

복수 크레인을 활용한 블록 내 컨테이너 이적 계획

오명섭* · 강재호** · 류광렬*** · 김갑환****

*,**부산대학교 컴퓨터공학과 대학원, ***부산대학교 컴퓨터공학과 교수, ****부산대학교 산업공학과 교수

A Heuristic Approach to Scheduling Multiple Cranes for Intra-Block Remarshalling

Myung-Seob Oh* · Jaeho Kang** · Kwang Ryel Ryu*** · Kap Hwan Kim****

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

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

요 약 : 블록 내 이적이란 컨테이너를 선박에 싣는 적하 작업을 효율적으로 수행하기 위하여 유휴 시간에 여기저기에 흩어져 있는 대상 컨테이너들을 적하 순서에 맞춰 몇 개의 베이로 모으는 작업이다. 이적 작업을 가능한 일찍 완료하기 위해서는 블록 내의 설치된 여러 대의 트랜스퍼 크레인들을 모두 활용하는 것이 유리하지만, 이적 계획 수립 시 크레인들 간의 간섭을 효과적으로 고려하지 못하면 상당한 작업 지연이 발생할 수 있다. 특히, 상호 교차가 불가능한 크레인들을 이용하여 이적을 수행하고자 하는 경우에는 이러한 간섭에 의한 지연이 보다 빈번히 발생한다. 본 논문에서는 교차가 불가능한 크레인들 간의 간섭을 고려하여 개별 컨테이너를 취급할 크레인을 선정하고 작업 순서를 결정하는 휴리스틱을 제안한다. 시뮬레이션 실험 결과 본 제안 방안이 다양한 환경에서 간섭에 의한 지연을 효과적으로 줄일 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 컨테이너 터미널 장치장, 블록 내 이적, 복수 크레인 작업 계획, 상태 전이 그래프

Abstract : Intra-block remarshalling is the task of rearranging into some target bays those containers which are scattered within around the block. If multiple transfer cranes installed in the block are all used together we may be able to complete the remarshalling task as early as possible. However, when multiple cranes are used simultaneously, there may occur significant delays if we do not carefully consider interferences between the cranes at the time of scheduling. Especially, delays caused by interferences occur more frequently in case of using non-crossing cranes. This paper presents an efficient heuristic method for assigning moves of containers to each crane and for determining an appropriate container moving order in a manner sensitive to the interferences. Simulation experiments have shown that the proposed method can effectively reduce delays in various environments.

Key words : Container terminal yard, Intra-block remarshalling, Multiple cranes scheduling, State transition graph

1. 서 론

컨테이너 터미널의 생산성은 선박에 컨테이너를 내리고 싣는 양적하 작업을 지연 없이 효율적으로 수행할 수 있을 때 향상 될 수 있다. 양적하 작업을 효율적으로 수행하기 위해서는 작업 시 발생하는 지연을 최소화하여야 한다. 양적하 작업 시 발생하는 지연을 최소화하기 위해서는 내부 운송 차량을 효율적으로 운영하고, 양적하 작업에 유리하게 장치장 계획을 수립하여 실행할 수 있어야 한다. 특히 적하 작업은 장치장 내 적하 대상 컨테이너들의 장치 위치에 따라 작업 효율에 큰 영향을 받는다. 적하 순서상 연속되는 컨테이너들이 장치장 여기저기에 흩어져 있거나 적하 시 재취급이 발생하면 작업 지연이 발생하기 때문이다. 따라서 수출 컨테이너는 장치장에 반입 시 적하를 고려하여 장치할 위치를 효과적으로 결정하여야 한다. 하지만 장치할 공간이 부족하거나 장치장 크레인이

이미 수행하고 있는 다른 작업들의 지연을 최소화하여야 하거나 적하 계획이 사전에 수립되기 어려운 상황에서는 이후에 있을 적하를 고려하여 컨테이너들의 장치 위치를 결정하기란 쉽지 않다. 이러한 이유로 장치장에서 발생하는 유휴 시간을 활용하여 블록 내에 흩어져 있는 대상 컨테이너들을 적하 순서에 맞춰 재취급이 발생하지 않게 모으는 작업이 필요하다. 이러한 작업을 블록 내 컨테이너 이적이라 한다.

이적에 소요되는 시간을 단축하기 위해서는 블록 내에 설치되어 있는 여러 대의 크레인을 모두 활용하는 것이 유리할 것이다. 그러나 여러 크레인을 동시에 사용하면 크레인 간의 간섭에 의한 작업 지연이 발생할 수 있으며, 이러한 지연이 빈번하면 이적에 소요되는 시간은 늘어나게 된다. 본 논문에서는 크레인 간의 간섭에 의한 지연을 고려하여 이적 계획을 수립하는 휴리스틱을 제안한다. 제안한 휴리스틱으로 실험한 결과 두 대의 크레인 이용 시 간섭을 고려하지 않고 작업 계획을

* 대표저자: 오명섭(정회원)oms1226@pusan.ac.kr, 051)510-3645

** 정회원, jhkang@pusan.ac.kr, 051)510-3645

*** 정회원, krryu@pusan.ac.kr, 051)510-2453

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

수립하는 경우에 비해 약 5~30%의 이적 소요 시간을 단축시킬 수 있었다.

본 논문은 먼저 2장에서 관련 연구들을 소개하고, 3장에서는 블록 내 이적 문제와 기존에 연구된 단일 크레인을 이용한 이적 계획 수립 방안에 대하여 소개한다. 4장에서는 본 연구에서 제안하는 복수 크레인 이용 시 발생하는 간섭에 대하여 설명하고, 이러한 간섭을 고려하여 이적 계획을 수립하는 휴리스틱을 소개한다. 5장에서는 제안한 방안을 적용한 실험 결과를 정리하여 분석하고, 마지막 6장에서 결론과 향후 연구 과제로 매듭짓는다.

2. 관련 연구

본 장에서는 먼저 장치장에서의 작업 흐름을 몇 단계로 나누어 살펴보고, 유휴 시간을 활용하여 적하 작업의 효율을 개선하고자 한 기존 연구들과 복수 크레인 작업 계획과 관련된 연구들을 소개한다.

Fig. 1은 선박에 적하할 컨테이너의 이동 흐름을 간략하게 도식화하여 보여 주고 있다. 적하할 컨테이너들은 선박이 입항하기 일정 시점 이전까지 터미널 외부에서 반입되어 사전에 계획된 장치장 공간에 장치된다¹⁾. 일반적인 수평 구조 장치장의 장치 공간은 적하 작업의 효율을 위하여 동일한 목적항과 규격을 가진 컨테이너들을 가능한 모을 수 있도록 계획된다. 이는 선박이 이후에 방문할 터미널에서 효율적으로 작업하기 위하여 같은 목적항과 규격을 가진 컨테이너들을 선박 내에서 동일한 선박 베이에 연이어 장치하는 것이 선호되기 때문이다. 적하 계획을 수립하는 전문가들은 컨테이너 반입이 완료되면 장치장 내 대상 컨테이너들의 위치와 선박의 안정성 등을 고려하여 적하 순서 즉, 장치장에서의 컨테이너 반출 순서를 결정한다. 해당 선박이 입항하여 적하 작업이 시작되면 장치장은 사전에 계획된 순서대로 컨테이너를 반출한다.

