

크레인 대수의 제약을 고려한 선석계획 문제에 대한 발견적 해법

박영만† · 김갑환*

† 해군사관학교 국방경영학과, *부산대학교 산업공학과,

A Heuristic Algorithm for Berth Planning with a Limited Number of Cranes

Young-Man Park† · Kap Hwan Kim*

† Department of Management Science, Korea Naval Academy, Jinhae 645-797, Korea
*Department of Industrial Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

요 약 : 본 연구는 컨테이너 터미널에서 선박의 선적작업을 위한 선석배정 및 크레인 할당문제를 동시에 결정하는 문제를 다루고 있다. 실제 컨테이너 터미널에서 고려하고 있는 다양한 형태의 제약을 고려하여 선석계획 및 크레인할당 문제에 대한 혼합정수모델을 제시하였다. 제안된 문제에 대해 좋은 해를 짧은 시간 안에 구하기 위하여 발견적 해법을 제시하였다. 또한 수치예제를 이용하여 제시된 발견적 기법의 수행도를 비교분석하였다. 분석결과 제시된 기법은 짧은 시간 안에 좋은 해를 제공하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 일정계획, 선석계획, 컨테이너 크레인, 최적화, 컨테이너 터미널

Abstract : This paper discusses the problem of scheduling berth and container cranes simultaneously in port container terminals. A mixed-integer programming model is formulated by considering various practical constraints. A heuristic algorithm is suggested for solving the mathematical model. A numerical experiment was conducted to test the performance of the suggested heuristic algorithm.

Key words : scheduling, berth planning, container crane, optimization, container terminal

1. 서 론

컨테이너 터미널에 있어서 선석은 가장 중요한 자원이며, 선석의 능력에 따라서 터미널의 능력이 결정되는 경우가 대부분이다. 또한 선석의 건설이 터미널에 있어서 다른 시설보다 훨씬 많은 비용이 든다. 따라서 터미널에서는 선석의 생산성을 높이기 위하여 많은 노력을 수행하고 있다. 그 중에서도 효율적인 선석계획을 통하여 선사 및 터미널의 비용을 줄이려는 노력이 많이 있었다. 그러나 정기선뿐만 아니라 부정기선 등 다양한 선박의 여건 및 선사의 다양한 요구사항을 만족시키는 선석계획을 수립하는 것은 대단히 어려운 일이었다. 이는 선석계획이 선석이라는 중요한 자원뿐만 아니라 컨테이너 크레인 (앞으로는 간단히 크레인이라고 부름)이라는 선석의 작업 장비와도 연관되어 있기 때문이다. 즉, 동일한 컨테이너를 취급하더라도 선박에 투입된 크레인의 수에 따라서 작업시간은 크게 달라진다. 그러나 투입할 수 있는 크레인의 수는 한계가 있으므로 언제 어떤 선박에 얼마만큼 크레인을 투입하는가에 의하여 선박이 터미널에 머무는 체류시간이 결정되게 된다.

본 연구와 관련된 기존의 연구 중에는 선석계획에 관한 것과 크레인의 일정계획에 관한 연구들이 있다. 컨테이너 터미널의 선석계획 문제는 1992년에 Lai and Shih(1992)이 터미널

안벽 전체를 몇 개의 선석으로 구분하여 선박에 대하여 하나의 선석을 할당하는 간단한 규칙을 제시하였다. Brown et al.(1994)은 선석을 여러 개의 영역으로 간주하여 선박을 어느 영역에 할당할 것인가를 결정하기 위하여 실제적인 제약조건을 고려한 정수계획법 모델을 제시하였다. Lim(1998)은 선석을 연속적인 것으로 간주하였으며, 접안위치를 결정함으로써 전체 선박의 작업 완료시간을 최소화하는 문제를 다루었다. Li et al.(1998)은 선석계획 문제를 단일기계가 동시에 여러 개의 작업을 수행하는 경우의 일정계획 문제로 다루었으며, 여러 개의 발견적 해법을 제시하여 실험을 수행하였다. Imai et al.(2001)은 선석을 여러 개의 영역(section)으로 구분하여 선박의 총 대기시간을 최소화하는 문제로 정의하여 혼합 정수계획 모델을 제시하였으며, 라그랑지안 완화법을 기초로 한 발견적 해법을 제시하였다. 또한, Nishimura et al.(2001)은 Imai et al.(2001)이 제시한 문제에 대하여 비교적 짧은 시간에 해를 제공하는 유전자 알고리즘을 이용한 해법을 제시하였다. 컨테이너 터미널 분야의 크레인 문제는 비교적 많이 다루어지지 않았으며, Daganzo(1989)에 의해서 여러 대의 선박 작업을 수행하기 위한 크레인 일정계획 문제로 처음 다루어졌다. Peterkofsky and Daganzo(1989)는 여러 대의 선박에 대하여 출항시간과 크레인 할당 수를 결정하는 알고리즘을 제시하여 선박의 지연을 최소

† 교신저자 : 연희원, ymanpark@pusan.ac.kr 055)549-1239

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

화하는 문제를 다루었다. Park and Kim(2003)은 선석계획에서 선석을 연속적인 것으로 고려하였으며, 선박의 선호위치나 선박들의 도착예정시간, 출항요구시간 등 선사들의 요구사항을 반영하면서 동시에 크레인에 대한 투입을 고려한 선석계획 문제를 처음으로 다루었다. 이후 Meisel and Bierwirth(2006)는 동일한 문제를 자원제약을 가진 다중모드 일정계획문제로 다루었으며, 후속 연구에서 Meisel and Bierwirth(2009)는 SWO(Squeaky Wheel Optimization)와 TS(Tabu Search) 휴리스틱을 이용하여 Park and Kim(2003)의 연구에서 다른 문제에 적용하여 약 12% 정도의 해의 개선을 가져왔다. 그러나 해법의 특성상 일정횟수의 반복수행으로 인하여 소요시간은 줄이지 못한 것으로 소개되었다.

