은 이전 작업과는 관계없이 기 결정되어 있는 작업위치와 컨테이너가 위치한 Tier에 따라 결정된다. 공차이동, 컨테이너 상차, 작업위치 이동, 컨테이너 하차로 이루어지는 작업시간을 시공간 다이어그램(Time-Space Diagram)으로 표현하면 Figure 6과 같다.

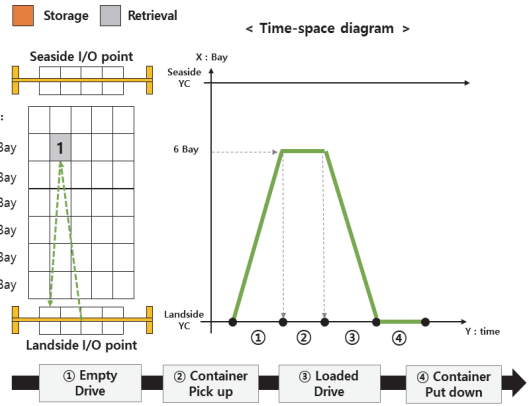


Fig. 6. Time-Space Diagram

육상측 크레인이 1번 회수주문을 처리할 경우 현재 야드 크레인의 위치에서 1번 컨테이너가 위치한 6Bay까지 이동하는데 소요되는 시간이 공차이동시간이며, 그림에서 ①에 해당된다. 6Bay에서 1번 컨테이너를 상차하기 위한 시간이 컨테이너 상차시간이고 그림에서 ②에 해당된다. 컨테이너 상차 후 육상측 I/O point에서 대기하고 있는 외부트럭에게 컨테이너를 전달하기 위해 I/O point로 이동하는 시간이 작업위치 이동시간이 되며, 그림에서 ③에 해당한다. I/O point에서 트럭에 컨테이너를 넘겨주는데 소요되는 시간은 컨테이너 하차시간으로 그림에서 ④에 해당된다.

3.3 야드 크레인 간섭문제

동일 레일을 사용하고 크기가 같은 야드 크레인 설비는 상호 교차가 불가능하기 때문에 크레인 간 충돌이 발생할 위험이 있다. 이런 경우를 크레인 간섭문제라고 하며 야드 크레인 스케줄링 문제에서 크레인 간섭은 반드시 회피되어야 하는 필수 고려요소이다. 만약 두 야드 크레인이 작업하는 도중 크레인 간 간섭문제가 발생할 것으로 예상되면 한 대의 야드 크레인은 작업을 처리하지 못하고 대기하게 된다. 이런 충돌을 피하기 위한 대기시

간을 크레인 간섭 대기시간이라고 한다. 간섭 대기시간은 크레인의 공차이동 전이나 작업위치 이동 전에 발생 할 수 있으며, 특히 야드 크레인의 이동 동선이 긴 수직 컨테이너 터미널에서 크레인 간섭 문제가 빈번하게 발생한다. 크레인 간섭 대기시간을 Time-Space Diagram으로 표현하면 Figure 7과 같다.

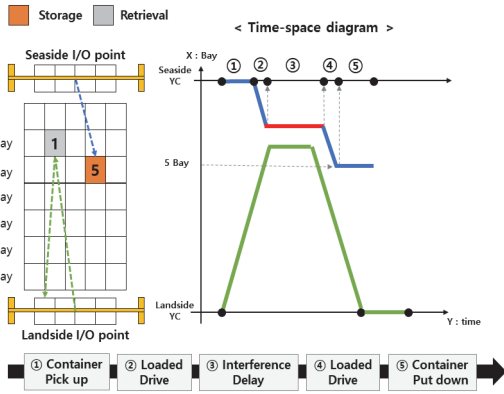


Fig. 7. Yard Crane Interference

육상측 크레인이 6Bay에 적재되어 있는 1번 컨테이너의 회수작업을 처리하고, 해상측 크레인이 5Bay에 적재해야 할 5번 컨테이너 저장주문을 처리해야 하는 상황에서 크레인 간 충돌을 피하기 위해서는 육상측 크레인이 위치한 Bay가 해상측 크레인이 위치한 Bay보다 작아야 한다. 하지만 Figure 7과 같은 경우 육상측 크레인이 위치한 Bay가 해상측 크레인이 위치한 Bay보다 커질 수 있는 상황이 발생하면 크레인 간 충돌이 발생한다. 이를 회피하기 위해 한 대의 크레인이 최소한의 안전거리를 확보할 수 있는 일정 위치에서 대기해야 한다. 그림에서 ③ 처럼 해상측 크레인이 간섭을 회피하기 위해 육상측 크레인이 6Bay에서 작업을 끝내고 I/O point로 이동하는 시점까지 대기하는 시간을 간섭 대기시간이라고 한다.

