

계약만족 탐색과 휴리스틱 교정기법을 이용한 최적 선석 및 크레인 일정계획

류광렬** · 김갑환*** · 백영수** · 황준하** · 박영만***

Optimal Berth and Crane Scheduling Using Constraint Satisfaction Search and Heuristic Repair

Kwang Ryel Ryu** · Kap Hwan Kim*** · Youngsoo Baik**

Junha Hwang** · Young-Man Park***

요 약

컨테이너 터미널에서의 선석 및 크레인 일정계획은 일정 기간 동안 입항 예정인 선박들을 대상으로 선석을 배정하고 접안 시기와 기간을 결정하며, 또한 각 선박별로 컨테이너를 싣고 내릴 크레인을 배정하고 각 크레인의 서비스 시작과 완료시간까지 지정하는 전 과정을 포함한다. 이 문제는 기본적으로 서로 시간적 공간적으로 복잡한 제약 관계에 있는 여러 선석들과 크레인들을 충돌 없이 각 선박에 할당하여야 하는 제약조건 만족 문제인 동시에, 각 선박의 희망 입출항 시간을 최대한 존중하면서 터미널의 운영비용을 최소화할 수 있는 계획안을 도출해야 하는 최적화 문제이기도 하다. 본 논문에서는 이 문제의 해결을 위해 계약만족 탐색기법을 동원하여 먼저 제약조건을 만족하는 해를 찾은 뒤, 제약조건을 만족하는 범위 내에서 보다 최적의 해를 유도해 내기 위해 휴리스틱 교정 기법을 계약만족 탐색기법의 틀 내에서 반복적으로 적용하는 방안을 제시하고 있다. 실제 부산 신선대 컨테이너 터미널의 데이터를 이용한 실험 결과 현장 전문가가 만족할 만한 수준의 일정 계획을 신속하게 수립할 수 있음을 확인하였다.

Keywords: 선석계획, 크레인 일정계획, 계약만족 탐색기법, 휴리스틱 교정기법

Abstract

The berth and crane scheduling problem in a container terminal encompasses the whole process of assigning berth to each ship, determining the duration of berthing, assigning container cranes to each ship, and determining the specific start and end time of each crane service, for all the ships scheduled to be arriving at the terminal during a certain scheduling horizon. This problem is basically a constraint satisfaction problem in which cranes and berths should be assigned in such a way that all the spatial and temporal constraints are satisfied without any interference. However, it is also an optimization problem because the requested arrival and departure time should be met for as many of the scheduled ships as possible, while the operation cost of the terminal should be minimized. In this paper, we present an effective and efficient approach to solving this type of problem, which combines constraint satisfaction search and heuristic repair. We first employ a constraint satisfaction search to find a feasible solution. Then, the feasible solution is modified to a more optimal one by iteratively applying our heuristic repair operations within the framework of constraint satisfaction search. Experimental results with a real data from Pusan East Container Terminal showed that our approach can derive a schedule of satisfactory quality in a very short time.

Keywords: berth scheduling, crane scheduling, constraint satisfaction search, heuristic repair

* 본 연구는 (주)토달소프트뱅크와 한국과학재단 지정 지능형통합항만관리연구센터(CIIPMS)의 지원에 의한 것입니다.

** 부산대학교 공과대학 컴퓨터공학과

*** 부산대학교 공과대학 산업공학과

1. 서 론

컨테이너 터미널에서의 선석 및 크레인 일정 계획이란 일정 기간 동안 입항 예정인 선박들을 대상으로 선석을 배정하고 선사의 요청에 따라 접안 시기와 기간을 결정하며, 또한 각 선박별로 컨테이너를 싣고 내릴 크레인을 배정하되 각 크레인의 서비스 시작과 완료시간까지 지정하는 전 과정을 말한다. 터미널 이용 선사들이 대상 기간 내에 입항 예정인 선박들의 입출항 예정 시간 및 싣고 내릴 컨테이너 내역을 터미널에 통보하면, 터미널 운영자는 선박별 작업 내역을 감안하여 선박의 구체적 접안 위치와 실제 입출항 시간을 결정해 알려 주어야 한다. 선박의 접안 위치 지정은 싣고 내릴 대상 컨테이너들의 장치장과 가능한 가까운 곳으로 하는 것이 좋고, 접안 기간은 작업량에 합당한 적정 수의 컨테이너 크레인(Container Crane: CC)을 각 선박에 배정해 줌으로써 선사의 희망 입출항 시간을 지킬 수 있도록 함이 좋다. 그러나, 주어진 계획기간 내에 여러 선박들이 있을 경우 선박들 상호간의 간섭현상 때문에 모든 선박의 요구조건을 다 만족시키는 계획을 도출해 내는 것이 불가능한 경우가 많다. 간섭현상은 어떠한 두 선박이라도 공간적으로나 시간적으로 조금이라도 겹치면서 접안할 수 없기 때문에 발생한다. 한 선박의 접안 위치 및 접안 기간의 변경은 시공간적으로 인접한 이웃 선박들에 간섭을 일으켜 그들의 시공간적 위치 변경을 초래하게 되고 이런 현상이 결국 전 선박으로 파급되기도 한다. 또한, 각 CC는 그 이동 범위가 한정되어 있기 때문에 선박의 접안 위치가 바뀔 경우 배정 가능한 CC가 달라지게 되며 그에 따라 소요 작업시간이 달라질 경우 선박의 접안 기간도 영향을 받게 된다. 선

석 및 크레인 일정계획은 이와 같이 여러 가지 제약조건들이 서로 복잡하게 영향을 주고 받는 고난도의 문제다.

이러한 종류의 문제는 소위 제약조건 만족 문제 (constraint satisfaction problem: CSP)의 형태로 정형화될 수 있고, 그런 경우 제약조건을 반영하여 탐색 공간을 줄여 나감으로써 해를 효율적으로 찾아 주는 제약만족 탐색(constraint satisfaction search) 기법을 활용하여 해결할 수 있다. 그러나, 본 논문의 선석 및 크레인 일정계획 문제에는 선석이나 CC 배정과 관련한 여러 변수들 사이에 절대적으로 지켜져야 할 시간 공간적 제약들이 존재한다는 측면 외에도, 터미널 운영 효율에 유리하도록 접안 위치를 선정해야 한다면 선박 전체의 부하를 균등화해야 한다는 등 최적화적 요소가 또한 포함되어 있다. 그런데, 제약만족 탐색기법은 제약조건을 만족하는 해를 효율적으로 찾아 줄 뿐, 최적해를 찾아 주지는 못한다는 문제가 있다. 그렇다고 이 문제를 보통의 최적화 탐색 기법만으로 해결하고자 할 경우에는 제약조건을 위배하지 않는 해를 찾는 것 자체가 어려워지게 되어 탐색이 효율적이지 못하게 된다. 흔히, 이러한 종류의 문제는 제약조건 만족 및 최적화 문제(constraint satisfaction and optimization problem: CSOP)라 불리며 (Baratak, 1999), 일반적인 CSP나 최적화 문제와는 다른 방식의 해결 방안을 필요로 한다.