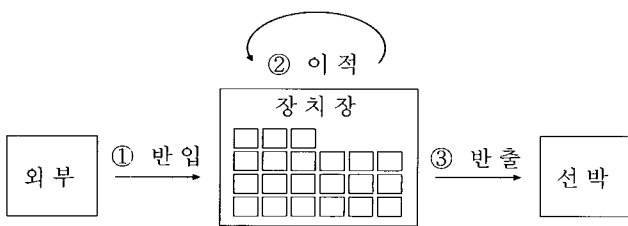


Fig. 1 Work flow of outbound containers in a container terminal yard

이와 같은 작업 흐름상에서 ③의 적하를 위한 반출 단계에서 장치장 크레인이 빈번하게 이동하고 재취급이 자주 발생하면 적하 작업의 효율에 큰 영향을 미치게 된다. 하지만 이 단계에서는 반출을 아무리 효율적으로 처리한다고 하더라도, 이미 적하 작업을 수행하고 있는 상황이기 때문에 적하 작업 수

행 시간을 단축하는 것은 그 한계가 있다. 따라서 적하를 위한 반출 이전 단계인 ① 반입 단계와 ② 장치장에서의 유휴 시간을 활용하여 이후의 적하 작업을 보다 효율적으로 수행할 수 있게 하는 방안이 요구되는 것이다.

본 논문의 연구 대상인 블록 내 이적은 외부에서 컨테이너들의 반입이 완료된 후 적하 작업이 수행되기 전에 발생할 수 있는 유휴 시간을 활용한다. 이는 Fig. 1의 ②에 해당되며 세계적으로 장치장의 효율화를 위하여 무인화 운영이 가능한 자동화 크레인이 도입되는 추세이므로 유휴 시간을 이용하여 적하 작업의 효율을 높이는 방안에 대한 연구의 중요성이 점차 증대하고 있다고 할 수 있다.

(Kim *et al.*, 1998)은 장치장의 한 블록에 흩어져 있는 컨테이너들의 베이 위치와 선박 베이의 여유 공간을 함께 고려하여 장치장 크레인의 움직임은 최소화하면서 컨테이너들을 모으는 방안을 제시하였다. 이 연구에서는 먼저 베이 정합(bay matching) 과정을 통하여 장치장의 어느 베이들에 어떤 컨테이너들을 모을 것인지 결정한 후, 작업할 장치장 크레인의 이동 최소화 문제를 순회 세일즈맨 문제(travelling salesman problem)로 변환하여 해를 도출하였다. 이 연구는 적하 계획이 구체적으로 수립되기 이전 단계를 대상으로 하였으며, 제시된 컨테이너 이동 순서 계획 방안은 각 컨테이너의 베이 내에서의 위치나 적하 순서를 고려하지 않았다. 이에 비해 본 논문에서 제시하고자 하는 방안은 적하 순서가 결정된 후 개별 컨테이너의 베이 내 위치까지 고려하여 이적 작업을 계획하는 문제를 다루고 있다.

(강 외, 2004)은 하나의 베이에 장치된 컨테이너들의 적하 순서가 결정되면, 반출 시 재취급이 발생하지 않도록 컨테이너들을 베이 내에서 정돈하는 방안을 제시하였다. 이 연구는 최소의 컨테이너 이동 횟수로 컨테이너들을 정돈하기 위하여 분지 한계법(branch-and-bound)을 이용하였다. 이 연구에서는 개별 컨테이너 위치와 반출 순서가 고려되었지만 베이 간 이동이 필요 없는 단일 베이 내 컨테이너들만을 대상으로 이적을 수행한다는 점이 본 논문에서 해결하고자 하는 상황과 다른 점이다.

(강 외, 2005)은 장치장 내 하나의 블록 여기저기에 흩어진 컨테이너들의 적하 순서가 결정되면, 적하 시 재취급이 발생하지 않도록 몇 개의 빈 베이로 모으는 이적 작업을 계획하는 휴리스틱을 제안하였다. 이 연구에서는 한 대의 크레인을 사용하여 이적 작업을 수행하는 상황을 가정하였다. 본 연구는 이 연구에서 제안된 컨테이너 이동 작업들 간의 부분 순서(partial ordering) 관계를 생성하는 방안을 이용하고 있다. 이에 대해서는 3장에서 보다 자세히 소개한다.

(이 외, 2004)는 자동화 컨테이너 터미널에서 이적 작업을 통하여 생산성을 얼마나 향상시킬 수 있는지에 대하여 연구하였다. 이 연구에서는 교차 가능한 두 대의 크레인을 이용하는 수직 구조의 장치장에서 본선 작업 및 외부 트럭 작업에 유리하도록 블록의 양 끝단 방향으로 옮길 컨테이너를 각 컨테이

1) 환적 화물과 같은 경우에는 다른 선박의 양하 작업에 의하여 선석(berth)에서 장치장으로 반입될 수 있다.

너의 예상 체류 시간을 이용하여 선정하는 방안을 제안하였다. 이 연구에서의 이적은 명시적인 적하 계획이 수립되기 전에 이후에 발생할 작업들에 대비하여 컨테이너들을 미리 옮기는 것으로 설정하였다.

복수의 크레인을 활용하여 블록 내에 발생하는 작업들을 효율적으로 처리하기 위하여 작업 계획을 수립하는 방안에 관한 주요 기존 연구들은 다음과 같다.

(왕, 2002)은 자동화 컨테이너 터미널에서 교차 가능한 두 대의 크레인을 이용하여 블록 내에서 발생하는 작업을 효율적으로 처리하기 위한 운영 방안으로 무부하 이동 거리 최소화(Minimum Empty Travel Distance; METD) 휴리스틱을 제안하였다. 이 연구에서는 크레인 간에 간섭이 발생한 경우 먼저 작업을 수행한 크레인의 작업이 완료될 때까지 다른 크레인이 대기하는 방안을 적용하였다. 본 연구는 이와 달리 각각의 크레인에 우선순위를 주는 경우에 대하여 지연을 추정하고 이를 바탕으로 우선권을 부여할 크레인을 선정한다.

(이, 2003)는 (왕, 2002)의 연구를 확장하여 크레인의 수를 증가시키거나 크레인 간의 교차 여부에 따른 여러 환경에서의 효율적인 복수 크레인 운영 방안을 제안하였다. 이 연구에서는 다양한 환경 하에서의 크레인 간의 간섭 문제를 다루고 있지만, (왕, 2002)의 연구에서와 같이 이적 작업에 특화된 연구는 아니다.

3. 블록 내 컨테이너 이적 문제와 단일 크레인을 이용한 이적 계획 수립 방안

본 장에서는 먼저 블록 내 이적 문제와 한 대의 크레인을 이용하여 이적 작업 계획을 수립하고자 한 기존 연구를 소개한다.