3.4 현업의 야드 크레인 작업 방식

현재 BNCT 터미널에 도착순서에 따라 작업을 진행하고 있다. 즉 해상측, 육상측 크레인 모두 야드 장치장에 도착한 트럭들의 순서에 따라 작업을 처리한다. 이를 Time-Space Diagram으로 표현하면 Figure 8과 같다.

현업에서 사용되고 있는 이 방식은 트럭의 도착순서를 기준으로 작업순서를 결정하기 때문에 크레인의 작업순서를 공차이동이나 간섭대기시간과 같이 크레인의 비효율적인 이동이 많이 발생한다는 단점이 있다. 현업에서의

이러한 처리방식은 야드 크레인의 낮은 생산성으로 인한 높은 대기시간과 터미널에 도착한 이후에 본인이 기다려야 하는 대기시간을 전혀 모르는 트럭 기사의 불만을 가중시킬 수 있다. 따라서 본 연구는 도착순서대로 작업을 할당하는 방식을 벗어나 두 크레인 간 충돌을 회피하는 제약하에서 효율적인 작업 스케줄을 생성하고 이를 사전에 트럭 기사에게 제공해주는 야드 크레인 스케줄링 방법을 제안하고자 한다.

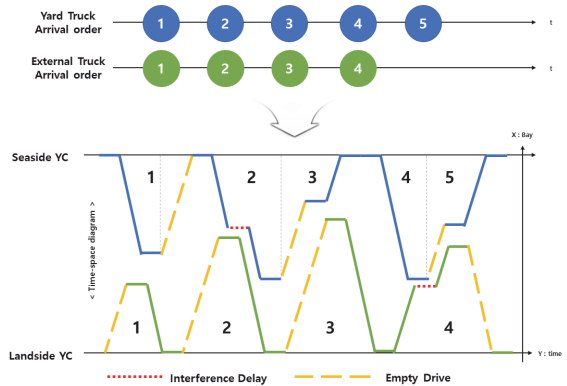


Fig. 8. Work Process in BNCT

4. 사전예약 정보(COPINO)를 이용한 야드 크레인 스케줄링

본 연구에서 제안하는 스케줄링 방법은 Fig 9와 같이 다음의 4가지 단계를 갖는다.

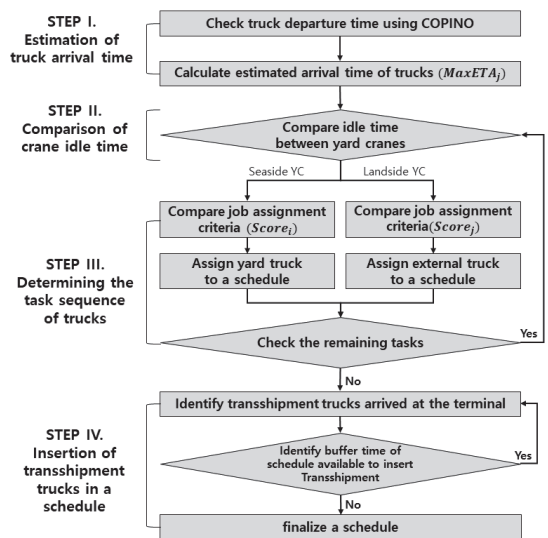


Fig. 9. Flow Chart of Yard Crane Scheduling

4.1 COPINO 정보를 활용한 외부트럭 도착 예정시간 추정

터미널로 컨테이너를 반입하거나 반출하기 위한 외부트럭은 출발하는 시점에 자신의 출발지 정보와 출발시간을 컨테이너 터미널에 전달하며 이를 COPINO 정보라고 한다. 이를 통해 컨테이너 터미널은 해당 외부트럭의 대략적인 도착시간은 알 수 있으나, 외부트럭의 이동시 발생하는 불확실성을 반영하지 못한다.

