

컨테이너 터미널에서 장치계획을 고려한 야드 크레인 배치 문제

원승환† · 김갑환*

† 한국해양수산개발원 해양물류연구부, *부산대학교 산업공학과

Deployment of Yard Cranes Considering Storage Plans in Container Terminals

Seung Hwan Won† · Kap Hwan Kim*

† Shipping, Port & Logistics Research Department, Korea Maritime Institute, Seoul 121-270, South Korea

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

요 약 : 컨테이너 터미널의 핵심 기능은 컨테이너 화물을 선박에 싣고 내리는 것이다. 이러한 기능에 대한 생산성을 향상시키기 위해서는 보유한 자원을 효과적으로 사용해야 하는데, 본 연구는 RMGC(rail mounted gantry crane) 유형 야드 크레인의 배치 방안에 대해서 논한다. 먼저, 컨테이너 터미널의 장치계획을 고려한 야드 크레인 배치 문제에 대한 수리모형을 개발한다. 수리모형은 한 기간 내에서 블록간 야드 크레인의 이동 허용여부에 따라서 2가지로 나누어진다. 제시한 모형을 검증하기 위하여 수치 예제를 풀어서 결과를 분석한다. 또한 장치계획만을 다루는 기존 모형과의 성능 차이를 분석하기 위한 비교 실험을 수행한다.

핵심용어 : 야드 크레인, 배치, 장치계획, 컨테이너 터미널

Abstract : The main function of a container terminal is to load container freights into vessels and discharge them from vessels. The container terminal needs to utilize its resources effectively in order to improve the productivity of it. This study deals with the deployment model for yard cranes whose type is RMGC (rail mounted gantry crane). We develop a mathematical model for the deployment of yard cranes. The model considers not only the deployment but also the storage plans. It could be divided into two cases according to whether inter-block movements of yard cranes are allowed or not, during the same period. Numerical examples are solved and analyzed to validate the model. Then, additional experiments are performed to compare the performance of the model with that of a previous model without the re-deployment of yard cranes.

Key words : yard crane, deployment, storage plan, container terminal

1. 서 론

항만에 위치한 컨테이너 터미널의 핵심 기능은 컨테이너 화물을 선박에 싣고 내리는 것이다. 이러한 기능을 수행하기 위하여 컨테이너 터미널은 안벽 하역장비, 야드 하역장비, 이송장비 등을 사용하고 있으며, 컨테이너의 도착과 출발 시점의 차이를 극복하기 위해 임시 보관을 위한 장치장을 보유하며, 터미널의 특성에 따라서 다른 수송 모드로의 연계 시스템을 갖추고 있다. 컨테이너 터미널의 생산성을 향상시키기 위해서는 보유한 자원을 효과적으로 사용해야 하는데, 본 연구는 야드 크레인의 효과적인 배치(deployment) 방안에 대해서 논하고자 한다.

야드 크레인은 구조적으로 갠트리 형식을 갖추고 있지만 이동 방식에 따라서 두 가지로 나누어진다. 첫 번째는 레일 위에서만 이동이 가능한 RMGC(rail mounted gantry crane)이고 두 번째는 타이어가 달린 바퀴를 통해 자유롭게 이동이 가능한 RTGC(rubber tired gantry crane)이다. RMGC는 RTGC에 비해 보다 빠르고 안정적인 작업이 가능하고 자동화가 가능하

다는 장점을 보유하고 있다. 하지만 이동을 할 수 있는 영역이 한 블록 혹은 동일한 행에 인접한 몇 개의 블록으로 제한된다. 반면에 RTGC는 작업 성능이 RMGC보다 떨어지고 자동화가 어렵지만 다른 블록으로 자유롭게 이동 가능하다.

야드 크레인의 배치에 관련된 연구는 한 블록 내에서의 배치, 한 선석에 대한 배치, 블록간의 배치로 나누어지는데 (Chung et al., 2002), 본 연구에서는 블록간의 배치를 다루고자 한다. 블록간의 배치와 관련된 기존 연구를 살펴보면, Linn et al. (2003)은 한 기간 내에서 작업 부하를 균등화하기 위하여 RTGC의 배치 문제를 혼합 정수계획법으로 모형화하고 배치 전략을 개발하였다. Zhang et al. (2002)은 여러 기간을 계획 범위 (planning horizon)로 하는 RTGC의 배치 문제를 다루었다. 작업 부하는 각 기간의 시작 시점에 추정되고, RTGC는 각 기간 동안 한 번만 이동 가능하며 RTGC의 이동은 각 기간 내에 완료된다고 가정하였다. 문제는 혼합 정수계획법으로 모형화 되고 라그랑지안 완화법을 통해 풀었다. Linn and Zhang (2003)은 RTGC의 배치 문제에 대한 수리 모형을 제시한 후

† 교신저자 : 원승환(정회원), shwon@kmi.re.kr 02)2105-2886

* 종신회원, kapkim@pusan.ac.kr 051)510-2419

효율적으로 풀기 위한 휴리스틱을 제시하였다. 휴리스틱은 각 단계에서 최소 비용을 가지는 RTGC의 이동을 결정하며, 블록 간의 이동은 동일한 기간에서 시작하여 종료된다고 가정하였다. Chung et al. (2002)는 RTGC의 배치 문제에 대한 수리 모형을 제시하였는데, 크레인의 이동이 한 기간 내에 완료되어야 한다는 가정을 제거하였다. 제시한 혼합 정수계획법 모형에서 문제의 복잡도를 분석하여, 큰 문제를 효율적으로 풀 수 있는 방안을 제시하였다.

기존 연구를 살펴보면 야드 크레인의 작업 부하는 입력되는 데이터로 취급되었다. 하지만 야드 크레인의 작업 부하는 장치 계획에 따라서 결정되며 장치계획은 선박의 도착에 영향을 받게 된다. 따라서 장치계획과 함께 야드 크레인의 배치계획이 수행되면 보다 현실적이면서 최적화된 계획을 수립할 수 있다. 따라서 본 연구는 컨테이너 터미널의 다양한 자원 부하를 고려하여 장치계획을 수행하는 Won and Kim (2009)의 모형을

야드 크레인의 능력이 제약사항이면서 동시에 결정사항이 되는 모형으로 변형하여 RMGC의 배치 문제를 다루고자 한다. 즉, 선박의 도착 정보가 주어졌을 때 장치장에 도착하는 컨테이너들의 공간계획과 RMGC의 배치계획을 동시에 결정하고자 한다.

Fig. 1은 RMGC로 운영되는 컨테이너 장치장의 예를 나타낸다. 제시된 장치장은 4행 3열로 이루어진 12개의 저장 블록으로 구성되고, 장치장의 위쪽에는 선박이 접안하는 선석이 3개 있고 장치장의 아래쪽에는 외부 이송장비가 출입하는 게이트가 있다. 한 행에 5대의 RMGC가 설치되어 있어서 내부 및 외부 이송장비와 컨테이너를 주고받을 수 있다. 하지만 RMGC는 레일 위에서만 이동이 가능하기 때문에 동일한 행의 블록으로만 이동할 수 있고 다른 행으로는 이동이 불가능하다. 한 블록에 배치되는 RMGC의 최대 대수는 블록의 크기와 운영 방식에 따라서 결정된다.