3.1 블록 내 컨테이너 이적 문제

본 연구에서 대상으로 하고 있는 이적 문제에 대한 가정은 Fig. 2와 같다. 우선 이적 대상 컨테이너들을 장치할 수 있을 만큼의 빈 베이들이 블록 내에 존재한다고 가정하고, 그 빈 베이들을 목적 베이(target bay)라 칭한다(가정 1). 본 연구에서 블록 내 이적은 모든 이적 대상 컨테이너들을 각각의 목적 베이로 옮기는 것이며, 이적 대상 컨테이너들은 목적 베이를 제외한 블록 전체에 임의로 흩어져 있다고 가정한다(가정 3). 각각의 이적 대상 컨테이너가 어느 목적 베이로 옮겨져야 하는지와 목적 베이 내에서의 반출 순서는 적하 계획에 의하여 이미 결정되어 있다고 가정한다(가정 4, 5). 그리고 재취급이 발생하면 이적에 소요되는 작업 시간이 늘어나므로 이적 작업 중에 재취급이 발생하지 않도록 작업을 계획하여야 하며(가정 6)2), 적하 시에도 재취급이 발생하지 않도록 장치하여야 한다(가정 7).

1. 이적 대상 컨테이너들을 모두 장치할 수 있는 만큼의 빈 베이들 즉 목적 베이들이 블록에 존재한다.
2. 목적 베이들을 제외한 베이들에는 컨테이너들이 최대 장치 가능한 수만큼 장치되어 있다.
3. 이적 대상 컨테이너들은 목적 베이들을 제외한 베이들에 무작위로 흩어져 있다.
4. 각각의 이적 대상 컨테이너는 이동되어 장치될 유일한 목적 베이이 있다.
5. 이적 대상 컨테이너는 적하 계획에 의해 목적 베이 내에서의 반출 순서가 정해져 있다.
6. 이적 대상 컨테이너는 한 번의 이동으로 목적 베이에 옮겨져야 한다.
7. 이적된 대상 컨테이너들은 적하 작업 시 재취급이 발생하지 않도록 장치되어야 한다.

Fig. 2 Assumptions for intra-block remarshalling

3.2 단일 크레인을 이용한 이적 계획 수립 방안

여러 대의 크레인을 이용한 이적 작업 계획 방안을 소개하기 전에 한 대의 크레인 사용 시 이적 작업을 계획하는 방안을 제시한 기존 연구 (강 외, 2005)를 살펴본다. 대상 컨테이너가 놓여있는 베이를 원천 베이(source bay)라 칭하며, 크레인은 원천 베이에서 재취급 없이 목적 베이로 각각의 컨테이너를 옮김과 동시에 목적 베이에서도 적하 시 재취급이 발생하지 않도록 장치하여야 한다.

Fig. 3은 3단 3열의 베이 구조에서 원천 베이가 2개라 가정된 경우를 예로 들고 있다. (a)의 원천 베이에서 대상 컨테이너들이 장치된 상태를 살펴보면, 1G 컨테이너는 7W 컨테이너 하단에 장치되어 있어 7W 컨테이너를 옮긴 후에 1G 컨테이너를 옮겨야 컨테이너 이동 시 재취급이 발생하지 않는다. 따라서 이들 간에는 이동 순서상의 제약이 존재한다. 그림에서는 이러한 관계를 실선 화살표로 나타내었다. 원천 베이의 장치 상태에 의한 이동 순서상의 제약을 어기지 않는 동시에 적하 시 재취급이 발생하지 않도록 컨테이너들을 목적 베이에 장치해야 되는데 기존 연구에서는 휴리스틱을 이용하여 목적 베이에 장치할 각각의 컨테이너의 장치 위치를 결정하였다. (b)는 목적 베이들에 장치 가능한 상태 중 하나를 보여주고 있다. 모든 컨테이너들의 목적 베이에서의 장치 위치가 결정되면, (b)의 목적 베이 내에서도 이동 순서상의 제약을 발견할 수 있다. 예를 들어 5W 컨테이너는 7W 컨테이너가 옮겨진 이후에 장치되어야 한다. 그림에서 이러한 이동 순서 제약 관계는 점선 화살표로 표시하였다. (a)의 원천 베이 상태에 의한 이동 순서 제약과 (b)의 목적 베이 상태에 의한 이동 순서 제약을 함께 표현하면 (c)와 같은 부분 순서 그래프를 얻을 수 있다. 이 그래프에서 표현된 이동 순서상의 선후 관계를 어기지 않고 이동 가능한 컨테이너를 하나씩 크레인에 할당하면

2) 이적 대상 컨테이너들 간의 재취급을 의미한다. 옮기고자 컨테이너의 상단에 이적과 관련 없는 컨테이너가 있는 경우에는 재취급이 발생한다.

각각의 컨테이너를 한 번의 이동으로 목적 배이로 옮길 수 있으며, 장치 후 적하 작업 시 재취급이 발생하지 않는다. 복수 크레인 사용 시 대상 컨테이너들에 대한 이동 순서의 제약도 (c)와 같은 우선순위 그래프를 이용하여 표현할 수 있다.

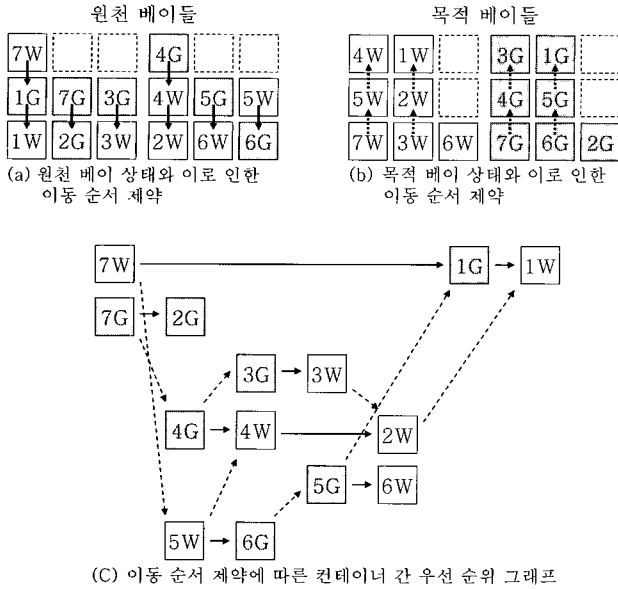


Fig. 3 A partial ordering of container moves

4. 복수 크레인을 이용한 이적 계획 수립 방안

이 장에서는 복수 크레인을 사용할 때 발생하는 간섭과 작업 지연을 손쉽게 추정하기 위하여 상태 전이 그래프(state transition graph)를 이용하는 방안을 소개하고 이를 이용하여 복수 크레인을 이용한 이적 계획 수립 방안을 소개한다.