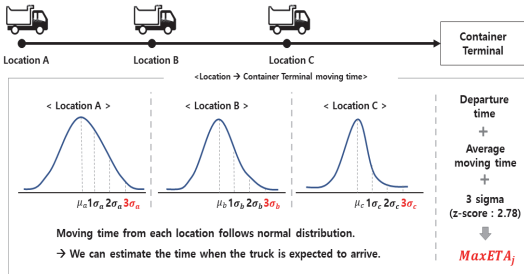


Fig. 10. Moving Time from Locations

터미널로 이동중인 트럭이 각 A, B, C 위치에 있다고 했을 때 각 지점에서 컨테이너 터미널까지 소요되는 시간은 Figure 10과 같이 정규분포를 따른다고 가정한다. 예를 들어 지점 A에서 컨테이너 터미널까지 소요되는 평균 시간은 30분이며, 6분의 표준편차를 갖는 정규분포를 따른다고 하면 지점 A를 통과한 트럭은 지점 A를 통과한 시간에서 평균 소요시간 + 3σ 이내로 도착할 것으로 예상할 수 있다. B 지점과 C 지점 또한 마찬가지로 식(1)과 같이 해당 지점 통과 시간에서 평균 소요시간 + 3σ 이내로 대부분의 트럭이 도착할 것이다. 본 연구에서는 예상 도착시간을 산정 시 터미널로부터 거리가 멀수록 평균 소요시간과 평균 소요시간의 불확실성에 따른 편차가 크다는 점을 반영했다. 또한 트럭은 각 지점을 통과할 때마다 평균 소요시간과 편차가 갱신된다고 가정하였다. 한편 지점 통과 시간에서 평균 소요시간 + 3σ 시간을 해당 트럭의 가장 늦은 도착시간, 즉 예상 도착시간의 최대치 $MaxETA_j$ 라고 정의했다.

$$MaxETA_j = \text{지점 통과시점} + \text{평균 소요시간} + 3\sigma \quad (1)$$

4.2 외부트럭 스케줄 할당 기준

외부트럭의 예상 도착시점과 작업정보를 알면 식(2)와 같이 야드 크레인의 공차이동시간과 간섭 대기시간

을 계산할 수 있고, 본 연구는 이를 최소화하기 위한 외부트럭의 작업을 할당한다. 만일 외부트럭의 도착시간이 늦을 경우 야드 크레인이 이전 작업을 마친 후 외부트럭을 기다려야 하는 상황이 발생할 수 있고 이러한 시간을 Buffer Time이라 정의한다. 즉 $Buffer Time_j$ 은 육상측 야드 크레인이 외부트럭 j를 기다려야 하는 시간으로 식(3)과 같이 야드 크레인의 이전 작업종료 시점인 육상측크레인유휴시점 seq 과 외부트럭j의 도착 예상시점인 $MaxETA_j$ 간의 간격으로 표현할 수 있다. 따라서 도착의 불확실성이 클수록 Buffer Time은 커지게 되고 이는 야드 크레인의 유휴시간이 증가를 의미한다.

$$Score_j = \text{공차이동시간}_j + \text{간섭대기시간}_j + Buffer Time_j \quad (2)$$

$$Buffer Time_j = MaxETA_j - \text{육상측크레인유휴시점}_{seq} \quad (3)$$

4.3 내부트럭 스케줄 할당 기준

내부트럭은 화주 소속의 외부트럭과는 다르게 컨테이너 터미널 사가 보유하고 있는 트럭이므로 도착순서와 작업순서가 변경되어도 서비스 수준에 큰 문제가 없다고 가정한다. 따라서 야드 장치장에 기 도착한 내부트럭들의 작업순서의 중요도는 동등하다고 가정한다.