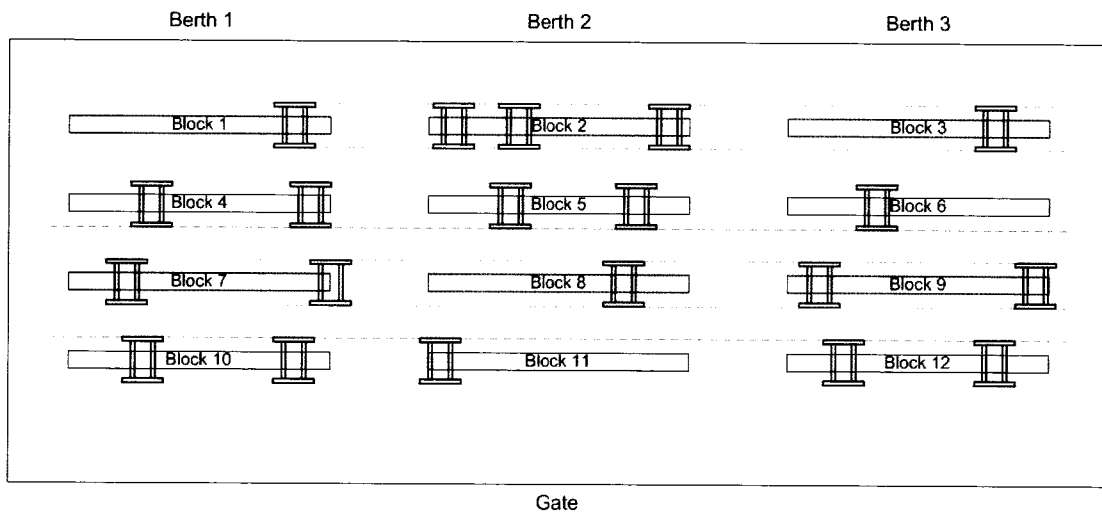


Fig. 1 The layout of the storage yard

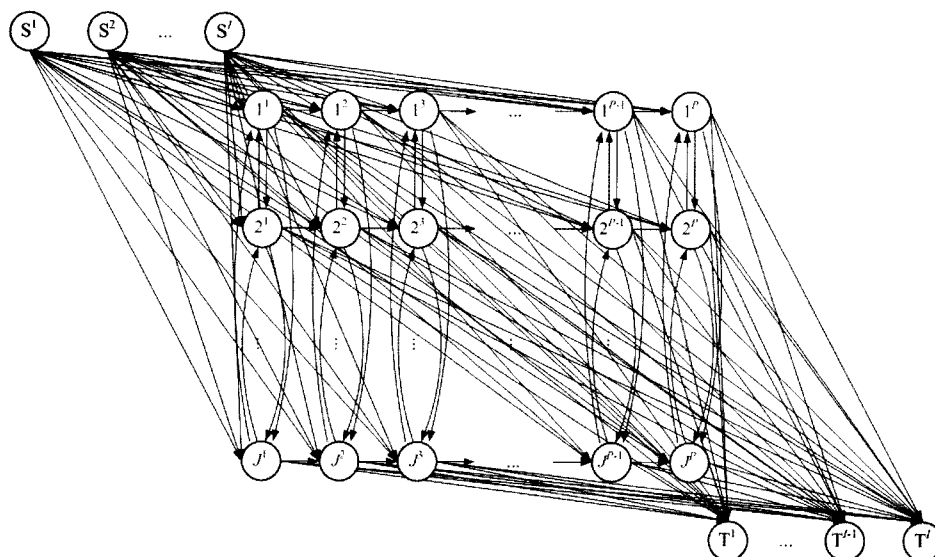


Fig. 2 The network representation of yard planning (Won and Kim, 2009)

본 논문의 구성을 살펴보면, 2장에서 문제에 대한 수리 모형을 제시하고, 3장에서는 수치 예제를 설명한다. 4장에서는 기존의 장치계획 모형과 본 연구에서 제시한 모형을 비교하는 실험 결과를 소개한다. 마지막으로, 5장에서는 결론을 제시한다.

2. 수리모형

본 연구의 수리 모형은 Fig. 2와 같이 장치계획의 네트워크 표현을 기반으로 한다. 네트워크의 시작 마디 (source node) S^i 는 나가는 호(arc)만을 가지며 저장 활동 i 의 개시 사건에 해당된다. 종착 마디 (sink or terminal node) T^i 는 들어오는 호만을 가지며 저장 활동 i 의 종결 사건에 해당된다. 각 저장 활동은 하나의 시작 마디와 하나의 종착 마디를 가진다. 경유 마디 (transshipment node) J^p 는 들어오는 호와 나가는 호를 모두 가지며 저장 블록 j 와 기간 p 에서의 증개 사건에 해당된다. 시작 마디에서 경유 마디로의 호는 컨테이너의 양하 혹은 반입을 나타내고, 경유 마디 간의 수평 호는 동일한 저장 블록에서 기간이 경과하므로 장치장에서의 보관을 나타내고, 경유 마디 간의 수직 호는 동일한 기간에서 저장 블록이 변화하므로 저장 블록 간의 이적을 나타내고, 경유 마디에서 종착 마디로의 호는 컨테이너의 반출 혹은 적하를 나타낸다. 각 호의 흐름량은 관련된 자원의 능력에 의해 제한된다.

이와 같은 네트워크 모형을 기반으로 RMGC의 배치 문제를 모형화하기 위하여 두 가지 경우를 나누어서 접근하고자 한다. 첫 번째 경우는 RMGC가 한 기간 내에서 동일한 행의 다른 블록으로 이동이 가능한 상황이고 (Case I), 두 번째 경우는 RMGC가 한 기간 내에서는 동일한 블록에 머물러야 하는 상황이다 (Case II). 두 경우 모두, 블록의 각 행에 운영되는 RMGC의 수는 고정된다. 이렇게 두 경우를 나누어서 수리모형을 제시하고자 한다.

2.1 수리모형 (Case I)

본 모형은 블록의 각 행에 운영되는 RMGC의 수가 고정된 상황에서 RMGC가 한 기간 내에서 동일한 행의 다른 블록으로 이동 가능하며 한 블록에 배치되는 RMGC의 최대 대수를 제한하는 경우이다.

수리 모형을 수립하기 위하여 다음의 표기법을 사용하기로 한다.

인덱스:

- j, u, v, y 저장 블록에 대한 인덱스. 인덱스 0은 저장 활동의 시작점을 뜻하며, 외부 이송장비로부터 게이트에 도착하는 컨테이너, 선박으로부터 양하되는 컨테이너 등이 시작점이 될 수 있음.
- p 기간에 대한 인덱스.
- I 저장 활동에 대한 인덱스.

k 저장 블록의 행에 대한 인덱스.