4.1 상태 전이 그래프

블록 내에서 여러 대의 크레인을 사용할 때 크레인 간의 간섭을 쉽게 파악하고, 지연에 소요되는 시간을 계산하기 위해서는 개별 크레인의 위치와 각 위치에서 수행하는 동작을 효율적이며 이해하기 쉽게 표현할 수 있어야 하는데 그 표현 방법으로 본 연구에서는 상태 전이 그래프를 사용하였다.

Fig. 4는 배이 1에 위치한 크레인이 7W 컨테이너 하나를 옮기는 작업을 상태 전이 그래프로 표현한 예이다. 상태 전이 그래프의 각 노드는 크레인의 상태를 표현한다. 노드 안의 숫자는 크레인의 블록 내 배이 위치를 의미한다. 노드의 색이 흰색인 경우에는 크레인이 컨테이너를 아직 집지 못한 상태이며, 회색인 경우에는 컨테이너를 집은 상태이다. 노드와 노드 간의 화살표는 상태간의 선후 관계를 나타내며 상태 변화에 소요되는 시간과 행해지는 동작이 함께 표기되어 있다.

크레인의 세부 동작(operation)은 Table 1과 같이 4가지로 구분하였다. 원천 배이로 이동하는 동작(Ms)이 있으며, 원천

배이에 위치한 컨테이너를 크레인이 집는 동작(Ps)이 있다³⁾. 그리고 컨테이너를 장치시키기 위하여 목적 배이로 이동하는 동작(Mt)과 목적 배이에서 대상 컨테이너를 장치시키는 동작(Pt)이 있다. 본 연구에서 생성하고자 하는 이적 작업 계획은 트럭과 같은 외부 장비와 연계가 필요하지 않으며 작업 시 재취급 발생을 허용하지 않기에 4가지 동작으로만 구분하였지만 보다 일반적인 크레인 작업 계획을 위해서는 세분화될 수도 있다.

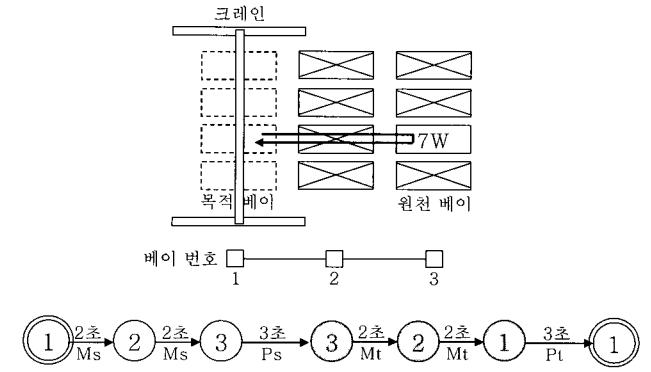


Fig. 4 A state transition graph of a crane which is trying to move container 7W from bay 3 to bay 1

하나의 컨테이너를 이동시키는 크레인의 동작 순서는 Ms, Ps, Mt, Pt 순으로 이루어지며, 표현된 상태 전이 그래프를 이용하면 작업 완료에 소요되는 시간을 쉽게 추정할 수 있다. 여기서는 이해하기 쉽도록 각 상태로 이동하는데 소요된 시간을 임의의 값을 설정하였으며, 7W 컨테이너를 이동시키는데 총 14초가 소요되었음을 알 수 있다.

Table 1 Mnemonics for crane operations

기호	설명
Ms	원천 배이 이동 (Move to Source bay)
Ps	원천 배이 작업 수행 (Process job in Source bay)
Mt	목적 배이 이동 (Move to Target bay)
Pt	목적 배이 작업 수행 (Process job in Target bay)

Fig. 4에는 하나의 컨테이너를 옮기는 작업에 대한 상태 전이 그래프를 나타내었지만, 하나의 컨테이너 이동 작업을 완료한 후 다음에 이동시킬 컨테이너 작업을 위한 상태 전이 그래프를 연결한다면 복수의 컨테이너 이동 작업에 대해서도 손쉽게 표현할 수 있다. 이러한 상태 전이 그래프는 크레인의 상태와 동작을 손쉽게 묘사할 수 있으며 효율적인 시뮬레이션이 가능하다. 계속해서 상태 전이 그래프를 이용하여 크레인들이 작업을 진행할 때 발생하는 간섭을 파악하고 지연 정도를 추정하는 방안을 소개한다.

3) 만일 원천 배이에서 컨테이너를 집기 위하여 이적 대상이 아닌 컨테이너들을 재취급하여야 하는 경우 Ps 동작에 포함된다고 가정하였다.

4.2 복수 크레인간의 간섭 파악과 지연 계산 방안

Fig. 5는 두 대의 크레인 A, B에 이적 대상 컨테이너들을 할당해가며 작업을 진행하고 있는 과정에서 한 상태를 보여주 고 있다. 이동 작업이 완료된 컨테이너들에는 어떤 크레인이 작업했는지 함께 표기하였다. 컨테이너 7W, 2G, 5W, 3G, 5G 는 크레인 A로 이동시켰으며, 컨테이너 7G, 4G, 4W, 6G, 3W 는 크레인 B로 이동을 완료한 상황이다. 남아있는 작업 대상 컨테이너들 중에서 2W 컨테이너는 크레인 A에 할당된 상태 이다. 크레인 B의 이전 작업이 완료되어 새로운 이동 대상 컨 테이너 하나를 할당하여야 한다고 가정하자. 이동 순서상의 부분 순서 그래프에 의하면 크레인 B는 굵은 흰색 화살표가 표시된 1G, 6W 중 하나를 선택하여야 한다. 간단하게는 이 두 컨테이너 각각을 크레인 B에 할당해보고 이 중에서 작업 시 간섭 정도가 적은 컨테이너를 선정하면 될 것이다. 계속해서 복수 크레인에 작업이 할당 되었을 때 어떻게 간섭을 파악 하고 작업 지연을 계산하는지 소개한다.

Fig. 6은 할당 가능한 두 컨테이너들 중 크레인 B에 1G 컨 테이너를 할당할 경우를 표현한 상태 전이 그래프와 상태 전 이 그래프를 이용하여 크레인들 간의 간섭을 파악하는 예를 보이고 있다. 크레인 A, B는 상호 교차 불가능한 크레인이고 2 베이 미만에서는 간섭이 발생한다고 가정하자⁴⁾. 앞에서 소 개한 방법으로 크레인 A, B 각각이 수행하여야 하는 작업에 대한 상태 전이 그래프를 만들 수 있다. 상태 전이 그래프의 각 노드를 다른 크레인들의 노드들과 비교해보면 제약 관계상 간섭이 발생하여 동 시점에는 함께 존재할 수 없는 노드들의 쌍을 파악할 수 있다. 크레인 A의 베이 위치를 A.loc, 크레인 B의 베이 위치를 B.loc이라 하고 크레인 A가 베이 번호가 작 은 왼쪽에 설치되었다면 간섭이 발생하는 조건은 $B.loc - A.loc < 2$ 로 나타낼 수 있다. 그림에는 이러한 간섭 조건이 만 족되는 노드간의 쌍을 모두 찾아 점선으로 연결해 두었다.