내부트럭의 작업을 처리하는 해상 측 야드 크레인의 작업할당 기준은 야드 크레인의 공차이동과 간섭대기 시간, 트럭의 대기시간을 포함하는 Score로 결정한다. Score에 포함된 공차이동과 간섭대기 시간은 크레인의 비효율적 이동 및 대기를 평가하며, 트럭의 대기시간은 선행 도착 트럭의 작업 우선을 반영하기 위해 포함했다. 또한 두 시간의 상대적 크기를 반영하기 위해 보정계수 α_1 과 α_2 를 사용했다. 일반적으로 트럭의 대기시간이 공차이동 및 간섭 대기시간보다 큰 경우가 많으므로 α_1 을 상대적으로 큰 수로 두어 두 시간의 정규화를 위한 보정계수로 활용하였다.

$$Score_i = \alpha_1(\text{공차이동시간}_i + \text{간섭대기시간}_i) - \alpha_2 * \text{트럭대기시간}_i \quad (4)$$

4.4 스케줄링 할당 방법

첫 번째 스케줄은 내부트럭들 중 Score가 가장 낮은 트럭이 선택되며 그 이후의 스케줄 전개 과정은 야드 크레인의 유휴상태에 따라 Score가 낮은 작업을 할당한다.

Figure 11은 스케줄 할당 결과를 보여주고 있으며, 다음과 같이 모든 작업의 할당이 완료되면 수립된 스케줄에 따라 야드 크레인 작업이 진행된다. 육상측과 해상측 크레인 중 스케줄에 포함된 작업들이 모두 수행되면 그 이후에 생성된 작업을 토대로 스케줄이 재작성된다.

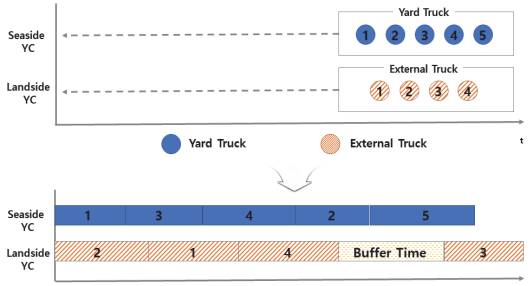


Fig. 11. Yard Crane Scheduling

4.5 타부두 환적트럭 할당 방법

본 연구에서 제안하는 스케줄링의 단점은 외부트럭 예상 도착 시점의 불확실성 때문에 야드 크레인의 Buffer Time이 발생할 수 있다는 점이다. 이는 총 작업시간의 증가 및 작업의 효율성을 저하시키는 문제를 일으킬 수 있다. 본 연구는 이를 보완하기 위해 상대적으로 작업량이 적은 타부두 환적 물량을 Buffer Time에 삽입하는 방안을 고안했다.

타부두 환적트럭은 타부두 컨테이너 터미널에서 양화된 컨테이너가 COPINO 정보 없이 자부두로 들어오는 트럭을 의미한다. 타부두 환적은 화주의 외부트럭보다 작업 중요도가 높기 때문에 우선적으로 처리되어야 하지만 타부두 내부트럭 이므로 예상 도착시간을 산정할 수 없어 스케줄 작성에 포함할 수 없다. 따라서 스케줄 대로 작업을 처리하는 과정에서 Buffer Time 발생 시 현재 터미널에 도착한 타부두 환적트럭을 Buffer Time 동안 처

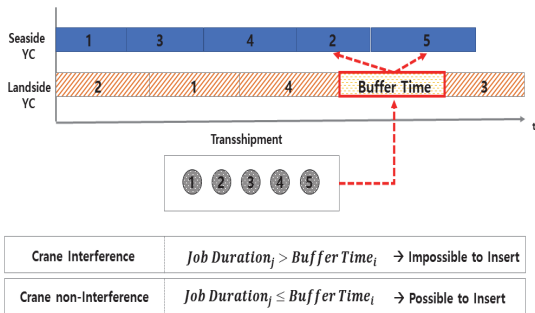


Fig. 12. Insert into the Schedule

리한다. Fig 12와 같이 처리 가능한 타부두 환적트럭 작업은 다음과 같다. 첫째, 이미 결정된 내부트럭의 야드 크레인의 작업과 간섭문제가 발생해서는 안 되고, 둘째, 환적트럭의 작업시간이 Buffer Time보다는 작아야 한다.