본 연구에서는 Park and Kim(2003)의 선석계획 문제에 대하여 새로운 형태의 수리모형을 제시하고 빠른 시간 안에 효율적인 선석계획을 수립할 수 있는 발견적 해법을 제시하였다. 본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 선석계획 문제에 대한 수리적 모형을 제시하며, 3장에서는 cluster안정화 기법을 이용한 발견적 해법을 제시하였다. 4장에서는 제시된 발견적 해법을 이용하여 간단한 수치문제를 다루었다. 또한 기존 연구에서 제시된 문제를 대상으로 비교 실험을 수행하였으며, 마지막으로 5장에서는 연구 결론을 제시하였다.

2. 선석계획 수리모형

기존 연구에서는 선석계획 문제와 크레인 할당을 서로 독립적인 문제로 따로 다루었다. 그러나 선박이 터미널에 체류하는 시간은 투입된 크레인의 수에 의하여 의존적으로 변하게 된다. 즉, 선박에 할당된 크레인의 수가 증가할수록 선박의 체류시간은 줄어들게 된다는 것이다. 따라서 선석계획 문제와 크레인 할당문제는 서로 합쳐져야 한다. 본 연구에서는 선석계획 문제를 실제 컨테이너 터미널에서 수행되고 있는 선석계획 문제와 가깝도록 크레인 투입을 고려한 선석계획 문제로 다시 정의하였다. 크레인 투입을 고려한 선석계획 문제의 의사결정 변수는 각 선박의 접안위치와 접안시간, 그리고 선박의 크레인 투입대수 및 시간이 된다. 선박의 접안시간과 크레인의 투입대수가 결정되면 선박의 출항시간은 자동으로 결정되게 된다. Fig. 1에서는 크레인 투입을 고려한 선석계획 문제의 최종 해의 예를 보여주고 있다. 여기서 사각형은 선박의 접안계획을 보여주고 있다. 선석 축으로는 선박이 접안하는 선석상의 접안위치를 나타내며 x축으로의 길이는 선박의 길이를 나타낸다. 또한, 시간 축은 선박의 접안시간 및 이안시간을 나타내고 있으며, 각 시간별로 할당된 크레인 수를 사각형의 좌측에 나타내었다. 즉, 선석 축으로는 선박이 선석을 차지하는 범위를 나타내며 시간 축으로는 선박의 체류시간을 나타내고 있다. 선박에 할당된 크레인수가 고정적인 경우에는 선박의 체류시간은 고정되게 되며, 이런 경우 선석계획 문제는 Two-dimensional stock-cutting 문제의 특별한 한 예로 볼 수 있다. Two-dimensional stock-cutting 문제는 이미 NP-hard

문제로 알려져 있으며, 선석계획 문제 자체로서 two-dimensional stock-cutting 문제와 동일한 복잡성을 가지는 것이 Lim(1998)에 의해 증명되어 있다. 따라서 본 연구에서 다루는 문제는 여기에 크레인 투입성을 추가로 고려하고 있으므로 NP-hard임을 알 수 있다.

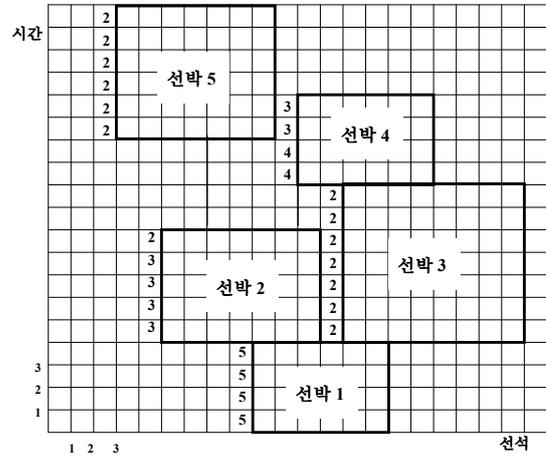


Fig. 1 An example of a berth plan

본 연구에서는 크레인 투입을 고려한 선석계획 문제에 대하여 혼합정수계획 모델을 제시하고, 이 모델에 대한 효율적인 알고리즘을 개발하였다.

2.1 기호의 정의

본 연구에서 사용하는 기호는 다음과 같다.

- x_i : 선박 i 의 접안위치(의사결정 변수)
- y_i^1 : 선박 i 의 접안시간 (의사결정 변수)
- y_i^2 : 선박 i 의 이안시간 (작업 완료시간, 의사결정 변수)
- z_{ij}^x : 선박 i 가 선박 j 의 접안위치보다 왼쪽에 있는 경우에는 1, 그렇지 않은 경우에는 0을 가짐
- z_{ij}^y : 선박 i 가 선박 j 의 접안시간보다 빠른 경우에는 1, 그렇지 않은 경우에는 0을 가짐
- a : 선박의 접안 시 선박사이의 안전을 위한 최소 간격 (실험에서 0으로 설정)
- b : 선박의 접안과 이안 시 필요한 최소 시간 (실험에서 0으로 설정)
- b_{ki} : 크레인 k 의 선박 i 에 대한 작업 시작시간 (의사결정 변수)
- e_{ki} : 크레인 k 의 선박 i 에 대한 작업 종료시간 (의사결정 변수)
- L_i : 선박 i 의 길이
- T_i : 선박 i 의 작업 요구시간
- C_L : 선박의 최소 크레인 작업 수
- C_U : 선박의 최대 크레인 작업 수
- T_V : 선박의 최소 계류시간

- u_{kij} : 크레인 k가 선박 i를 작업하고 나서 선박 j를 작업하면 1, 그렇지 않은 경우에는 0을 가짐
- s_i : 선박 i의 선호 집안위치 (야드내 운송비용이 최소인 집안 위치)
- a_i : 선박 i의 집안 요구시간
- d_i : 선박 i의 이안 요구시간
- c_{1i} : 선박 i의 집안위치에 관한 비용(집안위치와 거리만큼 비례하여 비용 발생)
- c_{2i} : 선박 i의 집안시간에 관한 비용(집안 요구시간과의 차이에 비례하여 비용 발생)
- c_{3i} : 선박 i의 이안시간에 관한 비용(이안 요구시간보다 늦은 경우에 비례하여 비용 발생)

2.2 모형의 기본적 가정

본 연구에서 다루는 선석계획 문제의 가정들은 다음과 같다.