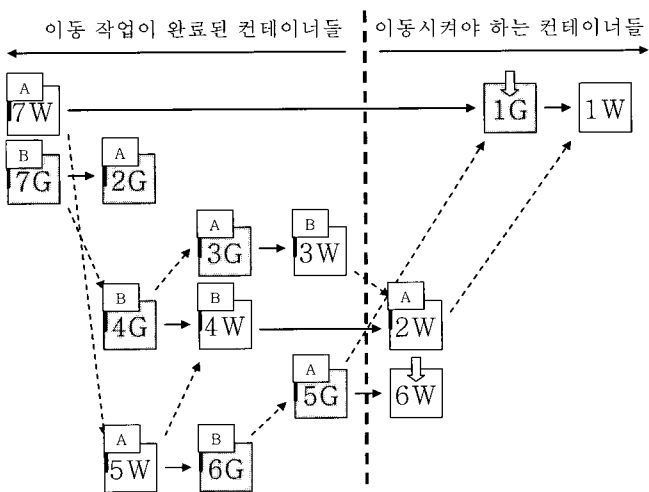


Fig. 5 A partial ordering of container moves after assigning the container 2W to crane A

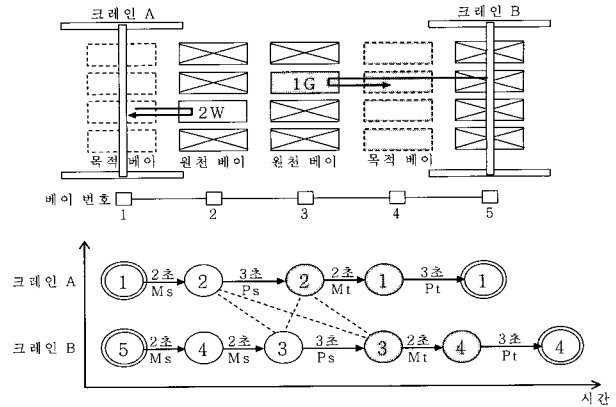


Fig. 6 A state transition graph with identified interference

여기서는 교차가 불가능한 두 대의 크레인을 사용하는 경우 를 예로 들었지만 상호 교차가 가능하거나 크레인 수가 증가 하더라도 이에 맞춰 간섭 발생 조건을 부여하면 동일한 방식 으로 크레인간의 간섭을 파악할 수 있다. Table 2에 이러한 몇 가지 예를 보이고 있다. 교차 불가능한 3대의 크레인을 사 용할 때 베이 번호가 작은 위치에 설치된 순서대로 크레인 A, B, C라 한다면 A와 B 그리고 B와 C간에는 간섭 거리 이내로 접근할 수 없다. 교차 가능한 2대의 크레인을 사용하는 경우 큰 크레인을 A, 작은 크레인을 B라 두면 A와 B가 일정 거리 이내로 접근한 상태에서 크레인 A는 트롤리를 내린 상태에서 수행하여야 하는 작업은 진행할 수 없다. 표에서 A.operation 은 크레인 A가 다음 상태 노드로 전이하기 위하여 취하는 동 작을 의미한다.

Table 2 Conditions for interference in various situations

상황	간섭 조건의 예
교차 불가능한 2대의 크레인	$B.loc - A.loc < 2$
교차 불가능한 3대의 크레인	$B.loc - A.loc < 2$ $C.loc - B.loc < 2$
교차 가능한 2대의 크레인	$ A.loc - B.loc < 2$ and (A.operation = Ps or A.operation = Pt)

동시에 존재할 수 없는 상태들의 쌍이 모두 파악되면 상태 전이 그래프로 시뮬레이션하며 현재 상황에서 간섭이 발생하 는지 여부를 쉽게 파악할 수 있다. Fig. 7의 (a)는 크레인 A에 는 컨테이너 2W를, 크레인 B에는 1G 컨테이너를 할당한 후 2 초가 경과한 상태이다. 크레인의 이름을 S라 할 때 크레인 S 의 상태 노드들은 그 진행 순서대로 s_1, s_2, s_3, \dots 와 같이 표기 하자. 여기서는 간단하게 두 크레인이 동시에 작업을 할당받 았다고 가정한다면 크레인 A와 크레인 B는 각각 자신의 상태 전이 그래프에서 a_2 와 b_2 에 위치하고 있을 것이다. 그림에서는 굵은 화살표로 각 크레인의 현재 상태를 나타내었다. 여기에서 2초가 더 경과하면, (b)와 같이 크레인 A는 아직 a_2 에 머물

4) 간섭 거리가 2 베이라면 두 크레인 간의 간격이 2 베이 이상이어야 상호 간섭 없이 작업이 가능하다.

러 있지만 크레인 B는 b_3 로 이동하게 된다. 앞에서 a_2 와 b_3 간에는 간섭이 있음을 파악하였다. 따라서 이러한 상황은 존재할 수 없으므로 크레인 A 또는 크레인 B 둘 중 하나가 간섭이 발생하지 않는 이전 상태 노드들 중에서 대기하여야 한다.

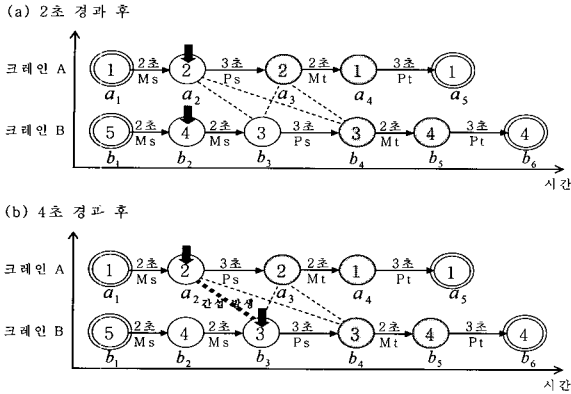


Fig. 7 Interference detection with state transition graph

Fig. 7의 (b)와 같이 간섭이 파악되면 크레인 A, B 둘 중 어느 크레인에 우선권을 주어야 할지를 결정하여야 한다. 우선권을 받은 크레인은 현재 상태 노드에 있게 되고, 그렇지 못한 크레인은 간섭이 생기지 않는 이전 상태 노드들 중의 하나에서 대기하여야 한다. 이 경우 크레인 A에 우선권을 준다면 크레인 B는 간섭이 발생하지 않는 b_2 에서 대기해야 할 것이며, 반대로 크레인 B에 우선권을 준다면 크레인 A는 a_1 에서 대기하여야 할 것이다.