문제의 상수값:

- C_i^{uv} 저장 활동 i 에 대해서, 컨테이너 하나가 블록 u 에서 v 로 전달될 때 발생하는 비용. $v = u$ 일 때는 저장비용에 해당되고, $v \neq u$ 일 때는 수송비용과 취급비용의 합에 해당됨.
 - α_i^{uv} 저장 활동 i 에 대해서, 컨테이너가 블록 u 에서 블록 v 로 전달되는 작업에 대한 긴급도 계수. 0과 1 사이의 값을 가짐. 고객이 서비스를 기다리는 경우에는 높은 값을 가지고, 그렇지 않은 경우에는 낮은 값을 가짐. 따라서 리마살링 작업에는 낮은 긴급도 계수가 부여됨.
 - d_i 저장 활동 i 에 대해 요구되는 컨테이너의 양.
 - q_i 저장 활동 i 에 대해서, 컨테이너 하나가 점유하는 공간.
 - s_i 저장 활동 i 의 시작 기간.
 - f_i 저장 활동 i 의 종료 기간.
 - a_{ip} 저장 활동 i 에 대한 전체 컨테이너 가운데 기간 p 에 도착하는 컨테이너의 비율. 계획 범위에 대해서 각 저장 활동에 대한 도착 비율의 합은 1이 됨.
 - r_{ip} 기간 p 의 초에, 저장 활동 i 에 대한 컨테이너의 출발 비율. 기간 p 는 s_i 와 f_i 사이의 값을 가짐. 단, 기간 $(p - 1)$ 의 말에 남아있는 저장 활동 i 의 전체 컨테이너 가운데, 기간 p 의 초에 장치장을 출발하는 컨테이너의 비율.
 - β 저장 활동 i 에 대해서, $a_{ip} > 0$ 인 기간의 수. 단, $a_{ip} > 0$ for $p = s_i, s_i + 1, \dots, s_i + \beta - 1$.
 - γ_i 저장 활동 i 에 대해서, $r_{ip} > 0$ 인 기간의 수. 단, $r_{ip} > 0$ for $p = f_i - \gamma_i + 1, f_i - \gamma_i + 2, \dots, f_i$.
 - ω_{ip}^{uv} 블록 y 에 위치한 RMGC가 저장 활동 i 에 대한 컨테이너 하나를 블록 u 에서 블록 v 로 이동시키기 위한 취급 시간. 블록 y 는 u 혹은 v 가 됨.
 - b_j 블록 j 의 저장 능력. 저장 가능한 컨테이너의 양으로 표현.
 - h_j^{Block} 한 기간 동안, 블록 j 의 취급 능력. 한 기간 동안 블록 j 에 위치한 RMGC의 가용한 취급시간의 합으로 표현.
 - h_k^{Row} 한 기간 동안, 행 k 의 취급 능력. 한 기간 동안 행 k 에 위치한 RMGC의 가용한 취급시간의 합으로 표현.
- 집합:
- T 기간의 집합. $T = \{0, 1, \dots, t\}$. 기간 0은 초기 상태를 나타내며, I 에서 t 까지는 계획 기간을 나타냄.
 - A 저장 활동의 집합. $A = \{1, 2, \dots, a\}$.

- A_0 당 계획 이전에 이미 장치장에 저장되어 있거나 저장 위치가 결정된 컨테이너에 관련된 저장 활동. 단, $A_0 \subset A$.
- B 저장 블록의 집합. $B = \{0, 1, \dots, b + 1\}$. 장치장에는 I 에서 b 까지의 블록만이 존재함. 블록 0 과 $(b + 1)$ 은 장치장에 존재하지 않으며, 각 저장 활동의 시작점과 종착점을 각각 나타냄.
- R 저장 블록 행의 집합. $R = \{1, 2, \dots, r\}$.
- B_k 행 k 에 속한 블록의 집합.
- H_{jp} 저장 활동 i 에 대해서, 기간 p 의 초에 블록 u 에서 v 로 이동하는 컨테이너의 수. $v = u$ 일 때는, 기간 p 의 말에 조사되는 저장 활동 i 의 재고수준에 해당.
- 기간 p 에 대해서, 블록 j 에 배치되는 RMGC의 취급 시간.
- Case I에 대해서, 컨테이너 터미널의 장치계획을 고려한 RMGC의 배치 문제는 다음과 같이 선형계획법 모형으로 수립될 수 있다.

의사결정변수:

X_{ip}^{uv}

식 (1)은 목적함수로서 모든 저장 활동의 총비용을 최소화한다. 비용에 곱해진 긴급도 계수는 긴급성이 떨어지는 작업

$$\text{Minimize } \sum_{i \in A - A_0} \sum_{u \in \{0\} \cup B} \sum_{v \in B \cup \{b+1\}} \sum_{p \in T} \alpha_i^{uv} c_i^{uv} X_{ip}^{uv}, \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{v \in B} X_{ip}^{0v} = a_{ip} d_i \quad \text{where } i \in A - A_0 \text{ and } p = s_i, s_i + 1, \dots, s_i + \beta_i - 1, \quad (2)$$

$$X_{ip}^{jj} - X_{ip}^{0j} + \sum_{v \in B - \{j\}} X_{ip}^{jv} - X_{i(p-1)}^{jj} - \sum_{u \in B - \{j\}} X_{ip}^{uj} = 0 \quad (3)$$

where $i \in A - A_0$, $j \in B$, and $p = s_i, s_i + 1, \dots, s_i + \beta_i - 1$,

$$X_{ip}^{jj} + \sum_{v \in B - \{j\}} X_{ip}^{jv} - X_{i(p-1)}^{jj} - \sum_{u \in B - \{j\}} X_{ip}^{uj} = 0 \quad (4)$$

where $i \in A - A_0$, $j \in B$, and $p = s_i + \beta_i, s_i + \beta_i + 1, \dots, f_i - \gamma_i$,

$$X_{ip}^{jj} + \sum_{v \in B - \{j\}} X_{ip}^{jv} - X_{i(p-1)}^{jj} - \sum_{u \in B - \{j\}} X_{ip}^{uj} + X_{ip}^{j(b+1)} = 0 \quad (5)$$

where $i \in A - A_0$, $j \in B$, and $p = f_i - \gamma_i + 1, f_i - \gamma_i + 2, \dots, f_i$,

$$X_{ip}^{j(b+1)} - r_{ip} X_{i(p-1)}^{jj} = 0 \quad \text{where } i \in A - A_0, j \in B, \text{ and } p = f_i - \gamma_i + 1, f_i - \gamma_i + 2, \dots, f_i, \quad (6)$$

$$\sum_{v \in B - \{j\}} X_{ip}^{jv} - X_{i(p-1)}^{jj} \leq 0 \quad \text{where } i \in A - A_0, j \in B, \text{ and } p = s_i, s_i + 1, \dots, s_i + \beta_i - 1, \quad (7)$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{v \in B} q_i X_{ip}^{jv} \leq b_j \quad \text{where } j \in B \text{ and } p \in T, \quad (8)$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{u \in \{0\} \cup B - \{j\}} \omega_{ij}^{uj} X_{ip}^{uj} + \sum_{i \in A} \sum_{v \in B \cup \{b+1\} - \{j\}} \omega_{ij}^{jv} X_{ip}^{jv} \leq H_{jp} \quad \text{where } j \in B \text{ and } p \in T, \quad (9)$$

$$H_{jp} \leq h_j^{Block} \quad \text{where } j \in B \text{ and } p \in T, \quad (10)$$

$$\sum_{j \in B_k} H_{jp} \leq h_k^{Row} \quad \text{where } k \in R \text{ and } p \in T, \quad (11)$$

$$X_{i(s_i-1)}^{jj} = 0 \quad \text{where } i \in A - A_0 \text{ and } j \in B, \quad (12)$$

$$X_{i0}^{jj} = 0 \quad \text{where } i \in A - A_0 \text{ and } j \in B, \quad (13)$$

$$X_{i0}^{jv} \text{ are given} \quad \text{where } i \in A_0 \text{ and } j \in B, \quad (14)$$

$$X_{ip}^{uv} \text{ are given} \quad \text{where } i \in A_0, u \in \{0\} \cup B, v \in B \cup \{b+1\}, \text{ and } p = 1, 2, \dots, f_i, \quad (15)$$

$$X_{ip}^{uv} \geq 0 \quad \text{where } i \in A - A_0, u \in \{0\} \cup B, v \in B \cup \{b+1\}, \text{ and } p \in T, \quad (16)$$

$$H_{jp} \geq 0 \quad \text{where } j \in B \text{ and } p \in T. \quad (17)$$

에 대해서는 비용을 할인하여 적용하기 위해 사용되었다. 식 (2)~(6)은 Fig. 2의 네트워크 모형에서 흐름 보존(flow conservation)에 대한 제약을 표현한다. 식 (2)는 시작 마디, 식 (3)~(5)는 경유 마디, 식 (6)은 종착 마디에서의 흐름 보존을 나타낸다. 식 (7)은 도착한 물량이 동일한 기간 내에 이적되지 않도록 하기 위하여 도입하였다.