5. 시뮬레이션 모델

본 연구에서 제안하는 스케줄링 방식의 효과성을 검증하기 위해 설비 이동속도 데이터, 초기 야적장 상태 데이터, 컨테이너 반출입 데이터가 활용되었다. 야드 장치장 레이아웃은 36Bay, 10Row, 6Tier의 단일 야드 장치장으로 두 대의 야드 크레인이 2Bay의 안전거리 제약 하에서 작업하는 형태를 구현하였다. 아래 Table 1은 실험에 사용된 크레인, 트롤리, 스프레더의 설비 사양을 보여주고 있다.

Table 1. Specification of Device

Device	Speed(m/s)	Direction of Movement
Gantry	3	Bay
Trolley	1	Row
Spreader	1.5	Tier

Table 2는 실험 초기 야드 장치장에 쌓여 있는 컨테이너의 적재상태를 보여주고 있다. 각 컨테이너 별 적재 위치는 Block, Bay, Row, Tier로 나타내어 진다.

Table 2. Container Stacking Data

Container ID	Block	Bay	Row	Tier
MRKU5938107	2D	6	1	1
MRKU5403506	2D	6	1	2
MRSU3257766	2D	6	2	1
PONU7353134	2D	6	2	2
MRKU5824655	2D	6	2	3
MSCU5850826	2D	6	2	4
MRKU0232550	2D	6	2	5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
TCNU1037123	2D	6	3	2
TEXU7267030	2D	6	3	3
MSCU7167439	2D	6	3	4
TTNU5827582	2D	6	3	5
MSCU5914392	2D	6	4	1
TKRU4085063	2D	6	5	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Table 3는 내부트럭과 외부트럭에 적재된 컨테이너들의 반출입 데이터를 보여주고 있다. 장치장에 도착하는 작업종류는 크게 수입, 수출, 환적으로 분류 될 수 있으며 실제 내부트럭의 도착시점을 반영하기 위해 데이터 상의 도착시점을 기준으로 내부트럭 작업이 생성되도록 구현했으며, 외부트럭의 경우 COPINO 입력시간을 기준으로 작업이 생성된다. 또한 트럭의 작업 종류 및 작업 위치가 야드 크레인 이동에 큰 영향을 미치기 때문에 실제 데이터와 동일한 작업 종류 및 위치를 갖도록 시뮬레이션 모델에 구현했다.

본 연구의 시뮬레이션 모델은 21개의 야드 장치장 중 1개의 야드 장치장을 구현하였다. 이는 하나의 야드 장치장에서 작업하는 두 대의 야드 크레인의 작업순서는 다른 장치장에서 작업하는 야드 크레인의 작업순서와는 무관하게 결정되기 때문에 하나의 장치장에서 작업하는 야드 크레인 스케줄링이 효율적이라면 전체 야드 장치장으로 확대했을 때 그 효과가 배로 증가한다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 전체 야드 장치장이 아닌 하나의 야드 장치장을 대상으로 시뮬레이션 모델을 구현하였으며, 실제 BNCT의 야드 장치장 레이아웃을 이용하여 Bay, Row, Tier, I/O point 등을 구현하였다.

Table 3. import/export data of container

Container	Bay	Row	Tier	COPINO time	Arrive time
1	45	5	4	-	092614
2	86	10	5	-	093105
3	21	5	3	082341	094053
4	51	2	5	091517	094117
5	49	9	1	-	094436
6	83	8	5	-	095230
7	83	4	5	074532	095328
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
120	9	10	6	100821	103030
121	61	7	1	-	103220
122	50	10	5	073546	104036
123	18	10	6	-	105012
124	68	7	2	-	105226
125	32	1	3	-	105424
126	14	9	2	092344	110159
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
500	56	2	4	084526	110410
501	70	2	2	-	110844
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

