

컨테이너 터미널에서 블록의 레이아웃을 고려한 야드 크레인의 주기시간 모형

이병권 · 김갑환[†]

부산대학교 산업공학과

Cycle Time Models for Yard Cranes Considering Block Layouts in Container Terminals

Byung Kwon Lee · Kap Hwan Kim

Department of Industrial Engineering, Pusan National University, Busan 609-735

Various different types of yard cranes are used in container terminals. Examples are rubber tired gantry cranes, rail mounted gantry cranes, overhead bridge cranes, dual rail-mounted gantry cranes, and automated stacking cranes. The kinematics and handling characteristics of these yard cranes are different from each other. This study analyses characteristics of generic types of yard cranes which represent various yard cranes in practice being used in several types of block layouts. Considering specifications of yard cranes and block layouts, expected cycle times and variances of the cycle time are estimated for different handling activities.

Keywords: Yard Crane, Handling Characteristics, Block Layouts, Cycle Times

1. 서론

컨테이너 터미널은 항공 터미널, 철도 터미널 그리고 트럭 터미널 등과 함께 물류체계를 이루는 주요 수송지점으로서 항만에 위치하여 대부분의 수출입 화물의 취급 저장소 및 운반 창고로서의 역할을 하는 산업시설이다.

컨테이너 터미널에서 이루어지는 주요 작업은 크게 3가지로 분류할 수 있다. 첫 번째는 트럭에 의해 운반된 컨테이너를 장치장에 저장하거나 장치장에 저장된 컨테이너를 트럭으로 인출하는 작업이고 두 번째는 선박으로부터 장치장으로 컨테이너를 양하하거나 혹은 그 반대로 적하하는 작업이다. 마지막으로, 위의 2가지 작업을 위해 장치장이라는 공간에 컨테이너를 일시적으로 저장하는 작업이다.

특히, 장치장은 블록(block)이라는 저장 공간의 집합으로 볼 수 있는데, 각 블록마다 단일 혹은 복수의 야드 크레인을 운용하여 컨테이너를 취급하는 다양한 작업을 수행할 수 있다. 예

를 들어, 트럭에 컨테이너를 내려놓거나 집어 올릴 수 있으며 장치공간에 컨테이너를 적재하거나 필요한 시기에 적재되어 있는 컨테이너를 인출할 수도 있다.

현존하는 많은 야드 크레인은 그 기계적인 동작 특징과 작동 방법에 따라 몇 개의 종류로 구분할 수 있다. 대표적으로는 RTGC(Rubber Tired Gantry Cranes), RMGC(Rail Mounted Gantry Cranes), OHBC(Overhead Bridge Cranes), DRMGC(Dual Rail Mounted Gantry Cranes), ASC(Automated Stacking Cranes) 등을 들 수 있다. 그러나 이처럼 다양한 야드 크레인이 존재하고 기계적 성능이 뛰어나더라도, 야드 크레인의 동작 특징과 장치장 내 블록 레이아웃의 특징을 보다 면밀히 분석하여 사용 환경에 적합한 야드 크레인을 선택하는 것이 더욱 중요한 사안으로 볼 수 있다.

현재까지의 연구동향을 살펴보면 야드 크레인의 성능 평가를 위한 연구가 상대적으로 많은 주의를 끌지 못했음을 알 수 있다. Kim and Kim(2002)은 야드 크레인의 대수와 배치를 고

본 연구는 해양수산부의 '지능형 항만물류 시스템 기술개발' 사업의 일환으로 수행되었음.

[†] 연락저자 : 김갑환, 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지 부산대학교 산업공학과, Tel : 051-510-2419, Fax : 051-512-7603,

E-mail : kapkim@pusan.ac.kr

2006년 07월 접수; 2006년 07월 수정본 접수; 2006년 08월 게재 확정.

러한 몇 개의 취급 시간 모형을 추정하였고 de Castilho and Daganzo(1993)는 한 베이(bay)에서 1개의 컨테이너를 인출하기 위한 크레인 운동 회수의 기대값과 분산을 추정하기 위한 간단한 수식을 제안하였다. 또한 Hu *et al.*(2005)은 컨테이너 터미널에서 사용가능한 새로운 종류의 자동창고(AS/RS)를 제안하고 컨테이너를 취급하기 위한 이동시간의 기대값을 구하는 수식모형을 제안하였다.

본 연구는 블록의 레이아웃을 몇 개의 가능한 형태로 분류하고 각 블록에서 사용가능한 야드 크레인의 성능을 평가하기 위한 상세 취급시간 모형을 제안하고자 한다. 제안하는 여러 모형을 사용하여 야드 크레인의 성능을 비교적 정확하고 신속하게 평가할 수 있을 것이므로, 터미널의 요구조건에 가장 적합한 야드 크레인을 선택하기 위한 척도로서 사용할 수 있을 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 야드 크레인과 블록 레이아웃의 종류와 그 특징들에 대해서 알아보고 3장부터는 2장에서 언급한 블록 레이아웃에 따른 각 작업별 주기 시간을 수식으로 표현한다. 3장에서 나타난 여러 수식들은 4장의 수치 예제를 통해 각 작업별 주기시간을 비교·분석해 보고 5장에서 결론을 맺는다.

2. 야드 크레인과 블록 레이아웃의 종류 및 특징

컨테이너 터미널에서 장치장 작업을 수행하기 위해서 다양한 장비가 활용될 수 있으나, 일반적으로 단순하면서도 높은 생산성을 제공하는 야드 크레인이 주로 사용된다. 이러한 야드 크레인은 장치장 내 블록마다 1~2대로 운영되고 있으나 각 블록 레이아웃별로 작업방식이 조금씩 다르다. 따라서 장비의 기계적 특성과 블록 레이아웃을 동시에 고려하여 야드 크레인의 작업 성능을 평가해 보고 가장 적합한 야드 크레인을 사용하는 것이 보다 바람직할 것이다.

2.1 야드 크레인의 종류 및 특징

컨테이너 터미널에서 가장 흔히 사용되는 야드 크레인은 RTGC로서 이는 수동으로 조작되고 타이어로 된 대형 바퀴를 이용하여 블록 사이를 유연하게 이동할 수 있다는 장점이 있다. RTGC는 주로 선석에 대해 수평방향으로 배치된 형태의 블록에서 사용된다. 그리고 컨테이너 취급 작업을 위해 트럭이 크레인 작업을 대기할 수 있는 위치는 블록의 측면에 위치한다. 이러한 트럭과의 연계작업 위치는 흔히 TP(Transfer Point)로 지칭된다.

DRMGC는 독일 함부르크에 위치한 CTA(Container Terminal Altenwerder)에서 사용되고 있는 야드 크레인으로서 크기가 서로 다른 2대의 크레인으로 구성된다. 두 크레인은 한 블록에서 운용되며 작은 크레인이 큰 크레인 밑으로 통과할 수 있다는

장점이 있다. 따라서 블록에서의 컨테이너 취급 처리율을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 야드 크레인간의 간섭을 줄일 수 있다. 또한 두 크레인 중 하나의 크레인이 고장 날 경우에도 나머지 크레인만으로 작업을 지속할 수 있다.

CTA는 대표적인 자동화 컨테이너 터미널로서 야드 크레인 과 이송장비가 자동화된 완전 자동화 터미널이다. 내부 이송장비로서는 AGV(Automated Guided Vehicle)를 사용하고 있으며 DRMGC와 AVG간의 연계작업은 자동으로 이루어진다. 단, 이송장비에 대한 컨테이너 상하차 작업의 경우에는 각 블록의 끝단에서 자동으로 이루어지나 외부트럭의 경우에는 통제실에서 원격으로 작업한다.

ASC는 네덜란드의 로테르담에 위치한 ECT(European Combined of Terminal)에서 사용되고 있는 야드 크레인이다. ECT에서는 CTA보다 블록의 길이가 상대적으로 짧기 때문에 1개의 블록에는 단지 1대의 ASC만 운용된다. 따라서 크레인이 고장 날 경우에는 해당 크레인은 견인되고 구조(rescue)용 크레인이 투입되어 작업을 지속한다. ECT도 CTA와 동일하게 자동화 컨테이너 터미널로서 야드 크레인은 자동으로 운영되고 있다. 내부 이송장비나 외부트럭과의 연계작업은 CTA에서와 동일하게 이루어진다.

동일 크기의 2대의 RMGC가 운용되는 터미널로는 영국의 테임즈에 위치한 TMP(Thames port)를 들 수 있다. 이 경우, 1대의 RMGC가 고장 난다면 해당 RMGC는 견인되고 나머지 크레인만으로 작업을 지속할 수 있다. TMP 또한 자동화된 터미널로서 야드 크레인은 자동으로 운영된다. 내부 이송장비는 매거진 존(magazine zone)에서 차량에 부착된 리모컨을 이용하고, 외부트럭에 대한 컨테이너 상하차 작업은 조이스틱을 이용하여 블록의 끝단에서 수동으로 조작한다.

OHBC는 싱가포르의 PPT(Pasir Panjang Terminal)에서 환적 컨테이너의 취급을 위해 사용되는 야드 크레인이다. 현존하는 야드 크레인 중 가장 고가의 장비이나 고생산성을 갖추고 있다는 장점이 있다. OHBC를 사용하는 블록에서는 블록의 좌우에 크레인 이동을 위한 구조물이 있어 내부 이송장비의 주행로는 블록의 중앙에 위치한다. 따라서 크레인과의 연계작업 위치는 블록의 중앙(길이 방향으로로는 측면)에 있으며 컨테이너의 상하차 작업은 CTA처럼 중앙 통제실에서 원격으로 조종한다.

위의 CTA와 TMP에서 사용되는 RMGC를 라멘 형(rahmen type)이라 하여 내부 이송장비나 외부트럭이 크레인의 기둥 내부로 진입하여 작업할 수 있는 반면 캔틸레버 형(Cantilever type)의 RMGC는 크레인의 기둥 외부에서 작업할 수 있는 특징이 있다. 이와 같은 캔틸레버 형 RMGC는 홍콩의 HIT(Hong Kong International Terminal)에서 사용되고 있으며 내부 이송장비와의 연계작업 위치는 야드 크레인의 측면에서 이루어진다. 캔틸레버 형 RMGC는 주로 TP가 블록의 측면에 위치한 경우에서 사용된다.