본 논문에서는 최적의 선석 및 크레인 일정계획 수립을 위해 제약만족 탐색기법의 틀 속에서 휴리스틱 교정기법을 효과적으로 결합하는 방안을 제시한다. 이 방법에서는 먼저 제약만족 탐색기법을 이용하여 초기해를 구한 후, 휴리스틱 교정기법을 이용하여 해의 질을 개선시키는 방향으로 제약만족 탐색을 유도하면서 재 실행하는 과정을 최적화 수준이 만족스러울 때까지 반

복한다. 제약만족 탐색기법에서는 문제에 등장하는 변수들 및 각 변수들이 취할 수 있는 변수값들에 대한 탐색의 순서가 탐색의 효율을 결정적으로 좌우하는 경우가 많다. 본 논문에서는 터미널에서 고려하는 선박의 우선순위 및 각 선박별 최적 접안 위치를 반영하여 변수의 순서와 변수값의 순서를 지정하는 휴리스틱을 사용함으로써 제약만족 탐색의 효율을 획기적으로 개선할 수 있음을 보여준다. 해의 질을 개선하기 위한 휴리스틱 교정기법에서는 일부 변수에 대해서만 변수값의 순서를 재 조정한 후 제약만족 탐색을 재 수행하게 되는데, 이 경우 탐색의 소요시간이 매우 짧기 때문에 이런 과정을 해의 질이 만족스러울 때까지 반복적으로 수행하더라도 계산 부담이 크지 않게 된다. 이러한 반복적 교정 기법은 해상 운송의 특성상 일정계획이 수시로 변경 수립되어야 한다는 요구조건에도 쉽게 부응할 수 있는 장점도 지닌다. 휴리스틱 교정기법 자체가 원래 계획 내용의 일부 변경을 시도하는 방식으로 이루어지기 때문이다.

제약만족 탐색기법의 구현에는 상용 도구인 ILOG Solver를 이용하였으며 휴리스틱 교정기법은 직접 구현하였다. 실제 부산 신선대 컨테이너 터미널의 선석 계획 자료를 이용한 실험 결과 현장 전문가가 만족할 만한 수준의 일정계획을 신속하게 수립할 수 있음을 확인하였다.

이하의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 선석 및 크레인 일정계획 문제를 보다 상세히 소개하고 관련 연구를 검토한다. 3장에서는 제약만족 탐색기법을 설명하고 본 논문에서 제안하는 변수와 변수값 순서 지정 휴리스틱을 제시한다. 4장에서는 휴리스틱 교정기법에 관해서 설명하고, 5장에서는 실험결과를 분석한다. 마지막 6장에서는 결론 및 향후 연구과제를 기술한다.

2. 선석 및 크레인 일정계획

2.1 대상문제의 개요

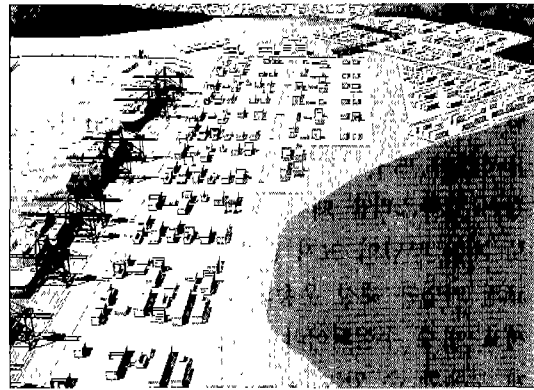
선석계획은 월간 선석계획과 주간 및 일일 선석계획으로 나누어진다. 월간 선석계획은 선사와 항만 터미널의 협의 계약인 장기 Calling Schedule과 선사가 보내온 월간 입항계획서를 바탕으로 작성한다. 월간 선석계획에서는 미래의 불확실성을 수용한 상태에서 일단 선석을 가 배정해 두되 보다 정확한 입항정보가 들어올 때마다 기존 계획을 수정함으로써 계획을 단계적으로 확정해 간다. 주간 및 일일 선석계획은 매일매일 접수되는 정보를 수시로 반영해서 실제로 선석을 배정하는 계획이다. 주간 선석계획은 월간 선석계획에 제시된 선석 운영계획 및 각 선박별 예상 처리 화물량에 근거하여 CC를 할당하고 선석을 배정한다. 일일 선석계획에서는 보다 정확한 화물 처리작업 소요시간의 추정치에 근거하여 필요 시 CC를 다시 할당하고 선석 배정을 확정한다. 선석 배정시 각 선박은 터미널 운영 효율상 유리하도록 취급 컨테이너들이 장치되어 있는 곳과 가까운 위치에 접안시키는 것이 좋고, 또한 작업 부하의 균등화를 위해 안벽 전체에 고르게 분포시키는 것이 좋다. 물론, 선석 배정은 계획 기간 내의 모든 선박들에 대해 서로 접안 위치와 접안 기간에 겹치는 부분이 없도록 되어야 한다. 접안계획 대상 선박이 많을 경우에는 고객 선사의 중요도에 따라 각 선박에 우선 순위를 부여하여 선석을 배정한다. 예를 들면, 정기선은 부정기선보다 우선순위가 높다.

크레인 일정계획은 각 선박에 대해 선석계획시 부여 받은 접안 위치에서 입항예정시간부터 시작하여 출항예정시간 전까지 모든 서비스를

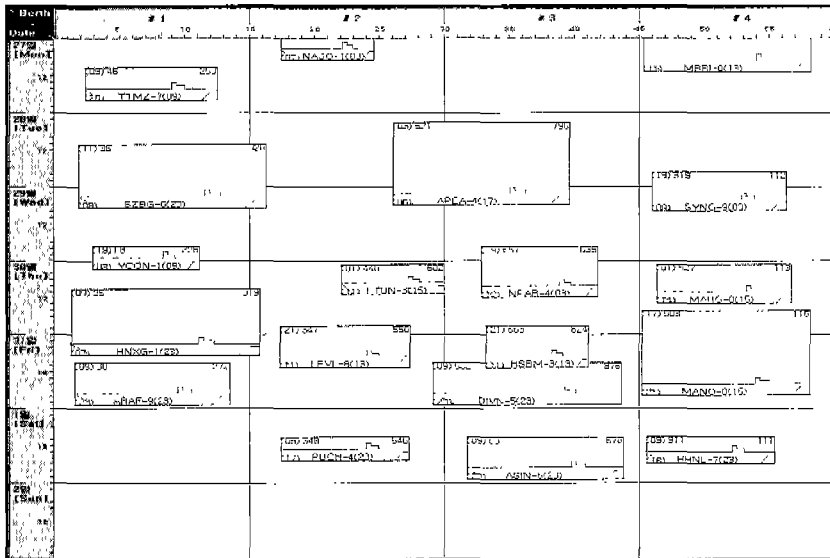
마칠 수 있도록 CC를 할당하는 계획을 말한다. CC들은 [그림 1]에서 보는 바와 같이 전체 선석에 걸쳐 안벽과 평행하게 설치된 궤도 상에서 움직이면서 선박에 대한 서비스를 수행한다. 각 CC는 한정된 범위 내에서 이동이 가능하므로 선박의 접안 위치에 따라 배정 가능한 CC가 달라진다. 한 선박에 대해서는 대개 2~3기의 CC를 배정하여 각 CC가 선박의 특정 구역을 담당하게 한다. CC의 배정 역시 서로 다른 CC들이 시간 공간적으로 서로 겹치는 일이 없도록 되어야 한다. 이미 언급한 바와 같이 CC의 배정에 따라 선박의 접안기간이 달라질 수 있고 그럴 경우 다른 선박의 선석 배정에도 영향을 주기 때문에, 선석계획과 크레인계획은 별도로 아니라 동시에 이루어져야 하는 것이다.