식 (8)은 각 기간, 각 블록에 대한 모든 저장 활동의 저장량이 각 블록의 저장 능력을 넘지 못하도록 제한한다. 식 (9)~(11)은 RMGC의 취급 능력에 대한 제약을 나타낸다. 식 (9)는 각 기간, 각 블록에 배치되는 RMGC의 취급시간이 요구되는 취급시간보다 커야 함을 나타낸다. 식 (10)은 한 블록에 배치되는 RMGC의 최대 취급시간을 제약한다. 즉, 한 블록에 배치되는 RMGC의 최대 대수를 제한하게 된다. 비슷한 방식으로, 식 (11)은 한 행에 배치되는 RMGC의 최대 취급시간을 제약함으로써, 각 행에 배치되는 RMGC의 수가 고정된 상황임을 나타낸다.

식 (12)는 각 저장 활동의 시작 기간 직전의 기말재고는 없음을 나타내고, 식 (13)은 식 (3)과 (7)에서 기간의 인덱스가 0이 되는 경우에 대한 조치이다. 식 (14)와 (15)는 당 계획 이전에 이미 장치장에 저장되어 있거나 저장 위치가 결정된 컨테이너들에 대한 장치 정보에 해당된다. 식 (14)는 이미 도착한 컨테이너에 대한 기초 재고이고, 식 (15)는 이미 도착한 컨테이너의 보관→(이적)→출발, 도착 예정인 컨테이너의 도착→보관→(이적)→출발에 대한 계획이다. 식 (16)은 장치계획에 대한 의사결정변수로서, 컨테이너의 개수에 해당되므로 정수로 제한하여야 하지만 하나의 저장 활동이 고려하는 컨테이너의 개수는 수십에서 수백에 이를 정도로 많으므로 실수 제약으로 풀 후 인근 정수로 변환하여도 해에는 큰 영향을 미치지 않는다 (Won and Kim, 2009). 식 (17)은 RMGC의 배치에 대한 의사결정변수이다. RMGC가 한 기간 내에서 이동 가능하므로 각 기간, 각 블록에 배치되는 취급시간은 RMGC 단위당 가용 취급시간의 배수가 될 필요가 없다.

계획 시점에, A_0 에 대한 모든 의사결정이 이미 이루어졌기 때문에 당 계획의 의사결정에서는 제외된다. 단, 부하 계산에서는 모든 저장 활동을 고려해야 하므로 식 (8), (9)에서와 같이 A_0 를 제외하지 않는다.

본 모형을 통해 얻어지는 H_{jp} 의 최적해는 Table 1과 같은 형태로 표현된다. 블록의 한 행, 즉 동일한 레일에 운영되는 RMGC가

6대로 고정된 상황에서 기간 3에, 각 블록에 배치되는 RMGC의 대수를 나타낸다. 이러한 결과를 통해 각 기간별로, 각 블록에 할당되어야 하는 RMGC의 대수를 쉽게 결정할 수 있다.

Table 1 An illustration for the deployment of RMGCs ($p = 3$)

Row \ Column	1	2	3
1	2.5 ($j=1$)	1.7 ($j=2$)	1.8 ($j=3$)
2	2.8 ($j=4$)	1.5 ($j=5$)	1.7 ($j=6$)
3	1.0 ($j=7$)	1.5 ($j=8$)	2.5 ($j=9$)

* Each value is H_{jp} divided by the handling capacity of an RMGC for a period.

2.2 수리모형 (Case II)

본 모형은 블록의 각 행에 운영되는 RMGC의 수가 고정된 상황에서 RMGC가 한 기간 내에서는 동일한 블록에 머물러야 하며 한 블록에 배치되는 RMGC의 최대 대수를 제한하는 경우이다. Case I과 다른 점은 한 기간 내에서 RMGC가 다른 블록으로 이동할 수 없다는 것이다. 즉, RMGC는 기간이 변경될 때에만 다른 블록으로 이동할 수 있다.

모형에 Case I과 다른 부분을 반영하기 위하여, 다음과 같이 일부 표기법을 재정의한다. 재정의되지 않은 표기법은 Case I과 동일하다.

문제의 상수값:

- h_j^{Block} 한 기간 동안, 블록 j 에 배치될 수 있는 RMGC의 최대 대수.
- h_k^{Row} 한 기간 동안, 행 k 에 배치될 수 있는 RMGC의 최대 대수.
- h 한 기간 동안, RMGC 한 대의 가용 취급시간.

의사결정변수:

- H_{jp} 기간 p 에 대해서, 블록 j 에 배치되는 RMGC의 대수.

Case II에 대해서, 컨테이너 터미널의 장치계획을 고려한 RMGC의 배치 문제는 다음과 같이 혼합 정수계획법 모형으로 수립될 수 있다.

$$\text{Minimize } \sum_{i \in A - A_0} \sum_{u \in \{0\} \cup B} \sum_{v \in B \cup \{b+1\}} \sum_{p \in T} \alpha_i^{uv} c_i^{uv} X_{ip}^{uv}, \tag{18}$$

subject to

$$\sum_{v \in B} X_{ip}^{0v} = a_p d_i \text{ where } i \in A - A_0 \text{ and } p = s_i, s_i + 1, \dots, s_i + \beta_i - 1, \tag{19}$$

$$X_{ip}^{jj} - X_{ip}^{0j} + \sum_{v \in B - \{j\}} X_{ip}^{jv} - X_{i(p-1)}^{jj} - \sum_{u \in B - \{j\}} X_{ip}^{uj} = 0 \tag{20}$$

where $i \in A - A_0$, $j \in B$, and $p = s_i, s_i + 1, \dots, s_i + \beta_i - 1$,

$$X_{ip}^{jj} + \sum_{v \in B - \{j\}} X_{ip}^{jv} - X_{i(p-1)}^{jj} - \sum_{u \in B - \{j\}} X_{ip}^{uj} = 0 \tag{21}$$

where $i \in A - A_0$, $j \in B$, and $p = s_i + \beta_i, s_i + \beta_i + 1, \dots, f_i - \gamma_i$,

$$X_{ip}^{jj} + \sum_{v \in B - \{j\}} X_{ip}^{jv} - X_{i(p-1)}^{jj} - \sum_{u \in B - \{j\}} X_{ip}^{uj} + X_{ip}^{j(b+1)} = 0$$

where $i \in A - A_0$, $j \in B$, and $p = f_i - \gamma_i + 1, f_i - \gamma_i + 2, \dots, f_i$,

$$X_{ip}^{j(b+1)} - r_{ip} X_{i(p-1)}^{jj} = 0 \text{ where } i \in A - A_0, j \in B, \text{ and } p = f_i - \gamma_i + 1, f_i - \gamma_i + 2, \dots, f_i,$$

