

자동화 컨테이너 터미널에서 수출 컨테이너 이적계획¹⁾

Export Container Remarshaling Planning in Automated Container Terminals

배중욱*, 박영만**, 김갑환***

* 전남대학교 교통물류학부 (jwbae@chonnam.ac.kr)

** 해군사관학교 경영과학과 (ymanpark@pusan.ac.kr)

*** 부산대학교 산업공학과 (kapkim@pusan.ac.kr)

Abstract

이적작업은 하역작업 시간을 단축하고 장치장의 효율을 높이기 위해 최근 중요하게 다루어지는 운영 전략들 중의 하나이다. 자동화 컨테이너 터미널에서 수출 컨테이너 이적작업은 작업영역에 제약이 가진 하역장비를 이용하여 장치장 블록에 산재되어 있는 수출 컨테이너들을 적하작업이 용이한 형태로 재배치하는 것이다. 이 연구는 이적 및 적하작업과 연관된 총비용을 최소화하기 위해 어느 베이의 어떤 컨테이너를 어느 베이로 재배치할 지를 결정하기 위한 이적계획을 정의하고 이를 혼합정수계획법으로 모형화하였다. 또한, 실제 현장에서 사용이 가능한 휴리스틱 알고리즘을 제안하였으며 다양한 시나리오를 구성하여 배치형태 및 비용 가중치 등에 대한 민감도를 분석하였다.

1. 서론

컨테이너 터미널의 주요 평가적도 중에 하나는 입항 선박의 재항시간을 결정짓는 본선작업 생산성이다. 본선작업 생산성은 선박에 컨테이너를 싣는 적하작업과 선박에서 컨테이너를 내리는 양하작업 동안의 시간당 컨테이너 처리 개수를 의미한다.

일반적으로 터미널 운영자는 본선작업의 생산성을 높이기 위해 작업에 투입되는 C/C(Container Crane), YT(Yard Tractor) 또는 TC(Transfer Crane)의 대수를 증가시키거나 장치장 계획, 장비 운영계획 등의 효율화를 모색한다. 특히, 장치장 계획은 본선작업 생산성뿐만 아니라 컨테이너 터미널의 애로자원인 장치공간의 효율적 활용과 밀접한 관련이 있다. 본선작업 생산성 측면에서 장치장 계획은 YT와 TC의 효율성을 높이기 위해 본선작업이 수행되는 선박의 접안위치와 근접한 저장위치를 확보하려고 한다. 또한 적하작업 및 반출작업에서의 재취급 작업(rehandling operation)의 발생과 작업 불가능 공간을 줄이기 위해 동일 특성의 컨테이너를 모아두는

특성이 있다. 그러나 적하계획(Loading plan), 베이 계획(bay plan) 등의 양적하 작업에 대한 정보를 반입 작업 과정에서 정확히 파악하기 어렵고 반출입 작업에 많은 가변성이 존재하기 때문에 사전에 수립된 장치장 계획을 효율적으로 운영하는 것은 매우 어렵다. 이러한 장치장 계획의 어려움을 보완하기 위한 터미널 운영자가 활용하는 중요한 운영 전략의 하나가 이적작업(remarshaling operation)이다.

이적작업은 적하 혹은 반출 작업이 수행되기 전에 장치장의 여기저기에 흩어져 있는 유사한 특성의 적하 또는 반출 컨테이너들을 같은 공간에 모으거나 장치장에서의 위치를 이동시키는 재배치 작업이다. 하지만 지금까지 컨테이너터미널의 운영에서 이적작업이 심도 깊게 다루어지지 않은 이유는 이적작업이 TC, YT 등의 장비와 운영인력의 추가 투입이 필요하다는 점과 구체적인 작업을 지시하기에는 현장의 변동적 요인이 많기 때문이다.

그러나 무인화된 첨단 장비로 운영되는 자동화 컨테이너 터미널에서는 이러한 장애가 상당부분 해소될 수 있다. 수동 컨테이너터미널에 비해 인건비의 비중이 낮아짐에 따라 추가 작업에 대한 비용 부담이 적고 장비의 운영에서 보다 정밀하고 예측 가능한 계획의 적용이 가능하기 때문이다.

이 논문에서는 자동화 컨테이너 터미널에서 적하 컨테이너의 이적작업을 어떻게 계획할 것인지를 다루고자 한다. 이 논문의 목적은 자동화 컨테이너 터미널에서 수행되는 이적작업의 관련 작업비용을 최소화하면서 본선작업의 생산성을 높이기 위한 이적계획을 정의하고 이를 수립하기 위한 실용적인 해법을 제시하는 것이다.

2. 문헌연구

컨테이너 터미널에 대한 국내외 초기 연구는 거시적인 수송문제나 컨테이너 터미널의 처리능력에 관련된 것들이 주류를 이루었다. 그러나 항만 운영의 중요성이 인식되면서 최근에는 다양한 분야에서 연구들이 진행되고 있다. 이 연구와 밀접한 연구 분야로는 장치장 계획 및 위치결정, 재취급 작업계획, 재배치 전략 등이 있다.

김동조와 박영택(1996)은 터미널 운영방법의

1) "이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임"(KRF-2005-003-F00025)

중요한 요소인 컨테이너 장치위치 결정법에 출고지역, 출고날짜, 무게 등의 복합 결정요소를 적용하여 이를 자동화하는 계획시스템을 구현한 사례를 소개하고 있다. 박강태(1997)는 선박의 재항시산을 줄이기 위해서 컨테이너 터미널의 수출 장치장 공간할당에 관한 연구를 소개하였다. Kim과 Kim(1999)은 수입 장치장을 운영하는데 특징적으로 나타나는 재취급 작업을 분석하였고, 이것을 수입 장치장 운영과 관련된 의사결정에 포함시켜서 다루었다. Castilho와 Daganzo(1993)는 컨테이너 터미널의 공간할당 문제를 처음 다루었고 상세히 문제를 정의한 점에서 가치가 인정된다. 이 연구에서는 예약 공간, 장치 공간, 신규 여유 공간 등의 공간 할당 문제를 이해하기 위한 개념들을 소개하고 있다. Kim 외 2인(2000)의 연구에서는 수출 컨테이너의 무게 등급을 고려하여 재취급 작업을 최소화하는 구체적인 장치위치의 결정문제가 다루어졌다.

