

철송 크레인 일정계획 문제에 대한 메타 휴리스틱

김광태 · 김경민[†]

한국철도기술연구원 녹색교통물류연구본부 교통시스템효율화연구단

Metaheuristics of the Rail Crane Scheduling Problem

Kwang-Tae Kim · Kyung-Min Kim

Green Transport & Logistics Systems Research Center Transport Systems Efficiency Research Team

Korea Railroad Research Institute

This paper considers the rail crane scheduling problem which is defined as determining the sequence of loading/unloading container on/from a freight train. The objective is to minimize the weighted sum of the range of order completion time and makespan. The range of order completion time implies the difference between the maximum of completion time and minimum of start time of each customer order consisting of jobs. Makespan refers to the time when all the jobs are completed. In a rail freight terminal, logistics firms as a customer wish to reduce the range of their order completion time. To develop a methodology for the crane scheduling, we formulate the problem as a mixed integer program and develop three metaheuristics, namely, genetic algorithm, simulated annealing, and tabu search. To validate the effectiveness of heuristic algorithms, computational experiments are done based on a set of real life data. Results of the experiments show that heuristic algorithms give good solutions for small-size and large-size problems in terms of solution quality and computation time.

Keyword: rail crane scheduling, rail freight terminal, order completion time, metaheuristics

1. 서론 및 기존연구

본 논문은 철도화물터미널에서 작업소요시간과 작업완료시간 범위의 가중합을 최소화하는 철송 크레인 일정계획 문제를 다룬다. 작업소요시간(makespan)이란 크레인의 작업시작시점부터 완료시점까지 시간을 의미하고 작업완료시간범위(the range of order completion time)란 개별 입주사의 작업시작시점부터 완료시점까지 시간을 의미한다.

국내 철도화물운송은 철송 크레인의 수용능력에 비해 상대적으로 처리물량이 적어 개별 입주사의 작업완료시간범위를 줄여주는 작업 방식이 가능하다. 실제 현장에서는 작업완료시간범위를 줄이는 작업 방식과 작업소요시간을 줄이는 작업 방식을 혼용하고 있으며 크레인 일정계획 수립은 작업기사의 경험에 의존하고 있다. 따라서 작업소요시간 범위와 작업소요시

간을 동시에 고려할 수 있는 크레인 일정계획 수립에 대한 방법론 개발이 필요하다.

크레인 일정계획에 관한 연구는 철도화물터미널(복합화물 운송터미널 포함)과 항만터미널에 진행된 연구로 구분될 수 있다. 철도화물터미널에서 수행된 연구로 Bostel and Dejax(1998)는 철도화물터미널에서 적재와 환적 예정인 컨테이너를 화물 열차로 할당하는 비용을 최소화하는 연구를 수행하였다. 문제 해결을 위해 수리모형과 휴리스틱을 제안하였다. Kozan(2000)은 복합운송터미널에서 환적시간과 이동시간을 최소화하기 위한 수리모형을 제안하였다. Jeong and Kim(2011)은 철도화물터미널과 항만터미널의 접점에서 철송 크레인 운영과 컨테이너 운반을 통합적으로 고려한 연구를 수행하였다. 문제 해결을 위해 수리모형을 제안하고 해법으로는 유전 알고리즘과 휴리스틱을 제안하였다.

[†]연락처 : 김경민 주임연구원, 437-757 경기도 의왕시 월암동 360-1 한국철도기술연구원 녹색교통물류연구본부 교통시스템효율화연구단, Fax : 031-460-5021, E-mail : kmkim@krii.re.kr

투고일(2011년 06월 13일), 심사일(1차 : 2011년 08월 09일, 2차 : 2011년 08월 30일), 게재확정일(2011년 09월 22일).

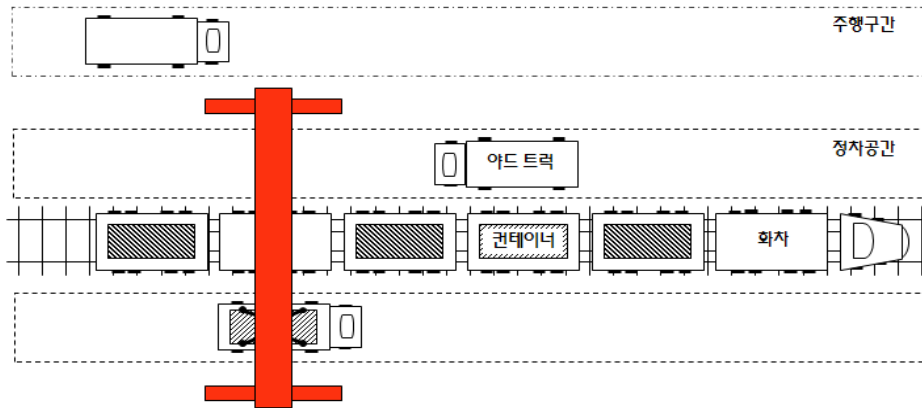


그림 1. 철도화물터미널에서 하역 작업

항만터미널에서 크레인 일정계획 관련 연구로 Kim and Park (2004)은 크레인의 작업 순서를 결정하기 위한 수리모형을 제안하였다. 목적함수는 작업소요시간과 개별 크레인 작업소요시간의 가중합으로 표현하였다. 해법으로 분지한계법과 휴리스틱을 제안하였다. NG and Mak(2005a, 2005b)은 서로 다른 준비시간을 갖는 작업에 대해 대기시간의 합을 최소화하는 트랜스퍼 크레인 일정계획 문제를 다루었다. 문제 해결을 위해 수리모형과 휴리스틱을 제안하였다. 그 이후 확장된 연구로써 분지한계법을 제안하였다. Jung and Kim(2006)은 작업소요시간을 최소화하는 복수 크레인 일정계획 문제를 다루었다. 수리모형을 제안하고 해법으로는 시물레이티드 어닐링과 유전 알고리즘을 제안하였다. Moccia(2006)은 작업소요시간과 크레인의 유희시간을 줄이기 위해 수리모형과 분지절단법을 제안하였다. Zhu and Lim(2006)은 작업소요시간을 줄이기 위한 복수 크레인 일정계획 문제를 다루었다. 이 문제가 NP-complete 범주에 속하는 것을 증명하고 해법으로 분지한계법과 시물레이티드 어닐링을 제안하였다. Cao *et al.*(2008)은 적재 시간의 최소화를 위한 복수 크레인 일정계획 문제를 다루었다. 이 문제가 NP-complete 범주에 속하는 것을 증명하고 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다. Lee *et al.*(2008)은 컨테이너선에서 구역별로 작업소요시간을 최소화하는 크레인 일정계획 문제를 다루었다. 이 문제가 NP-complete 범주에 속하는 것을 증명하고 유전 알고리즘을 제안하였다. Lee and Wang(2010)은 선박 베이(ship bay)의 우선순위를 고려한 안벽 크레인 일정계획 문제에 대해 다 루고 근사 알고리즘(approximation algorithm)을 제안하였다.

컨테이너 터미널(철도화물터미널과 항만터미널)을 대상으로 수행된 기존 연구들은 장비의 효율성을 높이기 위해 크레인의 작업소요시간을 줄이는 것에 초점을 두고 있다. 크레인 일정계획에 대한 기존 연구들에서 사용된 목적함수는 Bierwirth and Meisel(2010)에 정리되어 있다.

본 논문은 철송 크레인의 작업소요시간과 개별 입주사의 작업완료시간 범위를 동시에 고려하는 일정계획 수립을 위한 최적화모형과 휴리스틱 알고리즘을 제안한다. 따라서, 개별 입주사의 작업완료시간 범위를 추가적으로 고려한다는 점에서

기존 연구와 차별된다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제 2장에서는 철송 크레인 일정계획 문제를 정의하고 혼합정수계획모형을 제안한다. 제 3장, 제 4장 및 제 5장에서는 크레인 일정계획 문제에 대한 해법으로 시물레이티드 어닐링, 타부 탐색과 유전 알고리즘을 제안한다. 제 6장에서는 각 알고리즘에 대한 실험결과를 제시하고 수행도를 분석한다. 제 7장에서는 결론과 추후 연구 내용을 제시한다.

2. 문제정의 및 수리모형

본 장에서는 철송 크레인 일정계획 문제를 정의하고 혼합정수 계획모형을 제안한다. <그림 1>은 철도화물터미널에서 하역(반입)작업을 묘사하고 있다. 컨테이너의 작업 순서가 결정되면 야드 트럭은 정차공간에 대기하게 된다. 크레인이 컨테이너를 야드 트럭에 실어주면 하나의 하역 작업이 완료된다. 일반적으로 철도화물터미널에서 적재와 하역 작업이 동시에 진행되는 경우와 서로 독립적으로 진행되는 경우로 나누어 볼 수 있다. 적재 작업의 경우 컨테이너 위치가 미리 결정되어 있어 적재 작업도 하역 작업과 마찬가지로 작업순서를 결정하는 문제로 간주할 수 있다. 따라서, 본 논문은 두 작업이 독립적으로 진행되는 상황과 하역 작업만을 대상으로 연구 범위를 한정한다.