본 연구는 시뮬레이션 모델을 검증하기 위해 야드 크레인의 작업 처리량을 기준으로 실제 처리량과 시뮬레이션 모델의 처리량을 비교하여 시뮬레이션 모델이 실제와 얼마나 유사한지를 검증하였다. 이를 위해 식(5)와 같이 실제 장치장의 작업 처리량과 시뮬레이션 모델의 작업 처리량 간의 평균절대비율오차(MAPE : Means Absolute Percentage Errors)를 이용하였다. 여기서 처리량^A는 시간대 별 실제 처리량을 의미하며, 처리량^P는 시뮬레이션의 시간대 별 처리량을 의미하며, MAPE가 5% 이하일 경우 모델의 예측력은 우수하다고 볼 수 있다.

$$MAPE = \frac{1}{n} \times \sum_{t=1}^n \left| \frac{\text{처리량}_t^A - \text{처리량}_t^P}{\text{처리량}_t^A} \right| \times 100\% \quad (5)$$

2019년 7월 3일부터 5일까지 3일 동안 초기 야적장 적재 상태 데이터와 컨테이너 반출입 데이터를 활용하여 실측치와 시뮬레이션의 처리량을 비교한 결과 Figure 13과 같이 시간대 별 처리량 기준 4.5%의 오차가 난 것을 확인했으며, 이를 통해 본 연구의 모델이 실제 야드 크레인 프로세스를 충분히 반영하고 있다고 볼 수 있다.

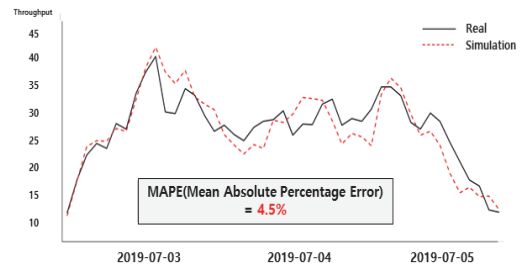


Fig. 13. Throughput over time

6. 실험결과

시뮬레이션 모델 개발 및 실험 환경은 intel(R) Core (TM) i5-6600 쿼드코어 3.30GHz와 8GB RAM, 64-bit Window 10 Pro 하에서 이루어 졌으며, 시뮬레이션 모델 개발 패키지 Arena 15.0을 사용하였다.

야드 장치장의 효율성을 결정하는 평가지표는 트럭 생산성과 야드 크레인 생산성으로 분류된다. 야드 크레인의 생산성 평가지표로는 평균 작업 처리시간과 공차이동 및 간섭 대기시간을 활용하였으며, 트럭의 생산성 평가지표로는 Table 4와 같이 내부트럭 대기시간과 외부트럭 체감 대기시간을 사용하였으며, 2019년 7월 중 4일간의

Peak 시점 데이터를 사용하였다. 본 연구에서는 평가지표를 기준으로 트럭의 도착 시점을 기준으로 작업 순서가 결정되는 현업의 방식과 본 연구에서 제안하는 스케줄링 방식을 비교하였다.

Table 4. Key Performance Indicator

	KPI	Description
YC	Process time	Average time to process one job
	Empty Drive time	Average time to pick up container
	Interference Delay time	Average time the crane waited to avoid a crash
Truck	Waiting time of yard truck	Average time the yard truck waited
	Waiting time of external truck	Average time the external truck waited

야드 크레인의 작업속도를 의미하는 평균 작업처리 시간은 터미널 내 병목공정인 야드 크레인의 효율성과 관련이 있다. 현업에서 사용 중인 작업처리 방식과 본 연구에서 제안하는 스케줄링 방식의 평균 작업 처리시간을 비교한 결과는 Table 5와 같다.

Table 5. Process time of Yard Crane

	BNCT	Scheduling	Change rate
Avg. Process time	2m 53s	2m 40s	-8%
Avg. Empty Drive time	38s	30s	-21%
Avg. Interference Delay time	17s	12s	-28%

제안한 방식의 평균 작업처리 시간은 약 8%가량 개선된 2분 40초를 보여주고 있으며, 공차이동과 간섭대기 시간 또한 현행 대비 약 20% 가량 개선된 결과를 확인할 수 있었다. 이는 본 연구에서 제안한 스케줄링의 작업할당 기준이 공차이동 시간과 간섭대기 시간을 고려함으로써 현행 방식보다 개선된 결과값이 나타났다고 할 수 있다. 평균 작업처리 시간의 개선은 도착 예정인 외부트럭을 포함한 내외부 트럭을 모두 고려하여 작업스케줄을 수립한 효과에 기인된다. 간섭대기 시간이 공차이동 시간보다 개선효과가 더 큰 것으로 미루어 보아 평균 작업처