컨테이너 터미널에서 수출 컨테이너의 재배치에 관한 Kim과 Bae(1998)의 연구에서는 작업배분과 하역장비의 작업순서의 문제로 분할하여 해법을 제시하였다. 그렇지만 제시된 방법은 이적작업에서 YT 또는 AGV (Automated Guided Vehicle)와 같은 이송장비와 복수의 ATC(Automated Transfer Crane)를 필요로 하기 때문에 본 연구에서 다루는 자동화 컨테이너 터미널의 배치 형태에는 적용이 어렵다. 윤원영 외 2인(2003)은 자동화 컨테이너 터미널의 이적작업에 무작위(random) 할당방법과 DOS (Duration of stay) 할당방법을 적용시켜 양적하 작업과 반출입 작업에서 ATC의 작업시간 변화를 비교하였다. 그러나 이는 운영규칙에 대한 비교연구로서 구체적인 이적작업의 계획을 다루지 않았다. 강재호 외 3인(2005)의 연구에서는 재취급 최소화를 고려한 이적작업에 대한 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다. 그러나 이 연구에서는 적하 컨테이너를 이적할 목적 베이(bay)에 충분한 장치 공간이 항상 존재하고 베이 내에서의 반출 순서가 사전에 정해져 있다고 가정하였고 이적작업에 소요되는 비용 및 적하작업에서의 ATC 이동비용 등을 고려하지 않았다.

앞서 살펴보았듯이 이적작업과 관련된 기존 연구들은 자동화 컨테이너 터미널에서 ATC의 이동시간과 장치위치에 대한 특성을 제대로 반영하지 못하였거나 너무 세부적인 문제를 다루어 실제 문제에 적용하기에는 많은 어려움이 있다. 따라서 이 연구에서는 ATC와 이송장비의 작업지점 등의 자동화 컨테이너 터미널이 지니는 특성들을 반영하여 이적계획문제를 다루고자 한다. 이 연구에서 이적작업은 1대의 ATC가 한 블록 내에 산재되어 있는 적하 컨테이너들을 해측 TP에 가까운 베이로 장치공간의 여유를 감안하여 이동시간을 최소화하면서 동일 특성의 컨테이너를 모아서 장치시키는 작업과정을 의미한다.

3. 자동화 컨테이너 터미널의 이적계획

3.1 문제정의

일반적으로 자동화 컨테이너 터미널에서 장치장 하역장비와 이송장비의 인터페이스 지점은 <Figure 1>과 같이 야드 블록(block)의 양끝에 설치되어 있다. 이러한 형태는 무인으로 운행되는 내부 이송장비와 외부 반출입 트럭의 이동 흐름을 분리하여 차량 혼잡과 사고를 예방하기 위한 것으로 네덜란드

ECT(Europe Combined Terminal)와 독일의 CTA(Container Terminal Alternwerder) 등에서 채택하고 있는 배치형태이다.

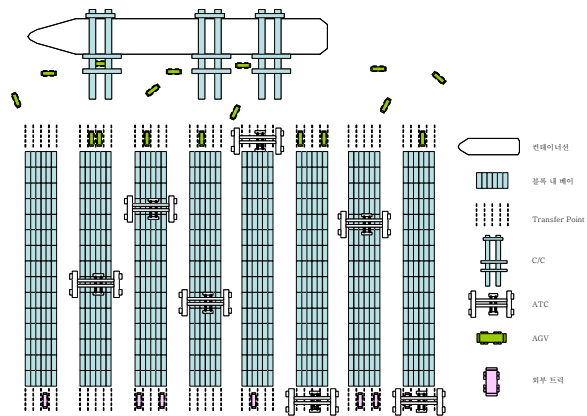


Figure 1. Layout of an automated container terminal

컨테이너 터미널의 장치장은 하역장비의 작업영역이 구분되는 블록으로 구성되고 블록은 1개의 컨테이너가 차지하는 길이 방향의 공간을 의미하는 야드 베이로 이루어진다. 이 연구는 한 블록 내에 1대의 ATC가 컨테이너 장치와 상하차 작업을 수행하는 것으로 가정한다. 그리고 ATC는 해측의 작업지점(Transfer Point: TP)에서 내부 이송장비인 AGV 또는 ALV(Automated Lifting Vehicle)와 연계 작업을 하고 육측 작업지점에서는 외부 트럭과 연계 작업을 수행한다.

<Figure 1>에서 컨테이너선과 장치장 블록 사이에 이동하는 차량은 AGV 또는 ALV와 같은 내부 이송장비이고 각 블록의 양끝에 점선으로 표시된 영역에서 위쪽 부분이 해측 TP 그리고 아래쪽 부분이 육측 TP을 의미한다.

적하될 컨테이너들은 선박이 입항하기 일정 시점 이전까지 터미널 외부에서 반입되어 블록에 장치된다. 역으로 양하한 컨테이너들은 블록에 장치되었다가 일정 기간 내에 터미널 외부로 반출된다. 반입작업에서 ATC의 운반 거리는 반입 컨테이너가 육측 TP에서 블록 내 장치위치까지의 이동하는 거리이다. 그리고 적하 컨테이너의 장치위치에서 해측 TP까지의 이동거리는 적하작업에서 ATC의 운반 거리이다. 따라서 수출 컨테이너를 위한 블록 내에서의 ATC 운반거리는 반입작업과 적하작업을 함께 고려할 때 육측 TP에서 해측 TP까지의 거리와 같다. 즉, ATC의 총 운반 작업 시간은 일정하다.

그러나 ATC가 어떤 시점에 사용되는지에 따라 시간가치는 다르다. 본선 작업과 반출입 작업시간은 선사나 화주의 서비스 수준과 밀접한 관계를 가진다. 내부 이송장비 또는 외부 반출입 트럭과 ATC의 연계작업에서 ATC의 운반시간이 본선 및 반출입 작업시간에 큰 영향을 미친다. 그러므로 반입작업에서는 ATC의 운반거리를 최소화하기 위해서 컨테이너의 저장위치를 육측 TP에서 가까이 하는 것이 유리하다. 그러나 이러한 장치위치는 적하 작업에서는 해측 TP까지의 운반거리가 증가하여 본선작업의 효율성을 떨어뜨린다. 따라서 적하할 컨테이너들이 해측 TP에 가깝게 장치될수록 적하 컨테이너를 해측 TP의 이송장비에 연계시켜주어야

하는 ATC의 이동거리가 단축되어 적하작업의 효율성이 높아진다. 본선작업 또는 반출입 작업에 소요되는 ATC의 작업시간 가치는 높고 반면에 이를 제외한 유틸시간에서는 상대적으로 작업시간의 가치는 낮다. 따라서 유틸시간을 활용하여 저장위치를 변경하는 것은 단순한 총 이동시간에는 영향이 없지만 시간 가치는 달라지게 한다.