(1) 각 선박은 집안 시에 최소 크레인 할당 수 및 최대 크레인 할당 수가 정해져 있으며, 이 각 선박은 이 범위 내에서 크레인을 할당하게 된다.

(2) 선박이 집안하여 머무는(체류) 시간은 선박에 투입된 크레인의 수에 반비례한다. 즉, 크레인을 2대 투입하는 경우의 선박체류시간이 6시간인 경우에 크레인을 3대 투입하면 체류시간은 4시간이 된다는 가정이다. 이는 현실에서도 선박의 체류시간은 투입하는 크레인의 수에 거의 반비례하는 것으로 나타나고 있기 때문이다.

(3) 각 선박은 집안 요구시간에 집안하지 못하는 경우와 이안 요구시간보다 늦게 작업을 완료하여 이안하는 경우에 비용이 발생하게 된다. 또한 터미널에서는 선박을 선호 집안위치에 집안시킴으로써 장치장에서의 작업이 원활하게 수행될 수 있다.

(4) 모든 선박은 자신의 선호집안위치를 가지고 있다. 이것은 해당 선박의 컨테이너가 장치되어 있는 장치장과 가장 가까운 위치를 말한다. 또는 선박에 따라서는 선석의 깊이나 파도의 영향이 작업에 많은 영향을 미치게 되는 경우가 있는데 이러한 선박들은 선박의 선호집안위치가 선석의 깊이나 파도의 영향 때문에 결정되기도 한다. 선석계획시 선박을 선호위치에 집안하지 못하는 경우에는 비용이 발생하게 된다.

2.3 수리적 모형

본 연구에서 다루는 크레인 투입을 고려한 선석계획 문제는 다음과 같이 수리적으로 모형화 할 수 있다.

$$\text{Min} \sum_i \{c_{1i}(\alpha_i^+ + \alpha_i^-) + c_{2i}(\beta_i^+ + \beta_i^-) + c_{3i}\gamma_i^+\} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } x_i - s_i = \alpha_i^+ - \alpha_i^- \quad \text{for all } i \quad (2)$$

$$y_i^1 - a_i = \beta_i^+ - \beta_i^- \quad \text{for all } i \quad (3)$$

$$y_i^2 - d_i = \gamma_i^+ - \gamma_i^- \quad \text{for all } i \quad (4)$$

$$x_i + L_i \leq B \quad \text{for all } i \quad (5)$$

$$x_i + L_i + a \leq x_j + M(1 - z_{ij}^x) \quad \text{for all } i \text{ and } j, i \neq j \quad (6)$$

$$y_i^2 + b \leq y_j^1 + M(1 - z_{ij}^y) \quad \text{for all } i \text{ and } j, i \neq j \quad (7)$$

$$z_{ij}^x + z_{ji}^x + z_{ij}^y + z_{ji}^y \geq 1 \quad \text{for all } i \text{ and } j, i < j \quad (8)$$

$$T_i = \sum_k (e_{ki} - b_{ki}) \quad \text{for all } i \quad (9)$$

$$y_i^2 \geq e_{ki} \quad \text{for all } k \text{ and } i \quad (10)$$

$$y_i^1 \leq b_{ki} \quad \text{for all } k \text{ and } i \quad (11)$$

$$e_{ki} \geq b_{ki} \quad \text{for all } k \text{ and } i \quad (12)$$

$$e_{ki} \leq b_{kj} + M(1 - u_{kij}) \quad \text{for all } k, i, \text{ and } j \quad (13)$$

$$\sum_j u_{kSj} = 1 \quad \text{for all } k \quad (14)$$

$$\sum_j u_{kij} - \sum_j u_{kji} = 0 \quad \text{for all } k \text{ and } i \quad (15)$$

$$\sum_i u_{kiT} = 1 \quad \text{for all } k \quad (16)$$

$$C_L \leq \sum_k \sum_i u_{kij} \leq C_U \quad \text{for all } j \quad (17)$$

$$y_i^2 - y_i^1 \geq T_V \quad \text{for all } i \quad (18)$$

$$\alpha_i^+, \alpha_i^-, \beta_i^+, \beta_i^-, x_i, y_i^1, y_i^2, e_{ki}, b_{ki} \geq 0 \quad \text{for all } k \text{ and } i \quad (19)$$

$$z_{ij}^x, z_{ij}^y, z_{ji}^x, u_{kij} \text{ 0 or 1 for all } k, i, \text{ and } j \quad (20)$$

식(1)은 크레인 투입을 고려한 선석계획 문제의 목적함수를 나타내고 있다. 목적함수는 선박의 집안위치와 관련된 컨테이너의 취급비용의 가중합과 선박의 집안 요구시간과 실제 집안 시간과의 차이, 선박의 이안 요구시간보다 늦게 이안하여 발생하는 비용의 합을 최소로 하였다. 식(2)는 선박의 선호위치와 집안위치의 차이를 나타내며, 식(3)은 집안 요구시간과 실제 집안시간과의 차이, 식(4)는 이안 요구시간과 실제 이안시간과의 차이를 선형계획법의 형식에 맞도록 나타내고 있다. 식(5)는 각 선박의 집안위치는 선박의 길이를 고려해야 한다는 것이며, 식(6)과 식(7)은 두 선박이 선석 축과 시간 축으로 서로 겹치지 않아야 한다는 것을 나타내고 있다. 식(9)는 선박의 작업 요구시간을 만족시켜야 합을 나타낸다. 식(10)은 선박의 이안시간을 식(11)은 선박의 집안시간을 나타낸다. 식(12)는 크레인의 선박 투입 시작시간과 종료시간과의 관계를 나타내고 있다. 식(13)은 크레인이 각 선박을 작업하는 경우의 전후 작업 선박에 대하여 작업 종료시간과 작업 시작시간과의 관계를 나타낸다. 식(14)부터 식(16)까지는 크레인의 맨 처음 작업시작 선박부터 최종 작업 선박까지의 관계를 나타낸다. 식(17)은 한 선박의 투입 크레인 수에 관한 제약을 나타낸다. 식(18)은 급유 등 선사의 운영상의 이유로 선박의 최소 체류시간이 일정시간 이상 되어야 합을 나타내고 있다. 식(19)과 식(20)은 모델에서 사용된 변수들에 대한 값의 범위를 나타내고 있다.