리 시간의 개선에 공차이동 시간의 감소가 더 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

Table 6. Waiting time of Yard Truck

	BNCT	Scheduling	Wait time decreasing ratio
Average	9m 16s	7m 23s	-21%
Deviation	2m 45s	2m 13s	-19%

Table 6은 내부트럭의 평균 대기시간을 보여주고 있다. 본 연구에서 제안한 방법은 외부트럭의 효과적인 작업순서를 결정하는데 초점을 맞추고 있기 때문에 상대적으로 내부트럭의 작업순서의 비효율성을 유발할 수 있다고 판단하였다. 이를 검증하기 위해 내부트럭 평균 대기시간 비교가 실험되었다.

제안된 방식이 현행보다 약 21% 개선되는 것을 확인되었다. 이는 내부트럭과 외부트럭의 작업할당 균형이 효과적으로 이루어 질 경우 내부트럭 또한 생산성이 개선될 수 있음을 보여줄 수 있는 결과라고 하겠다. 이는 결국 공차이동과 간섭대기 시간이 줄어든 만큼 내부트럭의 작업을 효율적으로 처리한 결과라고 볼 수 있으며, 블록 내에서 발생하는 내부트럭의 대기시간이 감소하면서 컨테이너 터미널의 주요 생산성 평가요소인 선박 체류시간 또한 개선될 것이라고 예상 할 수 있다.

본 연구에서는 체감대기시간 개념을 적용하여 외부트럭의 대기시간을 비교하였다. 체감 대기시간의 크기는 트럭기사들이 예상한 대기시간보다 더 오래 기다리는 초과분을 의미한다. 작업 예상시점을 받지 못하고 터미널에 도착하는 현행 방식의 경우 트럭 기사는 평균 대기시간만큼 기다린 이후 자신의 작업이 처리 받을 것이라고 기대한다. 따라서 평균 대기시간보다 더 오래 기다린 시간이 체감 대기시간이 된다. 반면에 본 연구에서 제안하는 방식은 터미널에 도착 전 트럭 기사가 작업 예상시점을 사전에 인지하기 때문에 터미널에 도착 후 작업 서비스를 받을 때 까지 대기한 시간으로 정의할 수 있다. Table 7은 외부트럭의 체감 대기시간 결과를 보여주고 있다.

실험 결과 체감 대기시간은 두 방식 모두 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 하지만 현행 방식은 터미널 내의 총 대기시간이 3분 50초 정도로 크다는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 체감 대기시간의 최대치를 비교한 결과에서는 제안된 방법은 평균 대비 약 2.6배 가 최대치였으나, 현행 방식의 경우 평균 대비 6배를 초과하는 체감 대기시간이 나타나는 경우가 있음을 확인할 수 있었다. 이는 도

Table 7. Excess Waiting time of External Truck

	BNCT		Scheduling
	Actual waiting time	Excess Waiting time	Excess Waiting time
Average	3m 50s	1m 35s	1m 28s
Deviation	2m 53s	2m 24s	51s
Max	13m 42s	8m 52s	3m 59s

착 예정시간의 사전 인지가 터미널 내 트럭의 대기시간의 편차를 줄여 안정적인 서비스 수준을 제공해 줄 수 있음을 보여주는 결과라고 하겠다.

그 밖에 도착 예정 트럭을 포함한 스케줄 생성은 터미널로 향하고 있는 트럭 기사에게 작업을 시작할 수 있는 대략적인 시간을 통보해 줄 수 있으므로 해당 시간에 맞추어 터미널로 도착할 수 있도록 유도할 수 있는 효과가 있다. 이는 터미널 내 혼잡도를 개선시킬 수 있는 효과로 기인될 수 있다.

7. 결론

본 연구는 컨테이너 터미널의 서비스 수준에 영향을 미치는 야드 장치장을 대상으로 야드 크레인의 효율적인 작업순서를 결정하는 연구를 진행하였다. 본 연구의 기여는 다음과 같다.