이송장비가 컨테이너가 장치된 베이까지 직접 이동하는 컨테이너 터미널의 장치장 계획에서는 적하 컨테이너의 목적항, 항차, 크기 등이 같은 동일 그룹의 컨테이너들이 동일 또는 근접한 베이에 장치될 수 있도록 노력한다. 이는 TC의 이동시간을 최소화하는 측면과 재취급 작업의 빈도를 줄이기 위한 목적이다. 이송장비가 블록 내부로 진입하지 않는 자동화 컨테이너 터미널에서는 이에 대한 요구가 크지 않은 것으로 알려져 있다. 그러나 서로 다른 그룹의 컨테이너가 한 베이 내에 혼재하게 되면 적하작업 시점의 차이에 따라 하단의 컨테이너를 끄집어내기 위해 상단의 컨테이너를 다른 위치로 옮기는 재취급 작업이 발생할 가능성이 높아진다. 또한 상이한 특성의 컨테이너들이 한 베이 내에 혼재되면 재취급 작업의 발생 가능성을 줄이기 위해 가까운 시점에 적하 혹은 반출이 예상되는 컨테이너의 상단에 장치하지 않아 발생하는 장치 불가능 공간이 증가할 가능성이 높다.

따라서 자동화 컨테이너 터미널에서 적하 컨테이너들은 해측 TP에 가까운 베이에 동일 특성의 적하 컨테이너들과 함께 장치되는 것이 본선작업의 효율성 측면에서 유리하다. 그러나 이를 위한 수행되는 이적작업의 운반작업 비용과 적하작업의 운반작업 및 재취급 작업 비용은 상충관계(trade-off)를 가진다. 따라서 이적작업은 이러한 총비용을 최소화되도록 계획되어야 한다.

3.2 혼합정수계획모형

이 절에서는 최적화 모형을 수립하기 위해 이적계획 문제에 대한 본 연구의 가정들을 살펴본 후, 혼합정수계획법을 이용한 최적화 모형을 소개한다.

이 연구는 취급 컨테이너의 크기가 동일하다고 보고 블록 내의 모든 베이이 이적이 가능한 장치 공간이고 ATC의 작업시간은 이적 컨테이너의 그룹과는 무관하다고 가정한다. 그리고 블록 내 이적작업에서 이적 대상 컨테이너 그룹에 포함되지 않는 컨테이너들은 저장위치를 재배치하지 않는 것으로 가정하였다. 왜냐하면 블록 양끝에 장비간의 연계작업이 수행되는 컨테이너 터미널에서는 한 블록 내에 수출입 및 환적 컨테이너가 혼재되어 장치된 컨테이너들 중에서도 이적작업이 필요하지 않은 경우도 존재하기 때문이다.

이적작업에서 발생하는 재취급 작업은 ATC의 이적작업시간에 고려하지 않음으로써 이적작업을 위해 소요되는 시간은 ATC의 이동시간 외에 pick up과 drop off 작업시간만을 포함하는 것으로 가정하였다. 그리고 적하작업에서 발생할 수 있는 재취급 작업시간은 한 베이 내에 동일 그룹의 컨테이너들이 장치될 때 최소가 되는 것으로 가정한다. 이적계획을 수립하기 위한 혼합정수계획모형에 사용되는 주요 기호와 의사결정변수는 다음과 같다.

- α : 적하작업 동안의 ATC 작업시간에 대한 가중치로 단위시간당 비용을 의미함
- β : 이적작업 동안의 ATC 작업시간에 대한 가중치로 단위시간당 비용을 의미함

- γ : 적하작업 동안에 재취급을 위한 ATC 작업시간에 대한 가중치로 단위시간당 비용을 의미함
- B : 블록을 구성하고 있는 베이의 집합
- G : 이적작업이 고려되는 컨테이너 그룹의 집합
- E : 이적작업이 고려되지 않는 컨테이너 그룹
- C : 베이 내에 최대를 장치할 수 있는 컨테이너 수량

M_k : 블록 내에 장치된 k 그룹 컨테이너가 필요로 하는 최소 베이 수, $k \in G$

d_i : i 베이에서 해측 작업위치까지의 ATC 운반 작업 시간, $i \in B$

d_{ij} : i 베이에 있는 컨테이너 한 단위를 j 베이로 이적할 때 소요되는 시간으로 운반시간과 pick up 및 drop off 작업시간의 합, $i, j \in B$

s_{ik} : 현재 i 베이에 있는 k 그룹 컨테이너 수량

x_{ik} : 이적작업 이후에 i 베이에 있는 k 그룹 컨테이너의 수량, $i \in B$ 그리고 $k \in G$

n_k : 이적작업 이후에 k 그룹의 컨테이너가 장치된 베이 수, $k \in G$

e_{ik} : 이적작업 이후에 i 베이에 k 그룹의 컨테이너가 있으면 1 그렇지 않으면 0, $i \in B$ 그리고 $k \in G$

y_{ijk} : i 베이에서 j 베이로 이동한 k 그룹 컨테이너의 수량, $i, j \in B$ 그리고 $k \in G$

이적계획을 위한 혼합정수계획모형은 다음과 같다.

Minimize

$$\alpha \sum_{i \in B} \sum_{j \in G} d_{ij} x_{ij} + \beta \sum_{i \in B} \sum_{j \in B, j \neq i} \sum_{k \in G} d_{ij} y_{ijk} \quad (1)$$

$$+ \gamma \sum_{k \in G} (n_k - M_k)$$

Subject to

$$x_{ik} - \sum_{j \in B, j \neq i} y_{ijk} + \sum_{j \in B, j \neq i} y_{jik} = s_{ik} \quad \text{for all } i, j \in B \text{ and } k \in G \quad (2)$$

$$\sum_{k \in G \cup E} x_{ik} \leq C \quad \text{for all } i \in B \quad (3)$$

$$\sum_{j \in B, j \neq i} y_{ijk} \leq s_{ik} \quad \text{for all } i, j \in B \text{ and } k \in G \quad (4)$$

$$x_{ik} - M e_{ik} \leq 0 \quad \text{for all } i \in B \text{ and } k \in G \quad (5)$$