3. 발견적 해법

제시된 발견적 해법은 현장에서 선석계획 전문가들이 사용하는 있는 방식을 면담을 통하여 얻은 다음 체계화 시킨 것이다. 현장 전문가들은 선석계획 수립 시에 우선 선석계획 대상 선박을 찾은 다음 선박의 집안위치를 먼저 결정하고, 크레인의 활용 가능성을 따져 크레인을 할당하여 선석계획을 완성한

다. 제시된 발견적 해법의 전체적인 절차는 전문가의 선석계획 기법과 유사한 방식을 따랐으며, 각 단계에서의 의사결정은 목적 함수 값을 최소화 할 수 있는 최적 의사결정 방식을 사용하였다. 전체적인 해법의 절차는 Fig. 2와 같다.

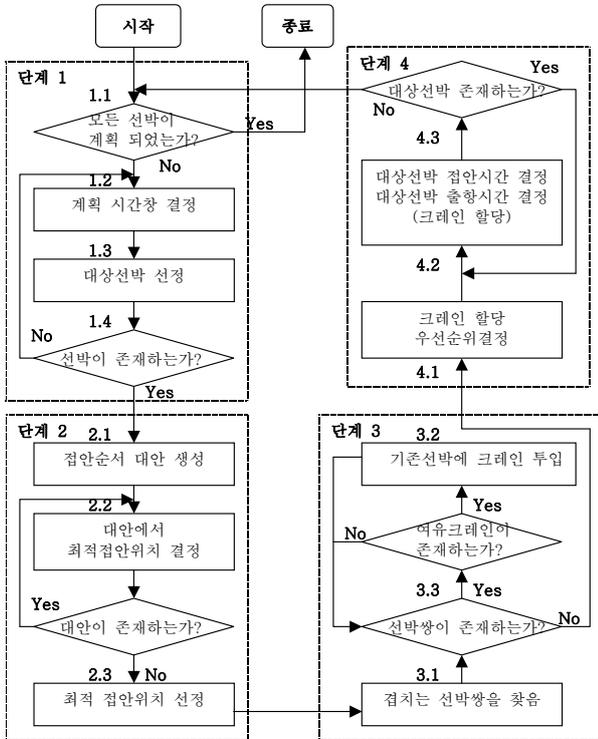


Fig. 2 Flowchart of the heuristic algorithm

3.1 발견적 해법 절차

발견적 해법의 각 단계에서의 구체적인 절차는 다음과 같다.

단계 1 [대상선박 선정]

단계 1.0: 계획 시간창 $t = 0$.

단계 1.1: 모든 선박의 접안계획이 완료되었으면 종료하고, 그렇지 않으면 단계 1.2로 간다.

단계 1.2: 계획 시간창은 $[t, t + \Delta t]$ 가 된다. 본 연구에서 Δt 는 6(시간)으로 사용하였다.

단계 1.3: 계획 시간창 안에 있는 선박을 대상선박으로 선정한다. 만약, 대상선박들의 선박 길이의 합이 총 선석의 길이를 초과하면 접안 요구시간이 빠른 순서로 선석의 길이 범위 내의 선박들만 고려한다.

단계 1.4: 대상선박이 존재하면 단계 2로 진행하고, 대상선박이 존재하지 않는 경우에는 $t=t+\Delta t$ 로 변경하고 단계 1.1로 간다.

단계 2 [접안위치 결정]

단계 2.1: 대상선박들의 접안순서 대안들을 생성한다. 선석의 길이가 1,200m인 경우 실험대상 선박의 수는 최대 6척 정

도이므로 가능한 모든 순서쌍을 생성하여도 그 수행시간에 미치는 영향은 적다.

단계 2.2: 각 접안순서 대안에 대하여 다음 절의 'cluster안정화 기법'을 이용하여 선박의 최적 접안위치를 결정한다.

단계 2.3: 각 대안 중에서 선호위치에 의한 비용이 가장 적게 발생하는 접안위치를 최적 접안위치로 선택하고, 단계 3으로 진행한다.

단계 3 [크레인 추가 할당]

단계 3.1: 접안 대상선박의 접안 요구시간이 기존에 접안이 결정된 선박의 이안시간보다 앞서고, 두 선박의 접안위치가 선박의 길이를 고려하여 서로 겹치는 경우의 모든 선박 순서쌍을 찾아낸다. 이 경우는 새로 접안 하고자 하는 선박이 기존 접안 계획된 선박에 의하여 접안 요구시간에 접안 할 수 없는 경우를 나타낸다.

단계 3.2: 단계 3.1에서 찾은 모든 선박 쌍에 대하여 크레인의 제약을 만족시키는 범위 내에서 접안된 선박에 크레인을 더 투입하여 대상선박을 최대한 접안 요구시간에 접안시킬 수 있도록 선박의 이안시간을 앞당기게 된다. 이때 최대로 앞당길 수 있는 시간은 크레인의 제약조건 및 선박의 최소 체류시간을 만족시키는 범위 내에서 이루어져야 한다.

단계 3.3: 더 이상 선박 순서쌍이 존재하지 않는 경우이거나 투입할 크레인이 없는 경우에는 단계 4로 진행한다.

단계 4 [대상선박의 접안시간 및 이안시간 결정]

단계 4.1: 대상선박의 크레인 할당 우선순위를 결정한다. 크레인 할당 우선순위는 작업시간 여유율이 작은 선박에 크레인을 우선 할당한다.

$$\text{여유율} = \frac{(\text{이안 요구시간} - \text{접안 요구시간})}{\text{작업요구시간}} \quad (21)$$

단계 4.2: 접안 대상선박에 대하여 접안시간, 이안시간을 결정한다. 접안시간은 크레인의 투입 가능 수량과 제약조건을 만족시키면서 대상선박의 접안 요구시간 이후에서 가장 가까운 시간에 접안하며, 이안시간은 최대한 대상선박의 이안 요구시간에 일치하도록 크레인을 할당하게 된다.