<그림 2>는 하역 작업에서 순차처리방식과 일괄처리방식에 따른 작업소요시간과 작업완료시간 범위의 변화를 보여준다. 화물 열차에 하역 예정인 컨테이너 5개(입주사 A: 3개, 입주사 B: 2개)가 배치된 경우 <경우 1>은 입주사 A와 B의 작업 완료시간범위는 각각 7분과 2분 30초가 되고 <경우 2>는 입주사 A와 B의 작업완료시간 범위는 각각 5분과 2분 30초가 된다. <경우 2>는 <경우 1>에 비해 입주사 A의 작업완료시간 범위는 2분이 줄어들지만 작업소요시간은 1분 증가한다. 이와 같이 작업소요시간과 작업완료시간 범위에는 상충관계가 존재함을 알 수 있다. 또한 작업소요시간은 열차의 출발시간 및

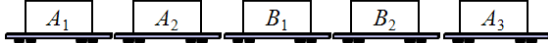
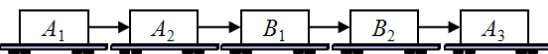
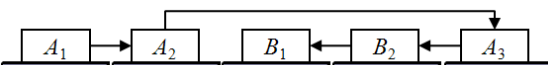
컨테이너 배치		컨테이너 처리시간 : 1분	
		화차간의 이동시간 : 30초	
	작업 순서	작업소요시간	작업완료시간범위
		크레인	입주사 A 입주사 B
경우 1 : 순차처리방식		7분	7분 2분 30초
경우 2 : 일괄처리방식		8분	5분 2분 30초

그림 2. 작업 순서에 따른 작업소요시간과 작업완료시간 범위의 변화 비교

작업선 효율에 영향을 주기 때문에 하역 작업은 열차의 출발 시간 이전 또는 허용된 작업시간 내에 완료되어야 한다.

본 논문에서 다루는 철송 크레인 일정계획 문제는 허용된 작업시간 내에 개별 입주사의 작업완료시간 범위와 작업소요시간을 동시에 최소화하는 크레인의 작업순서를 결정하는 문제로 정의한다.

본 논문에서 제안하는 혼합정수계획 모형에 사용되는 집합, 모수 및 결정변수는 다음과 같다.

• 집합(Set)

- C : 컨테이너의 집합, $i, j \in C$
- K : 입주사의 집합, $k \in K$
- C_k : 입주사 k 의 컨테이너 집합

• 모수(Parameter)

- h_i : 컨테이너 i 의 처리시간
- t_{ij} : 컨테이너 i 에서 j 까지 이동시간
(0 : 크레인의 작업시작위치와 종료위치)
- dt : 허용된 작업시간
- α : 가중치
- M : 양의 큰 수

• 결정변수(Decision variable)

- X_i : 컨테이너 i 의 작업시작시간
- Y_{ij} = 1 만약 컨테이너 i 가 처리된 이후 j 가 처리되면, 0 그렇지 않으면
- Z : 작업소요시간
- ST_k : 입주사 k 의 작업시작시간
- CT_k : 입주사 k 의 작업완료시간

개별 입주사의 작업완료시간 범위와 크레인의 작업소요시간은 식 (1)과 식 (2)로 표현된다.

• 입주사 k 의 작업완료시간 범위

$$= \max(X_i + h_i \ \forall i \in C_k) - \min(X_i \ \forall i \in C_k) \quad (1)$$

$$= CT_k - ST_k$$

• 작업소요시간

$$= \max(CT_k \ \forall k \in K) \quad (2)$$

$$= Z$$

본 논문에서 사용되는 가정 사항은 다음과 같다. 첫째, 단일 규격 컨테이너만을 고려한다. 둘째, 크레인의 작업시작위치와 종료위치는 고려하지 않는다. 셋째, 적재된 개별 컨테이너의 처리시간은 모두 같다. 마지막으로 크레인의 고장으로 인한 작업 중단은 발생하지 않는다.

크레인의 작업소요시간과 개별 입주사의 작업완료시간 범위의 가중합을 최소화하는 철송 크레인 일정계획 문제에 대한 혼합정수계획 모형은 다음과 같다.

• 혼합정수계획 모형(Mixed integer programming model)

$$\text{Minimize } \alpha \sum_{k \in K} (CT_k - ST_k) + (1 - \alpha)Z \quad (3)$$

subject to

$$X_i \geq ST_k \quad \forall k \in K, i \in C_k \quad (4)$$

$$X_i + h_i \leq CT_k \quad \forall k \in K, i \in C_k \quad (5)$$

$$CT_k \leq Z \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$Z \leq dt \quad (7)$$

$$X_i + h_i + t_{ij} \leq X_j + M \cdot (1 - Y_{ij}) \ \forall i, j \in C, i \neq j \quad (8)$$

$$Y_{ij} + Y_{ji} = 1 \quad \forall i, j \in C, i \neq j \quad (9)$$

$$ST_k \geq 0 \quad \forall k \in K \quad (10)$$

$$CT_k \geq 0 \quad \forall k \in K \quad (11)$$

$$X_i \geq 0 \quad \forall i \in C \quad (12)$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in C, i \neq j \quad (13)$$

$$Z \geq 0 \quad (14)$$

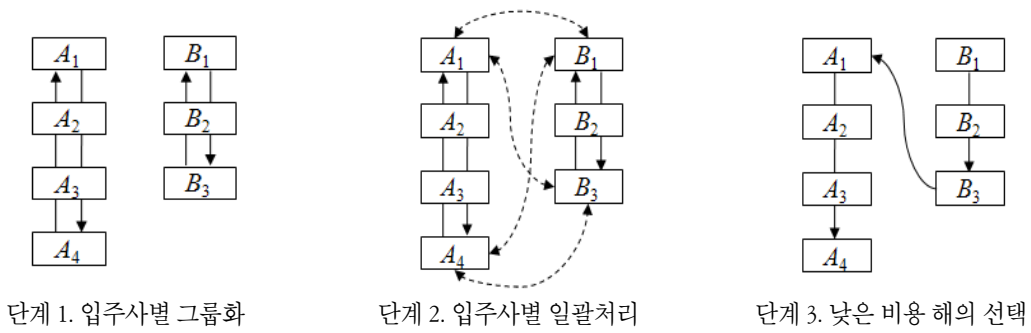


그림 3. 입주사별 일괄처리방식에 의한 초기해 생성 절차

목적함수 (3)은 개별 입주사의 작업완료시간범위와 작업소요시간의 가중합을 최소화하는 것을 의미한다. 제약식 (4)와 제약식 (5)는 개별 입주사의 작업시작시점과 완료시점을 결정한다. 제약식 (6)은 모든 컨테이너의 하역 작업이 끝나는 시점인 작업소요시간을 결정한다. 제약식 (7)은 모든 컨테이너의 작업은 허용된 작업시간 내에 완료되어야 함을 의미한다. 제약식 (8)과 제약식 (9)는 컨테이너 처리순서의 선후관계를 결정한다. 제약식 (10)~(14)는 결정변수의 비음조건 및 이진변수 제약을 나타낸다.

현실적으로 크레인의 작업시작위치와 종료위치를 파악하기가 쉽지 않아 제한한 모형은 크레인의 작업시작위치와 종료위치를 고려하지 않는다. 식 (15)을 제한한 모형에 추가하고 제약식 (6)을 식 (16)으로 변환하면 작업시작위치와 종료위치도 고려할 수 있다. 식 (15)는 작업시작위치부터 컨테이너까지 이동 후 작업이 가능하다는 것을 의미한다. 식 (16)은 크레인의 작업소요시간을 결정한다.

$$X_i \geq t_{0i} \quad \forall i \in C \quad (15)$$

$$X_i + h_i + t_{i0} \leq Z \quad \forall i \in C \quad (16)$$

3. 시뮬레이티드 어닐링

시뮬레이티드 어닐링(Simulated annealing)은 금속의 담금질 과정을 응용한 방법으로 Kirkpatrick *et al.*(1983)에 의해 제안된 이후 많은 조합 최적화 문제에서 그 효과가 입증된 메타휴리스틱기법 중 하나이다. 시뮬레이티드 어닐링은 기존의 반복적인 개선에 근거한 발견적 기법과는 달리 언덕 등반(uphill move)의 개념을 도입하였다. 지역해(local optimum)를 탈출하기 위해 확률적으로 열등한 이웃해(inferior neighborhood)를 채택함으로써 지역해의 탈출을 유도하여 전역 최적해 또는 근사해를 탐색해 나가는 기법이다.

3.1 초기해 생성

초기해는 순차처리방식과 입주사별 일괄처리방식에 의해

생성한 해의 집합 중에서 우수한 해를 초기해로 사용하였다. 입주사별 일괄처리방식은 우선 화물 열차에 실려 있는 상대적 순서를 유지하여 개별 입주사를 기준으로 컨테이너를 정렬한다. 그 후 입주사의 양 측면에 위치한 컨테이너를 첫 작업으로 설정한 후 탐욕 알고리즘(Greedy algorithm)을 적용하여 작업 순서를 결정한다. 예를 들어 컨테이너(A사 : 4개, B사 : 3개)가 A1-A2-B1-A3-A4-B2-B3처럼 배치된 경우에 A1, A4, B1, B3을 첫 작업으로 설정하여 동일 입주사의 컨테이너를 일괄처리 하면서 목적함수 값이 작은 해를 찾는 것이다.

<그림 3>은 입주사별 일괄처리방식에 의한 초기해 생성 절차를 보여준다. <단계 1>은 입주사별로 그룹화 과정을 나타내고 <단계 2>는 입주사별 일괄처리 과정을 보여주고 있다. 실선은 입주사별로 반드시 일괄처리가 되어야 한다는 것을 의미하고 점선은 한 입주사의 작업완료 이후 다른 입주사의 작업이 가능하다는 것을 의미한다. 입주사별 일괄처리방식에 의한 모든 후보해를 생성한 후 <단계 3>에서 목적함수 값이 작은 해를 선택한다. 이후에 순차처리방식의 해와 비교하여 목적함수 값이 작은 해를 선택하여 초기해로 사용하였다.