$$\sum_{v \in B - \{j\}} X_{ip}^{jv} - X_{i(p-1)}^{jj} \leq 0 \text{ where } i \in A - A_0, j \in B, \text{ and } p = s_i, s_i + 1, \dots, s_i + \beta_i - 1,$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{v \in B} q_i X_{ip}^{jv} \leq b_j \text{ where } j \in B \text{ and } p \in T,$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{u \in \{0\} \cup B - \{j\}} \omega_{ij}^{uj} X_{ip}^{uj} + \sum_{i \in A} \sum_{v \in B \cup \{b+1\} - \{j\}} \omega_{ij}^{jv} X_{ip}^{jv} \leq h H_{jp} \text{ where } j \in B \text{ and } p \in T,$$

$$H_{jp} \leq h_j^{Block} \text{ where } j \in B \text{ and } p \in T,$$

$$\sum_{j \in B_k} H_{jp} \leq h_k^{Row} \text{ where } k \in R \text{ and } p \in T,$$

$$X_{i(s,-1)}^{jj} = 0 \text{ where } i \in A - A_0 \text{ and } j \in B,$$

$$X_{i0}^{jj} = 0 \text{ where } i \in A - A_0 \text{ and } j \in B,$$

$$X_{i0}^{jv} \text{'s are given where } i \in A_0 \text{ and } j \in B,$$

$$X_{ip}^{uv} \text{'s are given where } i \in A_0, u \in \{0\} \cup B, v \in B \cup \{b+1\}, \text{ and } p = 1, 2, \dots, f_i,$$

$$X_{ip}^{uv} \geq 0 \text{ where } i \in A - A_0, u \in \{0\} \cup B, v \in B \cup \{b+1\}, \text{ and } p \in T,$$

$$H_{jp} = 0, 1, \dots, h_j^{Block} \text{ where } j \in B \text{ and } p \in T.$$

Case I에서 RMGC의 취급시간으로 정의되었던 변수가 Case II에서는 RMGC의 대수로 변경되어, 식 (26)과 (34)가 바뀌었을 뿐 나머지 부분은 Case I과 동일하다. 단, Case I의 식 (10), (11)에서는 RMGC의 취급시간을 사용하여 대수를 제약하였으나 Case II의 식 (27), (28)에서는 RMGC의 대수를 사용하여 바로 제약한다. 만약 식 (34)에서 H_{jp} 를 실수로 제약하면 본 모형은 Case I과 동일한 상황을 나타내게 된다.

3. 수치 예제

3.1 입력 자료

2장에서 설명한 수리모형에 대해서, 수치 예제를 풀기 위한 입력 자료를 설명한다. 장치장의 레이아웃은 Fig. 1에 제시된 것을 사용하였다. 장치장은 4행 3열의 12개 블록으로 구성되고 각 블록은 5단 6열 40베이로 이루어진다. 단, RMGC는 Fig. 5와 달리 한 행에 4대씩 운영되고 한 블록에 최대 2대까지 배치될 수 있도록 하였다. 선석 및 게이트와 블록의 거리, 블록 간

의 거리는 Table 2와 Table 3에 각각 제시된다.

저장 활동에 의하여 소모되는 취급 능력을 계산하기 위해서는 야드 크레인의 단위 취급시간이 필요하다. 이를 위해, 야드 크레인 유형과 작업 유형에 따른 작업 사이클 타임의 평균을 제시한 Lee and Kim (2007)의 연구 결과를 사용하였다. 또한 계획에 사용되는 한 기간의 길이를 하루로 가정하여, 자원의 능력을 다음과 같이 산정하였다.

$$\begin{aligned} \text{한 블록의 저장 능력} &= (\text{단의 개수}) \times (\text{열의 개수}) \times (\text{베이의 개수}) \\ &= 5 \times 6 \times 40 \\ &= 1,200(\text{단위}). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RMGC 한 대의 취급 능력} &= (\text{한 기간의 길이}) \times (\text{RMGC의 utilization}) \\ &= 1,440\text{분} \times 0.65 \\ &= 936\text{분}. \end{aligned}$$

Table 2 The distance between berths or gate and blocks (in meters)

blocks	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
berth 1	70	364	658	134	428	722	198	492	786	262	556	850
berth 2	364	70	364	428	134	428	492	198	492	556	262	556
berth 3	658	364	70	722	428	134	786	492	198	850	556	262
gate	586	292	586	522	228	522	458	164	458	394	100	394

Table 3 The distance between two blocks (in meters)

blocks	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	294	588	64	358	652	128	422	716	192	486	780
2	294	0	294	358	64	358	422	128	422	486	192	486
3	588	294	0	652	358	64	716	422	128	780	486	192
4	64	358	652	0	294	588	64	358	652	128	422	716
5	358	64	358	294	0	294	358	64	358	422	128	422
6	652	358	64	588	294	0	652	358	64	716	422	128
7	128	422	716	64	358	652	0	294	588	64	358	652
8	422	128	422	358	64	358	294	0	294	358	64	358
9	716	422	128	652	358	64	588	294	0	652	358	64
10	192	486	780	128	422	716	64	358	652	0	294	588
11	486	192	486	422	128	422	358	64	358	294	0	294
12	780	486	192	716	422	128	652	358	64	588	294	0

저장 활동은 수입 컨테이너, 수출 컨테이너, 환적 컨테이너와 각각 관련된 세 가지 유형이 있다. 수입 컨테이너는 작업 주기 10일(양하 1일, 보관 3일, 반출 6일), 수출 컨테이너는 작업 주기 10일(반입 6일, 보관 3일, 적하 1일), 환적 컨테이너는 작업 주기를 5일(양하 1일, 보관 3일, 적하 1일)로 가정하여 기간별 도착 비율과 출발 비율을 정의하였다.

긴급도 계수는 고객에게 직접 서비스하지 않는 작업에 대한 비용을 할인하기 위하여 사용된다. 즉, 보관 중인 컨테이너를 이적하는 작업에 대해서는 낮은 긴급도를 적용한다. 예제에서 고객을 직접 서비스하는 작업(양하, 적하, 반출, 반입 작업)에 대한 긴급도 계수는 1로 두고, 이적 작업에 대한 긴급도 계수는 0.2로 두었다.

3.2 풀이 결과

수리 모형은 ILOG OPL Development Studio 5.5로 코드화되었고 풀이에는 ILOG CPLEX 11.0 엔진이 사용되었다. 풀이 시간은 Intel Core2 CPU 2GHz 프로세서 PC를 사용한 결과이다.

1) Case I

Case I의 한 문제를 풀어서 장치계획에 의한 점유 공간, RMGC 배치 결과를 정리해 보았다. 문제 풀이에는 약 1분 30초가 소요되었다.