단계 4.3: 모든 접안 대상선박의 접안시간과 이안시간이 결정되면 $t=t+\Delta t$ 로 변경하고 단계 1의 단계 1.1로 진행한다.

3.2 클러스터(Cluster) 안정화 기법

cluster 안정화 기법은 비슷한(Δt) 시간대에 접안하게 될 선박들에 대하여 선석상의 접안위치를 결정하는 방법이다. 이는 접안 할 선박들이 자신의 선호위치에 접안하기 위하여 서로 경쟁하게 되며, 이러한 경쟁들을 원만히 해결하는 과정이 cluster 안정화 기법이다. cluster는 선석축 방향으로 서로 접해 있는 선박들의 집합을 말한다. 한 cluster가 안정 상태에 있다는 것은 그 cluster에 속해있는 선박들을 선석축의 음의 방향이나 양의 방향으로 이동시켜도 총 비용이 감소하

지 않는 상태이다. 반대로 cluster가 안정화되지 않았다는 것은 cluster를 좌측으로 이동시키면 비용이 줄어들 수 있다는 것을 의미한다. 또한 cluster가 이동하면서 다른 cluster를 만나게 되면 두 cluster는 합쳐지게 되어 새로운 cluster를 형성하게 된다.

식(22)은 cluster에 속하는 선박들 중에서 현재의 집안위치가 선호위치와 비교하여 같거나 좌측에 집안한 선박들의 가중치의 합과 선호위치보다 우측에 집안하는 선박의 가중치의 합을의 차이를 의미한다.

$$\Delta = \sum_{i \in CL} c_i - \sum_{i \in CR} c_i$$

$$CL = \{i | i \in cluster \wedge (x_i \leq s_i)\}, CR = \{i | i \in cluster \wedge (x_i > s_i)\} \quad (22)$$

집안위치를 결정하는 단계 2에서 하나의 집안순서 대안에 대하여 다음과 같은 cluster 안정화 기법을 이용하여 최적집안위치를 찾아 낼 수 있다.

단계 2.2.0: 집안순서 대안에서 주어진 순서에 의하여 새로운 선박을 추가한다. 이때 새로 추가되는 선박의 초기 집안위치는 기존의 선박 중에서 가장 오른쪽에 접하거나 해당 선박의 선호위치가 가장 오른쪽 선박보다 더 우측에 있으면 해당 선박의 선호위치에 집안하게 된다. 집안된 선박들에 대하여 선박의 cluster를 새로 정의한다. 더 이상 추가할 선박이 없으면 종료한다.

단계 2.2.1: Cluster가 왼쪽으로 이동 가능한지 계산한다. 이동가능 여부는 식(22)에서 구한 Δ 가 양인 경우에는 cluster가 안정화 되어있으며, 음인 경우에는 cluster를 왼쪽으로 이동하면 비용이 감소한다는 것을 나타내고 있다. cluster가 안정되었으면 단계 2.2.0으로 가고, 그렇지 않으면 현재의 cluster들이 좌측으로 이동할 때 만나게 되는 각 선박들의 선호위치까지의 거리 중에서 가장 최소거리인 $d1$ 를 구한 다음 단계 2.2.2로 간다.

단계 2.2.2: 현재의 cluster가 좌측으로 이동할 수 있는 최대 거리를 구한다. 다른 cluster와 인접하게 되는 거리($d2$)와 cluster가 선석 시작점에 위치하게 되는 거리($d3$)를 구한다. 이 둘 중에서 가장 작은 값 $D(D = \min\{d1, d2, d3\})$ 를 구하여 현재 cluster를 D 만큼 좌측으로 이동시킨다. 만약, $d2$ 가 선택되어 새로운 선박이 기존 cluster에 접하게 되면 cluster를 새롭게 정의하고 단계 2.2.1로 이동하며 그렇지 않은 경우에는 단계 2.2.0으로 간다.

Fig. 3은 선박이 모두 3대이고, 각각의 가중치가 (5, 4, 3)이면서 선박 집안순서가 (1, 2, 3)인 경우의 cluster 안정화 기법을 적용한 예를 나타내고 있다. Fig. 3의 (a)에서는 선박 1이 가장 먼저 자신의 선호위치에 집안위치를 결정하게 된다. 이때에는 선박 1이 자신의 선호위치에 놓이게 되므로 당연히 안정화 상태가 된다. 선박 2의 집안위치를 결정할 때에는 선박 2의 선호위치가 선박 1보다 좌측에 있으므로 선박 1에 인접하게 집안위치를 결정하면 Fig. 3의 (b)가 되며, 이때의 cluster는 선박 1과 선박 2가 된다. 이때 안정화 상태를 살펴보면, Δ

값이 양수가 되므로 안정화 상태이다. 즉, 좌측이나 우측으로 이동하게 되면 비용이 증가하게 된다. 선박 3의 선호위치도 집안 가능한 위치보다 좌측에 있으므로 선박 2에 Fig. 3의 (c)처럼 인접하게 되며, 이때의 cluster는 선박 (1, 2, 3) 된다. 이때 안정화 상태를 살펴보면 Δ 값이 음수가 되므로 cluster를 좌측으로 이동시키면 비용이 감소함을 알 수 있다. 이때 $D = \min\{\min(8, 1), \infty, 6\}$ 가 되므로 좌측으로 1만큼 이동한다. Fig. 3의 (c)는 Fig. 3의 (d)로 변경되며, 이때 안정화 상태를 살펴보면 값이 양수이므로 안정화 상태이다. 따라서 선박 (1, 2, 3)은 Fig 3의 (d)의 위치가 최적 집안위치 임을 알 수 있고, 이때 선호위치로 인하여 발생하는 총비용은 33임을 알 수 있다.