지금까지는 다양한 종류의 야드 크레인에 대해서 살펴보았

다. 그러나 이러한 야드 장비의 효과적인 운영을 위해서는 장비가 운영되는 블록의 레이아웃에 대한 고려가 있어야 한다. 이는 블록의 레이아웃에 따라 사용가능한 야드 크레인의 종류가 한정되기 때문이다. 이러한 블록의 레이아웃은 블록 내에서 TP의 위치에 의해 결정된다.

2.2 블록 레이아웃의 종류 및 특징

본 연구에서는 TP의 위치에 따른 블록의 레이아웃을 크게 3가지로 분류하고 각각의 블록 유형에 따라 야드 크레인의 운영 특징을 설명하고자 한다. 더불어 각 블록 레이아웃에 따라 적합한 야드 크레인의 조합을 제시하고자 한다.

<Figure 1>은 일반 컨테이너 터미널에서 가장 흔히 사용되는 블록의 레이아웃이다. 외부트럭과 내부 이송장비는 블록을 구성하는 각 베이(bay)의 측면에 있는 TP에서 크레인 작업을 대기한다. 이 경우 TP는 물리적인 위치가 아닌 논리적인 위치이다. 즉, 각 베이의 측면에 TP 공간이 따로 마련된 것이 아니라 트럭의 운전자가 작업 베이의 측면에 직관적으로 주차하여 크레인 작업을 대기하는 장소이다. 이러한 유형의 블록에서는 RTGC, 캔틸레버 형 RMGC, 라멘 형 RMGC, OHBC가 사용될 수 있다.

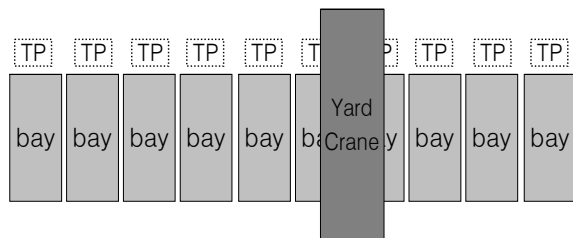


Figure 1. A block with TP at a side of each bay

두 번째 블록 레이아웃은 <Figure 1>과 매우 유사하나, TP의 개수가 베이의 개수보다 확연히 작은 구조이다. 이 경우, 베이의 측면에 위치한 TP는 물리적인 작업 공간을 가지고 있으며 내부 이송장비나 외부트럭은 항상 지정된 TP에 주차하여 크레인 작업을 기다린다. 특히 사항은 TP의 개수가 베이의 개수보다 작기 때문에 야드 크레인의 갠트리(gantry) 이동이 불가피하다. 즉, 반입 작업의 경우 외부트럭으로부터 컨테이너를 상차하여 목적 베이까지 컨테이너를 들고 갠트리 이동을 해야 한다. 캔틸레버 형 RMGC, 라멘 형 RMGC, OHBC가 사용될 수 있다.

마지막으로 <Figure 2>는 자동화 컨테이너 터미널에서 가장 많이 사용되는 블록의 레이아웃이다. 이러한 블록 레이아웃은 선석에 대해 수직으로 배치되어 있고 해측(sea side, 바다방향)과 육측(land side, 육지방향)에는 각각 4~7개의 TP가 위치해 있다. 육측에 위치한 TP는 외부트럭이 대기하는 장소이고 해측에 위치한 TP는 내부 이송장비가 대기하는 장소로서 블록

을 기준으로 양 끝단의 차량 흐름이 분리되어 있다.

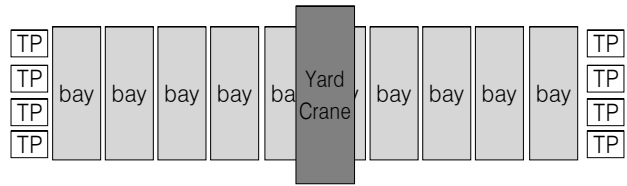


Figure 2. A block with TP at the ends of a block

<Figure 2>와 같은 블록 레이아웃의 경우, 외부트럭이 TP에 도착하면 임의의 위치에 있던 야드 크레인이 TP까지 갠트리 이동한다. 작업 TP에서 컨테이너를 상차하고 나면 야드 크레인은 다시 작업 위치까지 갠트리 이동을 한다. 즉, 단일 작업에 대해서 야드 크레인은 왕복운행(round-trip)을 해야 한다. 라멘형 RMGC와 ASC를 예로 들 수 있다.

다음 장부터는 위에서 언급한 3개의 블록 레이아웃별로 사용가능한 야드 크레인의 성능평가를 위한 취급시간 모형을 수리적으로 기술한다.

3. 야드 크레인의 작업 주기시간(Cycle Time)

야드 크레인의 주기시간은 장비의 종류와 그에 따른 기술적 특징 및 자동화 정도에 영향을 받는다. 취급 장비의 성능을 표현하기 위해 흔히 사용되는 방법으로는 수리적 모형을 개발하여 주기시간의 기대값과 분산을 추정하는 것이다.

수리적 모형이 아닌 시뮬레이션을 사용한다면 보다 정밀한 주기시간을 도출할 수 있겠으나, 단시간에 평가를 할 수 있다는 것, 변수(variables)들의 상호의존성(interdependency)을 분석해 볼 수 있다는 점, 논리적인 의사결정의 근거를 마련할 수 있다는 것과 같은 수리적 접근방법으로서의 이점을 감안한다면 의미 있는 결과를 마련할 수 있을 것이다. 주로 자동창고(AS/RS)와 관련된 많은 기존 연구에서 주기시간의 기대값을 추정하고 이를 성능 평가를 위한 방법으로 제안하고 있다. 본 연구에서는 수리적 모형의 특징을 최대한 활용하면서 통계적인 변동을 성능 평가에 포함시키기 위해 분산을 추정하여 제시한다.

본 연구에서는 컨테이너 터미널의 주요작업(반입, 적하, 양하, 반출)별로 야드 크레인의 성능을 추정하기 위하여 주기시간의 기대값과 분산을 추정하는 방법을 수리적으로 제시하고자 한다. <Table 1>은 본 연구에서 제시하는 여러 수식에서 사용되는 기호들을 정리한 것이다. <Table 1>에서 나열된 여러 상수 및 변수들의 보충설명은 <Figure 3>과 <Figure 4>를 이용하여 시각적으로 설명할 수 있다.

스프레드의 최상 높이에서 트럭의 새시까지 상하이동 거리의 기대값과 분산을 구하는 수식은 부록 1에서 상세히 서술하기로 한다.

Table 1. Notations

기 호	설 명
b	베이(bay)의 수
t	베이 내 단(tier)의 수
r	베이 내 열(row)의 수
m	블록의 한쪽 측면에 위치한 TP의 개수
l_0	동일 베이 내 연속한 적하작업의 수
c_w	컨테이너의 너비(m)
c_h	컨테이너의 높이(m)
c_l	컨테이너의 길이(m)
d_c	새시(트럭)의 중심선에서 베이의 끝 열까지의 거리(m)
d_b	연속한 베이간의 거리(간격)(m)
d_r	연속한 열 간의 거리(간격)(m)
h_c	새시의 높이(m)
h_{max}	스프레드의 최상 높이(m)
v_g^e	야드 크레인의 무부하(empty) 이동 속도(m/min)
v_g^l	야드 크레인의 부하(loaded) 이동 속도(m/min)
v_t^e	트롤리(trolley)의 무부하 이동 속도(m/min)
v_t^l	트롤리(trolley)의 무부하 이동 속도(m/min)
v_h^e	스프레드의 무부하 상하(hoisting) 이동 속도(m/min)
v_h^l	스프레드의 부하 상하(hoisting) 이동 속도(m/min)
D_t^h	스프레드의 최상 높이에서 적재되어 있는 대상 컨테이너까지의 이동거리(m)
$E(D_t^h)$	D_t^h 의 기대값(m), $E(D_t^h) = h_{max} - c_h \frac{t+1}{2}$ (부록 1. 참고)
$Var(D_t^h)$	D_t^h 의 분산(m ²), $Var(D_t^h) = c_h^2 \frac{t^2-1}{12}$ (부록 1. 참고)
d_{max}^h	스프레드의 최상 높이에서 새시까지의 거리, $d_{max}^h = h_{max} - (h_c + c_h)$
b_l	블록의 길이(m), $b_l = (c_l + d_b)(b-1)$
b_w	베이의 너비(m), $b_w = (c_w + d_r)(r-1)$
s_{rt}	베이의 적재용량, $s_{rt} = r \times t - (t-1)$, $t-1$ 은 이적을 위한 필요 공간이므로 공제(deduction)함
R_{rt}	r 과 t 로 구성되는 베이에서 임의의 컨테이너를 인출하기 위해 발생하는 재취급 횟수
$E(R_{rt})$	R_{rt} 의 기대값, $E(R_{rt}) = \frac{t-1}{4} + \frac{t+2}{16r}$
$Var(R_{rt})$	R_{rt} 의 분산, $Var(R_{rt}) = -0.0186r + 0.0585t^2 + 0.2169$

Kim(1997)은 동일 베이에 적재된 컨테이너는 임의의 순서로 인출된다는 가정 하에서, 적재되어있는 모든 컨테이너를 인출하는 동안 1회 인출시마다 발생하는 재취급의 회수의 기대값을 추정할 수 있는 간단한 수식을 제안하였다. 그는 베이

를 구성하는 열과 단의 수를 이용한 함수 형태로 기대 재취급 회수를 구하는 수식을 간단히 표현하였다. Kim(1997)의 연구를 바탕으로 본 연구에서는 재취급 회수의 분산을 부록 3과 같이 유도하여 야드 크레인의 작업 주기시간을 구하는데 이용할

것이다.