3.2 초기온도

기존 연구에서 물리적인 현상과의 유추를 통해 액화 상태를 유지하기 위해 적합한 초기온도를 구하는 방법들에 대하여 상당히 고심하였다. 초기온도는 이론적으로 모든 이동을 받아들일 수 있도록 높게 설정되어야 한다(Kim *et al.*, 1999).

본 논문에서는 해의 개선이 있는 이동 횟수를 이용하여 초기온도를 구하였다. 컨테이너 n 개가 존재할 경우 반복수 n 번 동안 해의 개선이 이루어진 경우에 대해서 평균적으로 개선된 값 (Δ)을 바탕으로 초기온도(t_0)는 식 (17)을 이용하여 도출하였다. 본 논문에서 모수 F_0 는 예비실험을 통해 0.64로 설정하였다.

$$e^{-\Delta/t_0} = F_0 \quad (17)$$

3.3 이웃해 생성

이웃해 생성은 교환방법, 삽입방법, 혼합방법 등 다양한 방

법이 있다. 본 논문에서는 임의로 서로 다른 두 개의 컨테이너를 선택하여 작업 순서를 교환하는 방법을 사용하였다. 이웃해는 특정 온도에서 내부루프의 반복수만큼 생성된다. 이웃해로 이동이 해를 개선시키면 이웃해를 채택하고 해의 개선이 없어도 확률적으로 열등한 이웃해로 이동을 허락하는데, 온도가 낮아질수록 열등한 이웃해로 이동할 확률은 낮아진다.

3.4 냉각 스케줄

이론적으로 온도를 내리는 함수는 감소함수로 시간이 경과함에 따라 0으로 수렴해야 한다. 현재까지 대표적인 냉각 스케줄은 로그스케줄, 기하스케줄 등이 있다. 로그스케줄은 이론적인 수렴을 보장하지만 수렴속도가 늦어 실제 적용에서는 기하스케줄을 많이 사용한다. 본 논문에서는 식 (18)과 같이 기하스케줄을 사용하였다. 외부루프의 반복수에 따른 k 번째 온도 (T_k)는 $k-1$ 번째 온도(T_{k-1})와 냉각률(r)의 관계식에 의해 결정된다. 냉각률은 대개 0.50~0.99 사이에서 정해지는데, 보통 0.90나 0.95를 사용한다(Kim *et al.*, 1999). 본 논문에서는 기존 연구와 예비실험을 바탕으로 냉각률을 0.99로 설정하였다.

$$T_k = r \cdot T_{k-1} \tag{18}$$

3.5 내부루프의 반복수

내부루프의 반복수(epoch length)는 특정온도에서 이웃해로 이동하는 횟수와 관련이 있다. 반복수를 크게 설정하면 탐색 영역을 다양하게 하여 전역 최적해에 도달할 기회가 증가하지만 계산시간이 증가하는 단점이 있다. 본 논문에서는 컨테이너 n 개가 존재할 경우 식 (19)을 이용하여 내부루프의 반복수를 설정하였으며 모수 β 는 예비실험을 통해 4로 설정하였다.

$$n \cdot (n-1)/2 \cdot \beta \tag{19}$$

3.6 종료조건

알고리즘의 종료조건은 정해진 시간, 정해진 반복횟수, 온도에 수렴한 경우 등이 있다. 본 논문에서는 온도 0.001에 수렴하면 알고리즘이 종료되도록 하였다.

4. 타부 탐색

타부 탐색(Tabu search)은 Glover(1989, 1990)에 의해 소개된 이후 많은 조합최적화 문제에 적용되어 그 효과성이 입증되었다. 타부탐색의 가장 큰 특징은 해와 관련된 속성(attributes)을 기억하는 메모리 기반의 전략을 사용한다는 것이다. 지역해에서 탈출하기 위해 이미 방문한 해로 재방문을 방지함으로써 다양

한 탐색영역을 유도하여 전역 최적해 또는 근사해를 탐색해 나가는 기법이다.

4.1 초기해 생성

초기해는 시뮬레이티드 어닐링과 마찬가지로 순차처리방식과 입주사별 일괄처리방식에 의해 생성된 해 중에서 좋은 적응도를 가진 해를 초기해로 사용하였다.

4.2 이웃해 생성

이웃해 생성은 교환방법, 삽입방법, 혼합방법 등 다양한 방법이 있다. 본 논문은 서로 다른 2개의 컨테이너를 순차적으로 작업 순서를 교환하는 방법을 사용하였다. 교환방법은 컨테이너 두 개를 순차적으로 교환하여 현재해에서 이동 가능한 모든 이웃해를 생성한 후 타부 목록에 존재하지 않고 해의 개선이 가장 큰 이웃해를 채택하였다. 컨테이너 n 개가 존재할 경우 이동 가능한 이웃해의 수는 $n \cdot (n-1)/2$ 이 된다. 그림 4는 이웃해 생성과 이동을 보여주고 있다. 모든 이웃해 중에서 교환 (1, 2)보다 교환(1, n)이 좋은 해를 주지만 후자의 경우 타부 목록에 존재하므로 교환(1, 2)을 통해 생성된 이웃해로 이동하게 된다.

교환(i, j)		목적함수 값	
1	2	1870	*
1	3	2700	
1	⋮	1880	T
1	n	1860	T
2	3	2500	
2	4	1970	
⋮	⋮	⋮	
$n-1$	n	1879	T

현재까지 최선해 : 1850.

그림 4. 이웃해 생성의 예

4.3 장기 메모리 전략

장기 메모리(long-term memory) 전략은 해의 탐색 공간을 넓히기 위해 사용되는 방법이다. 탐색 공간의 다양성을 확보하기 위해 여러 이웃해 중에서 목적함수의 값이 동일한 경우 방문 빈도가 낮은 이웃해에 우선순위를 두어 기존에 방문하지 않았던 탐색영역으로 유도하였다.

<그림 5>는 장기 메모리 전략의 예를 보여주고 있다. 교환 (1, 2)을 통해 생성된 이웃해가 가장 좋은 해를 주지만 현재까지 최선해 1850보다 크고 타부목록에 존재하므로 이동이 불가능하다. 이동이 가능한 이웃해 중에서 교환(1, 3), 교환(1, n), 교환 (2, 3)과 교환(2, 4)을 통해 생성한 이웃해는 동일한 목적함수 값

을 가지게 된다. 이런 경우 방문한 빈도수가 낮은 교환(1, n)을 통해 생성된 이웃해로 이동하여 다양한 탐색 영역을 유도한다.

교환(i, j)		목적함수 값	빈도수	
1	2	1870	1	T
1	3	2000	6	
1	n	2000	3	*
2	3	2000	5	
2	4	2000	4	
⋮	⋮	⋮	⋮	
$n-1$	n	3500	2	

현재까지 최선해 : 1850.

그림 5. 장기 메모리 전략의 예

4.4 타부 목록 및 열망조건

타부 목록(tabu list)은 해의 순환을 방지하는 역할을 한다. 타부 목록은 이웃해의 적응도, 방문 빈도수 등의 정보를 기록한다. 이웃해로 이동이 타부 목록에 존재한다면 해의 순환을 방지하기 위해 일정기간(tenure) 동안 그 이동은 제한된다. 이와 같은 해의 순환 방지는 때로 우수한 이웃해로 이동을 방해하는데, 이런 한계를 극복하기 위해 열망조건(aspiration condition)을 사용한다. 열망조건은 일반적으로 현재까지 최선해를 기준으로 한다. 이웃해로 이동이 최선해를 개선시킬 경우 그 이동이 타부 목록에 있어도 타부 제약에서 해제되어 이동을 허락한다.

타부 목록의 크기는 동적과 정적으로 관리할 수 있다. 본 논문은 타부목록의 크기를 정적으로 관리하였다. 기존 연구들에서 타부 목록의 크기는 대체로 6~10 사이의 정수가 사용되었다. 본 논문에서는 기존 연구와 예비실험을 바탕으로 타부 목록의 크기를 10으로 설정하였다.

4.5 종료조건

알고리즘의 종료조건은 정해진 계산시간, 정해진 반복수, 해의 개선이 이루어지지 않는 반복수 등이 있다. 본 논문에서는 정해진 반복수에 도달하면 알고리즘을 종료하도록 하였다. 반복수는 컨테이너 n 개가 존재할 경우 $n \cdot (n-1) \cdot 2$ 로 설정하였다.

5. 유전 알고리즘

유전 알고리즘(Genetic algorithm)은 생태계의 자연선택과 적자생존 원리를 모방한 확률적 탐색기법으로 Holland(1975)에 의해 소개된 이후 많은 최적화문제에 적용되어 그 효과성이 입증된 잘 알려진 메타 휴리스틱기법 중 하나이다. 유전 알고리즘은 문제의 해를 표현한 개체(individual)들로 이루어진 모집단

(population)을 생성하여 선별(selection), 교차(crossover) 및 돌연변이(mutation)의 세 가지 연산과정을 통하여 여러 세대에 걸쳐 높은 적응도(fitness)를 가진 개체를 반복적으로 재생산함으로써 전역 최적해 또는 근사해를 탐색해 나가는 기법이다.

5.1 해의 표현 및 초기해 생성

해의 표현은 해결하고자 하는 문제에 따라 적절하게 염색체(chromosome)를 생성하는 방법으로 문제에 따라 다르게 표현할 수 있다(Bae *et al.*, 2007). 본 논문에서는 각 유전자(gene)는 정수로 표현하였으며 이 값은 컨테이너 번호를 의미하며 염색체 위치는 작업 순서를 나타낸다. <그림 6>은 염색체의 표현을 보여주고 있으며 작업 순서는 2-4-3-6-5-1-7-8-9가 된다는 것을 의미한다.