본 논문에서 구현한 선석 및 크레인 일정계획 시스템은 부산 신선대 컨테이너 터미널(PECT: Pusan East Container Terminal)을 대상으로 실험되었다. [그림 1]은 신선대 컨테이너 터미널의

조감도이며, [그림 2]는 전문가가 작성한 주간 선석 및 크레인 일정계획의 예이다. [그림 2]에서 가로축은 안벽에 해당하고 세로축은 시간을 표시한다. 전체 안벽이 동일 쪽의 네 개 선석으로 나뉘어 있는 것처럼 동일 간격의 세로 구분선이 그림에 표시되어 있으나, 실제로 그렇게 엄격히 선석이 구분되지는 않는다. 각 사각형은 해당 선박이 가로축 길이 만큼의 안벽을 세로축



(그림 1) 실험 대상 터미널의 조감도



(그림 2) 전문가가 작성한 선석계획의 예

만큼의 기간 동안 점유함을 표시하고 있다. 따라서, 어떠한 사각형도 서로 겹치지 않아야 시행 가능한 계획이 된다. 그림에서 3번 선석에 접안기간이 겹치는 선박이 있는 이유는 이 계획이 아직 불확실한 정보에 바탕을 두고 있어서 최종적으로 확정된 것이 아니기 때문이다. 크레인 일정계획의 결과도 역시 선석계획처럼 사각형 형태로 표시할 수 있으나, 현장에서는 그보다 전체계획을 한꺼번에 보는 것을 선호하므로 각 선박에 대응하는 사각형 내에 배정된 CC 번호와 각 CC의 서비스 시작 및 종료 시간을 기록하고 있다.

2.2 관련 연구

선석과 크레인 일정계획을 동시에 수립하는 방안에 관해서는 국내외적으로 현재까지 연구된 사례가 거의 없으며, 대부분 선석 및 크레인 일정계획을 각기 독립적인 문제로 다루고 있다. 그리고 이들 연구에서는 주로 수리모형을 수립한 후 수리계획법이나 휴리스틱 알고리즘등을 이용해서 수리모형의 해를 구하는 방식을 취해왔다.

이흥걸 등(이, 1995)은 선석배정을 위한 세가지 수학적 모델인 총재항시간 최소화 모델, 계류시간 최소화 모델 그리고 최종작업종료시간 최소화 모델을 제시했다. 금중수(금, 1997)는 선박의 총재항시간을 최소화하는 선석배정모델을 제시한 다음, 선박의 도착시간 및 계류시간에 관한 정보가 정확하지 않다고 판단해서 이 모델을 퍼지 선석배정모델로 확장하고 이를 풀기 위한 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다. 김홍배 등 (김, 1998)은 컨테이너 크레인 할당을 위한 수리모형을 수립하고 유전 알고리즘을 이용한 해법을 제시하였다. 윤철영 등(윤, 1995)은 본 논문의 실험 대상인 신선대 컨테이너 터미널의 선석 및 크레인

운영을 최적화하는 모델을 소개하였다. 이 연구에서는 선석당 크레인수를 2기에서 3기로 증가 시킴으로써 선석의 효율을 높일 수 있음을 보였다. 하지만 수학적 모델에 기반을 둔 접근방법들은 문제의 규모가 커짐에 따라 계산량이 기하급수적으로 늘어나므로 현실적 규모의 문제를 풀기가 어렵다는 단점이 있다.

Lai 등(Lai, 1992)은 선석을 각 선박에 할당하는 이산적인 것으로 생각하여 간단한 여러 가지 선석할당 전략을 제시하였다. Lim (Lim, 1998)은 선석을 이산적이 아니라 연속적인 직선인 것으로 생각하여 임의의 시점에서 사용하는 선석 구간의 총길이를 최소화하는 각 선박의 접안 위치를 결정하는 문제를 다루었다. Li (Li, 1998)등은 선석계획 문제를 단일서버(선석)에서 여러 개의 작업(선박)을 동시에 수행가능한 경우의 일정계획문제로 생각하여 First-Fit-Decreasing (FFD) 알고리즘에 기반한 휴리스틱을 제시하였다. Daganzo (Daganzo, 1990)는 각 접안 대상 선박별 베이별로 각 시간대에 할당할 CC의 수를 결정하는 휴리스틱 기법을 제시하였다. Peterkofsky (Peterkofsky, 1989)등은 여러 척의 선박이 대기하고 있는 상태에서 여러 기의 크레인을 이용하여 총 접안시간의 가중합을 최소화하기 위하여 선박의 작업순서와 크레인의 할당 수를 결정하는 문제를 다루었다.

본 논문에서 제시하는 제약만족 탐색기법은 변수와 변수값의 순서지정 휴리스틱을 사용함으로써 그 탐색속도가 획기적으로 개선되었고, 또한 휴리스틱 교정기법 역시 계산 부담이 거의 없는 방식을 취하고 있다. 그 결과, 현실적 규모의 문제에 대해 선석과 크레인의 동시 일정계획을 수립하더라도 만족스러운 수준의 해를 신속히 찾을 수 있다.

현재 주요 선진 외국항만의 실태를 살펴보면, 싱가포르항은 지식베이스를 바탕으로 한 전문가

시스템을 도입하고 있고 로테르담항은 컴퓨터를 이용한 반자동 수준의 선석계획 시스템을 도입하고 있으나 구체적인 내용은 알려져 있지 않다.

