

수직 배치형 컨테이너 터미널 반입작업에서 수출 컨테이너의 작업순서와 장치위치 통합 의사결정

†배종욱 · 박영만*

† 전남대학교 물류교통학전공, * 해군사관학교 국방경영과학과

Integrated Decision-making for Sequencing and Storage Location of Export Containers at a Receiving Operation in the Container Terminal with a Perpendicular Layout

†Jong-Wook Bae · Young-Man Park*

† Department of Logistics and Transportation, Chonnam National University, Chonnam 550-749, Korea
* Department of Management Science, Korea Naval Academy, Changwon 645-797, Korea

요 약 : 본 연구는 수직 배치형 컨테이너 터미널에서 반입되는 수출 컨테이너의 작업순서와 장치위치를 결정하는 통합 문제를 다루었다. 수출 컨테이너에 대한 선호 장치위치는 대응하는 본선작업의 우선순위와 밀접하고 외부 트럭들의 대기시간은 장치 소요시간에 좌우된다. 본 연구는 외부 트럭들의 예정도착시간과 예정완료시간 그리고 적하작업의 선호 장치위치를 고려한 혼합정수모형을 제시하였다. 그리고 현장 적용을 위해 시뮬레이티드 어닐링에 기반한 휴리스틱 알고리즘을 개발하였다. 목적 함수값과 계산시간의 관점에서 최적 모형과 휴리스틱 알고리즘을 비교하였고 수치실험을 통해 휴리스틱 알고리즘의 수행도를 분석하였다.

핵심용어 : 컨테이너 터미널, 장치위치, 작업순서, 혼합정수계획법, 시뮬레이티드 어닐링, 휴리스틱 알고리즘

Abstract : This study deals with an integrated problem for deciding sequencing and storage location of export containers together at its receiving operation in the container terminal with a perpendicular layout. The preferred storage location of an export container varies with the priority of the corresponding loading operation and the waiting time of an external truck depends on its storage time. This paper proposes the mixed integer programming model considering the expected arrival time and expected finish time of an external truck and the preferred storage location for its loading operation. And we suggest the heuristic algorithm based on a simulated annealing algorithm for real world adaption. We compare the heuristic algorithm with the optimum model in terms of the computation times and total cost and the performance of the heuristic algorithm is analyzed through a numerical experiment.

Key words : container terminal, storage location, sequencing, mixed integer programming, simulated annealing, heuristic algorithm

1. 서 론

컨테이너 터미널에서 서비스 만족도와 하역작업시간은 밀접한 관계가 있다. 따라서 컨테이너 터미널 운영자들은 적하작업시간뿐 아니라 반입 컨테이너를 가져온 외부 트럭의 대기시간 단축을 위해 많은 노력을 한다. 적하작업시간을 좌우하는 요인 중의 하나는 반입 시점에 수출 컨테이너를 어느 위치에 장치하는가이다. 그리고 반입작업에서 외부 트럭의 대기시간은 컨테이너 장치위치에 영향도 있지만 반입작업을 수행하는 야드 크레인의 작업순서에 따라 많이 달라진다.

Stahlbock 등(2008)에 따르면 선형 연구들은 수출 컨테이너의 장치위치와 외부 트럭의 작업순서 문제를 분리하여 다루어

왔다. 그러나 수직 배치형 컨테이너 터미널의 경우는 장치장 블록의 특성상 이러한 접근으로는 문제 해결에 한계가 있다. 왜냐하면 적하작업 또는 반입작업 중에서 어느 작업의 관점이냐에 따라 유리한 장치위치가 달라 각 작업의 소요시간이 상충관계(trade-off)를 가지기 때문이다. 신속한 적하작업을 위해서는 수출 컨테이너를 장치장 블록(block)에서 선석과 가까운 베이(bay)에 장치하는 것이 바람직하다. 반면에 외부 트럭의 대기시간을 줄이기 위해서는 장치위치를 장치장 블록에서 게이트에 가까운 베일로 지정하는 것이 유리하다. 따라서 적하작업시간을 단축을 고려하면서 반입작업에서 외부 트럭의 대기시간을 줄이기 위해서는 두 문제의 특성을 고려한 의사결

† 연회원, jwbae@jnu.ac.kr 061)659-7352

* 연회원, ymanpark@pusan.ac.kr 055)549-1239

(주) 이 논문은 “컨테이너 터미널에서 수출컨테이너의 작업순서 및 장치위치 결정”이란 제목으로 “2009년도 추계학술대회 한국항해항만학회논문집(부산 백스코, 2009.10.22~23, pp.177-178)”에 일부 내용이 발표되었음

정을 해야 한다. 이때 결정해야 할 사항은 반입되는 수출 컨테이너의 장치위치와 야드 크레인 또는 외부 트럭의 작업순서이다.

본 연구는 수직 배치형 컨테이너 터미널의 반입작업에서 수출 컨테이너의 장치위치와 작업순서를 함께 결정하는 통합 의사결정문제를 다루고자 한다. 적하작업시간 단축을 위해 최적 장치위치가 기여하는 가치와 대기시간으로 인해 외부 트럭이 생각하는 가치는 다르다. 본 연구는 이러한 가치들을 고려하여 관련된 총 비용을 최소화하는 통합 문제를 정의하고 혼합정수계획법을 이용한 최적화 모형과 계산시간 측면에서 효율적인 휴리스틱 해법을 제시하고자 한다.

2절에서는 관련 선행 연구들의 한계점과 본 연구에서 다루고자 하는 문제 정의를 정리하였고 3절에서는 최적해를 도출하는 혼합정수계획모형을 제안하면서 그 적용예를 제시하였다. 4절에서는 시뮬레이티드 어닐링을 응용한 휴리스틱 방법을 소개하고 이를 적용한 실험 결과를 정리하였다.

2. 작업순서와 장치위치 통합결정

2.1 문헌연구

본 연구와 밀접한 선행 연구 분야로는 장치장계획의 장치위치 문제와 야드 크레인의 작업순서 문제로 나눌 수 있다.