첫째, 도착 예정인 트럭을 포함하여 작업순서를 결정하기 위해 예상 도착시간을 측정하는 방법을 제안했다. 둘째, 야드 크레인 간 간섭을 회피하기 위한 작업 동선을 반영하였다. 그리고 마지막으로 스케줄 작성 시 발생하는 유휴시간을 제거하기 위한 타부두 환적작업의 추가 삽입 방법을 제안했다는 점을 들 수 있다. 현행 작업방식과의 비교를 통해 평균 작업처리 시간의 개선과 공차이동 및 간섭대기시간의 개선 효과를 확인할 수 있었고, 뿐만 아니라 체감 대기시간의 개념을 통해 트럭 기사가 실제 체감하는 대기시간의 개선도 가져올 수 있음을 확인하였다.

향후 연구과제로 스케줄 재생성하는 시점 및 재생성 방법에 대한 보다 정교한 알고리즘 개발과 야드 장치장에서의 효과적인 작업이 터미널 전체 생산성에 미치는 영향에 대한 정량적인 효과분석이 필요할 것으로 판단된다.

References

- Cao, J. X., Lee, D. H., Chen, J. H., & Shi, Q. (2010). *The integrated yard truck and yard crane scheduling problem: Benders' decomposition-based methods. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(3), 344-353.
- Carlo, H. J., & Martínez-Acevedo, F. L. (2015). *Priority rules for twin automated stacking cranes that collaborate. Computers & Industrial Engineering*, 89, 23-33.
- Chen, L., Langevin, A., & Lu, Z. (2013). *Integrated scheduling of crane handling and truck transportation in a maritime container terminal. European Journal of Operational Research*, 225(1), 142-152.
- Choe, R., Kim, T. S., Kim, T., & Ryu, K. R. (2015). *Crane scheduling for opportunistic remarkshaling of containers in an automated stacking yard. Flexible Services and Manufacturing Journal*, 27(2-3), 331-349.
- Gharehgozli, A. H., Laporte, G., Yu, Y., & de Koster, R. (2014). *Scheduling twin yard cranes in a container block. Transportation Science*, 49(3), 686-705.
- Gharehgozli, A. H., Yu, Y., de Koster, R., & Udding, J. T. (2014). *An exact method for scheduling a yard crane. European Journal of Operational Research*, 235(2), 431-447.
- Gharehgozli, A. H., Vernooij, F. G., & Zaerpour, N. (2017). *A simulation study of the performance of twin automated stacking cranes at a seaport container terminal. European Journal of Operational Research*, 261(1), 108-128.
- Hu, Z. H., Sheu, J. B., & Luo, J. X. (2016). *Sequencing twin automated stacking cranes in a block at automated container terminal. Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 69, 208-227.
- Phan, M. H., & Kim, K. H. (2015). *Negotiating truck arrival times among trucking companies and a container terminal. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 75, 132-144.
- Speer, U., John, G., & Fischer, K. (2011, September).

Scheduling yard cranes considering crane interference. In International Conference on Computational Logistics (pp. 321-340). Springer, Berlin, Heidelberg.
Speer, U., & Fischer, K. (2016). *Scheduling of different automated yard crane systems at container terminals.*

Transportation Science, 51(1), 305-324.
Yan, W., Huang, Y., Chang, D., & He, J. (2011). *An investigation into knowledge-based yard crane scheduling for container terminals. Advanced Engineering Informatics*, 25(3), 462-471.



황 성 범 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-8094-4674> / hwangsb12002@gmail.com)

2017 광운대학교 경영학과 학사
2019 광운대학교 경영학과 석사
2019~ 현재 광운대학교 경영학과 박사과정

관심분야 : Simulation, Operation Research



정 석 재 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-7081-7567> / 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



윤 성 욱 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-4495-2364> / giantguard@naver.com)

2013 광운대학교 경영학과 학사
2015 광운대학교 경영학과 석사
2019 광운대학교 경영학과 박사
2019~ 현재 현대경제연구원 연구위원

관심분야 : Simulation and Operation, Closed Loop Supply Chain, Marketing Strategy