Table 4 The space occupied from the yard planning in an example (in TEU)

Block \ Period	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg.
1	1,200 (892)	1,200 (753)	1,200 (439)	1,200 (298)	1,200 (512)	1,200 (231)	1,200 (-)	1,200 (-)	1,200 (-)	1,200 (-)	1,200
2	1,200 (1,061)	1,200 (529)	1,200 (456)	1,200 (-)	1,200 (-)	1,200 (-)	1,200 (-)	1,200 (-)	1,200 (-)	1,200 (-)	1,200
3	1,200 (909)	1,200 (611)	1,200 (573)	1,200 (112)	1,200 (-)	1,200 (-)	1,200 (354)	1,200 (297)	1,200 (-)	1,200 (-)	1,200
4	1,200 (1,200)	1,200 (1,123)	1,200 (1,056)	1,200 (1,015)	1,114 (847)	1,200 (540)	1,182 (490)	1,200 (185)	1,200 (-)	1,200 (-)	1,190
5	1,030 (889)	836 (578)	1,200 (543)	1,117 (272)	1,200 (271)	1,200 (270)	1,143 (-)	1,200 (-)	1,200 (-)	1,147 (-)	1,127
6	1,200 (794)	1,200 (794)	1,200 (674)	1,165 (638)	1,200 (509)	1,200 (298)	1,200 (298)	1,200 (80)	1,200 (-)	1,200 (-)	1,196
7	1,200 (898)	1,200 (671)	1,200 (485)	1,200 (386)	1,176 (155)	1,200 (117)	1,200 (92)	1,091 (82)	1,200 (-)	1,200 (-)	1,187
8	1,200 (1,200)	1,146 (1,146)	1,200 (1,200)	898 (882)	990 (733)	1,200 (626)	918 (298)	1,200 (20)	1,200 (-)	1,199 (-)	1,115
9	1,200 (995)	1,200 (820)	1,200 (335)	1,084 (198)	1,200 (384)	1,173 (314)	1,200 (287)	1,109 (265)	916 (-)	1,200 (-)	1,148
10	1,070 (1,070)	986 (986)	832 (812)	1,200 (684)	983 (451)	917 (173)	1,034 (69)	809 (17)	1,200 (-)	1,200 (-)	1,023
11	1,013 (993)	1,054 (969)	1,066 (861)	1,027 (622)	1,115 (549)	1,199 (527)	1,176 (445)	1,200 (301)	1,169 (-)	1,018 (-)	1,104
12	1,161 (1,161)	1,200 (784)	884 (469)	997 (330)	1,200 (212)	949 (52)	1,200 (14)	1,117 (4)	1,079 (-)	1,003 (-)	1,079

Table 4는 계획 범위인 10기간에 대한 장치계획으로 얻어진 기간별, 블록별 점유 공간을 나타낸다. 팔호 안의 값은 당 계획 이전에 점유되었거나 점유가 예정되었던 공간을 표시한다. 선석에 가까운 블록일수록 점유 공간이 더 많음을 알 수 있다.

Table 5, Table 6은 기간별, 블록별 RMGC 배치 결과를 나타낸다. Table 5는 각 기간 및 블록에 할당된 RMGC 취급시간을 RMGC의 단위 취급능력으로 나눈 것이고, Table 6은 배치 결과를 각 RMGC가 작업하게 되는 블록으로 변환하여 제시한 것이다. 선석에서 가장 가까운 1행의 블록에는 평균 3.2대의

RMGC가 배치되고, 선석에서 가장 먼 4행의 블록에는 평균 2.04대의 RMGC가 배치되었다.

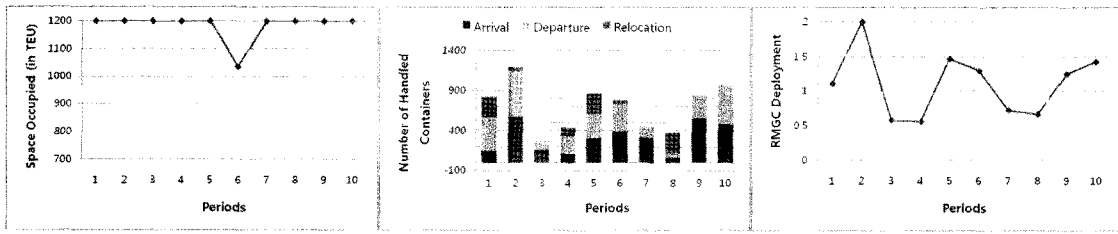
추가적으로 10문제를 풀어서 각 블록의 기간별 점유 공간, 기간별/유형별 취급 컨테이너 수, RMGC 배치 결과를 조사하였다. Fig. 3은 그 중 몇 문제에 대해서, 한 블록(블록 6)에 대한 사항들을 그래프로 나타낸 것이다. 취급 컨테이너의 유형(도착, 출발 등)에 따라서 점유 공간이 변화하는 것을 알 수 있으며, 취급 컨테이너의 수에 따라서 RMGC에 요구되는 취급 시간이 변화하여 이에 따라 RMGC의 배치가 이루어짐을 알 수 있다.

Table 5 The result for the deployment of RMGCs in an example

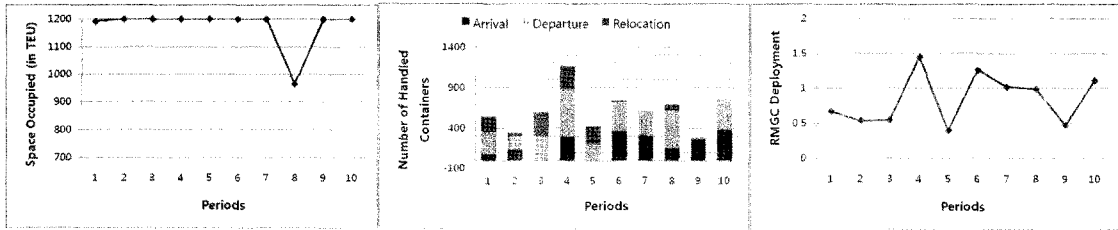
Block \ Period	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg.
1	1.16	1.07	1.64	0.24	1.50	1.40	0.89	0.37	2.00	1.52	1.18
2	0.83	1.66	0.59	1.33	0.12	1.12	1.24	1.28	0.44	0.48	0.91
3	1.37	0.64	0.75	1.25	1.41	1.37	0.99	0.52	0.90	2.00	1.12
Sub total	3.36	3.37	2.97	2.81	3.03	3.89	3.11	2.16	3.34	4.00	3.20
4	1.23	1.27	0.55	0.87	1.09	1.37	0.35	1.63	0.69	1.53	1.06
5	0.77	0.70	1.32	0.87	0.26	0.77	1.70	0.89	0.16	0.19	0.76
6	2.00	0.86	0.59	0.41	1.29	0.92	0.48	1.42	1.00	0.88	0.99
Sub total	4.00	2.83	2.45	2.14	2.64	3.06	2.53	3.95	1.84	2.60	2.81
7	1.40	0.96	0.94	0.61	1.19	0.86	0.83	0.50	1.25	1.21	0.97
8	0.02	0.38	0.64	1.55	0.79	0.77	1.01	0.99	0.45	0.71	0.73
9	0.92	0.88	1.28	0.42	0.91	0.69	1.29	0.73	1.14	0.99	0.93
Sub total	2.34	2.22	2.86	2.58	2.88	2.32	3.12	2.21	2.83	2.91	2.63
10	0.64	0.24	0.53	1.08	0.82	0.60	0.52	0.54	1.09	0.60	0.66
11	0.41	0.61	0.78	0.78	0.57	0.27	0.51	0.83	0.84	0.32	0.59
12	0.33	1.25	0.67	0.76	0.79	0.86	0.96	0.60	1.02	0.59	0.78
Sub total	1.37	2.10	1.98	2.61	2.18	1.72	1.99	1.98	2.94	1.52	2.04

Table 6 The working blocks of each RMGC from the deployment of RMGCs in an example