3. 제약만족 탐색기법

CSP는 변수들의 집합과 도메인(domain)들의 집합 및 변수들간의 제약조건으로 구성되는데 (Tsang 1996), 도메인이란 각 변수가 취할 수 있는 값들의 집합을 말한다. CSP의 해를 구하는 과정은 모든 변수들에 대해 그들 간에 주어진 제약조건을 모두 만족하도록 각 도메인으로부터 적절한 변수값을 지정하기 위한 탐색 과정이 된다. 이 과정은 주로 depth-first 탐색방식으로 이루어진다. 즉, 소정의 순서에 따라 각 변수에 해당 도메인에서 값을 찾아 할당해 나가되, 매 할당 시 제약조건 만족 여부를 검사하여 제약조건을 만족하면 다음 변수로 넘어가서 변수값 할당을 계속하고 그렇지 못하면 그 변수의 도메인에서 다음 값을 할당한다. 만약 도메인 내의 모든 값들이 전부 제약조건을 위배한다면, 직전의 변수로 되돌아가(backtracking) 그 변수의 지정 값을 다음 값으로 바꾼다. 직전 변수에서도 제약조건을 만족하는 값을 찾을 수 없다면 되돌아가기(backtracking)를 계속해야 하고, 그렇지 않다면 값을 할당한 후 순서상의 다음 변수로 넘어가서 과정을 계속한다. 이런 방식으로 마지막 변수까지 값 할당에 성공하면 해를 찾은 것이 된다.

그러나 이렇게 탐색공간 전체를 검색하는 depth-first 탐색 방식만으로는 탐색공간의 규모가 클 경우 해를 찾기 어렵다. 따라서, 보통 제약만족 탐색기법에서는 제약조건을 이용하여 탐색공간을 줄이는 방안으로서, 전향검사(forward checking)를 통한 도메인 축소(domain reduction) 기법을 활용

하고 있다. 이 기법에 따르면 매 변수에 값이 할당될 때마다 아직 값이 할당되지 않은 나머지 모든 변수의 도메인을 조사하여 이미 값이 할당된 변수들이 그 값들을 유지할 경우 이들과 제약조건 상 모순되는 값들을 파악하여 미 할당 변수의 도메인으로부터 미리 제거함으로써 예측 가능한 backtracking을 사전에 방지하게 된다. 이와 같은 제약조건의 전파를 통한 도메인의 축소는 제약조건에 관한 추론 기능을 강화할수록 그 효과가 더욱 커지게 되지만 추론 자체가 필요로 하는 추가의 계산 부담도 따라서 커지므로 주의 를 요한다 (Tsang, 1996; Baratak, 1999).

제약만족 탐색기법의 효율을 좌우하는 또 다른 요소로는 변수의 탐색 순서 및 각 도메인으로부터 선택하는 값의 순서를 들 수 있다. 대상 문제를 잘 분석하여 이들 순서를 적절히 가져가면 backtracking이 줄어들어서 그렇지 못한 경우 보다 훨씬 빨리 해를 찾을 수 있게 된다. 본 논문에서는 선석 및 크레인 일정계획 문제의 특성을 반영한 변수 순서 및 변수값 순서 지정 휴리스틱을 사용하여 탐색 효율을 획기적으로 개선하는 방안을 제시하고 있다.

3.1 변수와 도메인

본 문제에서는 각 선박의 입항예정시간, 출항 예정시간, 각 선박의 접안위치, 각 CC의 각 선박에 대한 서비스 여부, 각 CC의 서비스 시작 시간, 완료시간이 변수들이다. 이들 변수의 도메인들은 모두 정수의 유한 집합으로 이루어진다. 선박의 입출항 예정시간과 CC 서비스의 시작 및 완료시간에 관한 변수의 도메인은 전체 일정계획 대상기간의 1시간 단위 간격 값들의 집합이다. 선박의 접안위치 즉 선수의 위치를 나타내는 변수는 안벽의 총 길이에 대한 1m 간격의 1차원

좌표값들을 도메인으로 가진다. 예를 들어, 만약 선석의 길이가 1200m라면 이 변수의 도메인은 0부터 1200까지의 정수값의 집합이 된다. 끝으로, 각 선박에 대한 각 CC의 서비스 여부는 0과 1로 표시된다.

3.2 제약조건

선석과 관련해서는, CC의 이동 가능 범위 때문에 안벽의 시작과 끝 부분에 너무 가깝게 선박이 접안할 수 없다는 제약이 있고, 선박들 상호간에는 시공간적으로 적정한 안전 간격을 지키도록 되어있다. 각 선박의 접안시간과 출항시간은 CC의 서비스 시작 및 완료 시간과 제약관계에 있다. 즉, 한 선박에 배정된 CC들은 모두 그 서비스 시작시간이 그 선박의 접안 이후라야 하고, 완료시간은 출항 이전이야 한다. 각 선박의 접안시간과 출항시간은 소정의 범위 내에서만 변경될 수 있다. 선박의 수가 일시적으로 터미널의 처리 능력을 초과할 경우에는 접안시간과 출항시간의 변화 범위를 더욱 넓여 주어야 할 것이며, 그 범위가 선박의 우선 순위에 따라 달라지도록 할 수도 있을 것이다. 본 논문에서 실험 대상으로 한 신선대 터미널의 경우 접안시간은 선사의 희망 입항 시간(ETA: Estimated Time of Arrival)을 기준으로 ± 5 시간의 범위 내에서만 변경이 가능하도록 하였고, 출항시간은 CC의 서비스 종료시간 이후가 되도록 하되 선사의 출항 요청 시간(ETD: Estimated Time of Departure) 보다 늦어질 수는 없도록 하였다.

3.3 변수 및 변수값 순서지정 휴리스틱

임의의 주어진 문제에 대하여 변수 및 변수값의 탐색 순서를 어떻게 하는 것이 탐색의 양을

줄이는데 가장 효과적인지 판단하기란 쉽지 않다. 대개는 backtracking을 최소화할 수 있을 것으로 기대되는 휴리스틱을 동원하여 변수 및 변수값의 순서를 지정하고 있다 (Russell, 1995; Komar, 1992).

선석계획 문제에서 선박의 접안위치를 나타내는 변수들에 대해 아무런 탐색 순서를 두지 않는다면, 예를 들어 ETA가 뒤인 선박이 먼저 선석을 배정 받을 경우 ETA가 앞서는 선박이 접안할 위치값을 찾지 못해 backtracking을 해야 하는 상황이 발생할 수 있다. 따라서, ETA의 순서를 접안위치 변수의 순서에 반영하는 것은 매우 효과적인 변수 순서지정 휴리스틱이 된다. 본 논문의 계획시스템에서는 정기선을 부정기선에 앞서도록 배치 하되 ETA 순을 따르도록 변수순서를 지정하였다. 이는 정기선들에 대한 서비스를 보다 중요하게 취급하여 선석 배정 시 그들에게 우선권을 부여해 주어야 한다는 터미널 운영의 요구조건을 만족시키기 위한 것이다.