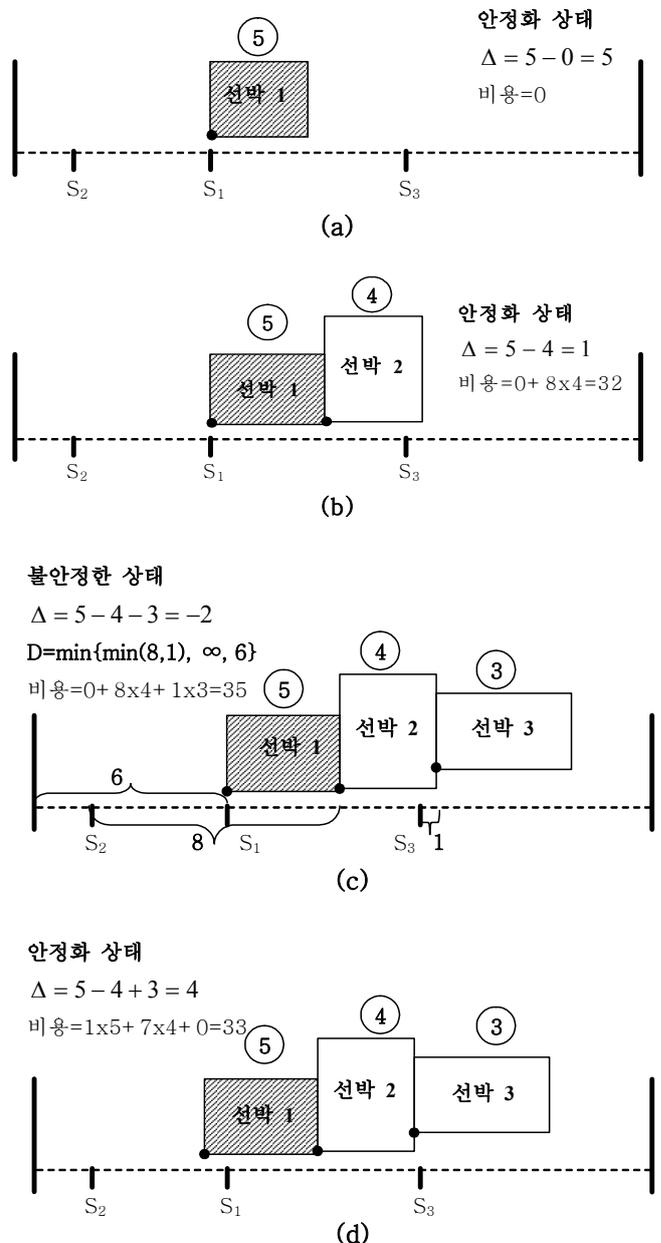


Fig. 3 An example of making cluster stable

4. 수치예제 및 실험

4.1 수치 예제

제시된 발견적 해법을 이용하여 선박이 5대인 문제에 적용하면 다음과 같다. Table 1은 선박 5대에 대한 입력 데이터이다. 가용한 크레인 수는 총 9대이며, 각 선박은 최소 2대에서 최대 4대의 크레인을 사용할 수 있다. 선석의 총길이는 25(단위 10m)이며 Δt 는 6으로 두었다. 또한, $c_{1i} = c_{2i} = 1, c_{3i} = 2$ 로 두고 비용을 구하였다.

Table 1 The input data of numerical example

	a_i	d_i	s_i^*	T_i	L_i^*
선박1	2	8	10	20	6
선박2	4	9	10	14	7
선박3	4	10	14	14	8
선박4	7	14	12	14	6
선박5	10	13	4	10	7

* s_i 와 L_i 의 단위는 10m임.

[Step 1] 단계 1

단계 1.0: $t=0$

단계 1.1: 모든 선박의 접안계획이 끝나지 않았으므로 단계 1.2로 간다.

단계 1.2: 계획 시간창은 $[0, 6]$ 이 된다.

단계 1.3: 계획 시간창 0과 6사이에 존재하는 선박은 (1, 2, 3)이다.

단계 1.4: 대상선박이 존재하므로 단계 2으로 진행한다.

[Step 2] 단계 2

가능한 접안순서 대안은 모두 6가지가 되며 각 대안에 대하여 안정화기법을 이용하여 접안위치를 결정한 결과를 Table 2에 나타내었다. 가장 비용이 적게 발생하는 것은 선박 접안순서 (1, 2, 3)이며, 최종 접안위치는 (4, 10, 17)이 된다. 이때, 선호접안위치에 의하여 발생하는 비용은 9가 됨을 알 수 있다.

Table 2 The results for vessel 1, vessel 2, and vessel 3 after step 2

접안순서대안	최종접안위치	비용
(1,2,3)	(4,10,17)	9*
(1,3,2)	(4,10,18)	18
(2,1,3)	(3,10,16)	9*
(2,3,1)	(4,11,19)	18
(3,1,2)	(2,10,16)	18
(3,2,1)	(2,10,17)	19

*: 최소비용

[Step 3] 단계 3

기준에 접안위치가 결정된 선박이 없는 상태이므로 바로

단계 4로 진행한다.

[Step 4] 단계 4

각 대상선박의 여유율은 (0.30, 0.36, 0.43)이 되므로 대상선박 (1, 2, 3)의 우선순위로 크레인을 할당한다. 단계 2에 의한 크레인 할당결과는 Table 3과 같으며 $t=6$ 이 되고, 단계 1의 단계 1.1로 진행한다.

Table 3 The results for vessel 1, vessel2, and vessel 3 after step 4

	x_i	y_i^1	y_i^2	크레인할당	비용
선박1	4	2	8	4,4,3,3,3,3	6
선박2	10	4	9	3,3,3,3,2	0
선박3	17	4	10	3,3,2,2,2,2	3

[Step 5] 단계 1

단계 1.1: 모든 선박의 접안계획이 끝나지 않았으므로 단계 1.2로 간다.

단계 1.2: 계획 시간창은 $[6, 12]$ 가 된다.

단계 1.3: 접안 요구시간이 6과 12사이에 존재하는 선박은 (4, 5)이다.

단계 1.4: 단계 2로 진행한다.

[Step 6] 단계 2

가능한 접안 순서 대안은 두 가지가 되며 각각에 대하여 안정화기법을 이용하여 접안위치를 결정한 결과를 Table 4에 나타내었다. 선박4와 5의 최종접안위치는 (12, 4)이 되며, 이때 선호 접안위치에 의하여 발생하는 비용은 0이 됨을 알 수 있다.