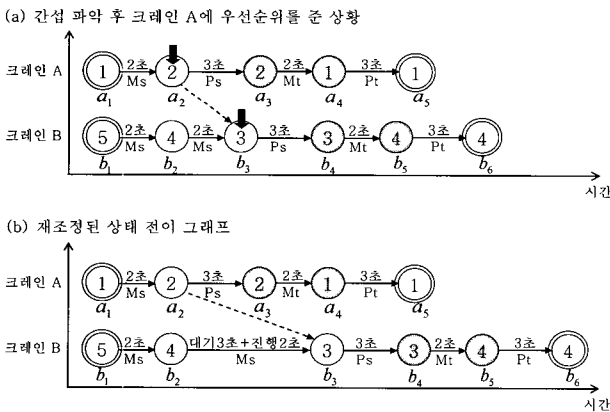


Fig. 8 Modification of state transition graph after deciding to give priority to crane A

Fig. 8은 크레인 A에 우선권을 준 경우이다. 이 경우 크레인 A에 우선권을 주었다는 의미는 크레인 A가 간섭이 생기지 않는 상태 노드로 진행한 후에야 크레인 B가 자신의 b_3 로 진행하겠다는 의미이다. Fig. 8의 (a)와 같이 a_2 에서 b_3 로 화살표를 그음으로써 이러한 우선순위 결정을 표시할 수 있다. (b)는 이를 시간적으로 고려하여 상태 전이 그래프를 조정된 결과이다. 크레인 A의 a_2 이후에 크레인 B의 b_3 와 간섭이 생기지 않는 첫 노드는 a_4 이므로 크레인 B는 3초의 대기 시간이 필요하

게 된다. 반대로 크레인 B에 우선권을 주었다면 동일한 방법으로 Fig. 9와 같이 표현할 수 있다. 크레인 A의 a_2 로의 진행은 간섭이 발생하지 않는 크레인 B의 b_4 이후에야 이루어진다. 이 경우에는 간섭을 해소하기 위하여 크레인 A에 7초의 대기 시간이 필요하게 된다.

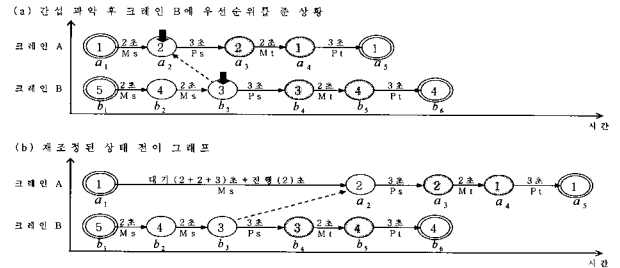


Fig. 9 Modification of state transition graph after deciding to give priority to crane B

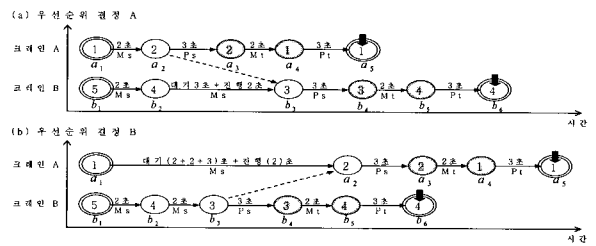


Fig. 10 Possible state transition graphs after making series of decisions

Fig. 10은 간섭이 발견될 때마다 각각의 크레인에 대하여 우선순위를 부여하여 생성할 수 있는 모든 상태 전이 그래프들을 보이고 있다. 본 예에는 간섭이 한 번만 발생하였지만 여러 번의 간섭이 발생할 수도 있다. 특히 각 크레인마다 복수의 작업을 할당하여 평가하게 되면 이러한 경우가 빈번히 발생한다. 새로운 간섭이 발생할 때마다 크레인별로 우선순위를 주는 경우 각각을 상태 전이 그래프로 따로 표현할 수 있다. 예를 들어 두 번의 간섭이 발생하는 경우 우선순위 결정 AA, AB, BA, BB의 4가지 경우의 상태 전이 그래프를 생성하게 된다.

4.3 간섭을 고려한 작업 할당 방안

이와 같은 방법으로 모든 할당 가능한 컨테이너에 대하여 (Fig. 5의 경우라면 1G와 6W) 생성 가능한 상태 전이 그래프들을 만들 수 있다. 만들어진 모든 상태 전이 그래프들을 대상으로 어떤 기준을 적용하여 평가해보면 적절한 이동 대상 컨테이너와 간섭 발생 시 회피 계획을 선택할 수 있다. 간단한 평가 기준으로는 크레인간의 지연이 가장 적은 간섭 회피 계획을 선정할 수 있다. 하지만 원천 베이나 목적 베이와의 거리가 멀어 수행에 시간이 많이 소요되는 작업은 작업 도중 간섭이 발생할 가능성이 그만큼 높아지고 이에 따라 지연도 늘어난다. 만일 단기적으로 간섭이 적게 발생하는 경우를 선택하게 되면 이후에는 간섭에 의한 지연이 많이 발생하는 작업들

만 남게 될 가능성이 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 작업 시간 대비 간섭 시간의 비율을 평가 척도로 사용하였다. 작업 시간은 두 크레인이 각각 할당된 작업을 모두 완료하는데 소요된 시간이다.

이러한 방식으로 작업이 완료된 크레인에 하나씩 새로운 작업을 할당해 나가면 모든 대상 컨테이너들에 대한 블록 내 이적 작업 계획을 수립할 수 있다.

5. 실험결과

이상에서 제안한 복수 크레인을 이용한 블록 내 이적 계획 수립 방안의 효과를 확인하기 위하여 Fig. 11과 같은 순서로 실험하였다. 본 논문에서 제안한 이적 계획 방안은 크레인에 작업 하나를 할당하기 위하여 먼저 현 시점에서 특정 크레인에 할당할 대상 컨테이너들을 파악하는 후보 컨테이너 선정 단계와 각각의 후보 컨테이너들이 할당되었을 때 가능한 상태전이 그래프를 생성해 보고 그 중에서 하나를 선택하는 계획 선정 단계로 이루어진다. 각 단계별로 몇 가지 방안을 구현하여 비교 실험하였다.

1. 목적 배이를 제외한 나머지 배이들 각각에는 최대 장치 가능한 수만큼 컨테이너를 놓는다.
2. 나머지 배이의 컨테이너들 중에서 각각의 목적 배이에 이적할 컨테이너들을 무작위로 선정하고 목적 배이 내에서의 적하 순서를 부여한다.
3. 제안한 이적 계획 방안들로 이적 대상 컨테이너들을 목적 배이로 이동시킬 순서를 계획한다.
4. 각 방안별로 이적에 소요되는 시간을 구한다.
5. 이러한 실험을 100회 수행하여 그 평균값을 구한다.