장치위치에 대한 연구에서 김 등(1996)은 터미널 운영방법의 중요한 요소인 컨테이너 장치위치 결정법에 출고지역, 출고날짜, 무게 등의 복합 결정요소를 적용하여 이를 자동화하는 계획시스템을 구현한 사례를 소개하고 있다. Kim(1999)과 Kim(2002)은 수입 장치장을 운영하는데 특징적으로 나타나는 재취급 작업을 분석하였고, 이를 수입 장치장 운영과 관련된 의사결정에 포함시켜 다루었다. Castilho 등(1993)는 컨테이너 터미널의 공간 할당 문제를 처음 다루면서 예약 공간, 장치 공간, 신규 여유 공간 등의 공간 할당 문제를 이해하기 위한 개념들을 소개하고 있다. Kim 등(2000)의 연구에서는 수출 컨테이너의 무게 등급을 고려하여 재취급 작업을 최소화하는 구체적인 장치위치의 결정문제가 다루어졌다. Zang 등(2003)은 컨테이너 터미널에서의 저장공간 할당을 블록별 장치수량 할당과 선박별 배정의 2단계 의사결정 문제로 구성하고 이에 대한 최적 수리모형을 개발하였다.

야드 크레인의 작업순서 문제에 대해 Kim 등(2003)은 수평형 컨테이너 터미널에서 컨테이너 장치위치가 결정된 후 반출입 외부 트럭의 총작업시간 또는 대기시간을 최소화시키는 작업순서 문제를 다루었다. 이들은 정적 상황의 문제에 대해 최적해를 탐색하는 동적계획모형을 제시하고 동적 상황에 대해서는 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다. Ng 등(2005)는 양적하 작업에 대해 각각의 예정작업시간이 주어진 경우에 본선작업의 예로자원이 되는 야드 크레인의 작업일정 문제에 대해 총 대기시간을 최소화하는 branch & bound 알고리즘을 제시하였다.

앞서 살펴본 선행 연구들은 전통적인 수평 배치형 컨테이너 터미널을 위주로 장치위치 문제와 야드 크레인의 작업순서 문제를 독립적으로 다루었다. 최근에는 수직 배치형 컨테이너 터미널에 대한 관심이 높아지고 있다. 이는 수평 배치형 컨테이너 터미널과는 다른 운영 특성을 지니고 있기 때문에 새로운 접근이 필요하다. 김·남(2006)의 연구를 살펴보면 RMGC형 크레인이 투입되는 수직 배치형 컨테이너 터미널에서는 야드 크레인의 작업영역이 제한적이기 때문에 추가적인 장비 투입이나 지원이 어렵다. 그러나 수직 배치형 컨테이너 터미널의 경우에 장치위치에 대한 국내외 선행 연구가 많지 않고 수직 배치형의 작업 특성을 고려한 야드 크레인의 작업순서에 대한 연구도 부족한 실정이다. 또한 선행 연구의 검토에서 살펴보았듯이 장치위치와 야드 크레인의 작업순서의 상호 관련성을 고려한 통합 의사결정에 대해서는 연구가 수행되지 않았다.

2.2 문제정의

최근 항만은 생산성 증대와 인건비 절감을 위해 하역장비의 고속화와 자동화를 추구하고 있다. 따라서 본 연구는 Fig. 1과 같이 야드 크레인의 동선이 안벽에 수직으로 배치된 컨테이너 터미널을 대상으로 통합 의사결정문제를 정의하고자 한다. 수직형 배치는 외부 트럭의 장치장 내 진입에 따른 통제의 복잡성을 줄이고 야드 장비의 효율성을 높이기 위해 고안되었다. 장치장 블록의 양끝에는 야드 크레인이 내부 이송장비와 연계 작업을 수행하는 장소로서 해측 TP(Transfer Point) 그리고 외부 트럭과 연계 작업이 수행되는 장소인 육측 TP가 있다. 장치장 블록은 다수의 베이로 구성된다. 그리고 일반적으로 야드 크레인 1대가 블록의 하역작업을 전담하며 타 블록으로 이동하지는 못한다. 따라서 장치공간이 배정된 다음에는 반입 컨테이너들의 장치위치 및 작업순서 결정은 블록별로 독립된 문제이다.

수직 배치형 장치장에서 적하작업은 블록에 장치된 수출 컨테이너를 야드 크레인이 내부 이송장비에 전달하면 이 이송장비가 안벽 크레인까지 컨테이너를 운반하고 이를 안벽 크레인이 선박에 싣는 과정이다. 그리고 반입작업은 외부 트럭이 수출 컨테이너를 실고 장치장 블록에 도착하면 야드 크레인이 컨테이너를 넘겨받아 장치장 블록의 지정된 장치위치에 옮기는 과정이다.

일반적으로 컨테이너 터미널의 장치장계획에서 컨테이너를 장치장의 어느 블록으로 배정할 것인지는 장치공간 문제라고 한다. 그리고 블록 내에서 어느 베이에 장치할 것인지는 장치위치 문제를 의미한다. 수평형 배치 컨테이너 터미널을 중심으로 수행된 연구들에서 장치공간 문제는 가용공간 제약, 선박의 접안위치와 블록의 이동거리 최소화 그리고 블록간 작업 부하 균형 등을 고려한다. 그리고 장치위치 문제는 가용공간 제약, 야드 크레인의 이동빈도 최소화, 공간 활용도 및 재취급(rehandling) 가능성 등을 중시한다. 그러나 수직 배치형 컨테이너 터미널에서 장치위치 문제는 수평 배치형 컨테이너 터미

널과 비교하여 야드 크레인의 이동 측면에서 차이가 있다.

수직 배치형 컨테이너 터미널에서 수출 컨테이너의 장치 위치는 해측에 위치할수록 적하작업에서 야드 크레인의 이동 및 운반시간이 짧아져 유리하다. 반면에 수출 컨테이너를 싣고 육측에 대기하는 외부 트럭의 입장에서는 반입작업을 수행하는 야드 크레인의 이동 및 운반시간이 증가되어 대기시간이 증가하게 된다.