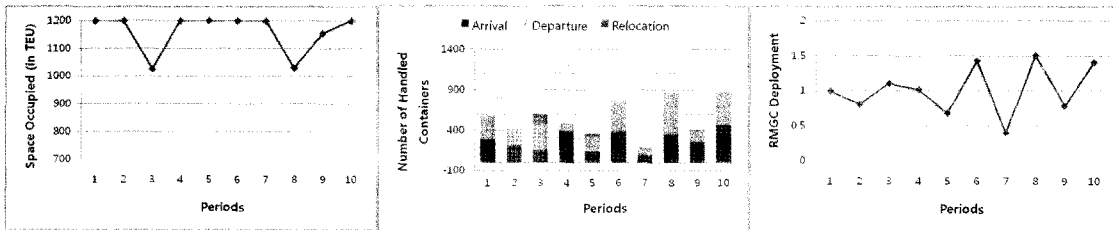
RMGC No. \ Period	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Row 1	1	1	1	1	1,2	1	1	1,2	1,2	1	1
	2	1,2,3	1,2	1,2	2,3	1,2,3	1,2	2	2,3	1	1,2
	3	3	2,3	2,3	3	3	2,3	2,3	3	2,3	3
	4	3	3	-	-	3	3	3	-	3	3
Row 2	5	4	4	4,5	4,5	4	4	4,5	4	4,5,6	4
	6	4,5	4,5,6	5,6	5,6	4,5,6	4,5	5	4,5	6	4,5,6
	7	6	6	6	6	6	5,6	5,6	5,6	-	6
	8	6	-	-	-	-	6	-	6	-	-
Row 3	9	7	7,8	7,8	7,8	7	7,8	7,8	7,8	7	7
	10	7,8,9	8,9	8,9	8	7,8,9	8,9	8,9	8,9	7,8,9	7,8,9
	11	9	9	9	8,9	9	9	9	9	9	9
	12	-	-	-	-	-	-	9	-	-	-
Row 4	13	10,11	10,11,12	10,11	10	10,11	10,11,12	10,11	10,11	10	10,11,12
	14	11,12	12	11,12	10,11,12	11,12	12	11,12	11,12	10,11,12	12
	15	-	12	-	12	12	-	-	-	12	-
	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



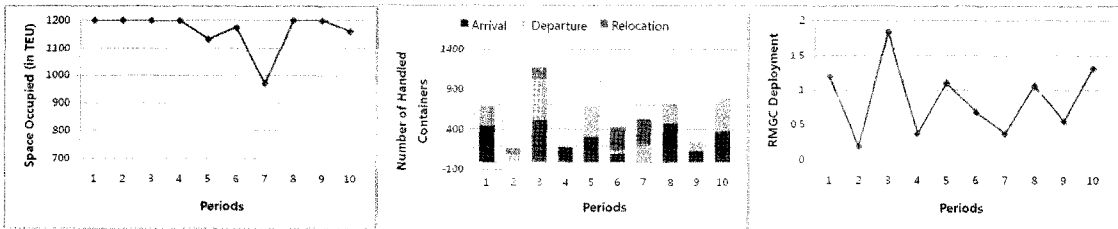
(a) Problem #1



(b) Problem #2



(c) Problem #3



(d) Problem #4

Fig. 3 The space occupied, the number of handled containers, and the RMGC deployment of block 6 from 4 problems among additional 10 problems

2) Case II

Case II의 한 문제를 풀어서 RMGC 배치 결과를 정리해 보았다. 문제 풀이에는 약 33시간이 소요되었다. Table 7은 계획 범위인 10기간에 대한 기간별, 블록별 RMGC 배치 결과를 나타낸다. 선석에서 가장 가까운 1행의 블록에는 모든 기간에서 4대의 RMGC 모두가 배치되고, 2행과 3행의 블록도 모든 기간에서 4대에 가까운 RMGC가 배치되었으나, 선석에서 가장 먼 4행의 블록에는 평균 3.2대의 RMGC가 배치되었다.

위 예제의 풀이에서는 계산시간이 과다하게 소요되어 문제의 크기를 축소하여 추가적인 10문제를 풀어보았다. 문제 풀이에는 한 문제당 3~5시간 내외가 소요되었다. 문제의 크기를 축소하기 위하여 저장 활동의 작업 주기를 수입 컨테이너 6일

(양하 1일, 보관 2일, 반출 3일), 수출 컨테이너 6일(반입 3일, 보관 2일, 적하 1일), 환적 컨테이너 4일(양하 1일, 보관 2일, 적하 1일)로 단축한 후 기간별 도착 비율과 출발 비율을 정의하였다. 추가적으로 풀이된 10문제 중 몇 문제에 대해서, 한 블록(블록 6)에 대한 기간별 점유 공간, 기간별/유형별 취급 컨테이너 수, RMGC 배치 결과를 정리하여 Fig. 4에 그래프로 제시하였다. Fig. 3과 마찬가지로, 취급 컨테이너의 유형(도착, 출발 등)에 따라서 점유 공간이 변화하는 것을 알 수 있으며, 취급 컨테이너의 수에 따라서 RMGC에 요구되는 취급 시간이 변화하여 이에 따라 RMGC의 배치가 이루어짐을 알 수 있다. 단, 한 기간 내에서는 RMGC가 한 블록에 머물러야 하므로 배치되는 RMGC의 수는 정수가 됨을 알 수 있다.

Table 7 The result for the deployment of RMGCs in an example

Block \ Period	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg.
1	1	1	2	1	2	1	1	1	2	1	1.3
2	1	2	1	2	0	1	2	2	1	1	1.3
3	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2	1.4
Sub total	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1.3
5	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1.2
6	2	1	1	1	2	1	1	2	2	1	1.4
Sub total	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	3.9
7	2	1	1	1	2	1	1	1	2	2	1.4
8	0	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
9	2	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1.3
Sub total	4	4	3	4	4	3	4	3	4	4	3.7
10	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1.1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	0	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1.1
Sub total	2	3	4	4	3	3	4	3	3	3	3.2