Fig. 11 The experimental procedure

후보 컨테이너 선정 방안으로 Random은 부분 순서 그래프 상에서 현재 작업 가능한 컨테이너 중에서 무작위로 하나를 선택하여 후보 컨테이너로 지정하는 방안이며 Closest는 작업 가능한 컨테이너들 중에서 작업을 할당하여야 하는 크레인의 현 위치에서 가장 가까이 있는 컨테이너를 후보로 사용하는 방안이다. Random과 Closest는 선정된 후보가 바로 이번에 작업할 대상 컨테이너가 된다. 이에 비해 All은 모든 할당 가능한 컨테이너들을 후보로 사용하는 방법이다. 상태전이 그래프로 표현된 컨테이너 작업 계획 중에서 하나를 선택하는 계획 선정 방안으로는 크레인의 동작 상태에 우선순위를 부여하여 하나의 계획만을 생성하는 방안(Operation Priority; OP)⁵⁾, 할당된 작업을 완료할 때까지 간섭에 의한 지연 시간이

가장 적은 계획을 선정하는 방안(Interference delay Minimization; IM), 할당된 작업을 완료하는데 소요된 시간 대비 간섭에 의한 지연 시간의 비율이 가장 낮은 계획을 선정하는 방안(Interference delay Ratio minimization; IR), 그리고 IM과 IR 방안을 혼용하여 후보 컨테이너 하나로부터 생성된 작업 계획들 중에서는 IR 방안으로 하나를 선정하고, 각 후보 컨테이너별로 하나씩 선정된 계획들 중에서는 IM 방안으로 최종 작업 계획을 선정하는 2단계 선정 방식(IR+IM) 이 네 가지를 비교하였다. 따라서 후보 선정 방안 3가지와 계획 선정 방안 4가지를 조합하여 총 12가지 이적 계획 수립 방안을 비교 실험하였다.

실험에서 가정한 하나의 블록에는 총 33개 배이가 있으며, 각 배이는 6단 9열의 형태로 구성되어 있다고 가정하였으며, 이적 대상 컨테이너는 이동하여 위치할 목적 배이와 적하 시 적하 순서에 대한 정보를 가지고 있다. 교차 불가능한 크레인 두 대를 사용하였으며, 크레인 간의 간섭 거리는 5 배이로 두었다. 크레인간의 협동 작업을 통하여 하나의 컨테이너를 이동시키는 경우는 고려하지 않았으며, 목적 배이 위치에 따른 각 방안들의 성능을 비교하기 위하여 Fig. 12와 같이 세 가지의 목적 배이 위치 설정을 가정하여 실험하였다.

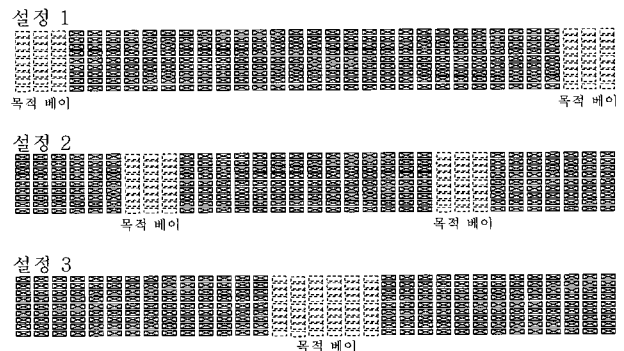


Fig. 12 Positions of target bays used in experiments

설정 1의 경우 블록의 양 끝단에 목적 배이들이 위치하는 경우로 본 연구에서는 교차 불가능하며, 작업 중 블록을 벗어날 수 없는 크레인 두 대를 사용한다고 가정하였기에 한쪽 목적 배이에는 두 크레인 중 하나만이 위치할 수 있다. 따라서 각각의 컨테이너는 어느 크레인이 작업하여야 하는지 이미 결정된 상황이다. 설정 2는 블록의 1/4 지점과 3/4 지점에 목적 배이들이 위치한 경우이며, 설정 3은 블록의 중앙에 목적 배이들이 모여 있는 경우이다. 이적 작업 시 복수 크레인을 사용할 경우의 성능은 (강 외, 2005)에서 제시한 단일 크레인 사용 시 이적 계획 방안으로 생성한 계획과의 상대적인 작업 소요 시간으로 평가하였다.

5) 크레인 동작의 우선순위는 Pt(1순위), Mt(2순위), Ps(3순위), Ms(4순위)로 부여하였으며, 충돌 발생 시 동작이 완료되기까지 소요되는 시간이 적은 크레인에 우선권을 주었다.
 6) 사용된 크레인 두 대의 사양은 동일하며, 갠트리 속도와 트롤리 속도는 2.5m/s와 2m/s로 부하/무부하에 상관없이 동일하며, 호이스트 속도는 부하일 때 0.58m/s, 무부하일 때는 1.16m/s로 설정하였다. 그리고 이적 시 소요되는 작업 시간은 설정된 크레인 사양으로 시뮬레이션을 통해 계산하였으며, 가감속은 고려하지 않았다.

Table 3 Estimated time for remarshalling divided by the time needed by using a single crane (unit: %)

목적 베이 위치	이적 계획 방안 (후보 생성방안-작업 계획선택방안)	2베이 (98개)	4베이 (196개)	6베이 (294개)
설정 1	Random-OP	68.96	72.52	74.10
	Random-IM	72.94	77.81	79.09
	Random-IR	68.90	72.45	73.07
	Random-IR+IM	68.90	72.45	73.07
	Closest-OP	66.23	68.02	70.20
	Closest-IM	71.29	73.61	76.42
	Closest-IR	66.70	67.77	68.86
	Closest-IR+IM	66.70	67.77	68.86
	All-OP	62.10	64.92	66.83
	All-IM	72.11	79.32	83.09
	All-IR	62.58	64.65	65.59
All-IR+IM	62.64	64.65	65.94	
설정 2	Random-OP	80.62	81.40	80.55
	Random-IM	79.92	80.78	81.27
	Random-IR	78.48	80.10	78.58
	Random-IR+IM	78.48	80.10	78.58
	Closest-OP	78.59	79.26	78.32
	Closest-IM	76.21	76.95	77.22
	Closest-IR	76.00	76.33	75.38
	Closest-IR+IM	76.00	76.33	75.38
	All-OP	66.35	67.70	67.21
	All-IM	63.29	66.96	66.32
	All-IR	68.22	70.83	68.33
All-IR+IM	62.17	63.64	62.21	
설정 3	Random-OP	79.25	77.78	76.27
	Random-IM	79.21	79.51	78.45
	Random-IR	72.91	70.98	70.06
	Random-IR+IM	72.91	70.98	70.06
	Closest-OP	79.01	78.34	76.75
	Closest-IM	81.53	80.71	79.36
	Closest-IR	77.15	75.86	73.65
	Closest-IR+IM	77.15	75.86	73.65
	All-OP	62.43	60.77	58.58
	All-IM	60.42	58.93	55.67
	All-IR	59.09	56.52	54.99
All-IR+IM	59.01	56.52	55.19	

Table 3은 설정별로 각각의 방안으로 수립한 이적 계획의 소요 시간을 하나의 크레인으로 작업했을 때와 대비하여 비율로 나타낸 표이다. 목적 베이의 수가 2개일 경우에는 98(= 49 × 2)개의 컨테이너를 이동시켜야 하며 목적 베이 수가 4개, 6개인 경우에는 각각 2배, 3배의 물량을 이동시켜야 한다. 각 설정 및 물량별로 가장 좋은 성능을 보인 방안은 표에서 굵은 글씨로 표시하였고, 가장 좋은 성능을 보인 방안과 성능 차이가 1% 이내인 방안들은 밑줄을 그어 표시하였다. 할당 가능한 컨테이너들을 모두 후보 컨테이너로 두고 작업 시간 대비 지연이 차지하는 비율과 지연 시간이 적은 계획을 2단계로 적용하는 All-IR+IM 방안이 대체적으로 가장 좋은 성능을 보였다. 특히 설정 2에서 다른 방안들보다도 두드러지게 좋은 성능을 보였는데 설정 2는 설정 1과 3에 비해 목적 베이 위치에 의한

7) 6단 9열의 경우 최대 54개를 위치시킬 수 있지만, 최악의 상황에서도 반출이 가능하도록 49(= 6 × 9 - 5)개 컨테이너만을 장치한다고 가정하였다.