본 논문의 계획시스템에서 변수값 순서지정 휴리스틱은 접안위치에 대한 변수들의 도메인을 대상으로 적용된다. 본 문제의 최적화적 요소와 관련하여 2.1절에서 설명했듯이 터미널 운영 효율을 높이기 위해 각 선박은 선호되는 위치에 가능한 가까이 접안 하는 것이 좋다. 선박별 선호 접안위치는 정기선의 경우 선사와의 합의하에 미리 지정되어 있고, 부정기선의 경우에는 장치장의 위치와 과거 운영 경험을 반영하여 지정된다. 예를 들어 어떤 선박의 선호 접안위치가 안벽 좌표값 500인 경우, 이 선박의 접안위치 변수의 도메인은 (500, 501, 499, 502, 498, ...)의 순으로 재정렬된다. 이 변수값 순서지정 휴리스틱은 실제로 접안위치의 최적화에만 도움을 주는 것이 아니라, 계약만족 탐색의 효율 향상에도 기여한다. 선박별 선호 접안위치 지정은 터미널의

운영 경험이 반영되어 이루어진 것으로서, 선호 위치에 가까운 곳부터 차례로 변수값 지정을 시도할 경우 선석배정 실패에 따른 backtracking 횟수도 상당히 줄어드는 효과가 있기 때문이다.

4. 휴리스틱 교정기법

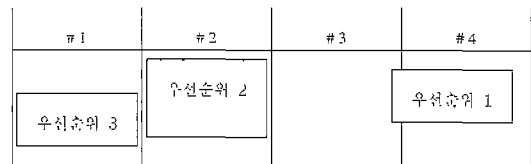
계약만족 탐색기법을 적용한 결과로 얻게 되는 해는 일단 주어진 제약조건을 모두 만족한다. 더욱이, 3.3절에서 설명한 바처럼 변수 및 변수 값 순서지정 휴리스틱을 사용할 경우 선박의 접안우선순위도 고려되고 선박의 접안위치들도 가능한 최적 위치에 가깝게 결정된다. 그러나, 우선순위가 낮은 선박의 경우 불필요하게 선호 위치에서 멀리 떨어져 접안하는 경우가 발생하고, 안벽의 전체적 부하평준화도 이루어지기 어렵다. 휴리스틱 교정기법은 보다 최적에 가까운 해를 구하기 위해 주어진 해를 분석한 결과를 바탕으로 일부 변수들에 대해 도메인 내의 변수값의 순서를 재 조정한 후 다시 계약만족 탐색 과정을 호출하는 방식을 취하고 있다. 이 기법에서는 대부분의 변수들이 이전 해의 변수값을 유지하도록 하면서 일부 변수들의 변화만을 유도하므로 계약만족 탐색 과정을 호출하더라도 탐색의 양이 매우 적어서 신속하게 탐색이 이루어진다. 본 연구에서 구현한 시스템에서의 휴리스틱 교정 과정은 접안위치의 조정, 안벽 부하의 평준화, 선박별 크레인 작업시간 균등화 순으로 최적화를 위해 계약만족 탐색을 반복적으로 호출하는 방식으로 이루어진다.

4.1 접안위치의 조정

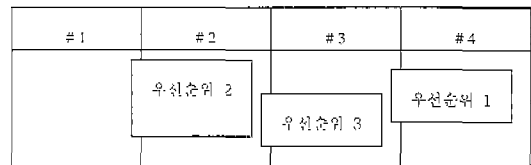
계약만족 탐색 과정에서는 변수 및 변수 값 순서지정 휴리스틱에 따라 우선순위가 높은 선

박들이 먼저 선석을 배정받고 접안위치도 가장 선호되는 좌표값으로 결정된다. 우선순위가 낮은 선박일수록 선호 접안위치를 점유하기 어렵고 경우에 따라서는 우선순위가 높은 선박들에 의해 전혀 다른 선석으로 밀려나기도 한다. [그림 3- (a)]는 우선순위 3인 선박이 선호 선석인 3번 선석을 차지하지 못하고 1번 선석으로 밀려난 상황을 보여주는 예이다. 이 문제는 [그림 3-(b)]에 보인 것처럼 우선순위 2인 선박이 선호 접안위치를 최적위치로부터 약간 양보하게 함으로써 해결될 수 있다. 이 예에서 우선순위 1인 선박이 4번 선석의 우측 끝 부분으로 이동할 수 없는 것은 CC의 이동범위 제약 때문이다.

계약만족 탐색 시에는 우선순위 1인 선박에 이어 우선순위 2인 선박이 접안위치 좌표값을 부여받게 되는데, 변수값 순서지정 휴리스틱대로 가장 선호하는 좌표를 부여받더라도 제약조건이 위배되는 상황이 발생하지 않으므로 그 위치들을 차지하게 된다. 그 다음, 우선순위 3의 선박은 비록 선호 위치가 3번 선석이라도 주위에 이미 배치된 선박 때문에 1번 선석으로 밀려서 위치하게 된 것이다. 이러한 문제는 우선



(a)



(b)

[그림 3] 우선순위가 낮은 선박의 접안위치를 개선하는 예

순위가 높은 선박의 접안위치 변수값 순서를 바꾸어 줌으로써 해결될 수 있다.

접안위치의 조정과정은 먼저 제약만족 탐색 과정에서 찾은 해로부터 접안위치가 이동되면 좋을 선박을 찾는 것으로 시작한다. 이동 후보 선박은 부정기선하면서 선석을 일정범위 이상 벗어난 선박이다. 이동 후보 선박이 선택되면 그 선박이 선석을 벗어나게 한 원인을 제공한 선박을 찾는다. 이동 후보 선박을 선석 밖으로 밀어냈던 선박에 대해 현재의 접안 선석에서 크게 벗어나지 않는 범위 내에서 위치조정을 해 줌으로써 이동 후보 선박이 선호 접안위치로 접근할 수 있는지 파악한다. 그 파악 결과에 따라 두 선박의 접안위치 변수값의 순서를 변경해 준다. [그림 3]을 예로 들어 본다면, 우선순위 2인 선박의 접안위치 변수의 도메인은 최초 변수값 순서지정 휴리스틱에 의해 (350, 351, 349, 352, 348, . . .)과 같이 배열되어 있었던 것이 접안위치 조정을 위해 (300, 301, 299, 302, 298, . . .)로 변경되는 것이다. 파악된 모든 이동 후보 선박에 대해 접안위치 변수값 순서지정을 변경한 후 그 변경된 순서를 가지고 제약만족 탐색 과정을 다시 호출한다. 이 때 전혀 이동이 필요 없다고 판단되는 선박들의 접안위치 변수들에 대해서는 변수값의 순서지정을 변경하지 않고 그대로 둔다.