$$n_k - \sum_{i \in B} e_{ik} = 0 \quad \text{for all } k \in G \quad (6)$$

y_{ijk} 는 정수형 for all $i, j \in B$ and $k \in G$

e_{ik} 는 0 또는 1 for all $i \in B$ and $k \in G$

식(1)은 이적계획 최적화 모형의 목적식으로 관련 작업을 수행하는데 소요되는 총비용을 최소화하는 것이다. 목적식의 첫 번째 항은 적하작업 시에 ATC가 컨테이너를 AGV 또는 ALV에 옮겨 실기 위해 해측 TP로 운반하는데 소요되는 작업시간에 대한 부분으로 각 그룹별 적하 컨테이너들이 장치된 위치에서 해측 TP까지 이동하는 거리와 수량이 곱하여 구해진 운반시간 비용을 의미한다. 식(1)의 두 번째 항은 이적작업 시에 ATC 작업시간 비용을 의미한다. 이는 각 컨테이너 그룹별로 이적작업이 이루어진 컨테이너 수량과 운반 작업 시간

을 곱한 형태로 표현된다. 세 번째 항은 적하작업 시에 발생하는 재취급 작업시간 비용을 나타낸다. 여기서 M_k 는 k 그룹 컨테이너가 다른 그룹의 컨테이너 혼재가 없이 장치될 때 소요되는 베이 수이다. 따라서 블록 내에 있는 k 그룹의 컨테이너 물량을 T_k 라 할 때 $\lceil T_k/C \rceil$ 를 의미한다. 예를 들면 T_k 이 36이고 C가 21이면 M_k 는 2이다.

제약식 (2)는 각 베이별로 장치된 그룹별 컨테이너 수량은 초기 장치된 수량에서 다른 베이로 부터 이적되어온 컨테이너 수량과 다른 베이로 이적되어 나간 컨테이너 수량의 변화에 따라 결정되는 것을 나타낸다. 제약식 (3)은 각 베이에 장치되어 있는 컨테이너 수량과 빈 공간의 합이 한 베이의 최대 장치능력을 초과할 수 없다는 조건이다. 제약식(4)는 각 그룹별로 한 베이에서 이적되는 컨테이너 수량은 초기에 장치된 수량보다는 적다는 것을 의미한다. 제약식 (5)와 (6)은 이적작업 후에 특정 그룹의 컨테이너가 베이별로 장치되어 있는지 여부와 각 그룹의 컨테이너가 몇 개의 베이에 장치되었는지를 나타낸다. 식(5)에서 M 은 아주 큰 수를 의미한다.

3.3 이적계획의 적용예

앞 절에서 제시한 수리모형을 이용하여 이적계획을 보여주는 간단한 적용예를 제시한다.

Table 1. Storage before remارشaling

Bay	Group				
	A	B	C	D	Other
1	1	3	3	1	4
2	0	1	2	2	3
3	1	3	1	0	5
4	0	4	0	7	9
5	6	0	5	3	2
6	7	3	4	4	0
7	5	2	5	2	5
8	6	5	2	4	2
Sum	26	21	22	23	30

예제에서 이적작업이 수행되는 블록은 8개의 베이로 구성된다. 이적 대상 컨테이너들은 4 종류의 그룹으로 분류되며 각 그룹별 컨테이너들이 블록 내에 장치된 베이 위치와 수량은 <Table 1>과 같다. 각 베이에는 컨테이너를 4단 6열로 장치할 수 있지만 최대 장치가능 수량은 재취급 작업을 감안하여 21개로 정한다. 그리고 ATC가 1 베이를 이동하는데 소요되는 시간은 10초이고 해측 TP를 이동하기 위해서는 1 베이를 더 이동한다. 이적작업에서 ATC의 pick up과 drop off 작업에 소요되는 시간은 총30초로 가정한다.

<Table 2>는 α 를 1,000원/초, β 를 100원/초 그리고 γ 를 100,000원/베이로 설정한 후에 혼합정수계획 모형을 통해 구한 최적해에서 이적계획을 요약한 표이다. 이 표에서는 각 그룹의 컨테이너들이 현재 장치된 베이에서 다른 베이로 몇 개가 옮겨지는지를 보여준다. 각 칸의 알파벳은 이적되는 컨테이너의 그룹을 의미하고 괄호안의 숫자는 이적되는 컨테이너 수를 뜻한다. <Table 3>은 이적작업이 완료된 후 각 그룹별 컨테이너들이 블록 내에서 장치된

베이 위치와 수량으로 정리한 것이다. <Table 1>과 <Table 3>을 비교하면 대상 컨테이너들이 해측 TP에 가까운 베이로 재배치되고 한 베이 내에 혼재되는 컨테이너 그룹의 수가 적어지면서 동일 그룹의 컨테이너들이 한 베이에 장치되는 경향이 확인된다. 이적작업 전후의 차이를 정리하면 이적작업을 통해 재배치된 컨테이너는 총 53개이고 이적 대상 컨테이너들의 해측 TP까지의 운반시간에서 단축된 시간은 1,850초이다. 이때 이적작업에 소요된 ATC의 작업시간은 ATC의 운반시간과 장치시간을 합하여 3,460초이다. 따라서 적하작업시 감소하게 되는 비용은 1,850,000원이고 재취급작업에서는 1,700,000원의 감소 효과가 있다. 반면에 이적작업에는 346,000원의 추가 비용 부담이 발생한다. 그러므로 총 비용감소는 3,204,000원이다.

Table 2. Remارشaling operations

To/From	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	D(1)	-	-	-	-	-	-
2	B(1)	-	-	-	-	-	-	-
3	A(1)	C(1)	-	-	-	-	-	-
4	B(1)	-	B(3)	-	-	-	-	-
5	-	-	-	D(3)	-	-	-	-
6	-	C(4) D(2)	B(3)	D(2)	-	-	-	-
7	-	D(2)	B(2)	-	A(2) C(5)	A(3)	-	-
8	A(6) C(1)	D(4)	B(5)	-	C(1)	-	-	-

Table 3. Storage after remارشaling using MIP

Bay	Group				
	A	B	C	D	Other
1	8	5	4	0	4
2	0	0	7	11	3
3	0	16	0	0	5
4	0	0	0	12	9
5	8	0	11	0	2
6	10	0	0	0	0
7	0	0	0	0	5
8	0	0	0	0	2
Sum	26	21	22	23	30

4. 실용적 해법

4.1 휴리스틱 알고리즘

앞서 제시한 수리모형은 이적 대상이 되는 컨테이너 그룹 수, 블록을 구성한 베이 수가 증가하면 최적해를 도출에 많은 시간이 소요되어 현실 문제에 적용이 어렵다. 따라서 이 절에서는 이적계획의 실제 적용을 위해 개발한 휴리스틱 알고리즘을 제시한다.