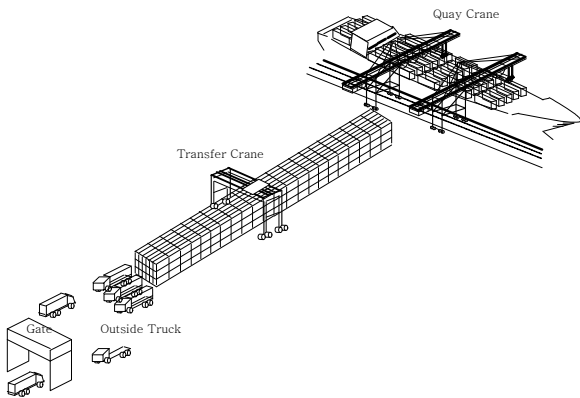


Fig. 1 A container terminal with a perpendicular layout

본 연구는 수출 컨테이너의 장치위치와 작업순서를 결정하는 통합 의사결정에 관한 특성을 위주로 해법을 수립하기 위해 문제를 단순화하였다. 장치장 블록에서는 양적하작업과 반출입작업이 동시에 수행될 수 있다. 그러나 본 연구에서는 장치장 블록에 반입작업만 있다고 가정하였다. 야드 크레인은 육측 TP에 도착한 외부 트럭에서 수출 컨테이너를 넘겨받아 지정된 장치위치로 운반 후 장치한 다음에 후속 작업을 위해 다시 육측 TP로 이동한다. 본선 및 반출작업이 없다고 가정하였으므로 야드 크레인의 이중작업(dual operation)이나 해측 TP로의 이동은 없다. 그리고 야드 크레인이 반입 트럭에서 컨테이너를 하차하는 시점이 외부 트럭의 작업완료시간이 된다.

야드 크레인의 반입작업 및 적하작업의 소요시간은 장치장 블록의 베이 내 컨테이너 장치 형태에 따라 달라진다. 그러나 본 연구는 베이 내에서의 야드 크레인의 장치작업시간은 동일하며 야드 크레인은 베이 단위로 이동한다. 연속적인 반입작업에 의해 베이별 장치능력은 작업순서에 따라 달라진다. 그러나 본 연구는 각 베이의 장치능력은 무한하다고 가정하여 베이 내 공간 제약을 고려하지 않았다.

적하작업 및 반입작업의 소요시간을 단축하는 다른 방법으로 재정돈작업(remarshaling)이 있다(박 등, 2010). 우선 외부 트럭의 작업완료시점을 줄이기 위해 야드 크레인의 이동시간을 감안하여 육측 TP에 가깝게 장치위치를 정한다. 그런 다음 야드 크레인의 유휴시간을 활용하여 컨테이너를 해측 TP에 가까운 베이로 다시 배치하는 것이다. 그러나 재정돈작업은 적하작업 시작시점에 가깝게 반입된 수출 컨테이너는 재배치될 가능성이 낮다. 이러한 특성은 수출 컨테이너별로 장치위치에 대한 가중치가 서로 다를 수 있음을 의미한다. 즉 재정

돈작업이 어려운 컨테이너의 장치위치를 해측 TP에 가깝게 정하고 재정돈작업이 가능한 컨테이너는 상대적으로 해측 TP와 떨어진 장치위치를 배정해도 적하작업시간에 미치는 영향이 줄어들 것이다.

컨테이너 터미널 운영자는 외부 트럭에 대해서 일정 수준의 서비스를 제공하고자 한다. 이를 위해 반입 트럭의 작업시간을 설정하고 이를 초과하지 않도록 야드 크레인의 작업순서 등을 통제한다. 외부 트럭이 게이트를 통과하며 이동할 장치공간, 즉 장치장 블록을 지정받게 되면 해당 블록의 육측 TP에 도착하여 작업이 시작할 수 있는 시점을 추정할 수 있다. 여기에 야드 크레인의 작업량, 작업순서와 목표 서비스 수준을 감안하여 예상 작업완료시점을 부여하게 된다.

육측 TP는 다수의 외부 트럭들이 동시에 대기할 수 있는 공간이다. 반입작업에서 야드 크레인과 외부 트럭의 연계작업이 수행되기 위해서는 외부 트럭이 육측 TP에서 준비상태가 되어야 한다. 그러나 본 연구는 작업순서가 결정되면서 이에 맞추어 외부 트럭이 TP에 진입하여 작업가능상태가 되는 것으로 가정하였다. 따라서 어떤 수출 컨테이너의 가장 이른 작업시작시점은 컨테이너를 적재한 외부 트럭이 육측 TP에 도착하는 시점과 동일하다고 가정한다. 따라서 작업순서를 결정할 때 외부 트럭의 육측 TP 도착에 따른 선입선출 규칙을 고려하지 않는다.

3. 최적수리모형

3.1 혼합정수계획모형

본 연구는 반입 컨테이너의 장치위치와 외부 트럭의 작업순서를 동시에 결정하는 혼합정수모형을 수립한다. 앞 절에서 언급한 가정 외에 최적화 모형을 수립을 위해 설정한 가정은 다음과 같다.

- (1) 장치장 블록은 B 개의 베이로 구성되어 있고 반입작업을 요청한 외부 트럭은 N 대이다.
- (2) 외부 트럭은 1개의 수출 컨테이너만 싣고 들어오며 이 트럭의 육측 TP의 도착시점과 최대 허용되는 작업완료시점은 주어진다.
- (3) 야드 크레인의 블록 내 이동시간, 베이 내 장치시간, 외부 트럭과의 연계작업시간은 부하/무부하 상태에 상관없이 일정하다.
- (4) 블록의 양끝 베이에서 각각 해측 또는 육측 TP까지의 이동거리는 베이간의 거리와 동일하다.
- (5) 반입 컨테이너별 장치위치에 대한 가치와 이를 적재한 외부 트럭의 작업시작시간에 대한 가치는 주어진다.

본 연구는 반입 컨테이너를 실은 외부 트럭의 하차작업이 반드시 가장 이른 작업가능시점과 가장 늦은 작업완료시점 내에 수행되어야 하는 제약조건으로 표현하였다. 모형의 목적은 장치위치와 작업시작시점으로 표현된 총 비용을 최소화하는

것이다. 이때 각각의 가치를 고려하는데 장치위치에 대한 가치는 해당 컨테이너를 싣는 선박의 중요도, 재정돈작업 가능성 등을 고려하여 결정된다. 그리고 외부 트럭의 가치는 트럭의 예상대기시간, 고객의 중요도 등을 고려하여 의해 정해진다. 혼합정수계획모형에서 사용되는 입력 변수와 의사결정변수는 다음과 같다.