2	4	3	6	5	1	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

그림 6. 염색체의 표현

유전 알고리즘에서 모집단의 크기(population size)를 결정하는 엄격한 규칙은 없지만 모집단의 크기가 클수록 더 많은 다양성을 확보할 수 있다(Park and Seo, 2009). 모집단의 크기가 작으면 지역해에 수렴할 확률이 높아지고 모집단의 크기가 크면 해의 다양성을 확보할 수 있지만 많은 계산시간을 필요로 한다.

본 논문에서는 예비실험을 통해 모집단 크기를 200개로 설정하였으며 임의생성방법을 통해 모집단을 생성하였다. 예를 들어 컨테이너 30개의 작업 순서를 결정할 경우 1~30 사이 정수가 중복되지 않도록 임의로 나열하여 200개의 개체를 생성하였다. 그 이후 임의로 염색체 한 개를 선별하여 시뮬레이터드 어닐링의 초기해로 대체하였다.

5.2 선별

선별은 적응도에 기초하여 현세대 모집단에서 다음 세대를 구성하는 염색체들을 선별하는 과정이다. 높은 적응도를 가진 염색체는 다음 세대의 구성에 이용함으로써 우수한 유전자를 유지하는 역할을 수행하게 된다(Bae *et al.*, 2007). 본 논문에서 제안하는 문제는 최소화 문제이므로 목적함수의 값이 작을수록 좋은 적응도를 가진 것을 의미한다. 유전 알고리즘에 사용되는 선별 연산자는 우성유전자 선별(elitist selection), 확률바퀴 선별(roulette wheel selection), 토너먼트 선별(tournament selection), 순위 선별(ranking selection) 등이 있다.

본 논문에서는 토너먼트 선별을 적용하여 다음 세대를 구성할 염색체를 선별하였다. 토너먼트 선별은 현세대에서 임의로 4개의 염색체를 선별하여 처음에 선택된 2개의 염색체 중에서 좋은 적응도를 가진 염색체와 나중에 선택된 2개의 염색체 중에서 좋은 적응도를 가진 염색체에 대해 교차율에 따라 교차 연산이 이루어지게 하였다.

5.3 교차

교차는 주 유전연산자로 두 부모 염색체의 결합을 통해 자식 염색체를 생성하여 좋은 적응도를 가진 해를 탐색해 가는 과정이다. 교차연산으로는 일점교차(one-point crossover), 이점교차(two-point crossover), 순서교차(order crossover), 균등교차(uniform crossover) 등이 있다. 본 논문에서는 부모의 상대적 순서를 보존하는 성질을 가진 순서교차를 적용하였다.

순서교차는 두 절단점(two-cut point)을 기준으로 부모(P₁)와 부모(P₂)의 두 절단점 사이의 요소들은 각각 자식(O₁)과 자식(O₂)에 상속하고 자식(O₁)의 나머지 유전자는 부모(P₂)의 두 번째 절단점 이후부터 상대적 순서로 상속된다. 자식(O₂)도 마찬가지로 부모(P₁)의 두 번째 절단점 이후부터 나머지 유전자를 상속받아 자식(O₂)이 생성된다. 순서교차에서 상대적 순서는 흔히 두 번째 절단점이 기준이 된다(Kim *et al.*, 1999).

<그림 7>은 순서교차의 예를 보여 주고 있다. 본 논문에서는 개체가 교차될 확률인 교차율(crossover rate)을 예비실험을 통해 0.8로 설정하였다.

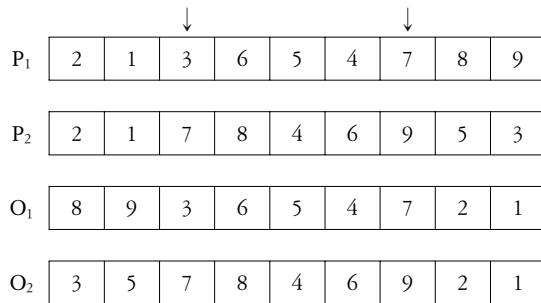


그림 7. 순서교차의 예

5.4 돌연변이

돌연변이는 주 유전연산자로 새로운 유전자가 생성되는 것으로 한 개체에 아주 작은 수의 유전자를 임의로 변화시키는 과정이다(Kim *et al.*, 1999). 돌연변이 연산은 해의 탐색 영역을 다양하게 하여 해의 조기 수렴을 방지하는 역할을 한다. 염색체가 순서를 나타내는 경우에 돌연변이 연산자는 교환돌연변이, 삽입돌연변이, 역순돌연변이 등이 이용된다(Bac *et al.*, 2007).

본 논문에서는 <그림 8>과 같이 서로 다른 두 개의 컨테이너를 선택하여 작업 순서를 교환하는 교환돌연변이 방법을 사용하였다. 돌연변이율(mutation rate)은 예비실험을 통해 0.2로 설정하였다.

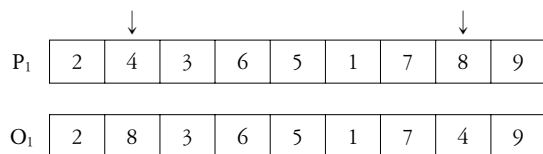


그림 8. 돌연변이의 예

5.5 적응도 평가

적응도 평가는 생성된 모집단에서 개체들의 우수성을 평가하기 위한 수단으로 사용된다(Bac *et al.*, 2007). 최적화 문제에서 적응도는 목적함수에 의해 평가되는데, 본 논문에서는 혼합정수계획모형의 목적함수 (3)을 적응도 평가를 위한 함수로 사용하였다.

5.6 종료조건

알고리즘의 종료조건은 정해진 계산시간, 정해진 세대수, 해의 개선이 이루어지지 않고 진행된 세대수 등이 있을 수 있다. 본 논문에서는 예비실험을 통해 세대수 3,000번에 도달하면 알고리즘을 종료하도록 하였다.

6. 계산실험 및 결과 분석

본 장에서는 제안한 혼합정수계획 모형과 휴리스틱 알고리즘을 실제 데이터를 적용하여 실험하고 휴리스틱 알고리즘의 수행도를 평가한다.

6.1 실험 데이터

표 1. 실험 데이터

	입주사 수	컨테이너 수	
데이터 1	3	18	(3, 3, 12)
데이터 2	2	15	(5, 10)
데이터 3	6	16	(2, 2, 4, 2, 1, 5)
데이터 4	3	19	(4, 8, 7)
데이터 5	2	18	(3, 15)
데이터 6	3	18	(1, 7, 10)
데이터 7	4	13	(1, 10, 1, 1)
데이터 8	4	17	(2, 4, 6, 5)
데이터 9	3	18	(2, 11, 5)
데이터 10	3	15	(2, 9, 4)
데이터 11	4	33	(15, 8, 5, 5)
데이터 12	4	33	(16, 7, 5, 5)
데이터 13	3	32	(9, 9, 14)
데이터 14	4	31	(5, 3, 5, 18)
데이터 15	4	32	(15, 7, 5, 5)
데이터 16	4	30	(16, 7, 5, 2)
데이터 17	3	32	(9, 9, 14)
데이터 18	2	33	(11, 22)
데이터 19	2	33	(11, 22)
데이터 20	4	32	(15, 7, 5, 5)

실험 데이터는 철도화물터미널의 현실 상황 분석과 실제 데이터를 기반으로 생성하였다. 화차간의 이동시간과 컨테이너 처리시간은 크레인의 작업시간을 분석하여 각각 25초와 70초로 설정하였으며 허용된 작업 시간은 2시간으로 설정하였다. <표 1>은 실험에 사용된 데이터 20개를 보여주고 있다. 데이터는 화물 열차에 적재된 컨테이너에 대한 정보로 입주사의 수, 총 컨테이너의 수와 개별 입주사의 컨테이너 수를 나타낸다. 예를 들어 데이터 1의 경우 하역 예정인 컨테이너의 수는 18개이며 이는 서로 다른 3개의 입주사로 구성되어 있으며 개별 입주사의 컨테이너 수는 3개, 3개 및 12개라는 것을 의미한다.

6.2 결과 및 분석

본 논문에서 제안한 휴리스틱 알고리즘은 Microsoft Visual C++2008 프로그램을 사용하여 C언어로 구현하였으며, 실험은 Intel(R) Core(TM) i5 CPU 750 @ 2.67GHz PC에서 수행하였다. 수리모형을 풀기 위해 최적화 상용소프트웨어 ILOG CPLEX 11.2를 사용하였다. 현실에서 일정계획 수립에 필요한 시간을 감안하여 수리모형의 풀이시간을 2시간으로 제한하였다. 휴리스틱의 성능을 알아보기 위해 데이터를 작은 크기(데이터 1~10번)와 현실 크기(데이터 11~20번)로 분리하여 실험하였다. 실험에서 메모리 부족현상과 풀이시간 제한 등으로 모든 실험에 대해 최적해와 휴리스틱 알고리즘에서 구한 해를 비교하는 것이 불가능하였다. 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 식 (18)을 사용하여 분석하였다. 식 (18)에서 CPLEX의 해는 2시간 이내에 도출된 최적해, 실행 가능해와 메모리 부족현상이 발생하기 전까지 도출된 해를 의미한다.

$$\text{최적성(Gap)} = \frac{\text{알고리즘의 해} - \text{CPLEX의 해}}{\text{CPLEX의 해}} \times 100\% \quad (18)$$

<표 2>와 <표 3>은 작은 크기의 문제(데이터 1~10번)에 대한 실험결과를 보여주며 <표 4>와 <표 5>는 현실 크기의 문제(데이터 11~20번)에 대한 실험결과를 보여준다. 각 표는 유전 알고리즘, 시뮬레이티드 어닐링, 타부 탐색, CPLEX에서 도출된 해, 계산시간 및 최적성을 보여주고 있으며 제안한 휴리스틱 알고리즘은 작은 크기와 현실 크기의 데이터 모두에서 짧은 계산시간에 우수한 해를 도출하는 것을 볼 수 있다.