Table 4 The results for vessel 4 and vessel 5 after step 2

접안순서대안	최종접안위치	비용
(4,5)	(12,18)	14
(5,4)	(4,12)	0*

[Step 7] 단계 3

단계 3.1: 접안 대상선박 4의 접안 요구시간은 7이며, 기준에 접안이 결정된 선박 중 (2, 3)의 이안시간은 (9, 10)이고, 선박 4와 선박 2, 3은 선박 길이를 고려할 때 서로 겹치게 되므로 선박 순서쌍은 (4, 2), (4, 3)이 된다.

단계 3.2: 선박 4와 선박 2의 관계에서 선박 4의 접안시간을 지연시키지 않기 위하여 선박 2의 시간 8의 크레인 2대를 시간 4와 시간 5에 추가 할당하고자 하지만 시간 4와 시간 5에 이미 크레인이 9대가 할당되어 더 이상 추가 할당이 불가능하다.

단계 3.2: 선박 3은 시간 9의 크레인 2대를 시간 6에 1대, 시간 7에 1대 추가 할당 (3, 3, 2, 2, 2, 2 -> 3, 3, 3, 3, 2)을 하게 되어 선박 4의 접안시간을 앞당길 수 있게 된다.

단계 3.2: 선박 3의 시간 8에 있는 크레인 2는 총 크레인 수를 초과하여 추가 할당이 불가능하다.

단계 3.3: 더 이상 관련된 선박이 없으므로 단계 4로 진행한다.

[Step 8] 단계 4

각 선박의 여유율은 (0.50, 0.30) 이 되므로 선박(5, 4)의 우선순위로 크레인을 할당한다. 단계 4.2에 의한 크레인 할당결과는 Table 5와 같으며 단계 1로 진행한다.

Table 5 The results for vessel 4 and vessel 5 after step 4

	x_i	y_i^1	y_i^2	크레인할당	비용
선박4	12	9	14	3,3,3,2	2
선박5	4	10	14	3,3,2,2	2

[Step 9] 단계 1

단계 1.1: 모든 선박의 집안계획이 끝났으므로 종료한다.

Fig. 4는 예제 문제에 대한 최종 해를 보여주고 있다. Fig. 4에서 각 선박의 집안위치와 집안시간, 이안시간, 선박의 할당 크레인 수, 각 시간대별 선박에 할당된 총 크레인 수가 나타나 있으며, 이때의 총비용은 13이 된다.

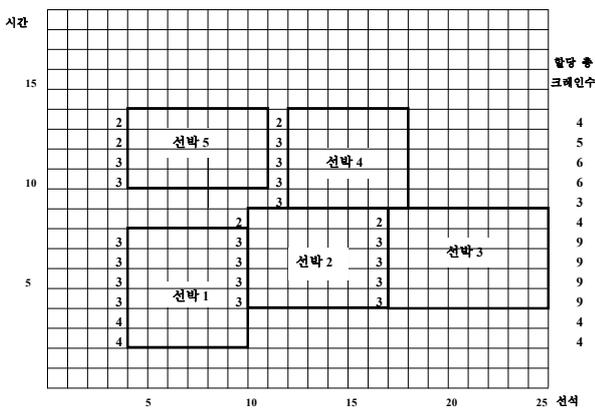


Fig. 4 The final results for the berth scheduling sample problem

4.2 실험

제시된 발견적 해법에 대한 성능을 알아보기 위하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 자료는 비교분석을 위하여 Park and Kim(2003)의 연구에서 사용된 자료와 동일하게 크레인 수는 11대이며 선석의 총길이가 1,200m인 경우를 가정하여 선박의 수가 20척, 25척, 30척, 35척, 40척으로 총 5가지 경우에 대해 각 10개씩 총 50개의 실험 자료를 생성하여 사용하였다.

Fig. 5는 선박이 30척인 서로 다른 세 문제에 대하여 크레인의 총 대수를 변경하면서 총비용의 변화를 살펴본 그림이다. Fig. 5에서 보듯이 크레인의 수가 증가할수록 크레인 투자비용을 고려하지 않을 때 총비용이 점점 감소하다가 11대 이

상이면 더 이상 감소하지 않음을 알 수 있었다. 따라서 컨테이너 터미널에서 사용하는 크레인은 크레인간의 간섭을 고려하여 적정수준의 크레인 대수가 효과적임을 알 수 있다.

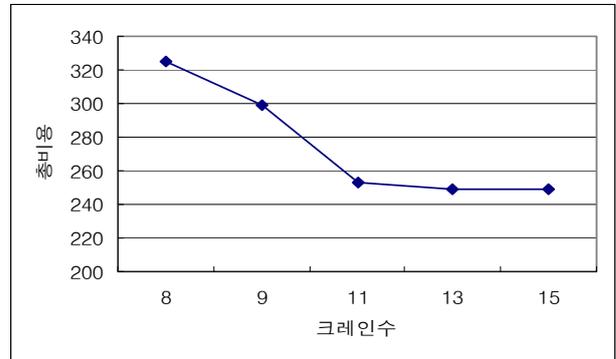


Fig. 5 The total cost changes for the various number of cranes

Fig. 6은 제시된 발견적 해법의 총비용의 변화를 라그랑지안 완화법(Park and Kim, 2003)과 비교 분석한 것이다. 해의 정도는 라그랑지안 완화법에 비하여 선박수 20일 때 40%, 선박수 40일 때 69% 정도 크게 나타났으며 전체적으로는 총비용이 평균 70%정도 크게 나타났다. 그러나 수행시간측면에서는 Fig. 7에서와 같이 라그랑지안 완화법은 선박의 수가 증가할수록 수행시간이 기하급수적으로 증가하지만 발견적 기법은 문제의 크기가 가장 큰 선박 수 40에 대해서도 최대 2초 이내에 해를 제공하는 것으로 나타났다.