입력 변수:

- WL_i : i 컨테이너의 장치위치에 대한 가치
- WT_i : i 컨테이너의 작업시작시간에 대한 가치
- S : 가상의 시작작업(시작 전 대기상태)
- T : 가상의 최종작업(완료 후 대기상태)
- A_i : i 컨테이너 가장 이른 작업시작시점(컨테이너를 적재한 외부 트럭이 육측 TP에 도착한 시간)
- D_i : i 컨테이너 가장 늦은 작업완료시점(목표 서비스 수준으로 최대 대기시간을 감안하여 외부 트럭이 컨테이너 하차를 종료해야 하는 최대 허용시간)
- T_{pd} : 야드 크레인의 하차 및 장치장 내 장치작업시간
- T_b : 야드 크레인이 1 베이를 이동하는 시간

의사결정변수:

- x_{ij} : 야드 크레인이 i 컨테이너를 작업하고 나서 j 컨테이너를 작업하면 1 아니면 0, $1 \leq i, j \leq N$
- y_i : i 컨테이너의 장치위치로 베이 번호를 의미하고 육측 TP에 가장 가까운 베이 번호가 1, 육측 TP에 가장 가까운 베이 번호가 B , $1 \leq i \leq N$
- s_i : i 컨테이너 장치작업 시작시간, $1 \leq i \leq N$

장치위치와 작업순서를 동시에 결정하는 통합 의사결정문제의 혼합정수계획모형은 다음과 같다.

Minimize

$$\sum_{i=1}^N WL_i y_i + \sum_{i=1}^N WT_i s_i \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{i=1}^N x_{Si} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{iT} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i=S, i \neq j}^N x_{ij} = 1 \quad \forall i, j = 1, \dots, n, T, \quad (4)$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^T x_{ij} - \sum_{j=S, j \neq i}^N x_{ji} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, N, \quad (5)$$

$$s_i + 2T_b(B+1-y_i) + 2T_{pd} - s_j \leq M(1-x_{ij}) \quad \forall i \neq j \wedge i = 1, \dots, N \wedge j = 1, \dots, N, T, \quad (6)$$

$$s_0 - s_j \leq M(1-x_{0j}) \quad \forall j = 1, \dots, N, \quad (7)$$

$$A_i \leq s_i \leq D_i \quad \forall i = S, 1, \dots, N, \quad (8)$$

$$1 \leq y_i \leq B \quad \forall i = 1, \dots, N, \quad (9)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ or } 1 \quad \forall i, j = S, 1, \dots, N, T, \quad (10)$$

$$y_i \text{ integer } \forall i = 1, \dots, N. \quad (11)$$

식(1)은 모형의 목적식으로 반입 컨테이너의 블록 내 장치위치(베이)와 외부 트럭 작업시작시간(대기시간)에 가치를 고려한 총 비용을 최소화하는 것이다. 목적식의 첫 번째 항은 가치가 높은 반입 컨테이너를 육측 TP에 가까운 베이에 장치하는 것이 유리함을 의미한다. 두 번째 항은 육측 TP에서의 외부 트럭 작업시작시간에 대한 것으로 외부 트럭별 가치를 고려하여 서비스 수준을 높게 적용하는 즉, 가치가 높은 외부 트럭은 가능한 일찍 반입작업이 수행되는 것이 유리하다는 것을 의미한다. 식 (2)는 야드 크레인이 가상의 시작작업 즉, 초기 대기상태에서 임의의 컨테이너에 대한 반입작업을 시작하는 것을 나타내며 식 (3)은 야드 크레인이 요청된 모든 반입작업을 수행하고 가상의 최종작업, 즉 작업종료 후 대기상태가 됨을 표현한다. 식 (4)는 모든 컨테이너는 반드시 한번 장치작업이 이루어져야 함을 의미하고 식 (5)는 작업의 흐름균형을 나타내는 제약이다. 식 (6)은 컨테이너 작업순서 및 작업위치에 따른 작업시작시간과 이동시간 및 장치시간의 관계를 표현하며 식 (7)은 수출컨테이너의 작업시작시간과 가상의 첫 작업간의 관계를 의미한다. 식 (8)은 i 컨테이너의 작업이 주어진 작업가능시간과 허용완료시점 사이에 시작되어야 함을 나타낸다. 끝으로 식 (9)에서 식 (11)은 각 변수들이 값을 가질 수 있는 범위를 의미한다.

3.2 통합 의사결정의 적용 예

제시한 혼합정수계획모형을 이용하여 통합 의사결정을 보여주는 간단한 적용 예를 제시한다.

20개의 베어로 구성된 한 블록에 Table 1과 같이 6개의 반입작업이 주어졌다고 가정하자. T_b 는 0.5(왕복1) 단위시간, T_{pd} 는 1 단위시간 그리고 WT_i 는 모두 0.01로 적용하였다. 야드 크레인의 초기 위치는 블록의 육측 TP이다.

Table 1 Export container data for example

Job No	WL_i	A_i	D_i
1	2	10	20
2	1	15	40
3	2	20	60
4	3	25	45
5	1	30	65
6	1	30	65

주어진 값을 혼합정수모형에 대입했을 때 목적함수값은 76.99이며 컨테이너별 장치위치와 작업순서는 Table 2와 같다. 표에서 장치위치 번호 1은 육측 TP에 가장 가까운 베이,

반대로 장치위치 번호 20은 육측 TP에 가장 가까운 베이를 의미한다. 최적해로 야드 크레인의 동선을 시간축에 따라 도식화하면 Fig. 2와 같다. 야드 크레인은 육측 TP에서 1번 컨테이너를 실은 외부 트럭이 단위시간 10에 도착하면 즉시 컨테이너를 넘겨받아 단위시간 11에 할당된 장치위치 베이 5로 출발한다. 단위시간 19에 장치위치에 도착한 크레인은 수출 컨테이너를 장치한 후 단위시간 20에 육측 TP로 이동하여 2 번째 수출 컨테이너의 반입작업을 수행하게 된다.