가중치(α)의 변화에 따른 작업완료시간 범위의 합과 작업소요시간의 변화를 분석해 보았다. <그림 9>는 가중치에 따른 개별 입주사의 작업완료시간범위의 합과 작업소요시간의 변화를 보여준다. 예상대로 가중치가 증가할수록 작업완료시간 범위의 합은 감소하는 반면 작업소요시간은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 컨테이너장치장의 상황을 고려하여 가중치의 변화를 통해 크레인 일정계획을 수립할 경우 다양한 의사결정 대안을 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

실제 현장에서 사용되는 크레인 일정계획과 제안한 알고리즘에서 도출된 일정계획을 비교하고자 했으나 아래와 같은 현상의 상황으로 인해 실시하지 못했다. 첫째, 현장에서는 개별 입주사의 일괄처리 방식과 순차처리 방식을 혼용하고 있다는 점이다. 둘째, 작업자의 경험에 의해서 작업 순서가 결정되므로 정확한 작업 형태를 파악할 수 없다는 점이다. 마지막으로 크레인의 작업 순서에 대한 기록이 저장되어 있지 않는다는 점이다.

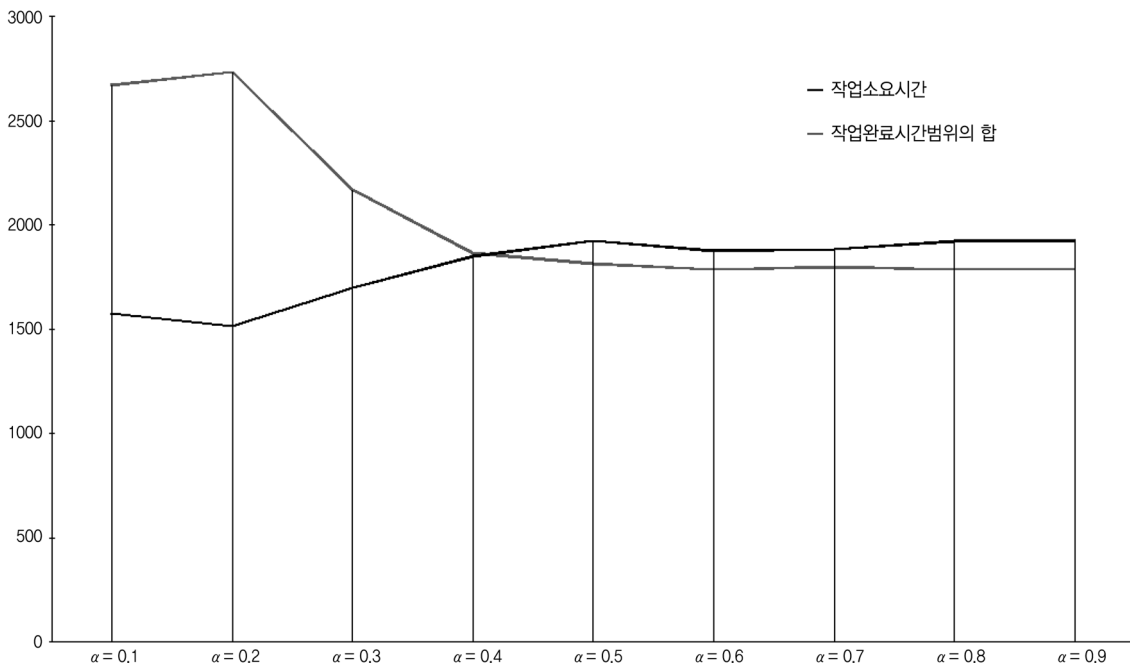


그림 9. 가중치에 따른 작업소요시간과 작업완료시간 범위의 변화

표 2. 계산실험결과 : 데이터 1~5번

α	데이터 1					데이터 2					데이터 3					데이터 4					데이터 5				
	GA	SA	TS	CPLEX		GA	SA	TS	CPLEX		GA	SA	TS	CPLEX		GA	SA	TS	CPLEX		GA	SA	TS	CPLEX	
0.1	1832.00 ^a (3.83) 0.00% ^c	1832.00 (3.33) 0.00%	1832.00 (0.31) 0.00%	1832.00 (3982.94)		1483.00 (3.38) 0.00%	1483.00 (2.08) 0.00%	1483.00 (0.11) 0.00%	1483.00 (123.39)		1682.00 (3.58) 0.00%	1682.00 (2.49) 0.00%	1682.00 (0.17) 0.00%	1682.00 (838.80)		2050.50 (4.14) 0.00%	2050.50 (4.06) 0.00%	2050.50 (0.45) 0.00%	2050.50 (7200.00)		1730.00 (3.78) 0.00%	1730.00 (3.16) 0.00%	1730.00 (0.31) 0.00%	1730.00 (1248.56)	
0.2	1979.00 (3.81) 0.00%	1979.00 (3.23) 0.00%	1979.00 (0.33) 0.00%	1979.00 ^d (1425.23)		1566.00 (3.36) 0.00%	1566.00 (2.02) 0.00%	1566.00 (0.13) 0.00%	1566.00 (778.78)		1869.00 (3.61) 0.00%	1869.00 (2.44) 0.00%	1869.00 (0.17) 0.00%	1869.00 ^d (1318.81)		2321.00 (4.19) 0.00%	2321.00 (3.81) 0.00%	2321.00 (0.45) 0.00%	2321.00 ^d (1393.53)		1775.00 (3.80) 0.00%	1775.00 (3.13) 0.00%	1775.00 (0.33) 0.00%	1775.00 ^d (2229.41)	
0.3	2063.00 (3.91) -2.96%	2087.50 (3.19) -1.81%	2063.00 (0.33) -2.96%	2126.00 ^d (1100.95)		1617.50 (3.45) 1.95%	1617.50 (2.00) 0.00%	1617.50 (0.13) 0.00%	1617.50 (587.05)		1989.50 (3.67) 1.07%	1968.50 (2.5) 0.00%	1982.50 (0.17) 0.71%	1968.50 (3132.16)		2448.00 (4.19) 1.16%	2490.00 (3.81) 2.89%	2490.00 (0.44) 2.89%	2420.00 ^d (1516.34)		1820.00 (3.78) 0.00%	1820.00 (3.22) 0.00%	1820.00 (0.31) 0.00%	1820.00 ^d (1524.20)	
0.4	2080.00 (3.86) -2.30%	2080.00 (3.33) -2.30%	2080.00 (0.33) -2.30%	2129.00 ^d (1575.02)		1615.00 (3.47) 0.00%	1615.00 (2.14) 0.00%	1615.00 (0.13) 0.00%	1615.00 (322.72)		1985.00 (3.80) 0.00%	1985.00 (2.47) 0.00%	1985.00 (0.17) 0.00%	1985.00 ^d (1926.77)		2485.00 (4.22) -0.60%	2485.00 (4.00) -0.60%	2485.00 (0.44) -0.60%	2500.00 ^d (1555.77)		1865.00 (3.78) 0.00%	1865.00 (3.09) 0.00%	1865.00 (0.33) 0.00%	1865.00 ^d (1417.70)	
0.5	2072.50 (3.86) 0.00%	2072.50 (3.39) 0.00%	2072.50 (0.34) 0.00%	2072.50 (7200.00)		1612.50 (3.45) 0.00%	1612.50 (2.13) 0.00%	1612.50 (0.13) 0.00%	1612.50 (305.38)		1970.00 (3.73) 0.00%	1970.00 (2.45) 0.00%	1970.00 (0.19) 0.00%	1970.00 (830.94)		2480.00 (4.20) 0.00%	2480.00 (4.06) 0.00%	2480.00 (0.45) 0.00%	2480.00 ^d (2096.00)		1860.00 (3.78) 0.00%	1860.00 (3.16) 0.00%	1860.00 (0.33) 0.00%	1860.00 ^d (1380.56)	
0.6	2065.00 (3.86) 0.00%	2065.00 (3.38) 0.00%	2065.00 (0.33) 0.00%	2065.00 (7200.00)		1610.00 (3.45) 0.00%	1610.00 (2.09) 0.00%	1610.00 (0.13) 0.00%	1610.00 (292.83)		1955.00 (3.72) 0.00%	1955.00 (2.48) 0.00%	1955.00 (0.17) 0.00%	1955.00 (322.92)		2475.00 (4.19) 0.00%	2475.00 (4.08) 0.00%	2475.00 (0.45) 0.00%	2475.00 (7200.00)		1845.00 (3.75) 0.00%	1845.00 (3.28) 0.00%	1845.00 (0.33) 0.00%	1845.00 (7200.00)	
0.7	2057.50 (3.86) 0.00%	2057.50 (3.17) 0.00%	2057.50 (0.34) 0.00%	2057.50 (7200.00)		1607.50 (3.45) 0.00%	1607.50 (2.08) 0.00%	1607.50 (0.11) 0.00%	1607.50 (220.63)		1940.00 (3.67) 0.00%	1940.00 (2.50) 0.00%	1940.00 (0.19) 0.00%	1940.00 (306.79)		2470.00 (4.20) 0.00%	2470.00 (3.97) 0.00%	2470.00 (0.45) 0.00%	2470.00 (7200.00)		1830.00 (3.77) 0.00%	1830.00 (3.30) 0.00%	1830.00 (0.33) 0.00%	1830.00 (7200.00)	
0.8	2050.00 (3.86) 0.00%	2050.00 (3.47) 0.00%	2050.00 (0.34) 0.00%	2050.00 ^d (2876.16)		1605.00 (3.45) 0.00%	1605.00 (2.19) 0.00%	1605.00 (0.11) 0.00%	1605.00 (387.91)		1925.00 (3.67) 0.00%	1925.00 (2.44) 0.00%	1925.00 (0.17) 0.00%	1925.00 (44.50)		2465.00 (4.20) 0.00%	2465.00 (4.28) 0.00%	2465.00 (0.45) 0.00%	2465.00 (3976.38)		1815.00 (3.78) 0.00%	1815.00 (3.31) 0.00%	1815.00 (0.33) 0.00%	1815.00 ^d (2333.25)	
0.9	2042.50 (3.88) 0.00%	2042.50 (3.45) 0.00%	2042.50 (0.34) 0.00%	2042.50 (7200.00)		1602.50 (3.47) 0.00%	1602.50 (2.16) 0.00%	1602.50 (0.11) 0.00%	1602.50 (398.94)		1910.00 (3.66) 0.00%	1910.00 (2.50) 0.00%	1910.00 (0.17) 0.00%	1910.00 (304.16)		2460.00 (4.22) 0.00%	2460.00 (4.19) 0.00%	2460.00 (0.44) 0.00%	2460.00 (7200.00)		1800.00 (3.75) 0.00%	1800.00 (3.39) 0.00%	1800.00 (0.34) 0.00%	1800.00 (4743.67)	