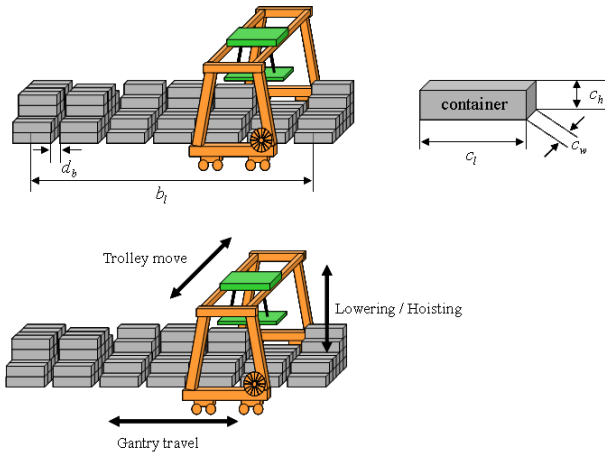


Figure 3. Illustrations of notations on blocks

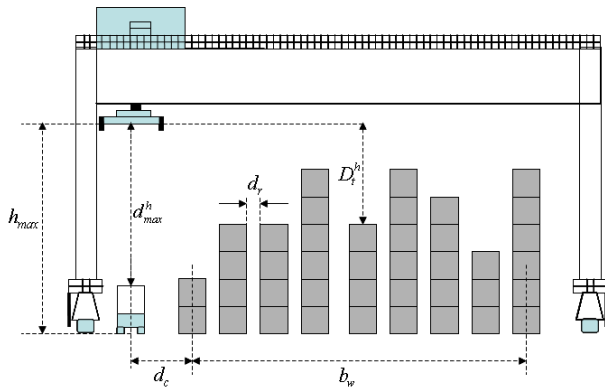


Figure 4. Illustrations of notations on a bay

Table 2. Illustrations of codes for describing handling elements

위치	분류	기호	설명
First digit	동작의 종류	G	갠트리(gantry) 이동
		T	트롤리(trolley) 이동
		H	상하(Hoisting) 이동
		S	스프레드(spreader)
Second digit	스프레드의 상태 (state/motion)	E	무부하(empty) 상태
		L	부하(load) 상태
		R	놓기(releasing) 상태
		G	잡기(grasping) 상태
Third and fourth digit	동작의 시작위치와 종료위치	R	임의(random)의 위치
		E	말단(end) 위치
		T	정상(top) 위치
		C	새시(chassis) 위치
		P	TP 위치
		N	작업 베이에서 가장 가까운 TP 위치
		W	한 TP의 작업범위 내 임의의 위치

야드 크레인의 움직임을 쉽게 묘사하게 위해 <Table 2>와 같이 야드 크레인의 세부 움직임을 기호로 표현하기로 한다. <Table 2>에서의 코드를 이용하면, 예를 들어 ‘GERR’은 야드 크레인이 임의의 두 위치 사이를 갠트리 방향으로 무부하 이동한다는 의미를 지니고 ‘SR’은 스프레드가 집기작업을 한다는 의미를 지닌다.

본 장의 이후로부터는 앞의 제 2장에서 제시한 3가지 형태의 블록 레이아웃별로 야드 크레인의 주기시간을 수리모형으로 유도하는 과정을 기술할 것이다. 이 때 <Table 2>를 사용하여 각 모형별 작업 순서를 코드화하여 제시할 것이다.

3.1 TP가 각 베이의 측면에 위치한 경우

이 경우는 <Figure 1>과 같이 TP가 각 베이의 측면에 위치하는 레이아웃이다. 여기서 TP는 물리적인 형태가 아닌 각 베이 옆의 주행로 상에서 트럭 운전기사의 직관으로 야드 크레인 작업을 기다리는 임시 주차공간이다.

Table 3. Handling process in blocks with a TP at each bay

순서	반입	적하	양하	반출	재취급
1	GERR	$GERR \left(\frac{1}{l_0} \right)$	$GERR \left(\frac{1}{s_{rt}} \right)$	GERR	HETR
2	hetc	TEER	hetc	TEER	sg
3	sg	HETR	sg	Rehandles(R_{rt})	HLRT
4	hlct	sg	hlct	HETR	TLRR
5	TLER	HLRT	TLER	sg	HLTR
6	HLTR	TLRE	HLTR	HLRT	sr
7	sr	hlct	sr	TLRE	HERT
8	HERT	sr	HERT	hlct	TERR
9	TERE	hetc	TERE	sr	
10				hetc	

이러한 블록 레이아웃에서 작업별 크레인 이동순서는 <Table 3>처럼 정리할 수 있다. 괄호로 표시된 부분은 한 주기 동안 단위 취급 작업의 발생 빈도를 나타낸 것이다. 예를 들어 GERR 작업은 경우 l_0 회의 적하 작업동안에 1회 발생한다. 반면에 재취급 작업은 1회의 반출 작업 중 R_{rt} 회 발생한다. 소문자로 표시한 부분은 그 소요시간이 상수값을 가지는 것을 의미한다. 따라서 소문자로 표시된 움직임에 대해서는 분산을 추정할 필요가 없다.

3.1.1 반입 작업을 위한 기대 주기시간 및 분산

GERR 은 야드 크레인의 무부하(empty) 이동 시간을 의미한다. 이동거리는 이전 작업완료 지점에서부터 다음 작업을

위한 위치까지이며 이때 거리 단위는 베이(bay)이다. 즉, 통계적으로는 블록 내 한 임의(random)의 위치에서 다른 임의의 위치까지 이동하는 셈이다. *GERR*의 기대값과 분산을 수식으로 표현하면 아래 식 (1)과 식 (2)로 나타낼 수 있다. 이에 대한 자세한 유도 과정은 부록 1에서 기술하도록 한다.

$$E(GERR) = \left(\frac{b_l}{3}\right) \left(\frac{1}{v_g^e}\right), \quad (1)$$

$$Var(GERR) = \left(\frac{b_l^2}{18}\right) \left(\frac{1}{v_g^e}\right)^2. \quad (2)$$

*hetc*는 야드 크레인의 스프레드가 컨테이너를 집기 위해 최상 위치로부터 트럭의 새시에 실린 컨테이너 위치까지 무부하 이동 시간을 가리킨다. 이는 아래 식 (3)으로 나타낼 수 있으며 이때, 분산은 0이 됨을 알 수 있다. 즉, 스프레드 이동거리가 상수 값을 갖는다.

$$hetc = d_{max}^h \left(\frac{1}{v_h^e}\right). \quad (3)$$

*sg*는 야드 크레인이 해당 컨테이너를 집는(*grasping*) 작업을 의미한다. 마찬가지로 이는 상수 값을 가진다.

$$sg = c_g. \quad (4)$$

*hlct*는 야드 크레인의 스프레드가 컨테이너를 집은 상태에서 수직으로 부하(*loaded*) 이동하는 작업 시간을 나타낸다. 이 작업의 이동거리는 트럭의 새시로부터 스프레드가 위치할 수 있는 최상단까지이다.

$$hlct = d_{max}^h \left(\frac{1}{v_h^e}\right). \quad (5)$$

야드 크레인의 스프레드는 트롤리(*trolley*)에 의해 좌우방향으로 이동할 수 있다. 주로 ‘트롤리 방향으로 이동한다.’는 표현을 사용하므로 본 논문에서도 스프레드의 좌우방향 이동을 트롤리 이동과 혼용하여 사용할 것이다. 스프레드가 컨테이너를 집은 상태에서 트롤리 이동하는 것은 *TLER*로 기호화할 수 있다. 이때, 이동거리는 베이의 한쪽 끝단 위치로부터 베이 내 임의의 작업 위치까지이다.

$$E(TLER) = \left(\frac{b_w}{2} + d_c\right) \left(\frac{1}{v_t^e}\right), \quad (6)$$

$$Var(TLER) = \left(\frac{b_w^2}{12}\right) \left(\frac{1}{v_t^e}\right)^2. \quad (7)$$

베이 내 작업위치까지 이동한 스프레드는 현재의 높이에서 임의의 저장 위치까지 수직 이동하여 지정된 위치로 컨테이너를 적재하여야 한다. 이는 *HLTR*로 나타내며 식 (8)과 식 (9)로 그 기대값과 분산을 나타낼 수 있다.

$$E(HLTR) = E(D_t^h) \left(\frac{1}{v_h^e}\right), \quad (8)$$

$$Var(HLTR) = Var(D_t^h) \left(\frac{1}{v_h^e}\right)^2. \quad (9)$$

*sr*은 *sg*와 반대의 의미를 가진다. 즉, 스프레드가 컨테이너를 놓는(*releasing*) 작업을 의미한다.

$$sr = c_r. \quad (10)$$

컨테이너를 베이 내 지정된 위치에 적재한 후, 스프레드는 다시 최상 높이까지 수직 무부하 이동을 하게 된다. *HERT*는 이러한 단위 작업 시간을 의미한다.

$$E(HERT) = E(D_t^h) \left(\frac{1}{v_h^e}\right), \quad (11)$$

$$Var(HERT) = Var(D_t^h) \left(\frac{1}{v_h^e}\right)^2. \quad (12)$$

*TERE*는 스프레드의 트롤리 방향으로의 무부하 이동을 나타낸다. 즉, 베이 내 임의의 작업위치에서 작업 완료 후에 다시 베이의 한쪽 끝단으로 이동하는 작업이다.

$$E(TERE) = \left(\frac{b_w}{2} + d_c\right) \left(\frac{1}{v_t^e}\right), \quad (13)$$

$$Var(TERE) = \left(\frac{b_w^2}{12}\right) \left(\frac{1}{v_t^e}\right)^2. \quad (14)$$

위와 같은 단위 작업을 모두 고려하여 반입 작업을 위한 야드 크레인의 주기시간(*cycle time*)을 하나의 수식으로 나타낼 수 있다. 식 (15)는 반입 작업을 위한 야드 크레인의 기대 주기 시간을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} E(Receiving) &= E(GERR) + etc + sg + hlct \\ &\quad + E(TLER) + E(HLTR) \\ &\quad + sr + E(HERT) + E(TERE). \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)에서의 기대 주기시간과 더불어, 반입 작업에 대한 야드 크레인의 주기시간의 분산을 수식으로 표현 할 수 있다. 이는 아래의 식 (16)으로 도출된다.

$$\begin{aligned} \text{Var}(\text{Receiving}) &= \text{Var}(GERR) + \text{Var}(TLER) \\ &+ \text{Var}(HLTR) + \text{Var}(HERT) \\ &+ \text{Var}(TERE) \end{aligned} \quad (16)$$

3.1.2 적하 작업을 위한 기대 주기시간 및 분산

4개의 알파벳으로 기호화된 단위 작업 시간은 끝자리 2개가 서로 바뀌더라도 동일한 값을 가진다(이동하는 방향만 반대일 뿐이다). 예를 들어, *TEER* 은 *TERE* 와 방향만 반대일 뿐 동일한 의미를 지닌다.