Table 2 Optimal job sequence and storage location

작업순서	작업번호	시작시점	완료시점	장치위치
1	1	10	28	5
2	2	28	31	20
3	6	31	34	20
4	5	34	37	20
5	4	37	59	1
6	3	59	81	1

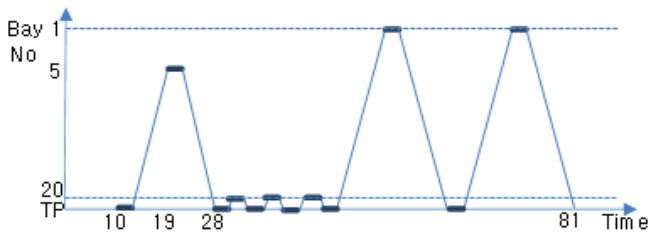


Fig. 2 Movement of a yard crane

4. 휴리스틱 알고리즘

4.1 SA 기반 휴리스틱 알고리즘

시간제약을 가지는 다수의 반출입 컨테이너 트럭에 대한 야드 크레인의 일정계획은 NP-hard 문제로 알려져 있다(Kim, Lee, and Hwang, 2003). 본 연구는 야드 크레인의 작업순서에 장치위치 결정이 추가된 문제를 다루고 있다. 따라서 본 연구의 모형은 변수가 증가하면 최적해 도출에 많은 시간이 소요되어 현실 문제에 적용이 어려운 NP-hard 문제이다. 이 절에서는 통합 문제의 실제 적용을 위해 휴리스틱 알고리즘을 제시하고자 한다.

통합 의사결정문제는 반입 트럭의 작업순서가 주어졌다고 가정하면 반입 컨테이너의 장치위치를 결정하는 문제가 된다. 따라서 작업순서가 주어진 경우에 최적 장치위치를 구할 수 있다면 작업순서를 찾는 문제로 변형가능하다. 휴리스틱 알고리즘은 일정계획문제에 좋은 효과를 보이고 있는 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing; SA)을 응용하여 작업순서를 결정한다. Kirkpatrick et al.(1983)이 제안한 SA 알고리즘은 조합 최적화문제의 한 해법으로 이웃해를 랜덤하게 선택하고 비용 함수를 이용하여 해의 채택여부를 결정한다. 이는 해의 다양성과 최적화를 수행하는 기법으로 일반적인 절차는 아래와 같다.

1. Get an initial solution S.
2. Set an Initial temperature $T > 0$.
3. Repeat
 - 3.1. Perform the following loop R times.
 - 3.1.1. Pick a random neighbor S' of S.
 - 3.1.2. Let $d = \text{cost}(S') - \text{cost}(S)$.
 - 3.1.3. if $d < 0$, set $S = S'$.
 - 3.1.4. If $d \geq 0$, generate random number, x , from the interval, (0,1).
If $x < \exp(-d/T)$, set $S = S'$.
 - 3.2 Set $T = rT$.
4. Until stopping condition becomes true.

본 연구는 SA 알고리즘을 이용하여 반입 트럭의 최적 작업순서를 탐색하면서 수출 컨테이너의 장치위치를 할당하는 휴리스틱 알고리즘을 개발하였다. 개발한 휴리스틱 알고리즘의 단계별 세부 내용은 다음과 같다.

단계 1. 주어진 작업 순서대로 육측에 가장 가까운 베이(B)에 장치작업 할 경우를 가정하여 가장 빠른 작업시작 시간을 S_i 로 두고, 작업완료시간은 육측에서 가장 가까운 베이 B에 장치할 경우 필요한 최소한의 작업시간을 더한 $S_i + \text{최소작업시간}$ 으로 둔다.

단계 2. 장치 베이위치를 결정해야 할 작업 중에서 WL_i 가 가장 큰 작업을 선택한다. 모든 작업의 장치위치가 결정되어 더 이상 작업할 작업이 없으면 종료한다. 선택된 작업의 바로 직후 작업의 작업시작시간과 최대허용시간(D_i)을 이용하여 여유시간을 구한다. 초기값으로 최대 작업시간은 추가로 해측으로 $B-1$ 베이를 이동할 수 있는 시간이므로 $(B-1)T_b \times 2$, 확정여유시간은 "0", 가능여유시간은 " ∞ "으로 설정한다.

단계 3. 선택된 작업보다 이후에 이루어져야 하는 작업들만 고려하여 추가 작업시간을 구한다(작업 가능한 빠른 시간에 작업을 시작하는 것으로 계획하기 때문에 선택된 작업의 작업시작시간을 더 앞당길 수는 없다). 선택된 작업에 대한 추가 작업시간은 해측 1번 베이에 장치할 경우 추가적으로 필요한 최대작업시간과 선택된 작업의 이후 작업들이 작업가능한 상태를 유지하면서 추가 작업할 수 있는 여유시간 중에서 작은 값을 말한다. 선택된 작업의 이후 작업들에 대한 새로운 여유시간은 다음과 같은 방법으로 구한다.

단계 3.1 가능여유시간은 선택된 작업과 직후 작업에 대하여 다음과 같이 구한다.

$$\text{가능여유시간} = \min \{ (\text{직후의 작업의 최대허용대기시간} (D_i) - \text{직후작업의 시작시간} - 1), \text{가능여유시간} \}$$

단계 3.2 선택된 작업의 종료시간과 직후작업의 시작시간이

이어지지 않으면(동일 클러스터가 아닌 경우) 다음과 같이 확정여유시간을 구한다.

확정여유시간 = 확정여유시간 + (선택된 작업의 종료시간과 직후 작업의 시작시간의 차이).

단계 3.3 다음 작업에 대하여 단계 3 과정을 반복하여 구한다. 마지막 작업순서이면 여유시간은 무한대이므로 다음과 같이 최종적으로 여유시간을 구하고 단계4로 간다.

$$\text{여유시간} = \min\{\infty, \text{가능여유시간}\} + \text{확정여유시간}.$$

단계 4. 더 이상 작업이 없으면 추가작업시간을 다음과 같이 구한다.

$$\text{추가작업시간} = \min\{\text{최대작업시간}, \text{여유시간}\}.$$

단계 5. 추가작업시간을 고려하여 선택된 작업의 장치위치 배이를 결정한다.

단계 6. 선택된 작업의 최종장치위치를 고려하여 이후의 작업들에 대해서 작업시작시간과 작업종료시간을 수정한다. 단계 2로 간다.

4.2 휴리스틱 알고리즘 계산과정

앞 절에서 다룬 예제의 최적작업순서(1-2-6-5-4-3)에 대하여 제시한 휴리스틱 알고리즘의 단계별 해법 과정을 살펴보면 다음과 같다.

단계 1. 각 작업에 대한 S_i 와 육측에서 가장 가까운 베이인 20 베이에 할당된 경우(작업소요시간= 3)의 각 작업의 시작시간 및 작업종료시간이다.