이 방법에 의하면 제약만족 탐색의 재 호출 결과 이동 후보 선박이 실제로 원하는 위치로 이동하지 못하는 경우도 생긴다. 각 이동 후보 선박의 이동 가능성은 그 선박 전 후방의 인접 선박의 상황을 국지적으로만 분석함으로써 판단되는데, 이동 후보 선박이 여럿일 경우 그러한 국지적 판단 결과에 따른 이동이 전체적으로는 제약조건에 위배되는 것일 수가 있기 때문이다. 그러나, 제약만족 탐색을 다시 이용하지 않고

선박들의 접안위치를 직접적으로 휴리스틱하게 조정하기는 매우 어렵다. 선박의 이동 가능성을 국지적 분석에 의존하지 않고 전역적 분석을 통하여 판단할 수 있다면 위치 이동을 실패 없이 수행할 수 있겠지만 그것은 원래 문제의 복잡도와 같은 수준의 난이도를 가지므로 의미가 없다. 그렇다고 국지적 분석만으로 선박의 이동을 시도할 경우 그 영향이 최악의 경우 계획기간 내의 전 선박으로 파급될 수가 있으므로 어떤 형태이든 별도의 탐색과정을 거칠 수 밖에 없다. 더욱이, 이동 과정에서 해당 선박의 크레인 일정계획 또한 바뀌어야 할 경우가 많으므로 이들 모두를 처리해 주는 탐색을 수행하기 위해서는 상당히 복잡한 알고리즘이 요구된다.

변수값 순서지정 변경 후 제약만족 탐색을 재 호출하는 방법은 매우 간단하면서도 이러한 문제들을 모두 해결해 주는 대단히 효과적인 휴리스틱 교정기법이다. 또한, 대부분의 변수들에 변화를 주지 않으면서 일부 변수들에 대해서만 변경된 순서로 탐색하게 하므로 탐색의 부담도 극히 적다. 본 장의 나머지 절들에서 설명하는 기법들은 모두 이상 설명한 바와 근본적으로 그 틀을 같이 하는 휴리스틱 교정기법이라 할 수 있다.

4.2 안벽 부하의 평준화

안벽의 부하 평준화는 안벽 전체적으로 CC 작업의 부하를 대략적으로 평준화하기 위해 과도하게 뽀비는 선석으로부터 그렇지 않은 쪽으로 선박들의 접안위치를 옮기는 방법으로 이루어진다. 먼저 주어진 해를 분석해서 선석별로 계획기간 내에 접안해 있는 선박들의 계류시간(접안에서 출항까지의 시간)의 총합을 구한다. 계류시간의 총합이 가장 높은 선석부터 조사하여, 접안하고 있는 부정기선들 중 선석을 벗어나 있는

선박들을 우선적으로 이동 후보 선박으로 선정한다. 선정된 이동 후보 선박의 선호 접안위치를 부하가 낮은 선석으로 옮기는데 문제가 없는지, 또한 옮길 경우 부하의 분포가 개선되는지 확인한다. 옮기는 것이 좋다고 판단되면 위치 이동이 가능하도록 해당 선박의 접안위치 변수값 순서를 변경한다. 이런 방식으로 모든 이동 후보 선박들에 대해 접안위치 변수값 순서를 변경하고 난 후 제약만족 탐색 과정을 다시 호출한다.

이상과 같이 안벽 부하 평준화에는 매우 단순한 방법이 사용되고 있다. 부하가 높은 선석으로부터 낮은 쪽으로 어떤 선박을 이동하고자 하더라도 그 선박의 계류 시간대에 선석이 비어있지 않으면 이동시키지 않는다. 이 외에 실제로 매우 정교하게 부하의 평준화를 시도하는 작업은 없다. 안벽 부하의 평준화를 위해 선박의 입출항 시간까지 조정한다든지 선호 접안위치를 지나치게 양보하게 하는 것은 바람직하지 못하기 때문이다. 이 단계에서는 단지 불필요하게 안벽의 부하가 불균형해지는 것만 막아주고 있다.

4.3 선박별 크레인 작업시간 균등화

제약만족 탐색의 결과로 찾은 해에서 선박 하나 하나에 대한 크레인 일정계획의 내용을 보면 대상문제의 주어진 제약조건은 모두 만족하지만 CC들간의 서비스 시간이 부자연스럽게 불균등한 경우를 흔히 보게 된다. 한 선박을 서비스하는 CC들에 대해서는 그 서비스 시작과 완료 시간이 가능한 비슷한 것이 좋다. 즉, 특별한 경우가 아니면 한 선박을 서비스하는 CC들 간에 부하의 불균형이 심한 것은 좋지 않다는 것이다. 물론, 특별히 어느 한 CC가 동시에 인접한 두 선박을 서비스할 경우에는 전적으로 한 선박만 서비스하는 CC들에 비해 그 선박에 대한 서비

스 부하가 현저히 작을 수가 있다.

이 단계는 CC들의 서비스 시간 불균형이 어느 한도 이상인 후보 선박을 찾는 것으로 시작한다. 후보 선박이 정해지면 그 선박을 서비스하는 CC들의 서비스 시간 평균을 구한 뒤 각 CC의 서비스 종료시간을 조정하여 모든 CC들의 서비스 시간이 가능한 한 평균값에 근접하도록 만든다. 물론 이 때의 균등화 과정은 그 선박의 물량을 모두 처리하는데 필요한 시간을 넘거나 모자라지 않는 범위 내에서 이루어져야 한다. 만약 한 CC가 같은 시간대에 접안하고 있는 다른 선박도 서비스한다면 다른 선박의 서비스 시간을 침해하지 않는 범위 내에서 그 CC의 서비스 시간을 조정한다. 여기서 CC의 서비스 시간 조정은 앞에서와 마찬가지로 모두 관련 변수의 변수값 순서를 변경하여 원하는 시간값이 가장 앞서도록 하는 방법으로 이루어진다.

각 선박의 출항시간은 그 선박에 할당된 CC들의 서비스 완료시간 중 가장 늦은 시간보다 더 이후가 되어야 한다. 따라서 한 선박에 대해 서비스하는 CC들의 서비스 시간이 균등화될수록 그 선박의 접안 기간이 단축될 수 있게 된다. 선박 접안 기간의 단축은 선석의 여유율을 높이는 효과를 가져다 주어 터미널 운영을 보다 원활하게 해 줄 뿐 아니라 특히 터미널에 입출항 선박이 많을 때에도 이들을 최대한 수용할 수 있는 계획을 수립할 수 있도록 도움을 준다.