적하 작업을 구성하는 단위 작업은 반입 작업과 거의 유사하나 적하 작업의 경우 동일 베이에서 대상이 되는 컨테이너의 개수만큼 연속작업이 이루어진다. 그에 반해 야드 크레인의 주행(gantry) 이동은 1회만 발생하게 되는데 이를 고려하여 주행 이동을 수식으로 표현하면 아래 식 (17)과 식 (18)로 나타낼 수 있다.

$$E\left(GERR\left(\frac{1}{l_0}\right)\right) = \left(\frac{1}{l_0}\right)E(GERR) \quad (17)$$

위의 식 (17)에서 l_0 은 동일 베이 내에서 연속작업의 회수이다. 따라서 <Table 3>에서 기술한 단위 작업 순서대로 작업을 수행한 적하 작업의 기대 주기시간은 아래 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E(\text{Loading}) &= \left(\frac{1}{l_0}\right)E(GERR) + E(TEER) \\ &+ E(HERT) + sg \\ &+ E(HLRT) + E(TLRE) \\ &+ hlct + sr + hect \end{aligned} \quad (18)$$

야드 크레인이 2회의 연속된 적하 작업 간에 주행 이동을 하는 회수를 N 이라 하자. 그러면 N 에 대한 기대값과 분산은 식 (19)와 식 (20)으로 각기 표현할 수 있다.

$$E(N) = \frac{1}{l_0} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}(N) &= \left(0 - \frac{1}{l_0}\right)^2 \left(\frac{l_0-1}{l_0}\right) + \left(1 - \frac{1}{l_0}\right)^2 \left(\frac{1}{l_0}\right) \\ &= \frac{l_0-1}{l_0^2} \end{aligned} \quad (20)$$

따라서

$$\begin{aligned} \text{Var}\left(GERR\left(\frac{1}{l_0}\right)\right) &= \text{Var}\left(\sum_{j=1}^N GERR_j\right) \\ &= E(N)\text{Var}(GERR) \\ &+ E(GERR)^2 \text{Var}(N) \end{aligned} \quad (21)$$

주의 할 점은 N 의 값이 0 또는 1이 될 수 있다는 점이다. 위의 식 (21)은 Ross(1996)를 참고하였다.

이제 적하 작업을 위한 야드 크레인의 주기시간의 분산은 <Table 3>을 참고하여 식 (22)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Var}(\text{Loading}) &= E(N)\text{Var}(GERR) \\ &+ E^2(GERR)\text{Var}(N) \\ &+ \text{Var}(TEER) + \text{Var}(HERT) \\ &+ \text{Var}(HLRT) + \text{Var}(TLRE) \end{aligned} \quad (22)$$

3.1.3 양하 작업을 위한 기대 주기시간 및 분산

양하 작업에서의 단위 작업의 구성은 적하 작업과 매우 유사하다. 단지, 작업 특성상 적하 작업과는 반대의 순서를 가진다는 차이점이 있을 뿐이다.

양하 작업은 주로 빈(empty) 베이에서부터 시작하여 더 이상 컨테이너를 적재할 수 있는 공간이 없을 때까지 반복된다. 이 때문에 양하 작업은 동일 베이 내에서 s_{rt} 회 동안 연속적으로 수행된다. 그러므로 s_{rt} 회의 양하 작업 동안 야드 크레인의 주행 이동은 1회 발생한다. 이를 수식으로 표현하여 양하 작업의 기대 주기시간을 나타내면 아래 식 (23)과 같다.

$$\begin{aligned} E(\text{Unloading}) &= \left(\frac{1}{s_{rt}}\right)E(GERR) + hect \\ &+ sg + hlct + E(TLER) \\ &+ E(HLTR) + sr \\ &+ E(HERT) + E(TERE) \end{aligned} \quad (23)$$

적하 작업에서와 유사하게 N 을 2회의 연속된 양하 작업 간에 야드 크레인이 주행 이동을 하는 회수라고 정의한다면

$$E(N) = \frac{1}{s_{rt}} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}(N) &= \left(0 - \frac{1}{s_{rt}}\right)^2 \left(\frac{s_{rt}-1}{s_{rt}}\right) + \left(1 - \frac{1}{s_{rt}}\right)^2 \left(\frac{1}{s_{rt}}\right) \\ &= \frac{s_{rt}-1}{s_{rt}^2} \end{aligned} \quad (25)$$

따라서 양하 작업을 위한 야드 크레인의 주기 시간의 분산은 아래 식 (26)으로 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} \text{Var}(\text{Unloading}) &= E(N)\text{Var}(GERR) \\ &+ E^2(GERR)\text{Var}(N) \\ &+ \text{Var}(TLER) + \text{Var}(HLTR) \\ &+ \text{Var}(HERT) + \text{Var(TERE)}. \end{aligned} \quad (26)$$

3.1.4 반출 작업을 위한 기대 주기시간 및 분산

반출 작업을 위해서는 대상 컨테이너의 취급 시간뿐만 아니라 재취급으로 인한 작업 시간까지 고려해야 한다. 재취급이란 대상 컨테이너가 다른 컨테이너의 하단에 적재되어 있는 경우 상단의 컨테이너들을 베이 내 임의의 다른 위치로 옮겨 놓는 작업을 의미한다. 이러한 재취급 작업은 방해가 되는 상단의 컨테이너들을 다른 위치로 모두 이적(relocation)할 때까지 반복된다. 따라서 재취급 작업의 회수는 야드 크레인의 성능에 중요한 영향을 끼치게 된다.

우선은 재취급 작업을 전체 반출 작업에서 하나의 요소 작업으로 간주하고 <Table 3>의 작업 순서를 고려하여 반출 작업의 기대 주기시간을 유도해 보면 아래 식 (27)과 같다.

$$\begin{aligned} E(\text{Delivery}) &= E(GERR) + E(TEER) \\ &+ E(R_{rt})E(\text{Rehandles}) \\ &+ E(HERT) + sg \\ &+ E(HLRT) + E(TLRE) \\ &+ hlrc + sr + hect \end{aligned} \quad (27)$$

재취급 작업의 분산은 Ross(1996)를 참고하여 아래와 같이 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Var}\left(\sum_{j=1}^{R_{rt}} \text{Rehandles}_j\right) &= E(R_{rt})\text{Var}(\text{Rehandles}) \\ &+ E(\text{Rehandles})^2 \text{Var}(R_{rt}). \end{aligned} \quad (28)$$

위의 식 (28)을 이용하여 반출 작업에서의 야드 크레인의 주

기시간의 분산을 유도하면 아래와 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Var}(\text{Delivery}) &= \text{Var}(GERR) + \text{Var}(TEER) \\ &+ E(R_{rt})\text{Var}(\text{Rehandles}) \\ &+ E^2(\text{Rehandles})\text{Var}(R_{rt}) \\ &+ \text{Var}(HERT) + \text{Var}(HLRT) \\ &+ \text{Var}(TLRE). \end{aligned} \quad (29)$$

이제 재취급 작업에 대해 상세히 다루어 보자. 기대 재취급 작업시간과 재취급 작업시간의 분산을 구하기 위해서는 재취급 회수의 분산을 먼저 유도하여야 한다. 이 유도과정은 부록 3에서 자세히 기술하기로 한다(기대 재취급 회수는 Kim(1997)에서 이미 연구된 바 있다. 따라서 본 연구에서는 Kim(1997)에서 제시한 기대 재취급 회수를 구하는 수식을 사용하기로 한다). 재취급 회수의 분산은 아래 식 (30)과 같이 유도되므로 이를 사용하기로 한다(부록 3 참고).

$$\text{Var}(R_{rt}) = -0.0186r + 0.0585t^2 + 0.2169 \quad (30)$$

야드 크레인은 먼저 이적 대상이 되는 컨테이너를 향해 빈 스프레드를 수직 이동한다(HERT). 컨테이너를 집어서(sg) 최상 높이까지 들어 올린(HLRT) 다음 베이 내 다른 저장 위치로 옮기기 위해 트롤리 방향으로 이동한다(TLRR).

$$E(TLRR) = \left(\frac{b_w}{3}\right) \left(\frac{1}{v_t'}\right) \quad (31)$$

$$\text{Var}(TLRR) = \left(\frac{b_w^2}{18}\right) \left(\frac{1}{v_t'}\right)^2 \quad (32)$$

이적 위치까지 횡행 이동한 스프레드는 현재의 최상 높이에서 저장 위치까지 수직 이동하여(HLTR) 컨테이너를 적재(sr) 한 후에 다시 최상 높이까지 수직 이동한다(HERT). 마지막으로 야드 크레인은 대상 컨테이너가 있는 작업 위치까지 다시 스프레드를 횡행 이동시켜(TEER) 다음 작업을 반복적으로 수행한다.

$$E(TEER) = \left(\frac{b_w}{3}\right) \left(\frac{1}{v_t^e}\right) \quad (33)$$

$$\text{Var}(TEER) = \left(\frac{b_w^2}{18}\right) \left(\frac{1}{v_t^e}\right)^2 \quad (34)$$

위와 같은 재취급 작업 순서를 고려하여 재취급 작업에 대한 기대 주기시간을 유도하면 아래 식 (35)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E(\text{Rehandle}) = E(\text{HETR}) + sg + E(\text{HLRT}) + E(\text{TLRR}) + E(\text{HLTR}) + sr + E(\text{HERT}) + E(\text{TERR}) \quad (35)$$

또한 재취급 작업을 위한 작업 주기시간의 분산은 아래 식 (36)으로 표현할 수 있다.

$$\text{Var}(\text{Rehandle}) = \text{Var}(\text{HETR}) + \text{Var}(\text{HLRT}) + \text{Var}(\text{TLRR}) + \text{Var}(\text{HLTR}) + \text{Var}(\text{HERT}) + \text{Var}(\text{TERR}) \quad (36)$$

위의 식 (35)와 식 (36)을 이용하여 반출 작업의 기대 주기시간 (식 (27))과 주기시간의 분산 (식 (29))을 좀 더 정밀하게 묘사할 수 있다.