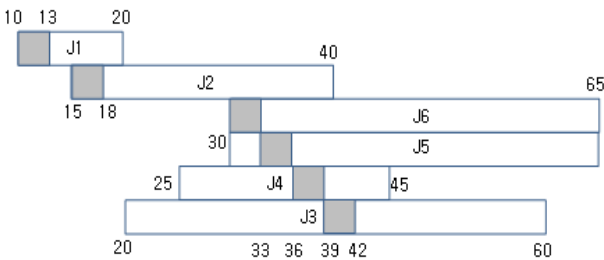


Fig. 3 Time window at step 1 of the 1st iteration for instance

단계 2. WZ_i 가 가장 큰 Job 4를 선택한다. 최대작업시간 = 19, 확정여유시간 = 0, 가능여유시간 = ∞ 로 둔다.

단계 3.1 Job 4는 Job 3과 동일 클러스터이므로 새로운 가능여유시간 = $\min\{(60-39-1), \infty\} = 20$.

단계 3.3 Job 3은 마지막 작업이므로 최종 여유시간 = $\min\{\infty, 20\} + 0 = 20$.

단계 4. 추가 작업시간 = $\min\{19, 20\} = 19$.

단계 5. Job 4의 최종 장치위치는 베이 1번.

단계 6. 각 작업의 시작시간과 종료시간을 아래와 같이 변경.

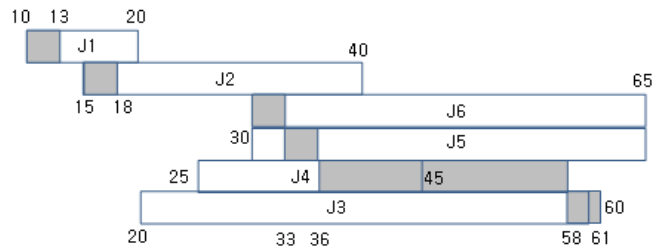


Fig. 4 Time window at step 6 of the 1st iteration for instance

단계 2. 남은 작업 중에서 WZ_i 가 큰 Job 1을 선택한다. 최대작업시간 = 19, 확정여유시간 = 0, 가능여유시간 = ∞ 로 둔다.

단계 3.1 Job 1의 가능여유시간 = $\min\{(40-15-1), \infty\} = 24$.

단계 3.2 Job 1과 Job 2는 동일 클러스터가 아니므로 확정여유시간 = $0 + (15-13) = 2$.

단계 3.1 Job 2의 가능여유시간 = $\min\{(65-30-1), 24\} = 24$.

단계 3.2 Job 2와 Job 6는 동일 클러스터가 아니므로 확정여유시간 = $2 + (30-18) = 14$.

단계 3.1 Job 6의 가능여유시간 = $\min\{(65-33-1), 24\} = 24$.

단계 3.1 Job 5의 가능여유시간 = $\min\{(45-36-1), 24\} = 8$.

단계 3.1 Job 4의 가능여유시간 = $\min\{(60-58-1), 8\} = 1$.

단계 3.3 Job 3이 마지막 작업이므로 최종 여유시간 = $\min\{\infty, 1\} + 14 = 15$.

단계 4. 추가작업시간 = $\min\{19, 15\} = 15$.

단계 5. Job 1의 최종 장치위치는 베이 5번.

단계 6. 각 작업의 시작시간과 종료시간을 아래와 같이 변경.

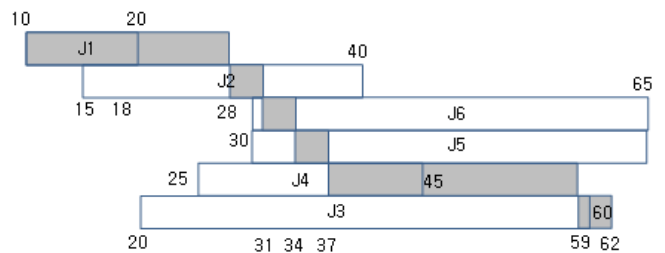


Fig. 5 Time window at step 6 of the 2nd iteration for instance

단계 2. 남은 작업 중에서 WLi 가 큰 Job 3을 선택한다. 최대작업여유시간 = 19, 확정여유시간 = 0, 가능여유시간 = ∞ 로 둔다.

단계 3.3 Job 3은 마지막 작업이므로 최종 여유시간 = $\min\{\infty, \infty\} + 0 = \infty$.

단계 4. 추가작업시간 = $\min\{19, \infty\} = 19$.

단계 5. Job 3의 최종 장치위치는 베이 1번.

단계 6. 각 작업의 시작시간과 종료시간을 아래와 같이 변경.

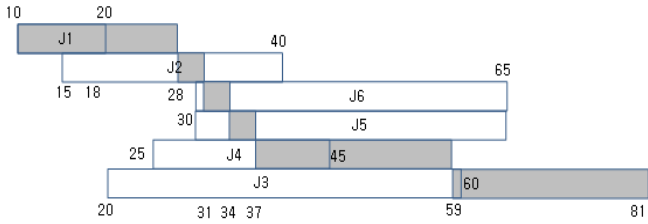


Fig. 6 Time window at step 6 of the 3rd iteration for instance

단계 2. 남은 작업중 WLi가 큰 Job 2를 선택한다. 최대작업 여유시간 = 19, 확정여유시간 = 0, 가능여유시간 = ∞로 둔다.
단계 3.1 Job 2의 가능여유시간 = $\min \{(65-31-1), \infty\} = 33$.
단계 3.1 Job 6의 가능여유시간 = $\min \{(65-34-1), 33\} = 30$.
단계 3.1 Job 5의 가능여유시간 = $\min \{(45-37-1), 30\} = 7$.
단계 3.1 Job 4의 가능여유시간 = $\min \{(60-59-1), 7\} = 0$.
단계 3.3 Job 3이 마지막 작업이므로 최종 여유시간 = $\min \{\infty, 0\} + 0 = 0$.
단계 4. 추가작업시간 = $\min \{19, 0\} = 0$.
단계 5. Job 2의 최종 장치위치는 베이 20번 현재 위치 그대로 장치.

단계 2. 남은 작업중 WLi가 큰 Job 5를 선택한다. 최대작업 여유시간 = 19, 확정여유시간 = 0, 가능여유시간 = ∞로 둔다.
단계 3.1 Job 5의 가능여유시간 = $\min \{(45-37-1), \infty\} = 7$.
단계 3.1 Job 4의 가능여유시간 = $\min \{(60-59-1), 7\} = 0$.
단계 3.3 Job 3이 마지막 작업이므로 최종 여유시간 = $\min \{\infty, 0\} + 0 = 0$.
단계 4. 추가작업시간 = $\min \{19, 0\} = 0$.