5. 실험 결과

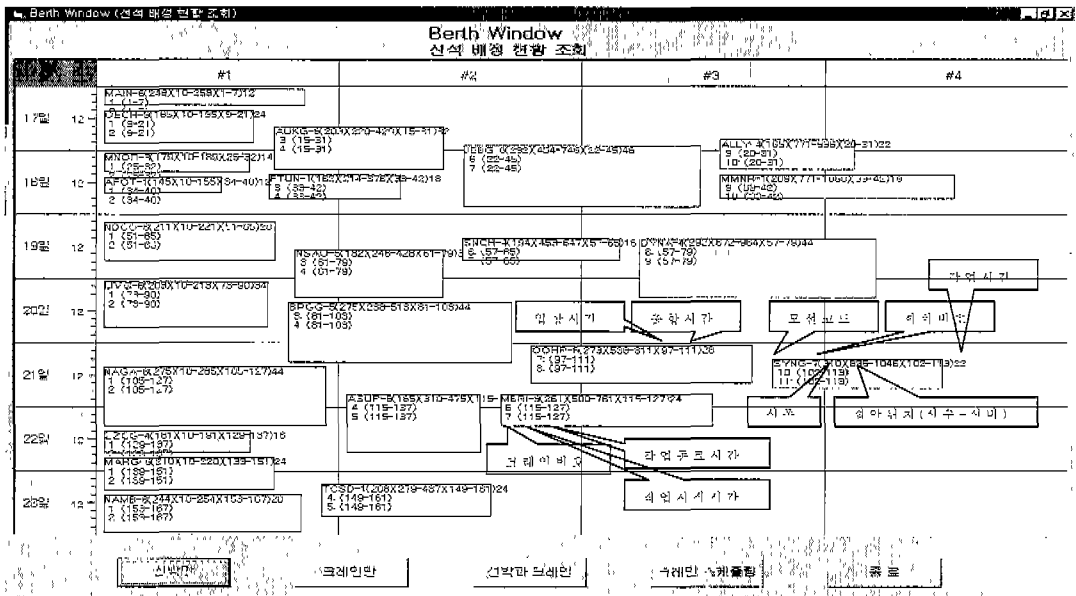
실험 대상으로 사용한 자료는 부산 신선대 컨테이너 터미널의 1999년 11월 17일부터 11월 23일까지의 주간 선석계획 자료로서 총 선박 수는 정기선 15척과 부정기선 9척을 합친 24척이고 CC의 수는 11대이며 이들과 관련된 변수의 수

는 모두 864개이다. 본 논문에서 제시한 방법론의 효과를 확인하기 위해 제약조건만 만족하도록 한 실험 결과를 변수 및 변수 값 순서를 지정하고 휴리스틱 교정기법을 적용한 실험 결과와 비교하였다. 제약만족 탐색 기법은 상용 도구인 ILOG Solver를 이용하여 구현하였고, 휴리스틱 교정기법은 C++ 언어를 사용하여 구현하였으며, 모든 실험은 Pentium II 266Mhz PC 상에서 수행되었다.

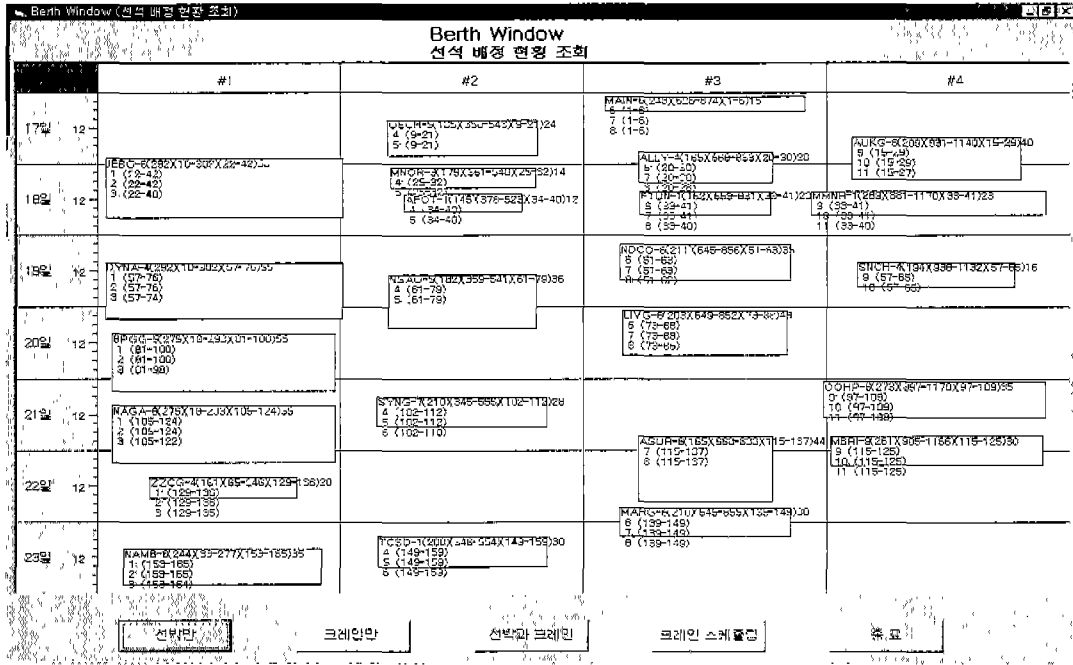
[그림 4]는 제약조건만 만족하도록 한 실험의 결과 화면이다. 각 직사각형의 가로변은 해당 선박이 차지하는 안벽 공간을 나타내며 세로축은 접안시간을 나타낸다. 각 직사각형 내부에는 해당 선박의 호선번호, 길이, 선수위치-선미위치, 입항시간-출항시간, 그리고 그 선박을 서비스하는 CC들의 번호와 각 CC별 서비스 시작 및 완료시간이 기록되어 있다. 이 실험의 결과, 대상 문제의 제약조건을 모두 만족하는 해를 찾기는

했지만 각 선박의 선호 접안위치가 거의 고려되지 않고 안벽의 부하 평준화도 이루어지지 않은 채 선박들이 전체적으로 1번 선석 쪽으로 몰려서 배치되어 있음을 볼 수 있다. 1번 선석으로 몰리게 된 이유는 각 선박의 접안위치 변수의 도메인이 가지고 있는 안벽 좌표값들이 별도로 순서지정을 하지 않을 경우 모두 안벽의 앞에서 뒤 방향의 순서로 정렬되어 있었기 때문이다.