3.2 TP가 몇 개의 지정된 베이의 측면에 위치한 경우

이러한 종류의 블록 레이아웃을 사용한다면, 트럭은 블록의 측면에 위치한 몇 개의 고정 TP들 중 하나에 주차하여 야드 크레인의 서비스를 받을 것이다. 여기서 TP의 개수는 베이의 개수보다 현저히 작으므로 야드 크레인은 블록 내 작업위치와 고정 TP 사이를 주행하는 움직임이 필수적이다.

Table 4. Handling process in blocks with intermittent TPs

순서	반입	적하	양하	반출
1	<i>GERN</i>	$GERR \left(\frac{1}{l_0} \right)$	$GERN \left(\frac{1}{s_{rt}} \right)$	<i>GERR</i>
2	<i>hetc</i>	<i>TEER</i>	<i>hetc</i>	<i>TEER</i>
3	<i>sg</i>	<i>HETR</i>	<i>sg</i>	<i>Rehandles</i> ($R_{r,t}$)
4	<i>hlct</i>	<i>sg</i>	<i>hlct</i>	<i>HETR</i>
5	<i>GLNW</i>	<i>HLRT</i>	<i>GLNW</i>	<i>sg</i>
6	<i>TLER</i>	<i>TLRE</i>	<i>TLER</i>	<i>HLRT</i>
7	<i>HLTR</i>	<i>GLWN</i>	<i>HLTR</i>	<i>TLRE</i>
8	<i>sr</i>	<i>hlct</i>	<i>sr</i>	<i>GLWN</i>
9	<i>HERT</i>	<i>sr</i>	<i>HERT</i>	<i>hlct</i>
10	<i>TERE</i>	<i>hetc</i>	<i>TERE</i>	<i>sr</i>
11		$GENW \left(\frac{l_0 - 1}{l_0} \right)$	$GEWN \left(\frac{s_{rt} - 1}{s_{rt}} \right)$	<i>hetc</i>

이와 같은 블록 레이아웃에서의 각 작업별 순서는 아래 <Table 4>로 정리하였다. 재취급 작업의 경우는 <Table 3>과 동일하다.

3.2.1 반입 작업을 위한 기대 주기시간 및 분산

TP의 개수가 베이의 개수보다 현저히 작기 때문에 한 TP는 여러 개의 베이를 서비스 한다. 즉 각 TP별로 작업범위를 갖고 있으며 TP는 그 작업범위의 중앙에 위치한다. 또한 야드 크레인인 TP와 작업 베이 사이를 컨테이너를 들고 주행해야 한다.

블록 내 임의의 위치에서 특정 TP까지, 야드 크레인의 기대 주행시간은 *GERN*으로 표현할 수 있고 이는 식 (37)과 (38)로 나타내어진다. 이 때, 블록 내에서 각 TP의 위치는 $b_j(2j-1)/2m$ for $j=1,2,\dots,m$ 이다.

$$E(\text{GERN}) = \sum_{j=1}^m \left(\int_0^1 \left| x - \frac{2j-1}{2m} \right| dx \right) \left(\frac{b_j}{m} \right) \left(\frac{1}{v_g^e} \right) \quad (37)$$

$$\text{Var}(\text{GERN}) = \sum_{j=1}^m \left(\int_0^1 \left| x - \frac{2j-1}{2m} \right|^2 dx \right) \left(\frac{b_j^2}{m} \right) \left(\frac{1}{v_g^e} \right)^2 - E(\text{GERN})^2 \quad (38)$$

*GLNW*는 특정 TP로부터 그 TP의 작업범위 내에서 임의의 위치까지 야드 크레인이 컨테이너를 들고 주행하는 시간을 의미한다. 이에 대한 기대값과 분산은 식 (39)와 식 (40)으로 각기 표현할 수 있다.

$$E(\text{GLNW}) = \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{b_l}{2m} \right) \left(\frac{1}{v_g^l} \right) \quad (39)$$

$$\text{Var}(\text{GLNW}) = \left(\frac{1}{12} \right) \left(\frac{b_l}{2m} \right)^2 \left(\frac{1}{v_g^l} \right)^2 \quad (40)$$

따라서 반입 작업에 대한 기대 주기시간은 <Table 4>를 참고하여 아래와 같은 수식으로 도출된다.

$$E(\text{Receiving}) = E(\text{GERN}) + \text{hetc} + \text{sg} + \text{hlct} + E(\text{GLNW}) + E(\text{TLER}) + E(\text{HLTR}) + \text{sr} + E(\text{HERT}) + E(\text{TERE}) \quad (41)$$

또한 반입 작업을 위한 야드 크레인의 주기시간의 분산은 <Table 4>를 참고하여 아래와 같은 수식으로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Var}(\text{Receiving}) &= \text{Var}(\text{GERN}) + \text{Var}(\text{GLNW}) \\ &\quad + \text{Var}(\text{TLER}) + \text{Var}(\text{HLTR}) \\ &\quad + \text{Var}(\text{HERT}) + \text{Var}(\text{TERE}). \end{aligned} \quad (42)$$

3.2.2 적하 작업을 위한 기대 주기시간 및 분산

적하 작업의 요소 작업 중에서 아직 정의되지 않은 작업은 $GENW$ 이며 이는 $GLNW$ 와 매우 유사하게 정의될 수 있다. 단지 $GENW$ 는 야드 크레인의 무부하 주행을 나타내는 것이다.

$$\begin{aligned} E\left(GENW\left(\frac{l_0-1}{l_0}\right)\right) &= \left(\frac{l_0-1}{l_0}\right)E(GENW) \\ &= \left(\frac{l_0-1}{l_0}\right)\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{b_l}{2m}\right)\left(\frac{1}{v_g^e}\right). \end{aligned} \quad (43)$$

그러므로 이제 적하 작업을 위한 기대 주기시간은 아래와 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} E(\text{Loading}) &= \left(\frac{1}{l_0}\right)E(\text{GERR}) \\ &\quad + \left(\frac{l_0-1}{l_0}\right)E(GENW) \\ &\quad + E(\text{TEER}) + E(\text{HETR}) \\ &\quad + sg + E(\text{HLRT}) \\ &\quad + E(\text{TLRE}) + E(\text{GLWN}) \\ &\quad + hltc + sr + hect. \end{aligned} \quad (44)$$

주기시간의 분산은 3.1절의 블록 레이아웃에서의 적하 작업과 유사하게 구할 수 있다. 먼저 N_1 을 3.1.2절에서의 N 과 동일한 의미로 보고 N_2 를 연속된 적하 작업을 위해 TP의 작업 범위 내에서 야드 크레인이 주행하는 회수라고 정의하자. 그러면

$$E(N_2) = \frac{l_0-1}{l_0} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}(N_2) &= \left(0 - \frac{l_0-1}{l_0}\right)^2 \left(\frac{1}{l_0}\right) + \left(1 - \frac{l_0-1}{l_0}\right)^2 \left(\frac{l_0-1}{l_0}\right) \\ &= \frac{l_0-1}{l_0^2} \end{aligned} \quad (46)$$

Ross(1996)를 이용하여 $GENW((l_0-1)/l_0)$ 는 쉽게 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Var}\left(GENW\left(\frac{l_0-1}{l_0}\right)\right) &= \text{Var}\left(\sum_{j=1}^{N_2} GENW_j\right) \\ &= E(N_2)\text{Var}(GENW) \\ &\quad + E(GENW)^2 \text{Var}(N_2). \end{aligned} \quad (47)$$

위의 식 (47)을 이용하여 적하 작업 주기시간의 분산을 아래와 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Var}(\text{Loading}) &= E(N_1)\text{Var}(\text{GERR}) \\ &\quad + E^2(\text{GERR})\text{Var}(N_1) \\ &\quad + E(N_2)\text{Var}(GENW) \\ &\quad + E^2(GENW)\text{Var}(N_2) \\ &\quad + \text{Var}(\text{TEER}) + \text{Var}(\text{HETR}) \\ &\quad + \text{Var}(\text{HLRT}) + \text{Var}(\text{TLRE}) \\ &\quad + \text{Var}(\text{GLWN}). \end{aligned} \quad (48)$$

3.2.3 양하 작업을 위한 기대 주기시간 및 분산

양하 작업을 위한 기대 주기시간과 주기시간의 분산은 적하 작업에서와 거의 유사한 방법으로 유도할 수 있다. 단지 l_0 를 s_{rt} 로 대체하고 작업 순서가 반대가 될 뿐이다.

기대 주기시간은 아래 식 (49)와 같다.

$$\begin{aligned} E(\text{Unloading}) &= \left(\frac{1}{s_{rt}}\right)E(\text{GERN}) \\ &\quad + \left(\frac{s_{rt}-1}{s_{rt}}\right)E(GEWN) \\ &\quad + hect + sg + hlct \\ &\quad + E(\text{GLNW}) + E(\text{TLER}) \\ &\quad + E(\text{HLTR}) + sr \\ &\quad + E(\text{HERT}) + E(\text{TERE}). \end{aligned} \quad (49)$$

주기시간의 분산은 3.1절의 블록 레이아웃에서의 양하 작업과 유사하게 구할 수 있다. 먼저 N_1 을 3.1.3절에서의 N 과 동일한 의미로 보고 N_2 를 연속된 양하 작업을 위해 TP의 작업 범위 내에서 야드 크레인이 주행하는 회수라고 정의하자.