단계 5. Job 5의 최종 장치위치는 베이 20번 현재 위치 그대로 장치.

단계 2. 남은 작업 중 WLi가 큰 Job 6을 선택한다. 최대작업 여유시간 = 19, 확정여유시간 = 0, 가능여유시간 = ∞로 둔다.

단계 3.1 Job 6의 가능여유시간 = $\min \{(65-34-1), \infty\} = 30$.

단계 3.1 Job 5의 가능여유시간 = $\min \{(45-37-1), 30\} = 7$.

단계 3.1 Job 4의 가능여유시간 = $\min \{(60-59-1), 7\} = 0$.

단계 3.3 Job 3이 마지막 작업이므로 최종 여유시간 = $\min \{\infty, 0\} + 0 = 0$.

단계 4. 추가작업시간 = $\min \{19, 0\} = 0$.

단계 5. Job 6의 최종 장치위치는 베이 20번 현재 위치 그대로 장치.

단계 2. 모든 작업의 장치위치가 결정되었으므로 종료.

따라서 최종적인 반입 트럭의 장치작업에 관한 시간차은 Fig 6과 같으며 이 경우 앞에서 제시된 최적해의 최적 장치위치와 동일하게 나타남을 알 수 있었다.

4.3 수치실험

제안한 휴리스틱 알고리즘의 성능을 평가하기 위한 수치실험을 실시하였다. 실험에 사용되는 입력자료 중에서 컨테이너 정보는 박(2010)의 연구를 참조하였다. 일별도착분포 비율이 최대가 되는 선박도착 2일전인 35%대와 하루 중 도착하는 컨테이너의 2시간대별 분포 중에서 대표적인 3개구간의 분포 (12.2%)를 이용하여 수출컨테이너의 도착수를 구하였다. 따라

Table 3 Comparison of objective values and computational times

작업수		실험번호										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
5	수리모형	목적함수값	22.76	16.18	26.97	18.7	14.3	22.96	21.17	59.84	12.43	23.12
		계산 시간	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
	휴리스틱 알고리즘	목적함수값	22.76	48.04	26.97	18.7	14.3	22.99	21.17	59.98	12.43	23.12
		계산 시간	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	수리모형	목적함수값	156.82	217.55*	194.19	182.56	117.48	103.26	86.79	275.27*	180	77.25
		계산 시간	855	1500	1345	445	547	42	61	1500	501	174
	휴리스틱 알고리즘	목적함수값	186.36	217.65	202.87	242.35	144.6	219.44	132.03	189.8	277.38	77.3
		계산 시간	1	3	0	1	0	1	0	0	1	0
15	수리모형	목적함수값	494.64*	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		계산 시간	1500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	휴리스틱 알고리즘	목적함수값	363.96	500.14	510.08	492.21	380.34	599.46	383.07	384.49	460.85	489.59
		계산 시간	6	3	2	2	3	2	5	2	3	2
20	수리모형	목적함수값	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		계산 시간	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	휴리스틱 알고리즘	목적함수값	715.82	876.19	771.84	795.01	765.44	613.74	724.3	934.16	666.9	715.97
		계산 시간	5	13	5	5	4	10	7	7	32	31

*는 제한 시간(1,500초) 내에 구해진 가능해

서 본 연구에서는 2시간 동안 도착하는 수출컨테이너 수를 최대 시간대를 고려하여 최소 5개에서 최대 35개의 작업에 대하여 5개씩 구간을 나누어 총 7개 그룹에 대하여 실험을 수행하였다. 도착 트럭간격은 지수분포를 이용하여 생성하였다. 즉 트럭의 도착시간은 이전작업의 도착시간과 트럭도착간격의 합으로 생성하였다. 트럭의 대기시간은 최소 10분이상이며 추가적인 대기시간은 평균 20분 지수분포로 가정하여 생성하였다. 도착하는 트럭들에 대한 WLi는 보통부터 가장 긴급한 경우까지 총 5가지 등급을 랜덤 생성하여 사용하였으며, WTi는 모두 동일한 것으로 가정하여 실험하였다. 실험의 정확도를 높이기 위하여 각 실험 조건당 10문제를 생성하여 발견적 기법을 적용하였다. 기타 필요한 시간 데이터는 앞 절의 적용에 사용할 수치를 가정하였다. 실험에 사용된 SA 파라미터는 초기 온도는 40도, 마지막 온도를 1.0도, 쿨링 비율을 0.65, 연속해서 20회 최소 비용에 변화가 없는 경우 온도를 조정하는 것으로 설정하였다. 수치실험은 Intel 2.4GHz PC에서 LINDO 6.1과 C++로 개발한 휴리스틱 알고리즘 프로그램으로 수행되었다.

반입작업 트럭수가 5, 10, 15, 20개인 경우에 대해 각각 수리 모형과 휴리스틱 알고리즘을 통해 구한 문제별 목적함수 값과 계산시간을 Table 3에 정리하였다. 수치실험에 따르면 작업수가 5인 경우에 휴리스틱 알고리즘이 총 10개의 문제 중에서 9개가 동일한 해를 구하였다. 작업수가 10인 경우는 제한 시간 내에 최적해가 구해진 8문제에 대해 목적값을 비교하면 휴리스틱 알고리즘이 최적해에 비해 36.7% 높았지만 계산시간은 절대적으로 적음을 알 수 있다. 작업수가 15 이상인 문제부터는 많은 계산시간으로 최적해를 구할 수 없었지만 휴리스틱 알고리즘은 유용한 시간 내에 결과를 제시하였다. 비록 작업수가 많은 문제에 대해 두 방법의 해를 비교할 수는 없지만 제한된 작업수의 문제를 통해 휴리스틱 알고리즘이 비교적 만족할 해를 구할 수 있음을 알 수 있었다.

휴리스틱 알고리즘을 이용하여 도착하는 반입작업의 수를 증가시키면서 구한 목적함수의 변화를 살펴보았다. 휴리스틱 알고리즘을 적용할 경우에 Fig 7과 같이 작업수가 증가할수록 목적함수의 값이 선형으로 증가하였다. Fig 8은 작업수가 증가함에 따라 휴리스틱 알고리즘의 계산시간도 선형의 형태로 증가함을 보여주고 있다.