주) a : 목적함수 값, b : 계산시간(단위 : 초), c : 최적성, d : 메모리 부족.

표 3. 계산실험결과 : 데이터 6~10번

α	데이터 6				데이터 7				데이터 8				데이터 9				데이터 10			
	GA	SA	TS	CPLEX	GA	SA	TS	CPLEX	GA	SA	TS	CPLEX	GA	SA	TS	CPLEX	GA	SA	TS	CPLEX
0.1	1841.50 ^a (3.89) 0.00%	1841.50 (3.61) 0.00%	1841.50 (0.33) 0.00%	1841.50 (3670.73)	1231.00 (2.86) 0.00%	1231.00 (1.22) 0.00%	123.10 (0.05) 0.00%	1231.00 (21.77)	1725.00 (3.70) 0.00%	1725.00 (3.05) 0.00%	1725.00 (0.25) 0.00%	1725.00 (1960.80)	1841.50 (3.81) 0.00%	1841.50 (3.31) 0.00%	1841.50 (0.33) 0.00%	1841.50 (5223.17)	1575.50 (3.36) 0.00%	1575.50 (2.08) 0.00%	1575.50 (0.13) 0.00%	1575.50 (252.97)
0.2	1998.00 (3.91) 0.00%	1998.00 (3.49) 0.00%	1998.00 (0.33) 0.00%	1998.00 ^d (1617.39)	1252.00 (2.86) 0.00%	1252.00 (1.23) 0.00%	1252.00 (0.06) 0.00%	1252.00 (83.58)	1860.00 (3.72) 0.00%	1860.00 (3.02) 0.00%	1860.00 (0.25) 0.00%	1860.00 ^d (1685.58)	1998.00 (3.81) 0.00%	1998.00 (3.34) 0.00%	1998.00 (0.33) 0.00%	1998.00 ^d (1358.19)	1751.00 (3.36) 0.00%	1751.00 (2.00) 0.00%	1751.00 (0.13) 0.00%	1751.00 (1574.92)
0.3	2095.00 (4.00) 0.00%	2095.00 (3.36) 0.00%	2095.00 (0.33) 0.00%	2095.00 ^d (1428.33)	1266.00 (2.88) 0.00%	1266.00 (1.2) 0.00%	1266.00 (0.06) 0.00%	1266.00 (146.36)	1932.00 (3.89) -0.39%	1960.00 (2.98) 1.06%	1960.00 (0.25) 1.06%	1939.50 ^d (1464.55)	2102.00 (3.89) -0.50%	2112.50 (3.33) 0.00%	2102.00 (0.33) -0.50%	2112.50 ^d (1227.63)	1818.00 (3.55) 0.00%	1818.00 (2.09) 0.00%	1818.00 (0.13) 0.00%	1818.00 (3508.22)
0.4	2090.00 (4.00) -4.08%	2090.00 (3.52) -4.08%	2090.00 (0.34) -4.08%	2179.00 ^d (1331.30)	1268.00 (2.88) 0.00%	1285.00 (1.19) 1.34%	1268.00 (0.06) 0.00%	1268.00 (102.23)	1950.00 (3.88) 0.21%	1950.00 (2.99) 0.21%	1950.00 (0.24) 0.21%	1946.00 (3251.77)	2105.00 (3.91) 0.00%	2105.00 (3.44) 0.00%	2105.00 (0.33) 0.00%	2105.00 ^d (1519.30)	1849.00 (3.55) 0.00%	1855.00 (2.13) 0.32%	1849.00 (0.13) 0.00%	1849.00 (729.11)
0.5	2085.00 (4.02) 0.00%	2085.00 (3.45) 0.00%	2085.00 (0.34) 0.00%	2085.00 (7200.00)	1270.00 (2.86) 0.00%	1272.50 (1.20) 0.20%	1270.00 (0.06) 0.00%	1270.00 (80.45)	1940.00 (3.89) 0.00%	1940.00 (2.92) 0.00%	1940.00 (0.23) 0.00%	1940.00 (6034.70)	2097.50 (3.92) 0.60%	2097.50 (3.31) 0.60%	2097.50 (0.33) 0.60%	2085.00 (7200.00)	1850.00 (3.55) 0.00%	1850.00 (2.02) 0.00%	1850.00 (0.13) 0.00%	1850.00 (746.78)
0.6	2080.00 (4.02) 0.00%	2080.00 (3.50) 0.00%	2080.00 (0.34) 0.00%	2080.00 (7200.00)	1260.00 (2.88) 0.00%	1260.00 (1.14) 0.00%	1260.00 (0.06) 0.00%	1260.00 (156.77)	1930.00 (3.89) 0.00%	1930.00 (3.08) 0.00%	1930.00 (0.24) 0.00%	1930.00 (4570.67)	2090.00 (3.94) 0.48%	2090.00 (3.55) 0.48%	2090.00 (0.36) 0.48%	2080.00 (7200.00)	1845.00 (3.53) 0.00%	1845.00 (2.11) 0.00%	1845.00 (0.13) 0.00%	1845.00 (684.91)
0.7	2075.00 (4.03) 0.00%	2075.00 (3.42) 0.00%	2075.00 (0.34) 0.00%	2075.00 (7200.00)	1247.50 (2.86) 0.00%	1247.50 (1.17) 0.00%	1247.50 (0.05) 0.00%	1247.50 (13.84)	1920.00 (3.89) 0.00%	1920.00 (3.00) 0.00%	1920.00 (0.25) 0.00%	1920.00 (2386.80)	2082.50 (3.92) 0.36%	2082.50 (3.48) 0.36%	2082.50 (0.33) 0.36%	2075.00 (7200.00)	1840.00 (3.53) 0.00%	1840.00 (2.05) 0.00%	1840.00 (0.13) 0.00%	1840.00 (416.74)
0.8	2070.00 (3.98) 0.00%	2070.00 (3.61) 0.00%	2070.00 (0.33) 0.00%	2070.00 (2696.97)	1235.00 (2.88) 0.00%	1235.00 (1.24) 0.00%	1235.00 (0.05) 0.00%	1235.00 (50.50)	1910.00 (3.89) 0.00%	1910.00 (3.17) 0.00%	1910.00 (0.24) 0.00%	1910.00 (314.20)	2075.00 (3.97) 0.24%	2075.00 (3.55) 0.24%	2075.00 (0.33) 0.24%	2070.00 (7200.00)	1835.00 (3.55) 0.00%	1835.00 (2.19) 0.00%	1835.00 (0.14) 0.00%	1835.00 (563.33)
0.9	2065.00 (4.00) 0.00%	2065.00 (3.55) 0.00%	2065.00 (0.34) 0.00%	2065.00 (7200.00)	1222.50 (2.86) 0.00%	1222.50 (1.23) 0.00%	1222.50 (0.05) 0.00%	1222.50 (20.67)	1900.00 (3.88) 0.00%	1900.00 (3.16) 0.00%	1900.00 (0.25) 0.00%	1900.00 (7200.00)	2067.50 (3.95) 0.12%	2067.50 (3.44) 0.12%	2067.50 (0.33) 0.12%	2065.00 (7200.00)	1830.00 (3.53) 0.00%	1830.00 (2.11) 0.00%	1830.00 (0.13) 0.00%	1830.00 (60.97)

주) a : 목적함수 값, b : 계산시간(단위 : 초), c : 최적성, d : 메모리 부족.