알고리즘에서 사용하는 기호는 다음과 같다.

a_{ik} : 현재 i 베이에 있는 k 그룹 컨테이너 수량

e_i : i 베이의 빈공간의 크기로 장치 가능한 컨테이너 수량을 의미함.

m_{ijk} : j 베이의 k 그룹 컨테이너 수와 i 베이의 빈 공간중 작은 값으로 $\min\{a_{jk}, e_i\}$.

b_{ijk} : j 베이의 k 그룹 컨테이너를 i 베이로 m_{ijk} 만큼 이적할 때 k 그룹 컨테이너가 장치되어 있는 베이의 감소분으로 $m_{ijk}=0$ 이면 0. 만일 $m_{ijk}>0$ 인 경우에는 $m_{ijk}=a_{jk}$ 이면 1. $m_{ijk}=e_i$ 이고 $a_{jk}=0$ 이면 -1, 그렇지 않으면 0임.

c_{ijk} : k 그룹의 컨테이너를 j 베이로부터 i 베이로 m_{ijk} 개의 컨테이너를 이적시 발생하는 해당 감소 비용으로 $\{\alpha(d_i - d_j)m_{ijk} - \beta d_{ij}m_{ijk} + \gamma b_{ijk}\} / m_{ijk}$ 을 의미함.

Δc_{jk} : j, k 의 각 조합에 관련된 c_{ijk} 중에서 가장 큰 값

- i^*_{jk} : 동일 j, k 에서 $\Delta c_{jk}=c_{ijk}$ 가 성립하는 i 베이
- i^* : 이적 대상 컨테이너가 옮겨지는 i 베이
- j^* : 이적 대상 컨테이너가 장치되어 있는 j 베이
- k^* : 이적 대상 컨테이너가 속하는 k 그룹

이적작업을 통한 총비용의 감소가 발생할 때까지 반복적인 절차를 가지는 단계별 계산과정은 다음과 같다.

[초기화] 주어진 배치안에 대해 a_{jk} 와 e_i 를 설정.

[단계 1] m_{ijk}, b_{ijk} 의 이용하여 c_{ijk} 를 계산한 다음에 Δc_{jk} 와 i^*_{jk} 를 구함.

[단계 2] 양의 값을 갖는 Δc_{jk} 중에서 가장 큰 Δc_{jk} 를 찾아 i^*, j^*, k^* 를 결정. 이때 $i^*=i^*_{j^*k^*}$. 만약 양의 값을 갖는 Δc_{jk} 가 없는 경우에는 수행을 종료함.

[단계 3] $a_{j^*k^*} = a_{j^*k^*} + m_{i^*j^*k^*}$, $a_{i^*k^*} = a_{i^*k^*} - m_{i^*j^*k^*}$, $e_i = e_i + m_{i^*j^*k^*}$, $e_j = e_j - m_{i^*j^*k^*}$ 로 갱신하고 단계 1로 돌아감.

제시한 휴리스틱 알고리즘은 컨테이너 1개에 대한 이적작업에 소요되는 비용, 적하작업의 비용 감소분 그리고 베이 내 재작업 비용 감소분의 합인 Δc_{jk} 를 계산하여 이익이 발생할 때까지 이적작업을 계획하는 과정을 가진다. 이때 이적 컨테이너는 한 베이 내의 동일 그룹 컨테이너를 모두 옮기는 것으로 가정하지만 옮겨질 베이의 장치 가능 공간도 함께 고려한다. 따라서 실질적인 이적 컨테이너 수는 현재 베이 내에 장치된 동일 그룹의 컨테이너 수량과 이적할 베이의 최대 여유공간 중에서 작은 값으로 정한다. <Table 1>의 배치 자료에 휴리스틱 알고리즘을 적용하여 해를 구하는 과정은 다음과 같다.

(초기화) <Table 1>의 배치 자료를 이용하여 a_{jk} 와 e_i 를 설정한다.

(단계 1) Δc_{jk} 와 i^*_{jk} 를 정리하면 <Table 4>와 같다. 예를 들면 Δc_{11} 을 산출하기 필요한 $c_{111}, c_{211}, c_{311}, c_{411}, c_{511}, c_{611}, c_{711}, c_{811}$ 의 값은 0, 0, 112000, 0, 40666.7, 44285.7, 56000, 56000이다. 이때 c_{311} 는 $\{1000 \times (20) \times 1 - 100 \times 80 \times 1 + 100000 \times 1\} / 1$ 이고 m_{311} 와 b_{311} 는 모두 1이다.

(단계 2) <Table 4>에서 가장 큰 양의 값은 Δc_{11} 로

i^*, j^*, k^* 는 각각 1, 3, 1이다.

(단계 3) 이적작업을 수행한 후 변경된 배치형태에 따른 a_{jk} 와 e_i 를 정리하면 <Table 5>와 같고 다시 단계 1로 돌아가 모든 Δc_{jk} 의 값이 0이 될 때까지 위의 단계별 과정을 반복하여 수행한다.

Table 4. Δc_{jk} at iteration 1

$j \backslash k$	1	2	3	4
1	112,000	106,000	112,000	86,000
2	36,000	80,000	106,000	86,000
3	72,000	86,000	80,000	30,000
4	0	72,000	0	58,000
5	72,000	18,000	72,000	62,000
6	58,000	56,000	62,000	56,000
7	44,000	30,000	56,000	16,000
8	30,000	36,000	30,000	36,000

Table 5. Storage after iteration 1

Bay \ Group	A	B	C	D	Other
1	2	3	3	1	4
2	0	1	2	2	3
3	0	3	1	0	5
4	0	4	0	7	9
5	6	0	5	3	2
6	7	3	4	4	0
7	5	2	5	2	5
8	6	5	2	4	2
Sum	26	21	22	23	30

Table 6. Storage after remarkshaling using H. A.