그러면

$$E(N_2) = \frac{s_{rt} - 1}{s_{rt}} \quad (50)$$

$$Var(N_2) = \frac{s_{rt} - 1}{s_{rt}^2} \quad (51)$$

이제 양하 작업에서의 야드 크레인 주기시간의 분산을 구해보면 아래 식 (52)가 됨을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} Var(Unloading) = & E(N_1)Var(GERN) \\ & + E^2(GERN)Var(N_1) \\ & + E(N_2)Var(GEWN) \\ & + E^2(GEWN)Var(N_2) \\ & + Var(GLNW) + Var(TLER) \\ & + Var(HLTR) + Var(HERT) \\ & + Var(TERE) \end{aligned} \quad (52)$$

3.2.4 반출 작업을 위한 기대 주기시간 및 분산

앞의 3.1.4절에서 언급했듯이 반출 작업에서 재취급 작업은 필수적이며 주기시간 산정 시 반드시 포함되어야 한다. 재취급 작업 시간의 추정치는 이미 3.1.4절에서 제시했으므로 더 기술하지 않을 것이다. 본 연구에서는 재취급 작업이 도일 베이내에서만 이루어지므로 블록 레이아웃에 관계없이 3.1.4절에서 추정된 재취급 작업시간을 그대로 적용할 수 있다.

따라서 반출작업을 위한 야드 크레인의 기대 주기시간은 아래 식 (53)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E(Delivery) = & E(GERR) + E(TEER) \\ & + E(R_{rt})E(Rehandles) \\ & + E(HETR) + sg \\ & + E(HLRT) + E(TLRE) \\ & + E(GLWN) + hlct + sr + hect \end{aligned} \quad (53)$$

더불어, 주기시간의 분산은 아래 식 (54)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Var(Delivery) = & Var(GERR) + Var(TEER) \\ & + E(R_{rt})Var(Rehandles) \\ & + E^2(Rehandles)Var(R_{rt}) \\ & + Var(HETR) + Var(HLRT) \\ & + Var(TLRE) + Var(GLWN) \end{aligned} \quad (54)$$

3.3 TP가 블록의 양 끝단에 위치한 경우

이 경우의 블록 레이아웃은 주로 블록이 선석에 대해 수직인 경우에서 볼 수 있는 종류이다. <Figure 2>에서처럼 TP가 블록의 양 끝단에 위치하므로 해측(sea side)과 육측(land side)의 차량 흐름이 분리된다. 이러한 블록 레이아웃에서는 야드 크레인의 기대 주행거리는 균일분포(uniform distribution)를 따르며 그 분포형태는 $U(0, b_l)$ 이다. 그리고 야드 크레인은 컨테이너를 운반하기 위해 반드시 왕복이동(round trip)을 해야 하는 특징이 있다.

Table 5. Handling process in blocks with TPs at ends

순서	반입	적하	양하	반출
1	<i>GERE</i>	<i>GEER</i>	<i>GERE</i>	<i>GEER</i>
2	<i>TERR</i>	<i>TERR</i>	<i>TERR</i>	<i>TERR</i>
3	<i>hetc</i>	<i>HETR</i>	<i>hetc</i>	<i>Rehandles(R_{rt})</i>
4	<i>sg</i>	<i>sg</i>	<i>sg</i>	<i>HETR</i>
5	<i>hlct</i>	<i>HLRT</i>	<i>hlct</i>	<i>sg</i>
6	<i>GLER</i>	<i>GLRE</i>	<i>GLER</i>	<i>HLRT</i>
7	<i>TLRR</i>	<i>TLRR</i>	<i>TLRR</i>	<i>GLRE</i>
8	<i>HLTR</i>	<i>hlct</i>	<i>HLTR</i>	<i>TLRR</i>
9	<i>sr</i>	<i>sr</i>	<i>sr</i>	<i>hlct</i>
10	<i>HERT</i>	<i>hetc</i>	<i>HERT</i>	<i>sr</i>
11				<i>hetc</i>

3.3.1 반입 작업을 위한 기대 주기시간 및 분산

*GERE*는 이전 작업을 완료한 야드 크레인이 현재의 위치에서 다음 반입 작업을 위해 블록의 육측 끝단까지 무부하 주행하는 것을 의미한다. 따라서 *GERE*의 기대값과 분산은 아래 식 (55)와 식 (56)으로 표현 가능하다.

$$E(GERE) = \left(\frac{b_l}{2}\right) \left(\frac{1}{v_g^e}\right) \quad (55)$$

$$Var(GERE) = \left(\frac{b_l^2}{12}\right) \left(\frac{1}{v_g^e}\right)^2 \quad (56)$$

*GLER*은 *GERE*와 매우 유사한 요소 작업으로서 차이점 으로서는 *GLER*이 무부하가 아닌 부하 주행을 한다는 것이다.

$$E(GLER) = \left(\frac{b_l}{2}\right) \left(\frac{1}{v_g^l}\right) \quad (57)$$

$$\text{Var}(GLER) = \left(\frac{b_l^2}{12} \right) \left(\frac{1}{v_g^l} \right)^2 \quad (58)$$

위의 수식들을 이용하여 반입 작업을 위한 야드 크레인의 기대 주기시간을 구하면 아래 식 (59)와 같다.

$$\begin{aligned} E(\text{Receiving}) &= E(GERE) + E(TERR) \\ &+ hetc + sg + hlct \\ &+ E(GLER) + E(TLRR) \\ &+ E(HLTR) + sr + E(HERT) \end{aligned} \quad (59)$$

또한 야드 크레인의 주기시간의 분산은 아래 식 (60)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Var}(\text{Receiving}) &= \text{Var}(GERE) + \text{Var}(TERR) \\ &+ \text{Var}(GLER) + \text{Var}(TLRR) \\ &+ \text{Var}(HLTR) + \text{Var}(HERT) \end{aligned} \quad (60)$$

3.3.2 적하 작업을 위한 기대 주기시간 및 분산

적하 작업에서의 기대 주기시간과 주기시간의 분산은 3.1.2 절에서와 동일한 방법으로 유도할 수 있다. 그러나 한 적하 작업 주기 동안 야드 크레인의 무부하 주행과 부하 주행이 모두 발생한다는 차이점이 있다.

<Table 5>에서 묘사된 적하 작업에서 야드 크레인의 기대 주기시간은 아래 식 (61)과 같이 나타낼 수 있다.

주의할 점은 앞서 기술한 블록 레이아웃과 다르게 본 절에서 다루는 블록 레이아웃에서는 적하 작업 주기시간에 있어 연속작업을 고려하지 않아도 된다는 점이다. 이는 야드 크레인이 컨테이너 1개에 대해서 왕복주행을 하므로 연속된 작업이라 할지라도 대상 컨테이너의 개수만큼 전체 요소작업이 반복되어야 하기 때문이다. 이러한 이유로 적하나 양하 작업에서 단일 컨테이너의 작업만 고려하여 주기시간을 산정하더라도 충분함을 증명할 수 있다.

$$\begin{aligned} E(\text{Loading}) &= E(GEER) + E(TERR) \\ &+ E(HETR) + sg + E(HLRT) \\ &+ E(GLRE) + E(TLRR) \\ &+ hlct + sr + hect \end{aligned} \quad (61)$$

그리고 주기시간의 분산은 아래 식 (62)와 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Var}(\text{Loading}) &= \text{Var}(GEER) + \text{Var}(TERR) \\ &+ \text{Var}(HETR) + \text{Var}(HLRT) \\ &+ \text{Var}(GLRE) + \text{Var}(TLRR) \end{aligned} \quad (62)$$

3.3.3 양하 작업을 위한 기대 주기시간 및 분산

양하 작업도 3.1.3절에서 사용한 방식대로 기대 주기시간과 주기시간의 분산을 유도할 수 있다. 이는 각각 식 (63)과 식 (64)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} E(\text{Unloading}) &= E(GERE) + E(TERR) \\ &+ hetc + sg + hlct \\ &+ E(GLER) + E(TLRR) \\ &+ E(HLTR) + sr + E(HERT) \end{aligned} \quad (63)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}(\text{Unloading}) &= \text{Var}(GERE) + \text{Var}(TERR) \\ &+ \text{Var}(GLER) + \text{Var}(TLRR) \\ &+ \text{Var}(HLTR) + \text{Var}(HERT) \end{aligned} \quad (64)$$

3.3.4 반출 작업을 위한 기대 주기시간 및 분산

<Table 5>에서 기술된 작업순서를 기반으로 반출 작업을 위한 기대 주기시간과 주기시간의 분산을 추정할 수 있다. 이 때 재취급 작업 반드시 고려되어야 하며 재취급 작업은 3.1.4절에서 언급한 재취급 작업 시간을 나타내는 수식(식 (35), 식 (36))을 이용한다.

따라서 반출작업을 위한 기대 주기시간은 아래 식 (65)로 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} E(\text{Delivery}) &= E(GEER) + E(TERR) \\ &+ E(R_r)E(\text{Rehandles}) \\ &+ E(HETR) + sg + E(HLRT) \\ &+ E(GLRE) + E(TLRR) \\ &+ hlct + sr + hect \end{aligned} \quad (65)$$

또한, 야드 크레인이 반출 작업을 수행하기 위한 주기시간의 분산은 아래 식 (66)과 같이 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Var}(\text{Delivery}) &= \text{Var}(GEER) + \text{Var}(TERR) \\ &+ E(R_r)\text{Var}(\text{Rehandles}) \\ &+ E^2(\text{Rehandles})\text{Var}(R_r) \\ &+ \text{Var}(HETR) + \text{Var}(HLRT) \\ &+ \text{Var}(GLRE) + \text{Var}(TLRR) \end{aligned} \quad (66)$$

4. 수치 예제

수치 실험은 다양한 블록 레이아웃에 대해 각 작업별로 야드 크레인의 성능을 평가하고 비교하기 위한 목적으로 수행하기로 한다. 기본적인 실험 데이터는 $t = 4, r = 6, b = 30, m = 6, d_r = d_b = 0.4m, d_c = 6m, h_{max} = 21m, h_c = 1.5m, v_g^e = v_g^l = 150m/min, v_t^e = v_t^l = 120m/min, v_h^e = v_h^l = 75m/min, l_0 = 10$ 으로 설정한다. 컨테이너의 크기는 모두 20ft 를 기준으로 한다. 즉, $c_l = 6.058m, c_w = 2.438m, c_h = 2.438m$ 이다.