표 4. 계산실험결과: 데이터 11~15번

α	데이터 11				데이터 12				데이터 13				데이터 14				데이터 15			
	GA	SA	TS	CPLEX	GA	SA	TS	CPLEX	GA	SA	TS	CPLEX	GA	SA	TS	CPLEX	GA	SA	TS	CPLEX
0.1	3729.50 ^a (7.27)	3729.50 (10.42)	3729.50 (10.09)	3729.50 ^d (6516.41)	3767.50 (7.24)	3767.50 (10.58)	3767.50 (10.14)	3767.50 (7200.00)	3447.00 (6.77)	3447.00 (9.03)	3447.00 (8.33)	3447.00 (7200.00)	3340.00 (6.69)	3340.00 (8.45)	3340.00 (6.98)	3340.00 ^d (5985.36)	3615.50 (6.92)	3615.50 (9.52)	3615.50 (8.53)	3615.50 ^d (6588.55)
0.2	4349.00 (7.27)	4349.00 (10.52)	4349.00 (10.08)	4349.00 ^d (2291.50)	4425.00 (7.22)	4425.00 (10.44)	4425.00 (10.16)	4425.00 ^d (2559.05)	3879.00 (6.77)	3879.00 (9.19)	3879.00 (8.56)	3879.00 (7200.00)	3760.00 (6.70)	3760.00 (8.39)	3760.00 (6.89)	3760.00 ^d (2069.16)	4216.00 (6.92)	4216.00 (9.80)	4216.00 (8.45)	4216.00 ^d (2995.27)
0.3	4807.50 (7.47)	4807.50 (10.55)	4807.50 (10.03)	4968.50 ^d (1781.94)	4837.50 (7.44)	4837.50 (10.63)	4704.50 (9.94)	5082.50 ^d (1689.63)	4150.00 (6.86)	4150.00 (9.31)	4150.00 (8.14)	4311.00 (7200.00)	3914.00 (6.73)	4110.00 (8.55)	4110.00 (6.73)	4180.00 ^d (2692.84)	4589.00 (7.30)	4697.50 (9.66)	4522.50 (8.38)	4816.50 ^d (1565.77)
0.4	4790.00 (7.48)	4790.00 (10.75)	4790.00 (10.09)	4997.00 ^d (1607.14)	4830.00 (7.41)	4830.00 (10.52)	4786.00 (9.83)	5666.00 ^d (5568.83)	4145.00 (6.83)	4145.00 (9.28)	4145.00 (8.22)	4743.00 ^d (4722.80)	4090.00 (6.74)	4090.00 (8.63)	4090.00 (6.78)	4550.00 ^d (3715.47)	4675.00 (7.22)	4675.00 (9.74)	4575.00 (8.50)	5417.00 ^d (5212.94)
0.5	4772.50 (7.45)	4772.50 (10.84)	4772.50 (10.30)	5062.50 (7200.00)	4822.50 (7.41)	4822.50 (10.78)	4822.50 (9.91)	5197.50 (7200.00)	4140.00 (6.83)	4140.00 (9.44)	4140.00 (8.33)	5175.00 (7200.00)	4070.00 (6.74)	4070.00 (8.75)	4070.00 (6.83)	4570.00 (7200.00)	4652.50 (7.22)	4652.50 (9.99)	4627.50 (8.53)	4920.00 (7200.00)
0.6	4755.00 (7.47)	4755.00 (10.89)	4755.00 (10.25)	5100.00 (7200.00)	4815.00 (7.41)	4815.00 (11.06)	4815.00 (9.75)	5185.00 (7200.00)	4135.00 (6.86)	4135.00 (9.53)	4135.00 (8.31)	4215.00 (7200.00)	4050.00 (6.73)	4050.00 (8.72)	4050.00 (6.81)	4164.00 (7200.00)	4630.00 (7.22)	4630.00 (10.08)	4630.00 (8.58)	5146.00 (7200.00)
0.7	4737.50 (7.47)	4737.50 (11.09)	4737.50 (10.48)	4752.50 (7200.00)	4807.50 (7.42)	4807.50 (10.86)	4807.50 (9.81)	4905.00 (7200.00)	4130.00 (6.84)	4130.00 (9.39)	4130.00 (8.36)	4167.50 (7200.00)	4030.00 (6.73)	4030.00 (8.64)	4030.00 (6.84)	4090.00 (7200.00)	4607.50 (7.20)	4607.50 (9.94)	4607.50 (8.72)	4802.50 ^d (4875.47)
0.8	4720.00 (7.49)	4720.00 (10.97)	4720.00 (10.33)	4785.00 ^d (5415.59)	4800.00 (7.41)	4800.00 (10.92)	4800.00 (9.72)	5345.00 ^d (4419.92)	4125.00 (6.83)	4125.00 (9.64)	4125.00 (8.36)	4125.00 (7200.00)	4010.00 (6.77)	4010.00 (8.75)	4010.00 (6.86)	4305.00 ^d (6127.31)	4585.00 (7.25)	4585.00 (10.19)	4585.00 (8.72)	4760.00 ^d (3330.36)
0.9	4702.50 (7.47)	4702.50 (11.05)	4702.50 (10.36)	4707.50 (7200.00)	4792.50 (7.42)	4792.50 (10.94)	4792.50 (9.73)	4792.50 (7200.00)	4120.00 (6.84)	4120.00 (9.52)	4120.00 (8.38)	4155.00 (7200.00)	3990.00 (6.75)	3990.00 (8.78)	3990.00 (6.84)	4010.00 ^d (2160.62)	4562.50 (7.20)	4562.50 (10.13)	4562.50 (8.77)	4572.50 (7200.00)

주) a : 목적함수 값, b : 계산시간(단위 : 초), c : 최적성, d : 메모리 부족.

표 5. 계산실합결과: 데이터 16~20번

α	데이터 16					데이터 17					데이터 18					데이터 19					데이터 20								
	GA	SA	TS	CPLEX		GA	SA	TS	CPLEX		GA	SA	TS	CPLEX		GA	SA	TS	CPLEX		GA	SA	TS	CPLEX					
0.1	3330.50 ^a (6.42) 0.00% ^c	3330.50 (7.91) 0.00%	3330.50 (5.56) 0.00%	3330.50 ^d (3030.73)		3523.00 (6.86) 0.00%	3523.00 (9.25) 0.00%	3523.00 (8.45) 0.00%	3523.00 (7200.00)		3392.50 (7.02) 0.00%	3392.50 (9.83) 0.00%	3392.50 (9.80) 0.00%	3392.50 ^d (4834.48)		3402.00 (6.92) 0.00%	3402.00 (9.70) 0.00%	3402.00 (9.58) 0.00%	3402.00 (1930.91)		3402.00 (6.92) 0.00%	3402.00 (9.70) 0.00%	3402.00 (9.58) 0.00%	3402.00 ^d (1930.91)		3691.50 (7.08) 0.00%	3691.50 (9.80) 0.00%	3691.50 (8.47) 0.00%	3691.50 (2050.38)
0.2	3836.00 (6.44) 0.00%	3836.00 (7.77) 0.00%	3836.00 (5.84) 0.00%	3836.00 ^d (2790.67)		4031.00 (6.89) 0.00%	4031.00 (9.09) 0.00%	4031.00 (8.39) 0.00%	4031.00 (7200.00)		3675.00 (7.02) 0.00%	3675.00 (9.58) 0.00%	3675.00 (10.08) 0.00%	3675.00 ^d (3183.52)		3694.00 (6.92) 0.00%	3694.00 (9.42) 0.00%	3694.00 (9.92) 0.00%	3694.00 (7200.00)		3694.00 (7.06) 0.00%	3694.00 (9.78) 0.00%	3694.00 (8.47) 0.00%	3694.00 ^d (1612.39)		4368.00 (7.06) 0.00%	4368.00 (9.78) 0.00%	4368.00 (8.47) 0.00%	4368.00 (1612.39)
0.3	4107.00 (6.59) -5.40%	4107.00 (7.92) -5.40%	4107.00 (5.80) -5.40%	4341.50 ^d (1657.97)		4367.50 (6.88) -3.78%	4367.50 (9.23) -3.78%	4367.50 (8.25) -3.78%	4539.00 (7200.00)		3852.50 (6.94) -2.56%	3852.50 (9.64) -2.56%	3852.50 (9.89) -2.56%	3957.50 (7200.00)		3877.50 (6.94) 3.52%	3877.50 (9.65) 3.52%	3877.50 (9.92) 3.52%	3986.00 ^d (1474.47)		4827.50 (7.39) -4.30%	4827.50 (9.97) -4.30%	4827.50 (8.19) -4.30%	5044.50 ^d (3518.42)		4827.50 (7.39) -4.30%	4827.50 (9.97) -4.30%	4827.50 (8.19) -4.30%	5044.50 ^d (3518.42)
0.4	4126.00 (6.59) -14.79%	4126.00 (8.14) -14.79%	4126.00 (5.89) -14.79%	4842.00 ^d (4075.81)		4360.00 (6.89) -13.61%	4360.00 (9.45) -13.61%	4360.00 (8.36) -13.61%	5047.00 (7200.00)		3850.00 (6.94) -9.20%	3850.00 (10.05) -9.20%	3850.00 (10.13) -9.20%	4240.00 ^d (2526.17)		3875.00 (6.92) -9.42%	3875.00 (-10.02) -9.42%	3875.00 (10.13) -9.42%	4278.00 ^d (2944.58)		4815.00 (7.39) -11.51%	4815.00 (10.34) -11.51%	4815.00 (8.27) -11.51%	5441.00 ^d (5895.53)		4815.00 (7.39) -11.51%	4815.00 (10.34) -11.51%	4815.00 (8.27) -11.51%	5441.00 ^d (5895.53)
0.5	4145.00 (6.58) -9.05%	4145.00 (8.14) -9.05%	4145.00 (5.86) -9.05%	4557.50 (7200.00)		4352.50 (6.89) -21.65%	4352.50 (9.52) -21.65%	4352.50 (8.41) -21.65%	5555.00 (7200.00)		3847.50 (6.95) -14.93%	3847.50 (9.86) -14.93%	3847.50 (10.22) -14.93%	4522.50 (7200.00)		3872.50 (6.95) -9.10%	3872.50 (9.69) -9.10%	3872.50 (10.28) -9.10%	4260.00 (7200.00)		4802.50 (7.41) -5.43%	4802.50 (10.16) -5.43%	4802.50 (8.20) -5.43%	5132.50 (7200.00)		4802.50 (7.41) -5.43%	4802.50 (10.16) -5.43%	4802.50 (8.20) -5.43%	5132.50 (7200.00)
0.6	4160.00 (6.56) -0.95%	4160.00 (8.06) -0.95%	4160.00 (5.78) -0.95%	4200.00 (7200.00)		4345.00 (6.89) -0.23%	4345.00 (9.61) -0.23%	4345.00 (8.39) -0.23%	4355.00 (7200.00)		3845.00 (6.95) -19.14%	3845.00 (10.11) -19.14%	3845.00 (10.33) -19.14%	4755.00 ^d (5987.67)		3870.00 (6.94) -20.40%	3870.00 (10.00) -20.40%	3870.00 (10.41) -20.40%	4862.00 (7200.00)		4790.00 (7.41) -7.64%	4790.00 (10.23) -7.64%	4790.00 (8.24) -7.64%	5186.00 (7200.00)		4790.00 (7.41) -7.64%	4790.00 (10.23) -7.64%	4790.00 (8.24) -7.64%	5186.00 (7200.00)
0.7	4145.00 (6.58) -0.18%	4145.00 (8.19) -0.18%	4145.00 (5.78) -0.18%	4152.50 (7200.00)		4337.50 (6.91) -0.17%	4337.50 (9.58) -0.17%	4337.50 (8.41) -0.17%	4345.00 (7200.00)		3842.50 (6.95) -5.18%	3842.50 (9.94) -5.18%	3842.50 (10.38) -5.18%	4052.50 (7200.00)		3867.50 (6.95) -4.92%	3867.50 (9.95) -4.92%	3867.50 (10.34) -4.92%	4067.50 (7200.00)		4777.50 (7.39) -9.99%	4777.50 (10.27) -9.99%	4777.50 (8.25) -9.99%	5307.50 ^d (4536.70)		4777.50 (7.39) -9.99%	4777.50 (10.27) -9.99%	4777.50 (8.25) -9.99%	5307.50 ^d (4536.70)
0.8	4130.00 (6.58) -9.83%	4130.00 (8.23) -9.83%	4130.00 (5.78) -9.83%	4580.00 ^d (3767.66)		4330.00 (6.89) -0.32%	4330.00 (9.74) -0.32%	4330.00 (8.44) -0.32%	4465.00 (7200.00)		3840.00 (6.95) -3.52%	3840.00 (10.14) -3.52%	3840.00 (10.42) -3.52%	3980.00 (7200.00)		3865.00 (6.95) -7.31%	3865.00 (9.75) -7.31%	3865.00 (10.36) -7.31%	4170.00 ^d (4507.67)		4765.00 (7.41) -10.18%	4765.00 (10.41) -10.18%	4765.00 (8.20) -10.18%	5305.00 ^d (2829.38)		4765.00 (7.41) -10.18%	4765.00 (10.41) -10.18%	4765.00 (8.20) -10.18%	5305.00 ^d (2829.38)
0.9	4115.00 (6.59) -0.36%	4115.00 (8.25) -0.36%	4115.00 (5.78) -0.36%	4130.00 (7200.00)		4322.50 (6.89) -0.23%	4322.50 (9.80) -0.23%	4322.50 (8.47) -0.23%	4332.50 (7200.00)		3837.50 (7.03) -1.79%	3837.50 (10.17) -1.79%	3837.50 (10.47) -1.79%	3907.50 (7200.00)		3862.50 (6.94) 0.00%	3862.50 (10.02) 0.00%	3862.50 (10.39) 0.00%	3862.50 (7200.00)		4752.50 (7.39) -1.81%	4752.50 (10.44) -1.81%	4752.50 (8.27) -1.81%	4840.00 ^d (3779.84)		4752.50 (7.39) -1.81%	4752.50 (10.44) -1.81%	4752.50 (8.27) -1.81%	4840.00 ^d (3779.84)