Bay \ Group	A	B	C	D	Other
1	2	6	6	3	4
2	0	0	9	9	3
3	0	15	0	0	5
4	0	0	0	11	9
5	12	0	7	0	2
6	12	0	0	0	0
7	0	0	0	0	5
8	0	0	0	0	2
Sum	26	21	22	23	30

<Table 6>은 휴리스틱 알고리즘을 통해 작성된 이적계획에 따라 재배치한 결과이다. 블럭 내에 산재되어 있는 수출 컨테이너들이 안벽 측으로 옮겨져 이적계획 후 적하작업에서 소요되는 작업비용은 3,090,000원으로 비용감소는 1,800,000원이다. 그리고 동일 그룹의 컨테이너가 장치되는 베이의 수를 줄임으로써 절감되는 재취업 작업의 비용 감소는 1,600,000원이다. 반면에 이에 소요되는 이적작업 비용은 720,000원이다. 따라서 총감소액은 2,680,000원이다.

앞서 최적화 모형을 통해 구한 <Table 3>의 결과와 비교할 때 적하작업 감소 비용에서는 50,000

원이 많고 이적작업에 따른 비용 차이는 374,000원이 많다. 그리고 재작업 작업의 감소 비용에서는 100,000원이 많은 것이다. 따라서 최적해와 비교할 때 524,000원이 많게 이적계획이 수립된다.

최적해를 통한 총비용감소에 대한 두 해법간 차이의 비율은 16%로 계산에 소요되는 시간을 고려할 때 현실적으로 수용할 수 있는 실용적인 결과라고 판단된다.

4.2 실험 및 분석

이 절에서는 제안한 알고리즘을 적용하여 이적작업에 따른 비용감소 효과를 살펴보기 위한 수치 실험을 한다. 컨테이너 장치 형태와 작업별 비용 가중치 변화의 영향을 비교하기 위해 총 7개 요인을 변화시켜 시나리오를 구성한다. 변화 요인은 장치 블럭을 구성하는 베이 수, 블럭 내에 장치된 컨테이너 그룹 수, 베이별 평균 장치 컨테이너 수, 베이별 평균 컨테이너 그룹 수 그리고 α, β, γ 의 값이다.

각 시나리오로부터 해를 산출하기 위한 알고리즘상의 반복횟수, 적하작업의 비용감소분, 재취급작업의 비용감소분 그리고 이적작업 비용을 구하였다. 그리고 결과의 통계적 유의성을 높이기 위해 각 시나리오별로 10회씩 반복 실험하여 구한 평균값을 통해 결과를 분석하였다.

각 분석결과를 두 가지 형태의 그래프로 정리한다. 하나는 계산 소요시간을 추정할 수 있는 알고리즘의 반복횟수이고 다른 하나는 비용(단위: 원)의 관점이다. 막대 그래프로 표현된 비용 분석의 결과에는 본선 적하작업에서의 감소비용, 재취급작업의 감소비용, 이적작업에 소요되는 비용과 총 감소비용을 정리한다.

<Figure 2>는 한 블럭의 베이 수를 10개부터 15개로 늘려가면서 실험을 수행한 결과이다. 베이 수가 증가함에 따라 알고리즘의 반복횟수는 지속적으로 증가하는 것을 알 수 있으며, 이적작업 비용 증가에도 불구하고 본선작업에 의한 개선효과와 재취급작업의 개선효과로 인하여 베이 수가 증가할수록 총 개선효과도 증가함을 알 수 있다.

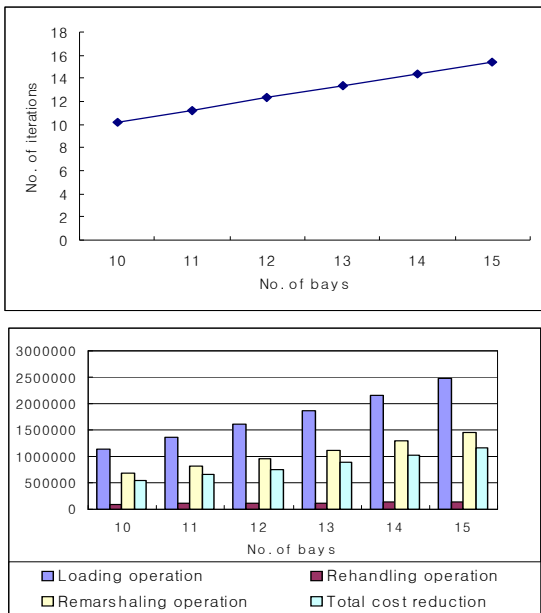


Figure 2. Analysis results for number of bays

<Figure 3>은 그룹 수의 변화에 따른 반복횟수 및 개선효과를 보여주고 있으며 그룹 수가 증가할수록 반복횟수 및 총 개선효과도 증가함을 알 수 있다. 그러나 그룹수의 증가에 따른 총개선효과의 증가는 베이 수의 증가시 보다는 크지 않음을 알 수 있다.

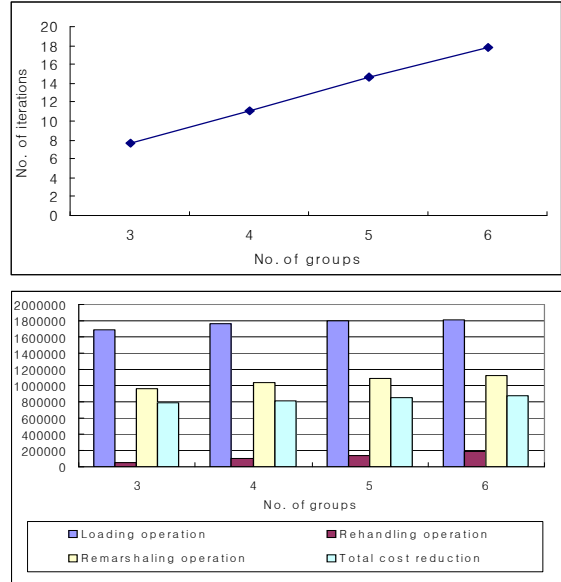


Figure 3. Analysis results for number of groups

<Figure 4>는 베이당 컨테이너수의 변화에 따른 실험결과를 보여주고 있으며 컨테이너 수가 증가할수록 반복횟수 및 총 개선효과는 감소함을 알 수 있다. 이는 베이당 컨테이너수가 많을수록 여유공간이 줄어들게 되어 이적작업이 용이하지 않기 때문이다.