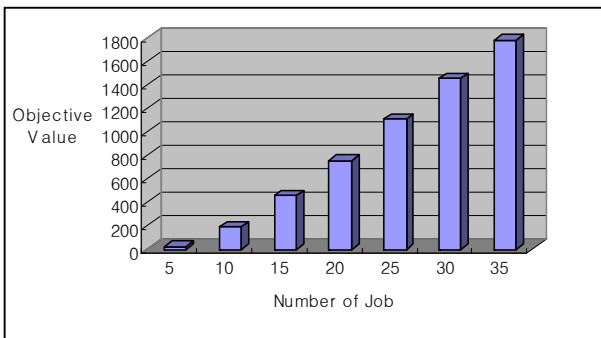


Fig. 7 Objective values of experiments by heuristic algorithm

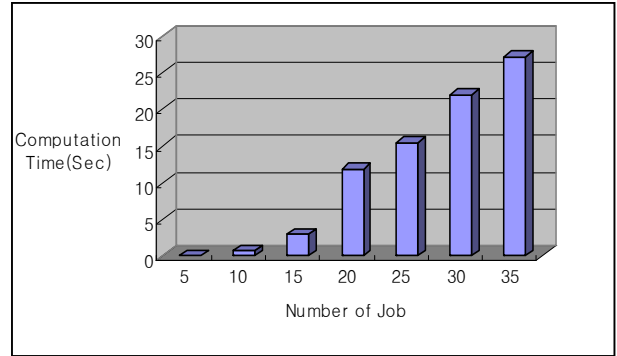


Fig. 8 Computational times of experiments by heuristic algorithm

5. 결론

수직형 배치형 컨테이너 터미널에서 적하작업과 반입작업에서 선호되는 수출 컨테이너의 장치위치는 야드 크레인의 운반거리 측면에서 상반된다. 기존 연구들은 야드 크레인의 작업순서와 컨테이너 장치위치 문제를 분리하여 다루었다. 그러나 본 연구는 컨테이너 터미널이 관리하는 주요 고객인 선사와 외부 운송업자에 대한 서비스 지표가 상호 트레이드오프 관계인 점을 고려하여 두 문제를 통합하였다. 즉 반입작업의 수출 컨테이너 장치위치와 이를 적재한 외부 트럭의 작업순서를 동시에 결정하는 의사결정문제를 제시하였다.

본 연구는 가용 장치공간은 충분하고 베이 내 작업시간은 동일하다는 가정 하에 문제를 정의하고 최적해를 도출하기 위한 혼합정수계획모형을 수립하였다. 비록 이 모형은 현실의 다양한 제약과 특성을 단순화했지만 반입 외부 트럭의 시간 제약을 만족시키면서 장치위치와 작업시작시간의 가치를 고려한 총 비용을 최소화하였다.

본 연구는 계산 소요시간이 짧으면서도 우수한 해를 구하는 해결 방법으로 SA 알고리즘에 기반한 휴리스틱 알고리즘을 제시하였다. 수치실험을 통해 최적모형과 비교할 때 휴리스틱 알고리즘의 성능은 우수한 것으로 나타났다. 이는 주어진 문제크기에 비례하여 계산시간이 소요되는 특성을 지녀 현실 문제를 다루는 운영시스템에서 활용하기에는 적절한 것으로 판단된다.

그러나 추후 연구를 통해 보다 현실적인 요소들이 고려되어야 할 것이다. 장치위치 결정 문제에서 가용 장치공간은 매우 중요한 고려 요소이며 야드 크레인의 작업시간은 베이 내 적재형태에 의존적이며 적재형태는 반입작업이 진행되면서 계속적으로 변화된다. 따라서 이러한 특성을 반영한 보다 현실적인 문제 정의와 해결 방법에 대한 실용적 연구가 필요하다.

후 기

이 논문은 2010년도 전남대학교 학술연구비의 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] 김동조, 박영택(1996), "Planning 기반 컨테이너 장치 계획 시스템", 한국지능정보시스템 5권 1호, pp. 145-166.
- [2] 김우선, 남기찬(2006), "자동화터미널의 ATC 운영전략 개발", 한국항해항만학회지, 30권, 3호, 235-240.
- [3] 박기역, 박태진, 류광렬(2010), "컨테이너 터미널의 재정 돈 대상 컨테이너 주기적 재선택 방안", 한국항해항만학회지, 34권 6호, pp 503-509.
- [4] 박현배(2010), 컨테이너 터미널 시뮬레이션을 위한 외부 차량 도착사건 생성방법, 부산대학교 석사학위논문
- [5] Castilho, B. D. and Daganzo, C. F.(1993) "Handling Strategies for Import Containers at Marine Terminals", Transportation Research-A, Vol. 27B No. 2, pp. 151-166
- [6] Kim, K.H. and Kim, H.B.(1999), "Segregating space allocation models for container inventories in port container terminals", International Journal of Production Economics Vol. 59, pp. 415-423
- [7] Kim, K.H. and Kim, H.B.(2002), "The optimal sizing of the storage space and handling facilities for import containers", Transportation Research 36B, pp. 821-835
- [8] Kim, K. H., Lee, K. M. and Hwang H.(2003), "Sequencing Delivery and Receiving Operations for Yard Cranes in Port Container Terminals", International Journal of Production Economics, Vol. 84, pp. 283-292
- [9] Kim, K.H., Park, Y.M., and Ryu, K.R.(2000), "Deriving decision rules to location export container in container yards", European Journal of Operational Research Vol. 124, pp. 89-101
- [10] Kirkpatrick S., Gelatt, C.D.Jr., and Vecchi, M.P.(1983), "'Optimization by Simulated Annealing," Science, Vol. 220, pp. 671-680
- [11] Ng, W.C. and Mak, K.L.(2005) "Yard crane scheduling in port container terminals", Applied Mathematical Modelling, Vol. 29, pp. 263-276
- [12] Stahlbock, R. and Voß, S.(2008), "Operations research at container terminals: a literature update", OR Spectrum, Vol. 30, pp. 1-52
- [13] Zhang, C. et al.(2003), "Storage space allocation in container terminals", Transportation Research Part B, Vol. 37, pp. 883-903

원고접수일 : 2011년 8월 3일

심사완료일 : 2011년 9월 16일

원고채택일 : 2011년 9월 19일