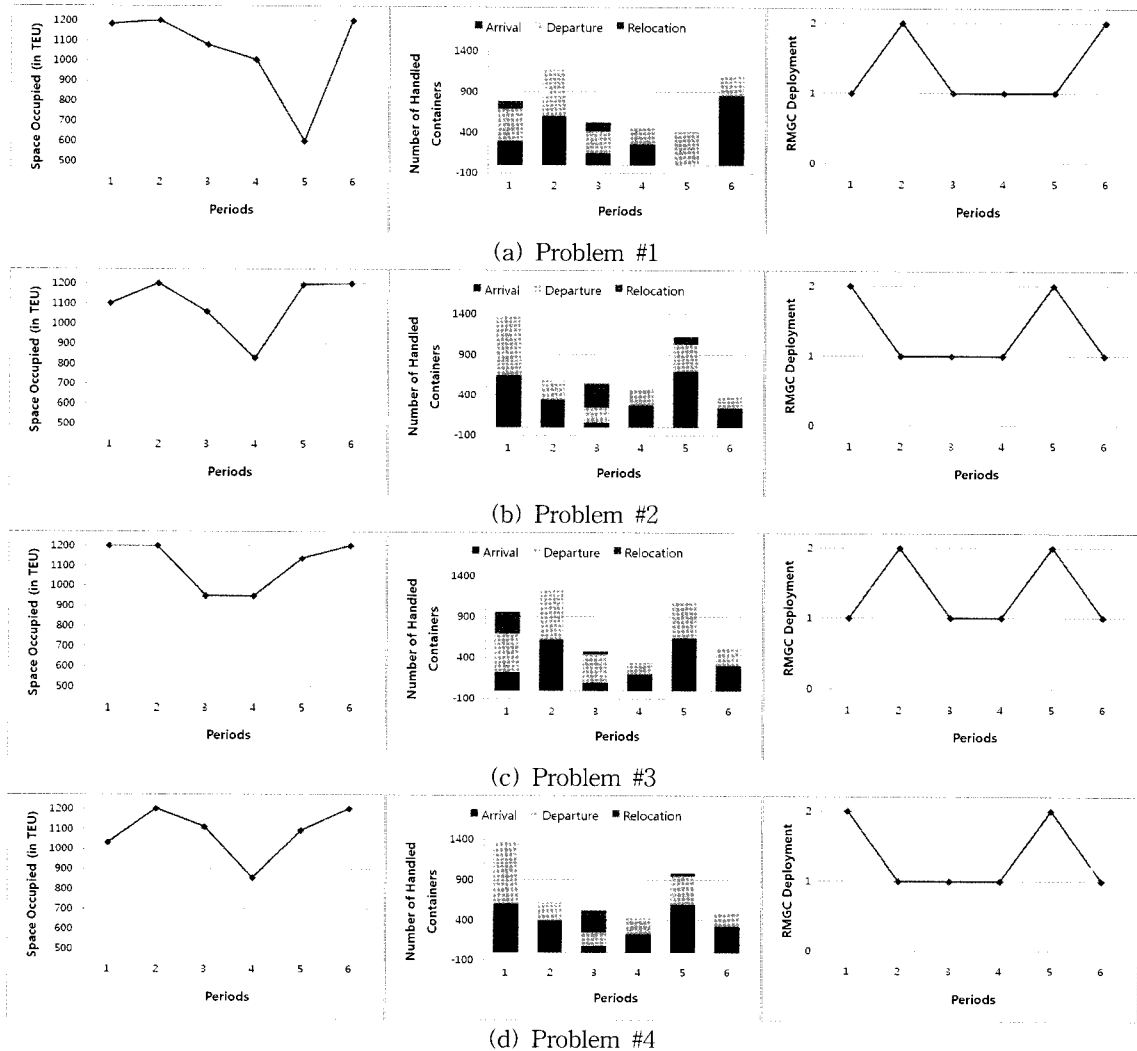


Fig. 4 The space occupied, the number of handled containers, and the RMGC deployment of block 6 from 4 problems among additional 10 problems

Table 8 The comparison of the yard planning model and the RMGC deployment model considering yard plans

Problem	Won and Kim (2009)		Case I		Case II	
	Objective value	Solving time	Objective value	Solving time	Objective value	Solving time
#1	142,540	17.95	141,810	17.36	142,210	12,551.09
#2	144,580	17.73	143,840	17.03	144,260	10,083.46
#3	141,840	18.48	141,000	17.17	141,440	24,058.10
#4	141,420	18.26	140,710	17.19	141,110	17,852.70
#5	141,050	18.00	140,270	17.44	140,730	16,935.34
#6	143,270	18.50	142,510	16.97	142,950	13,853.82
#7	141,850	17.50	141,090	17.42	141,520	17,779.24
#8	143,620	18.76	142,850	16.45	143,260	12,464.55
#9	140,930	17.95	140,190	17.45	140,600	10,970.49
#10	142,830	18.06	142,040	17.22	142,480	12,692.11
Average	-	18.12	-	17.17	-	14,924.09

4. 비교 실험

본 연구에서 제시한 모형은 장치계획과 RMGC의 배치를 동시에 결정하므로 장치계획만 수행했던 기존 모형에 비해 RMGC의 사용이 취급부하에 맞춰 적절한 곳에서 이루어지게 된다. 따라서 이러한 효과를 검증하기 위하여 장치계획만 수행하는 Won and Kim (2009) 모형, 본 연구의 Case I, 본 연구의 Case II를 비교하는 실험을 수행하였다. Won and Kim (2009)은 장치계획을 수행할 때 취급부하를 고려하지만 각 블록의 취급부하를 고정된 제약으로 고려한 점에서 본 연구의 모형과 차이가 난다.

본 연구 Case II의 계산시간을 고려하여 3.2.2절에서와 같이 축소된 문제를 사용하여 풀어 보았다. Table 8은 10문제에 대한 목적함수 값과 계산시간을 비교하여 나타낸다. 목적함수는 저장, 수송, 취급비용의 합이며 계산시간의 단위는 초이다. 모든 문제에서 장치계획을 고려하는 RMGC 배치 모형이 장치계획만 수행하는 모형의 목적함수 값보다 낮게 나타났다. 또한 한 기간 내에서 RMGC의 이동을 허용하는 Case I이 한 기간 내에서 RMGC의 이동을 허용하지 않는 Case II에 비해 낮은 목적함수 값을 나타내었다. 이는 Case I이 RMGC의 취급부하에 보다 유연하게 대응하고 있기 때문이다. 계산시간을 검토해보면, Won and Kim (2009)과 Case I은 17~18초 내외가 소요되었으나 Case II는 평균 약 4시간 9분이 소요되었다.

5. 결 론

본 연구는 컨테이너 터미널에서의 RMGC 배치 문제에 대해서 논하였다. 다양한 자원의 부하를 고려하는 장치계획 모형을 변형하여, 장치계획과 RMGC 배치를 동시에 풀 수 있는 선형 계획법 및 혼합 정수계획법 모형을 개발하였다. 모형은 한 기간 내에서 블록간 RMGC의 이동 허용여부에 따라서 2가지로

나누어졌다. 모형을 검증하기 위하여 수치 예제를 만들어서 풀이 결과를 해석하고 계산 시간을 검토해 보았다. 또한 장치계획만을 다루는 기존 모형과의 성능 차이를 분석하기 위하여 비교 실험을 수행하였다.

본 연구에서 다양한 실험을 수행해본 결과, Case I은 현실적인 크기의 문제를 적절한 시간 내에 풀 수 있었지만 Case II는 결정변수의 정수 제약에 따라 탐색 시간이 과다하게 소요되어 풀이에 많은 제약이 따랐다. 따라서 Case II에 대해서는 계산시간을 단축시키면서 최적해에 가까운 결과를 도출할 발견적 기법의 개발이 뒤따라야 할 것이다.

본 연구에서 제시한 모형에서는 장치장의 한 행에서만 이동이 가능한 RMGC의 배치에 대해서 논하였지만, 장치장 전체에서 이동이 가능한 RTGC의 배치문제에도 확장될 수 있을 것이다.

후 기

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

참 고 문 헌

- [1] Chung, R. K., Li, C. L., and Lin, W.(2002), "Interblock crane deployment in container terminals", Transportation Science, Vol. 36, No. 1, pp. 79-93.
- [2] Lee, B. K. and Kim, K. H.(2007), "Cycle time models for yard cranes considering block layouts in container terminals", Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers, Vol. 33, No. 1, pp. 110-125.
- [3] Linn, R., Liu, J. Y., Wan, Y. W., Zhang, C., and Murty, K. G.(2003), "Rubber tired gantry crane deployment for

- container yard operation", Computers and Industrial Engineering, Vol. 45, No. 3, pp. 429-442.
- [4] Linn, R. and Zhang, C. Q.(2003), "A heuristic for dynamic yard crane deployment in a container terminal", IIE Transactions, Vol. 35, No. 2, pp. 161-174.
- [5] Won, S. H. and Kim, K. H.(2009), "Yard planning considering the load profile of resources in container terminals", Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers, Vol. 35, No. 1, pp. 58-72.
- [6] Zhang, C., Wan, Y. W., Liu, J., and Linn, R. J.(2002), "Dynamic crane deployment in container storage yards", Transportation Research Part B, Vol. 36, No. 6, pp. 537-555.

원고접수일 : 2008년 12월 2일

심사완료일 : 2009년 2월 25일

원고채택일 : 2009년 2월 26일