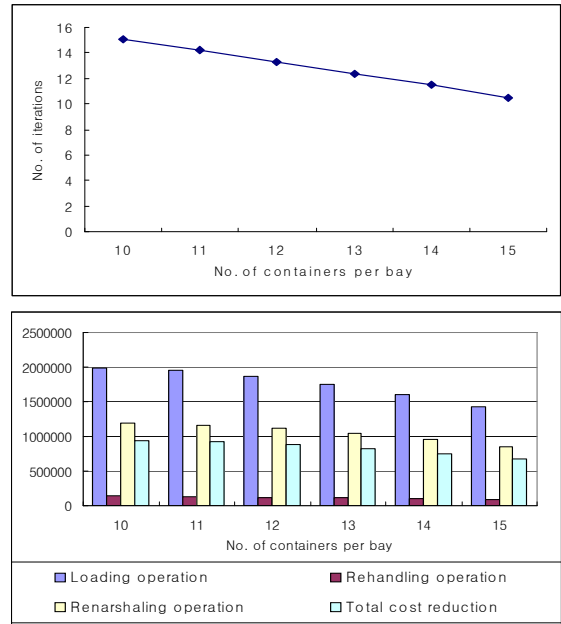


Figure 4. Analysis results for number of containers per bay

<Figure 5>에서는 베이당 그룹수의 증가할수록 반복횟수와 총 개선효과는 증가함을 알 수 있다.

이는 베이당 그룹수가 많을수록 이적작업으로 작업 비용을 개선시킬수 있기 때문이다.

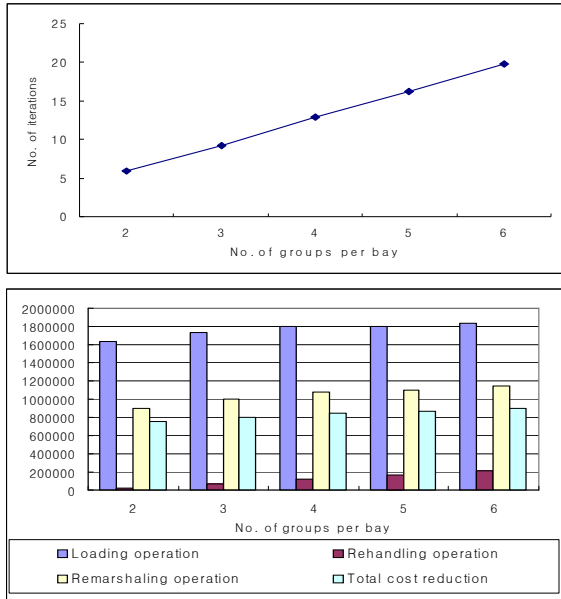


Figure 5. Analysis results for number of groups per bay

<Figure 6>에서는 베이수와 컨테이너 그룹수에 따른 반복횟수 및 개선효과를 분석하였다. 그림에서 베이수가 증가하고 그룹수가 많을수록 반복횟수가 증가하여 활발하게 이적작업이 이루어지고 총 개선효과가 커짐을 알 수 있다.

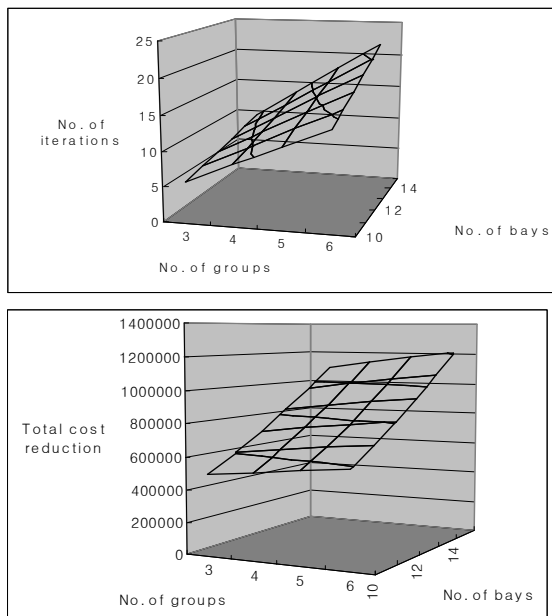


Figure 6. Analysis results for number of bays and number of groups

<Figure 7>에서는 베이수와 베이당 그룹수의 변화에 따른 반복횟수 및 개선효과를 보여주고 있다. 그림에서 베이수가 증가하고 그룹수가 많을수록 알고리즘의 반복횟수가 증가하여 활발하게 이적

작업이 이루어지고 총 개선효과도 커짐을 알 수 있다.

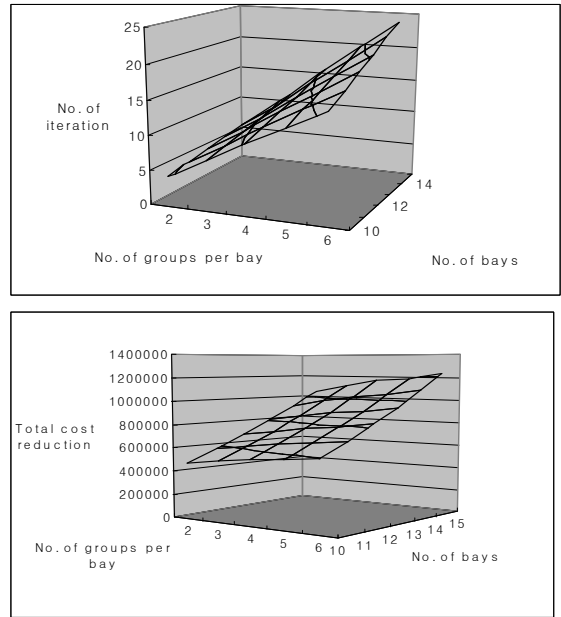


Figure 7. Analysis results for number of bays and number of groups per bay

<Figure 8>에서는 베이수가 증가하고 베이당 컨테이너수가 적을수록 반복횟수가 증가하여 활발하게 이적작업이 이루어지고 총 개선효과도 커짐을 알 수 있다.