주) a : 목적함수 값, b : 계산시간(단위 : 초), c : 최적성, d : 메모리 부족.



그림 10. 일정계획의 변화에 따른 작업시간대 비교

입주사별 작업시간대의 분산효과를 분석해 보기 위해 작업 소요시간을 줄여주는 순차처리방식과 본 논문에서 제안하는 일정계획을 비교해 보았다. 데이터 13의 해에서 가중치(α)가 0.5인 경우 일정계획에 따른 개별 입주사의 작업시간대를 비교한 결과는 <그림 10>과 같다. 순차처리 작업방식은 같은 시간대에 여러 입주사의 작업이 이루어진다. 하지만 본 논문에서 제안하는 크레인 일정계획은 입주사의 작업이 시간대에 따라 분산되는 효과를 볼 수 있다.

7. 결론 및 향후 연구 과제

본 논문은 철도화물터미널에서 입주사의 작업완료시간 범위와 작업소요시간의 가중합을 최소화하는 크레인 일정계획문제를 다루었다. 이 문제는 터미널 운영사와 입주사의 측면을 동시에 고려한 문제로 입주사의 서비스 수준을 높여줄 수 있는 새로운 시도였다고 할 수 있다. 제안한 최적화 방법론은 다음과 같은 효과를 줄 것으로 기대된다. 첫째, 입주사의 작업 시간대를 미리 결정해줌으로써 효율적인 장비관리와 효과적인 작업 계획을 수립하는데 도움을 줄 것이다. 둘째, 시간대별로 야드 트럭의 동선관리가 가능하여 터미널 내부의 교통 혼잡도를 줄일 수 있을 것이다. 마지막으로 작업완료시간 범위의 감소는 터미널 입주사의 서비스 수준을 증가시켜 철도운송의 경쟁력을 높이는데 도움을 줄 것으로 기대된다.

향후 연구로는 복수의 화물 열차를 대상으로 일정계획에 대한 연구가 필요하다. 또한, 화물 열차에서 적재와 하역 작업이 동시에 진행될 경우 적재 위치와 작업순서를 통합적으로 결정하는 일정계획 수립에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

Bae, H. C., Park, K. C., Cha, B. C., and Moon, I. K. (2007), Scheduling of shipyard sub-assembly process using genetic algorithm, *IE Interfaces*, 20(1), 33-40.

Bierwirth, C. and Meisel, F. (2010), A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals, *European Journal of Operational Research*, 202(3), 615-627.

Bostel, N. and Dejax, P. (1998), Models and algorithms for container allocation problems on trains in a rapid transshipment shunting yard, *Transportation Science*, 32(4), 370-379.

Cao, Z., Lee, D. H., and Meng, Q. (2008), Deployment strategies of double-rail-mounted gantry crane systems for loading outbound containers in container terminals, *International Journal of Production Economics*, 115(1), 867-877.

Glover, F. (1989), Tabu search-Part I, *ORSA Journal on Computing*, 1(3), 190-206.

Glover, F. (1990), Tabu search-Part II, *ORSA Journal on Computing*, 2(1), 4-32.

Holland, J. (1975), *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The university of Michigan Press, Ann Arbor.

Jeong, B. J. and Kim, K. H. (2011), Scheduling operations of a rail crane and container deliveries between rail and port terminals, *Engineering Optimization*, 43(6), 597-613.

Jung, S. H. and Kim, K. H. (2006), Load scheduling for multiple quay crane in port container terminal, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17(4), 479-492.

Kim, K. H. and Park, Y. M. (2004), A crane scheduling method for container terminals, *European Journal of Operational Research*, 156(3), 752-768.

Kim, Y. K., Yun B. S., and Lee, S. B. (1999), *Metabeuristic*, Yeongji Moonbwas, Seoul, Korea.

Kirkpatrick, S. H., Gelatt, C. D., and Vecchi, M. P. (1983), Optimization by simulated annealing, *Science*, 220(4598), 671-679.

Kozan, E. (2000), Optimizing container transfers at multimodal terminals, *Mathematical and Computer Modeling*, 31(10-12), 235-243.

Lee, D. H., Wang, H. Q., and Miao, L. (2008), Quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals, *Transportation Research Part E*, 44(1), 124-135.

- Lee, D. H. and Wang, H. Q. (2010), An approximation algorithm for quay crane scheduling with handling priority in port container terminals, *Engineering Economics*, 42(12), 1151-1161.
- Moccia, L., Cordeau, J. F., Gaudioso, M., and Laporte, G. (2006), A branch-and-cut algorithm for the quay crane scheduling problem in a container terminal, *Naval Research Logistics*, 53(1), 45-59.
- Ng, W. C. and Mak, K. L. (2005a), An effective heuristic for scheduling a yard crane to handle jobs with different ready times, *Engineering Economics*, 37(8), 867-877.
- Ng, W. C. and Mak, K. L. (2005b), Yard crane scheduling in port container terminals, *Applied Mathematical Modelling*, 29(3), 263-276.
- Park, C. K. and Seo, J. Y. (2009), Genetic algorithm of the planar storage location assignment problem, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 35(2), 129-140.
- Zhu, Y. and Lim, A. (2006), Crane scheduling with non-crossing constraint, *Journal of the Operational Research Society*, 57(12), 1464-1471.



김광태

한림대학교 경영학과 학사
 인하대학교 물류전문대학원 석사
 현재 : 한국철도기술연구원 연구원
 관심분야 : Logistics System/SCM Optimization,
 Optimization Applications, Metaheuristics



김경민

한국과학기술원 산업공학과 학사
 서울대학교 산업공학과 석사
 현재 : 한국철도기술연구원 주임연구원
 관심분야 : Optimization models and their applications,
 Approximation of combinatorial optimization problems