[그림 5]는 제약만족 탐색기법에 변수와 변수 값 순서지정 휴리스틱을 추가하고 또한 최적화를 위한 휴리스틱 교정기법을 결합하여 실험한 결과이다. 우선 [표 1]에서 보듯이 이 실험에서는 탐색 소요시간이 획기적으로 단축되었다. 실제로는 변수 및 변수 값 순서지정 휴리스틱을 추가한 효과로 제약만족 탐색의 소요시간이 120초에서 약 4초로 단축되었고, 휴리스틱 교정을 수행하는데 약 1초가 추가로 소요되었다. 해의 질적인 측면에서 보면, 첫 실험에서 70% 이상의



[그림 4] 제약조건만 만족하도록 한 실험 결과



(그림 5) 변수와 변수값 순서를 지정하고 휴리스틱 교정기법을 적용한 결과

[표 1] 수행 시간 및 해의 질 비교

	수행 시간 (초)	선호선석을 얻긴 선박수		크레인 작업시간이 불균등한 선박수
		정기선	부정기선	
계약조건만 만족하도록 한 결과	120	12	5	16
변수와 변수값 순서를 지정하고 휴리스틱 교정기법을 적용한 결과	5	0	2	0

선박이 선호 선석에서 벗어나 있는 데 비해 이 실험의 결과로는 우선순위가 낮은 부정기선 2척을 제외한 모든 선박의 선호 점안위치가 존중되었다. 또한, 선박의 접안이 전 안벽에 걸쳐 고르게 이루어지고 있고, CC의 작업시간 불균형도 해소되었다. CC 작업시간의 균등화 결과 선박의 접안기간이 짧아져서 동일 선석에 입출항하는 선박간의 시간적 여유율도 일부 개선되었음을 볼 수 있다.

6. 결론 및 향후 과제

선석 및 크레인 일정계획은 복잡한 제약조건을 가진 최적화 문제이다. 본 논문에서는 이러한 문제를 효과적으로 해결하기 위해 제약만족 탐색 기법에 휴리스틱 교정기법을 결합한 해결 방안을 제시 하였다. 제약만족 탐색의 효율 향상을 위해서는 변수 및 변수값에 대한 탐색의 순서가 중요한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 선박의 점안위치와 관련된 변수들 및 그들의 변수값들을 대상으로 순서지정 휴리스틱을 적용하여 탐색시간을 획기적으로 줄일 수 있음을 확인하였다. 또한 변수 및 변수값 순서지정의 부수적 효과로, 선박의 서비스 우선순위와 선박별 선호 점안위치가 대폭 반영되어 터미널 운영 효율과 관련한 최적화 요구조건 면에서도 상당히 개선된 계획

이 수립되었다. 그러나, 우선순위가 낮은 선박의 접안위치가 지나치게 선호위치에서 벗어나는 문제, 터미널 안벽 전체에 선박의 접안이 고르게 이루어지지 않는 문제, 그리고 각 선박별로 볼 때 서비스 크레인의 작업시간이 심하게 불균등한 문제 등 최적화 관련 요소들은 제약만족 탐색기법만으로는 해결되지 못했다. 이들 문제를 휴리스틱 방법으로 직접 교정하는 데는 많은 어려움이 따른다. 복잡하게 얽혀있는 제약조건으로 인해 일부 변수에 대한 변수값 변경이 결국 전 변수의 변수값 변경으로 이어지게 되기 때문이다. 본 연구에서 제시한 휴리스틱 교정기법은 바꾸고 싶은 변수들의 변수값 순서만 새로이 지정하여 제약만족 탐색을 다시 수행하는 과정을 반복함으로써 효과적으로 최적화의 목표를 달성해 주었다. 휴리스틱 교정 단계에서는 제약만족 탐색을 다시 호출하더라도 수정 대상 변수도 많지 않고 변수값 변경도 휴리스틱한 판단 하에서 제약 위반 가능성이 적은 쪽으로 이루어지기 때문에 초기해를 구할 때에 비해 매우 짧은 시간 내에 탐색이 완료된다.

실제 부산 신선대 컨테이너 터미널의 주간 일정계획 자료로 실험한 결과 다양한 제약조건을 모두 만족하면서 최적화요소가 고려된 결과를 신속히 도출할 수 있었다. 특히, 본 논문에서 제시한 선석 및 크레인 일정계획 수립 방법은 반복적 교정과정을 기본 틀로 하고 있기 때문에, 해상 운송의 특성상 선사측의 입출항 일정 변경 요청이 잦아 계획 자체가 수시로 변경 수립되어야 한다는 요구조건에도 쉽게 부응할 수 있는 장점도 지닌다. 일정 변경 요청이 들어오면 그에 따라 접안위치 변수의 순서지정을 변경하여 제약만족 탐색을 재 수행한 후, 필요 시 휴리스틱 교정기법까지 다시 적용하기만 하면 될 것이

기 때문이다. 향후, 보다 규모가 크고 다양한 문제에 대한 적용을 통한 성능 개선 및 보완 작업과 함께 실제로 일정 변경 요청에 대응하여 계획을 수립하고 재조정하는 실험도 수행해 보아야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 김종수, *컨테이너 터미널의 선석배정계획에 관한 연구(A Berth Assignment Planning for a Container Terminal)*, 한국해양대학교 박사학위논문, 1997
- [2] 김홍배, 양성민, 송경동, 이해경, "유전자 알고리즘을 이용한 Container Crane 스케줄링에 관한 연구", *대한산업공학회/한국경영과학회 '98 춘계공동학술대회 논문집*, 1998
- [3] 윤철영, 문성혁, "컨테이너터미널 사용자비용을 최소화 하는 선석과 크레인의 최적구성에 관한 연구", *한국항만학회지*, 제9권 제2호, pp.39 - 49, 1995
- [4] 이홍걸, 이철영, "발전적 알고리즘에 의한 컨테이너 터미널의 선석배정에 관한 연구", *한국항만학회지*, 제9권 제2호, pp.1 - 8, 1995
- [5] Baratak, R., "Constraint Programming: In Pursuit of the Holy Grail", *Proceedings of WDS99 (invited lecture)*, Prague, 1999
- [6] Daganzo, C. F., "The Crane Scheduling Problem", *Transportation Research*, Vol. 24B, no.3, pp. 159-172, 1990.
- [7] Glover, F. and Laguna, M. *Tabu Search*, Kluwer Academic Publishers, 1997
- [8] Kumar, V., "Algorithms for Constraint Satisfaction Problems: A Survey", *AI Magazine* 12(1), pp.32-44, 1992

- [9] Lai, K. K. and Shih, K., "A Study of Container Berth Allocation", *Journal of Advanced Transportation* 26 (1), pp. 45-60, 1992
- [10] Li, C-L., Cai, X. and Lee, C-Y., "Scheduling with Multiple-job-on-one-processor Pattern", *IIE Transactions* 30, pp. 433-445, 1998.
- [11] Lim, A., "The Berth Planning Problem", *Operation Research Letters* 22, pp. 105-110, 1998.
- [12] Peterkofsky, R. I. and Daganzo, C. F., "A Branch and Bound Solution Method for the Crane Scheduling Problem", *Transportation Research*, Vol. 23B, no.3, pp. 159-175. 1989.
- [13] Russell, S. and Norvig, P., *Artificial Intelligence A Modern Approach*, Prentice Hall, 1995
- [14] Tsang, E., *Foundations of Constraint Satisfaction*, Academic Press Limited, 1996
- [15] Tsang, E. and Voudouris, C., *Constraint Satisfaction in Discrete Optimization*, UNICOM Seminar, 1998