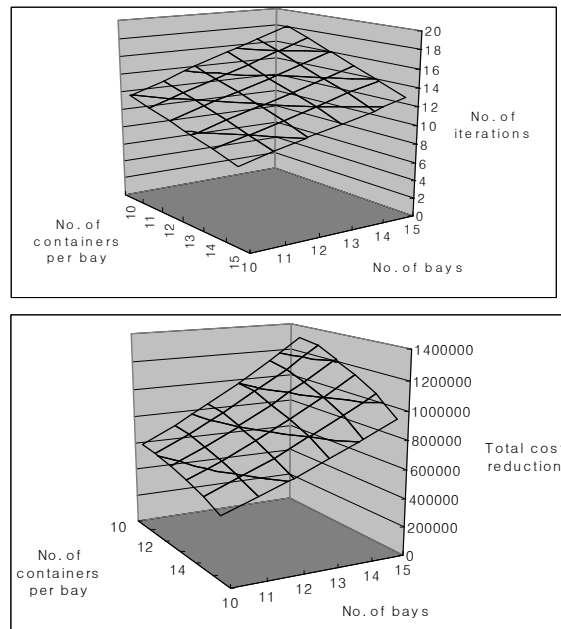


Figure 8. Analysis results for number of bays and number of containers per bay

<Figure 9>는 α 를 기준으로 β 와 γ 의 시간당 비용의 가중치를 변화시키면서 이적계획의 효과를 분석하였다. 실험결과 베타값(이적작업 비용 가중치)이 크고 감마값(재취급 개선비용 가중치)이 작을수

록 알고리즘의 반복횟수가 감소하여 이적작업이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 반대로 베타값이 작고 감마값이 클수록 이적작업을 수행하는 것이 전체 비용을 감소시키는 방안임을 알 수 있었다.

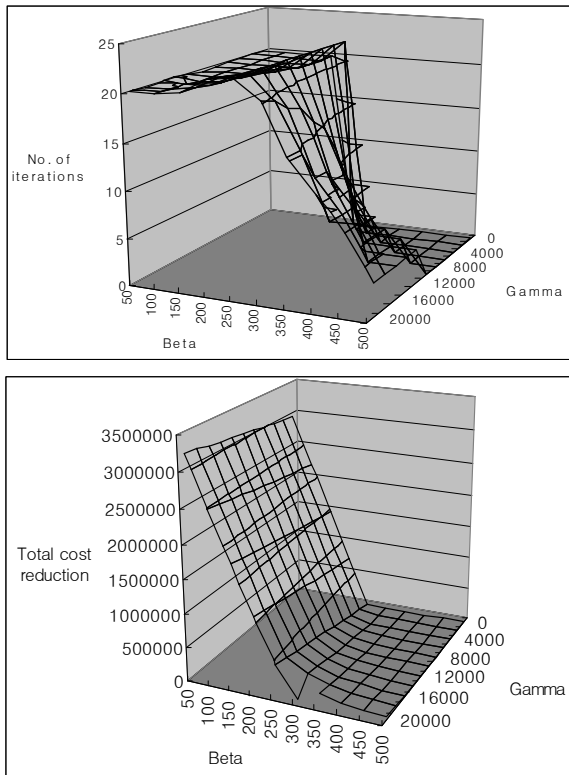


Figure 9. Analysis results for cost weights

5. 결론 및 추후연구

본 연구에서는 자동화 컨테이너 터미널에서 적하작업을 신속하게 처리하기 위해 수출 컨테이너의 장치위치를 재배치하는 이적계획을 다루었다. 이적계획에서는 적하작업 시 재취급 작업의 발생 가능성을 줄이기 위해 동일 그룹의 컨테이너를 동일 베이 내에 모을 뿐 아니라 적하작업 시에 ATC의 운반작업 시간을 줄이기 위해 해측 TP 가까운 지점으로 옮겨주는 것도 함께 고려하였다. 터미널 운영자에게 이적계획은 추가적인 운반작업이 요구하기 때문에 어떤 컨테이너를 어느 장치위치에 옮길 것인지를 계획하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 적하작업에서 ATC 운반작업 비용 및 재취급 작업의 비용 그리고 이적작업에 따른 추가 작업 비용을 고려한 총비용을 최소화하는 정수계획모형을 제시하였다. 그리고 수리적 모형의 적용 과정을 보여주기 위한 예제를 제시하였다. 그러나 최적화 모형은 장치 블록 내의 장치 베이 수, 컨테이너 그룹 수가 큰 현실 문제에 적용하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이적작업을 통한 총비용의 감소가 발생할 때까지 컨테이너 이적을 수행하는 반복 구조를 가진 계산 소요시간이 작은 휴리스틱 알고리즘을 개발하였다.

다양한 배치형태를 갖는 여러 가지 문제를 생성하여 적용해 본 결과 베이수, 컨테이너 그룹수, 베이당 그룹수가 증가할수록 이적작업 횟수가 증가

하는 반면에 반대로 베이당 컨테이너수가 많을수록 이적작업의 기회는 줄어들을 알 수 있었다. 또한 이적작업 비용 가중치가 작고 재취급 개선비용 가중치가 클수록 이적작업이 아주 효과적인 것으로 나타났다.

향후 연구로는 수리모형과 휴리스틱 알고리즘의 수행도에 대한 비교 연구가 필요하고 이적 컨테이너의 이동위치와 이동수량을 이용하여 ATC가 어떤 순서로 작업을 처리해야 하는지에 관한 논의가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

강재호, 오명섭, 류광렬, 김갑환 (2005), 컨테이너 터미널 장치장에서 블록 내 이적을 위한 컨테이너 이동 순서 계획, *한국항해항만학회지*, 29(1), 83-90.

김동조, 박영택 (1996), Planning 기반 컨테이너 장치 계획 시스템, *한국지능정보시스템*, 5(1), 145-166.

박강태 (1997), 모델변경의 용이성을 고려한 컨테이너 터미널의 공간할당 계획, 석사학위 논문, 부산대학교.

윤원영, 이주호, 최용석 (2003), 시뮬레이션을 이용한 자동화 컨테이너 터미널의 이적 규칙에 관한 연구, *한국시뮬레이션학회논문집*, 12(3), 21-29.

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

Kim, K. H. and Bae, J. W. (1998), Re-marshalling Export Containers in Port Container Terminals, *Computers & Industrial Engineering*, 35(3-4), 655-659.

Kim, K. H. and Kim, H. B. (1999), Segregating Space Allocation Models for Container Inventories in Port Container Terminals, *International Journal of Production Economics*, 59, 415-423.

Kim, K. H., Park, Y. M., and Ryu, K. R. (2000), Deriving Decision Rules to Locate Export Containers in Container Yard, *European Journal of Operational Research*, 124, 89-101.

Mounira, T. I., Castilho, B. D., and Daganzo, C. F. (1993), Storage space vs handling work in container terminals, *Transportation Research-A*, 27B(2), 13-32.