제약이 적으므로 효율적인 작업 계획을 수립하기 위해 고려해야 될 요소가 더 많은 경우이다. 따라서 이적 계획 방안 중 가장 많은 요소들을 고려하는 방안인 All-IR+IM 방안이 두드러지게 좋은 성능을 나타낸 것으로 판단된다.

실험 결과를 보다 쉽게 분석하기 위하여 Table 4와 같이 각 후보 컨테이너 생성 방안 별로 결과를 비교해 보았다. All 방안이 전반적으로 가장 우수하였으며, 특히 목적 베이들이 중앙에 모여 있는 설정 3에서 좋은 결과를 보였다. 이에 비해 양 끝단에 목적 베이들이 존재하는 설정 1의 경우에는 세 가지 방법 모두 비슷한 성능을 보였다. 이러한 결과는 설정 1의 경우 컨테이너별로 작업할 크레인이 이미 결정되어 있는 상황이기 때문에 효율적인 작업 계획을 유연하게 수립할 여지가 적기 때문이다.

Table 4 Average estimated time for remarshalling by various candidate generation methods (unit: %)

후보 생성 방안	설정 1	설정 2	설정 3
Random	72.9	79.9	74.9
Closest	69.4	76.8	77.4
All	67.9	66.1	58.2

Table 5는 생성한 여러 상태 전이 그래프 중에서 작업 계획 방안을 선정하는 방안에 따른 성능을 분석한 결과이다. 여기서는 IR+IM 방안이 대체적으로 가장 좋은 성능을 보였다. 설정 1에서는 IM 방안의 성능이 특히 좋지 못했는데, 이는 IM 방안의 경우 상대적으로 작업 소요 시간이 짧은 작업을 우선적으로 할당하게 되므로 이적 작업 후반부에는 간섭에 의한 지연 시간이 긴 작업들이 많이 남기 때문이다. 또한 설정 1에서 IM 방안은 두 크레인간의 작업 완료 시간의 차이가 다른 이적 계획 선정 방안에 비해 큰 것으로 나타났다.

Table 5 Average estimated time for remarshalling by various work plan selection methods (unit: %)

작업 계획 선정 방안	설정 1	설정 2	설정 3
OP	68.2	75.6	72.1
IM	76.2	74.3	72.6
IR	67.8	74.7	67.9
IR+IM	67.9	72.5	67.9

Table 6은 복수 크레인 이적 계획 수립 방안으로 간단하게 접근할 수 있는 가장 가까운 컨테이너를 새로운 작업으로 할당하고 작업 수행 과정에서 간섭이 발생하면 작업이 많이 진행된 크레인에 우선순위를 부여하는 Closest-OP 방안⁸⁾과 논문에서 가장 좋은 성능을 보인 All-IR+IM 방안을 각 목적 베이 위치 설정과 물량별로 비교하고 있다. 표에서 수치는

Closest-OP 방안으로 생성한 작업 계획에 대비하여 All-IR+IM 방안 적용 시 단축시킬 수 있는 시간의 비율이다. 적게는 5%에서 많게는 30% 가량 이적 작업 소요 시간을 단축시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

본 논문에서 제안한 방안은 교차가 불가능한 두 대의 크레인 뿐 아니라 교차가 가능한 복수 크레인이나 크레인의 수를 증가시키더라도 적용 가능하므로 향후 다양한 환경에서도 본 제안 방안의 유효성을 검증하는 연구가 필요하다.

Table 6 Reduction of estimated time for remarshalling using All-IR+IM divided by the time needed by using Closest-OP (unit: %)

목적 베이 위치	2베이 (98개)	4베이 (196개)	6베이 (294개)
설정 1	5.4	5.0	6.1
설정 2	20.9	19.7	20.6
설정 3	25.3	27.9	28.1

Table 7은 실험한 방안 중에서 가장 고려하여야 하는 상황이 많은 All-IR+IM 방안을 적용하였을 때 크레인에 하나의 새로운 작업을 할당하는데 소요되는 시간을 측정 한 결과이다. 짧은 시간 내에 작업을 할당할 수 있어 본 제안 방안을 실시간에 적용할 수 있음을 알 수 있다.

Table 7 Elapsed time for running All-IR+IM algorithm for assigning one move (unit: seconds)

이적 물량	2베이 (98개)	4베이 (196개)	6베이 (294개)
All-IR+IM	0.010	0.012	0.016

6. 결 론

본 논문에서는 적하 작업을 효율적으로 수행하기 위하여 유휴 시간을 활용하여 블록 내 이적 작업을 효율적으로 수행하는 복수 크레인 작업 계획 수립 방안을 제안하였다. 본 제안 방안으로 실험한 결과 두 대의 크레인 사용 시 간섭을 고려하여 이적 계획을 수립하면 간섭을 고려하지 않고 작업 계획을 수립하는 경우에 비해 약 5~30% 정도의 작업 소요 시간을 단축시킬 수 있으며, 실시간에 이적 계획 수립이 가능함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 교육부에서 주관하는 "차세대물류IT기술 연구사업단"에 의해 지원 받은 연구입니다.

참 고 문 헌

- [1] 강재호, 류광렬, 김갑환 (2004): "장치장에서 베이 내 컨테이너의 효율적인 재정돈 방안," 한국지능정보시스템학회 2004년 추계학술대회 논문집, pp. 287-295.
- [2] 강재호, 오명섭, 류광렬, 김갑환 (2005): "컨테이너 터미널 장치장에서 블록 내 이적을 위한 컨테이너 이동 순서 계획," 한국항해항만학회지 제 29권 1호, pp. 83-90.
- [3] 왕승진 (2002): "자동화 컨테이너 터미널에서의 장치장 운영규칙에 관한 연구," 석사 학위 논문, 부산대학교 대학원 산업공학과.
- [4] 이석준 (2003): "자동화 컨테이너 터미널에서의 자동화 야드크레인의 작업순서 결정법," 석사 학위 논문, 부산대학교 대학원 산업공학과.
- [5] 이주호, 최용석 (2004): "자동화 컨테이너터미널의 이적작업에 관한 시뮬레이션 연구," 한국항해항만학회 제 28권 제 2호 추계학술대회논문집 pp. 203-208.
- [6] Kim, K. H. and Bae, J.-W, (1998): "Re-Marshaling Export Containers," Computers and Industrial Engineering, Vol. 35, No. 3-4, pp. 655-658.

원고접수일 : 2005년 4월 29일

원고채택일 : 2005년 6월 16일