먼저, 각 블록 레이아웃에 대해 작업 종류별 기대 주기시간을 비교해 보면 <Figure 5>와 같다. 그래프에서 Case 1, Case 2, Case 3은 각각 3.1절의 블록 레이아웃, 3.2절의 블록 레이아웃, 3.3절의 블록 레이아웃을 가리킨다.

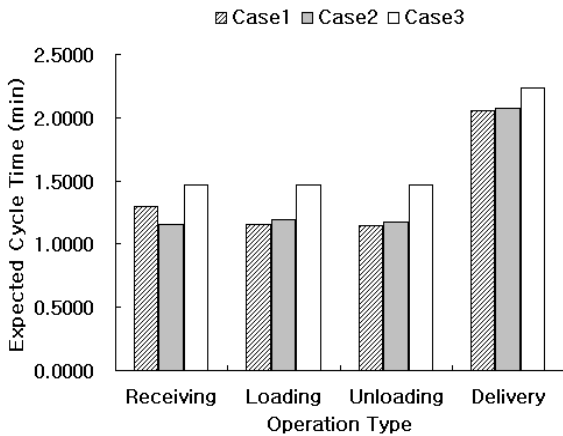


Figure 5. Expected cycle time for various type of blocks for various type of operation

전반적으로 3가지 블록 레이아웃 중에서 TP가 블록의 끝단에 위치한 경우가 주기시간이 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있는데 이는 상대적으로 긴 주행거리 때문인 것으로 판단된다. 그리고 반입 작업의 경우, Case 1보다 Case 2가 더 작은 주기시간을 가지는데 이 역시 주행거리가 보다 짧기 때문이다.

반출 작업을 살펴보면 (모든 블록 레이아웃의 경우에서 동일하게) 주기시간이 다른 작업에 비해 큰 값을 가진다. 이는 재취급으로 인한 작업시간 증가에 따른 것이다.

위의 <Figure 5>와 관련하여 주기시간의 분산을 비교한 그래프는 <Figure 6>과 같다. 분산의 경우, (모든 블록 레이아웃의 경우에서) 반출 작업에 대한 주기시간의 분산이 다른 작업들에 비해 상당히 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 이는 재취급으로 인한 작업시간의 변동이 크다는 것을 보여준다.

본 연구에서 제시한 블록 레이아웃 중에서 TP가 블록의 측면에 간헐적으로 위치한 레이아웃(Case 2)은 TP의 개수에 따라 야드 크레인의 작업 주기시간에 영향을 끼칠 것으로 판단되므로 수치실험을 통해 알아보기로 한다. <Figure 7>은 TP 개수에 따른 각 작업별 기대 주기시간을 비교한 그래프이다.

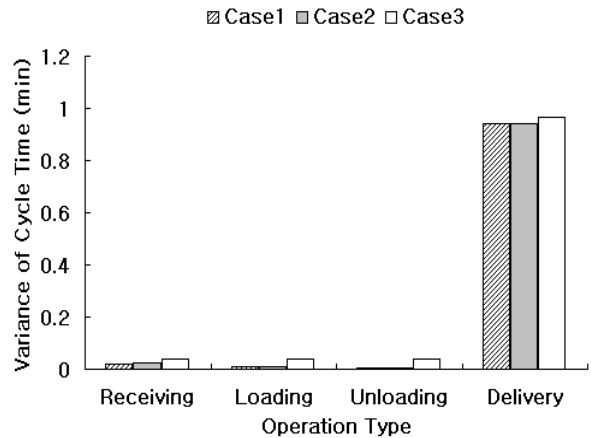


Figure 6. Variance of cycle time for various type of blocks for various type of operation

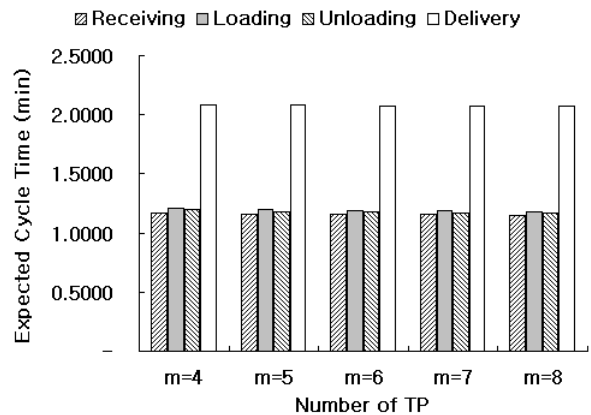


Figure 7. Expected cycle times of blocks with intermittent TPs during various operations for different number of TP

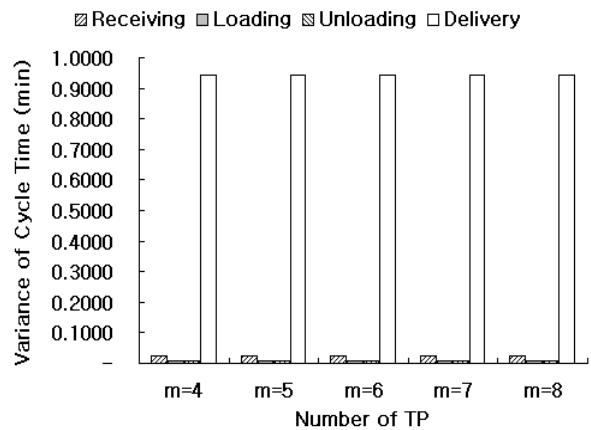


Figure 8. Variances of cycle times in blocks with intermittent TPs for various operations for different number of TP

위 <Figure 7>에서 보이듯이 TP의 개수는 야드 크레인의 성능에는 별다른 영향을 주지 못함을 볼 수 있다. 소수점 단위까

지 상세히 비교하면 TP의 증가함에 따라 모든 작업에 대해 기대 주기시간은 점차 감소함을 볼 수 있으나 이는 매우 미미한 수준이므로 현실적으로는 별다른 차이가 없다고 볼 수 있다.

TP 개수에 따른 주기시간의 분산은 위 <Figure 8>로 도시하였다.

본 연구에서 다루고 있는 반입, 적하, 양하, 반출 작업은 모두 트럭과 야드 크레인과 연계작업이다. 즉, 야드 크레인 자체적으로는 수행할 수 없는 작업이다. 그러므로 트럭과의 연계작업을 고려하여 야드 크레인의 성능을 평가하는 것이 보다 바람직할 것이다. 대기행렬 이론을 적용하면 트럭의 평균 대기시간, 평균 체류시간 등을 구할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 Lee(1998)를 참고하여 대표적으로 트럭의 평균 대기시간을 추정하여 제시한다. 대기행렬 이론과 관계된 자세한 수식은 본문에서는 생략하기로 한다. <Figure 9>는 반출 작업에 대한 트럭의 평균 대기시간을 비교한 그래프이다.

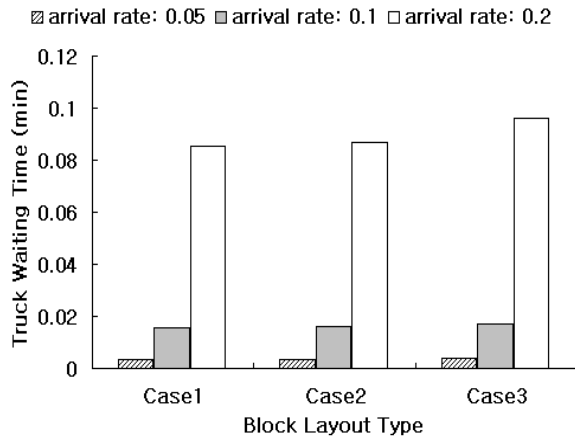


Figure 9. Truck waiting times for various type of blocks for various truck arrival rate for the delivery operation

트럭의 도착시간 간격은 위 <Figure 9>에서 표기한 대로 각기 20분, 10분, 5분으로 설정하였고 서비스 규칙은 선입선출(FCFS; First Come First Service) 규칙을 적용하였다. 블록 레이아웃별로는 Case 1보다 Case 2가, Case 2 보다는 Case 3이 극미하게 높은 값을 가진다. 그러나 현실적으로는 무시될 수 있는 수치이므로 블록의 레이아웃에는 별다른 영향을 받지 않는다고 판단된다.

5. 결론

본 연구는 컨테이너 터미널에서 사용되는 주요 장비인 야드 크레인의 성능을 평가하기 위하여, 작업 주기시간의 기대값과 분산을 추정할 수 있는 수식을 다양한 블록 레이아웃과 작업 유형에 대하여 유도하였다.

상세한 추정을 위해 각 작업을 여러 개의 단위 작업으로 상

세 화하고 각 단위 작업별로 기대 시간과 분산을 유도하였다. 또한, 블록의 레이아웃을 다양하게 적용하였다. 첫 번째로는 TP 각각 베이의 측면에 위치한 블록이고, 두 번째로는 TP가 블록의 측면에 간헐적으로 위치한 블록이다. 마지막으로 TP가 블록의 양 끝단에 위치한 블록이다. 각 블록 레이아웃별로 야드 크레인의 작업 특성을 고려하여 작업 주기시간을 수식으로 추정하였다.

본 연구에서는 각 블록 레이아웃별로 반입, 적하, 양하, 반출 작업에 대해 기대 주기시간과 주기시간의 분산을 수리적으로 표현하였다. 이는 특정 블록 레이아웃에서 야드 크레인의 성능을 평가하는데 쉽게 적용할 수 있고 특히, 새로운 종류의 야드 크레인을 설계하는 데에도 적용할 수 있을 것이다.