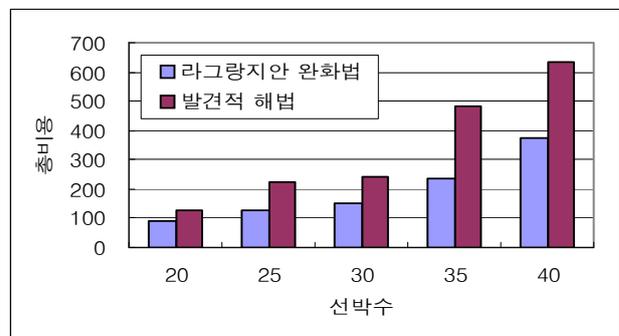


Fig. 6 The average total cost of the Park and Kim(2003) and the heuristic method

국내의 컨테이너 터미널 운영사는 보통 600m에서 3,200m 정도의 선석(안벽)을 운영하고 있다. Table 6은 부산항에 있는 주요 터미널의 2010년도 10월의 선박 처리현황을 보여주고 있다. 현재 부산항의 주요 터미널은 일주일 동안 보통 40척에서 많은 경우 60척 이상을 처리하고 있으며, 월간으로는 많은 경우 250척 이상을 처리하고 있으므로 빠른 선석계획 수립은 중요한 의미를 가진다. 그러므로 일주일간 선석계획을 수립하는 주간 선석계획에는 보다 성능이 우수한 라그랑지안 완화법을 적용하고, 계획대상 선박의 수가 많은 월간 선석계획은 수행시간이 적게 소요되는 발견적 해법을 적용하는 것이 유용할 것으로 판단된다.

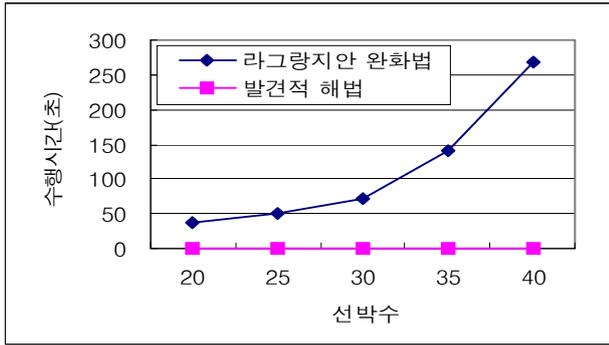


Fig. 7 The Computation time of the Park and Kim(2003) and the heuristic method

Table 6 The number of vessels of container terminals

구 분	선석 길이	선박 수(주)	선박 수(월)
자성대	1,447 m	47	160
신선대	1,500 m	60	248
감만부두	700 m	40	167
신항(1단계)	2,000 m	57	213
신항(2-1단계)	1,100 m	43	195

5. 결 론

본 연구에서는 크레인 투입을 고려한 선석계획 문제를 다루었다. 제시된 문제에 대하여 현장의 다양한 제약을 고려한 혼합정수모델과 발견적 해법을 제시하였다. 기존 연구에서 수행한 실험결과와 비교실험을 수행하였으며, 실험 수행결과 빠른 시간 안에 선석계획을 제공함을 알 수 있었다. 실제 컨테이너터미널에서는 선석계획을 수립하는 경우에 전문가가 상당한 시간과 노력을 기울여 수립하게 되며, 선석계획 수립 후에는 지속적으로 수정 보완해 가는 작업을 하고 있다. 본 연구에서 개발된 발견적 해법은 짧은 시간 안에 선석계획을 제공하므로 각 비용요소를 현실적으로 조정하여 장기적인 선석계획을 빠르게 수립한 다음 라그랑지안 완화법과 같은 정밀한 선석계획 알고리즘을 사용하거나 전문가의 보완작업을 하나간다면 현장에서 적용 가능한 유용한 알고리즘이 될 것이라 생각 된다.

후 기

이 논문은 2011년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구임 (지역거점연구단육성사업/차세대물류IT기술연구사업단)

참 고 문 헌

[1] Brown, G. G., Lawphongpanich, S., and Thurman, K. P.(1994), "Optimizing Ship Berthing," Naval Research Logistics 41, pp. 1-15.

[2] Daganzo, C. F.(1990), "The Crane Scheduling Problem," Transportation Research, Vol. 24B, No. 3, pp. 159-172.

[3] Geoffrion, A. M.(1974), "Lagrangian Relaxation for Integer Programming," Mathematical Programming Study 2, pp. 82-114.

[4] Held, M., Wolfe, P., and Crowder, H. P.(1974), "Validation of Sub-gradient Optimization," Mathematical Programming 6, pp. 62-88.

[5] Imai, A., Nishimura, E., and Papadimitriou, S.(2001), "The Dynamic Berth Allocation Problem for a Container Port," Transportation Research Part B 35, pp.401-417.

[6] Lai, K. K. and Shih, K.(1992), "A Study of Container Berth Allocation," Journal of Advanced Transportation 26 (1), pp. 45-60.

[7] Li, C-L., Cai, X., and Lee, C-Y.(1998), "Scheduling with Multiple-Job-on-One-Processor Pattern," IIE Transactions 30, pp. 433-445.

[8] Lim, A.(1998), "The Berth Planning Problem," Operation Research Letters 22, pp. 105-110.

[9] Meisel, F. and Bierwirth, C.(2006), "Integration of Berth Allocation and Crane Assignment to Improve the Resource Utilization at a Seaport Container Terminal. In: Haasis, H-D., H.-D., Kopker, H., Schonberger, J.(Eds.), Operations Research Proceedings 2005. Springer, Berlin, pp.105-110.

[10] Meisel, F. and Bierwirth, C.(2009), "Heuristics for the Integration of Crane Productivity in the Berth Allocation Problems," Transportation Research Part E 45, pp. 196-209.

[11] Murty, K. G.(1992), Network Programming, Prentice Hall, United States.

[12] Nishimura, E., Imai, A., and Papadimitriou, S.(2001), "Berth Allocation Planning in the Public Berth System by Genetic Algorithms," European Journal of Operational Research 131, pp. 282-292.

[13] Park, Y.-M. and Kim, K. H.(2003), "A Scheduling Method for Berth and Quay Cranes," OR Spectrum, Vol. 25, No. 1, pp. 1-23.

[14] Peterkofsky, R. I. and Daganzo, C. F.(1989), "A Branch and Bound Solution Method for the Crane Scheduling Problem," Transportation Research, Vol. 23B, No. 3, pp. 159-175.

원고접수일 : 2010년 10월 7일
 심사완료일 : 2010년 12월 20일
 원고채택일 : 2011년 1월 13일