추후 과제로는 블록의 용도에 따른 저장방식(수출 전용, 수입 전용, 수출입 혼용 등)을 다양하게 고려하여 야드 크레인의 성능을 평가하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

부록 1. 상하이동을 위한 기대 거리와 분산

본 연구에서는 야드 크레인의 이동거리를 연속적으로 간주한다. 그러므로 스프레드의 최상단에서부터 컨테이너의 임의의 저장 위치까지 스프레드의 기대 이동거리는 아래 식 (1.1)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}
 E(D_t^h) &= \frac{1}{t} \sum_{z=1}^t (h_{\max} - c_h z) \\
 &= h_{\max} - \left(\frac{1}{t}\right) c_h \left(\frac{t(t+1)}{2}\right) \\
 &= h_{\max} - c_h \left(\frac{t+1}{2}\right). \tag{1.1}
 \end{aligned}$$

위의 식 (1.1)을 이용하여 이동 거리의 분산을 유도하면 아래 식 (1.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Var(D_t^h) &= \frac{1}{t} \sum_{z=1}^t (h_{\max} - c_h z)^2 - E(D_t^h)^2 \\
 &= h_{\max}^2 - h_{\max} c_h (t+1) \\
 &\quad + c_h^2 \frac{1}{6} (t+1)(2t+1) \\
 &\quad - \left(h_{\max} - c_h \left(\frac{t+1}{2}\right)\right)^2 \\
 &= c_h^2 \left(\frac{t^2-1}{12}\right) \tag{1.2}
 \end{aligned}$$

부록 2. 반입 작업의 분산추정을 위한 상세

블록 내에서 임의의 두 지점 사이의 거리는 통계적으로 아래 식 (2.1)과 같은 분포를 따른다.

$$Z = |X - Y| \tag{2.1}$$

식 (2.1)에서 X와 Y는 블록의 길이방향으로 임의의 두 위치를 나타내는 확률변수이다. 블록의 길이는 b_l 로 정의하였으므로, 누적 분포함수(cumulative distribution function)와 확률 밀도함수(probability density function)는 각각 아래 식 (2.2)와 식 (2.3)으로 나타낼 수 있다.

$$F(Z) = \frac{b_l^2 - (b_l - z)^2}{b_l^2} \tag{2.2}$$

$$f(z) = \frac{2(b_l - z)}{b_l^2} \tag{2.3}$$

따라서 블록 내 임의의 두 지점사이의 기대 거리와 거리의 분산은 아래 식 (2.4)와 식 (2.5)로 각각 추정할 수 있다.

$$E(Z) = \frac{b_l}{3} \tag{2.4}$$

$$Var(Z) = \frac{b_l^2}{18} \tag{2.5}$$

베이의 측면에 있는 가상의 TP로부터 베이 내 임의의 저장 위치까지의 거리는 식 (2.6)과 같은 균일분포를 따른다고 볼 수 있다.

$$Z \sim U(d_c, d_c + b_w) \tag{2.6}$$

균일분포의 기대값과 분산을 추정하는 방법을 이용하여 베이 내에서 트롤리 방향으로의 이동거리에 대한 기대값과 분산

을 식 (2.7)과 식 (2.8)로 각각 추정할 수 있다.

$$E(Z) = d_c + \frac{b_w}{2} \tag{2.7}$$

$$Var(Z) = \frac{b_w^2}{12} \tag{2.8}$$

본 논문에서는 위와 같은 기본적인 통계적 추정을 이용하여 다양한 수식을 유도한다.

부록 3. 재취급 회수의 분산

재취급 작업의 기대 회수와 그에 따른 분산은 취급시간을 좀 더 상세하게 추정하기 위해 반드시 고려되어야 한다. 특히, 반출작업의 경우 재취급으로 인해 주기시간의 증감에 많은 영향을 끼치므로 보다 정교한 재취급 작업시간의 추정이 요구된다.

한 베이에 적재되어 있는 컨테이너의 개수를 L 이라 하자. 베이의 구성(열과 단)은 각각의 컨테이너가 인출될 때마다 달라지며, 1회 인출에 대한 재취급 회수는 스택(stack)의 구성에 의해 영향을 받는다. 베이 내 적재된 L 개의 컨테이너를 임의의 순서대로 1개씩 인출할 경우, 모두 인출할 때까지 재취급 회수가 i 회일 확률을 $P(i)$ 라 하자. 이 경우, 재취급 회수의 확률분포는 $P(i)$ 를 이용하여 도출할 수 있다(Kim and Kim, 2002).

<Table 6>은 재취급 회수의 분산을 계산한 예를 나타낸 것이다. 이와 같은 방식으로, 모든 가능한 베이의 구성에 대해서 재취급 회수의 분산을 구할 수 있다. 그 결과는 <Table 7>로 정리하였다. 회색으로 표시된 셀은 비현실적인 베이 구성으로서 본 연구에서는 배제하기로 한다.

아래 <Figure 10>와 <Figure 11>는 <Table 7>의 일부를 그래프로 도시한 것이다. 그래프에서 보이듯이 재취급 회수의 분산은 열(row)의 수가 증가함에 따라 조금씩 감소하고 단(tier)의 수가 증가함에 따라 급격하게 증가함을 볼 수 있다.

Table 6. $P(i)$: The probability that the number of rehandles is i

구성	$P(0)$	$P(1)$	$P(2)$	$P(3)$	$P(4)$	$P(5)$	$P(6)$	$P(R_{rt})$
(t = 1, r = 6)	1.000	0.000						0.000
(t = 2, r = 6)	0.714	0.272	0.014					0.238
(t = 3, r = 6)	0.594	0.261	0.129	0.016				0.598
(t = 4, r = 6)	0.511	0.256	0.140	0.077	0.015			1.069
(t = 5, r = 6)	0.451	0.244	0.149	0.090	0.052	0.015		1.635
(t = 6, r = 6)	0.405	0.231	0.150	0.099	0.063	0.038	0.014	2.352

Table 7. Variances of number of rehandles

$r \backslash t$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2	0.318	0.280	0.260	0.247	0.238	0.231	0.226	0.222	0.219	0.216	0.214	0.212	0.210	0.209
3		0.707	0.654	0.621	0.598	0.581	0.568	0.558	0.550	0.543	0.537	0.532	0.528	0.525
4			1.174	1.112	1.069	1.038	1.014	0.995	0.980	0.968	0.957	0.948	0.940	0.934
5				1.721	1.653	1.604	1.566	1.537	1.513	1.494	1.477	1.463	1.451	1.440
6					2.352	2.281	2.227	2.185	2.151	2.123	2.099	2.079	2.062	2.047
7						3.071	2.998	2.941	2.895	2.858	2.826	2.799	2.776	2.756
8							3.880	3.807	3.747	3.698	3.658	3.623	3.593	3.567

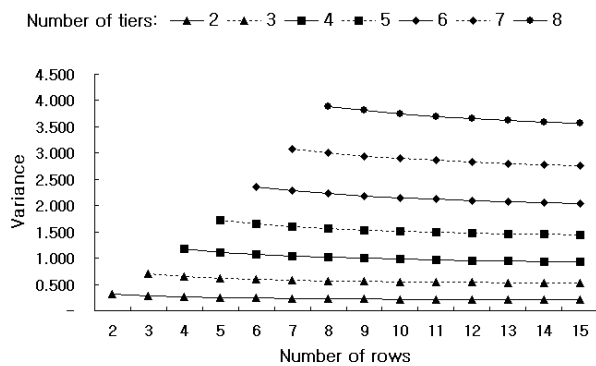


Figure 10. Variances of the number of rehandles

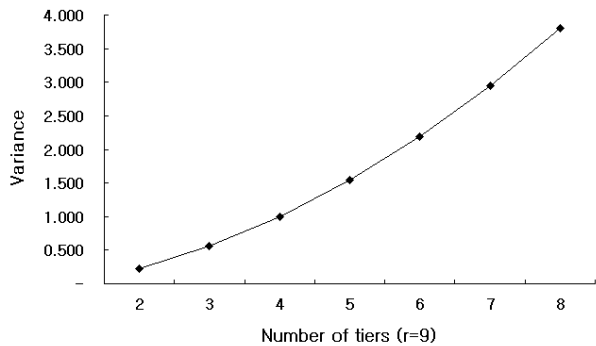


Figure 11. Variances of the number of rehandles (r = 9)

<Table 7>의 데이터를 이용하여 재취급 회수의 분산을 추정

할 수 있는 간단한 수식을 얻고자 회귀분석을 수행하였다. 회귀 분석은 상용 통계 소프트웨어인 MINITAB을 사용하였고 그 결과 아래 식 (3.1)과 같은 간략한 수식을 얻을 수 있었다. 분석 결과 P-값이 거의 0에 근접하므로 통계적으로 매우 유의하다고 볼 수 있다.

$$Var(R_{rt}) = -0.0186r + 0.0585t^2 + 0.2169 \tag{3.1}$$

참고문헌

de Castilho, B. and Daganzo, C. F. (1993), Handling Strategies for Import Containers at Marine Terminals, *Transportation Research Part B*, **27**(2), 151-166.

Hu, Y. H., Huang, S. Y., Chen, C., Hsu, W. J., Toh, A. C., Loh, C. K., and Song, T. (2005), Travel Time Analysis of a New Automated Storage and Retrieval System, *Computers and Operations Research*, **32**(6), 1515-1544.

Kim, K. H. (1997), Evaluation of the Number of Rehandles in Container Yards, *Computers & Industrial Engineering*, **32**(4), 701-711.

Kim, K. H. and Kim, H. B. (2002), The Optimal Sizing of the Storage Space and Handling Facilities for Import Containers, *Transportation Research Part B*, **36**(9), 821-835.

Lee, H. W. (1998), *Queueing Theory: Stochastic Processes Analysis*, 387-398, Sigma Press

Ross, S. M. (1996), *Stochastic Processes*, 2nd Edition, 22-23, Wiley.