

선석 및 크레인 일정계획에서 반복적 개선 탐색을 위한 제약조건의 활용

황준하⁰ 류광렬
부산대학교 컴퓨터공학과
(jhhwang, krryu)@pusan.ac.kr

Exploiting Constraint for Iterative Improvement Search in Berth and Crane Scheduling

Junha Hwang⁰ Kwang Ruel Ryu
Dept. of Computer Engineering, Pusan National University

요 약

컨테이너 터미널에서의 선석 및 크레인 일정계획은 일정 기간 동안 입항 예정인 선박들을 대상으로 접안 위치와 접안 시기 및 기간을 결정하며, 또한 각 선박별로 컨테이너를 싣고 내릴 크레인을 배정하되 각 크레인의 서비스 시작과 완료시간까지 지정하는 전 과정을 포함한다. 이 문제는 여러 선박들 사이의 시간적 공간적 제약 관계를 준수하고 크레인들을 충돌 없이 각 선박에 할당하여야 하는 제약조건 만족 문제인 동시에, 각 선박의 선호 위치와 희망 입출항 시간을 최대한 준수해야 하는 최적화 문제이기도 하다. 기존의 연구에서는 제약만족 탐색기법을 사용하여 초기계획을 수립한 후 최적의 해를 유도해 내기 위해 휴리스틱 교정기법을 제약만족 탐색기법의 틀 내에서 반복적으로 적용하였다. 본 논문에서는 반복적 개선 탐색 도중에 도출되는 해의 정보를 이용하여 새로운 제약조건을 추가함으로써 다음 제약만족 탐색 시 보다 쉽게 더 좋은 해를 찾을 수 있도록 하였으며 이 방법을 기존의 휴리스틱 교정기법과 결합하여 휴리스틱 교정기법의 성능을 향상시켰다.

1. 서론

컨테이너 터미널에서의 선석 및 크레인 일정계획이란 일정 기간 동안 입항 예정인 선박들을 대상으로 접안 위치를 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. 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 달라지게 되고 선박의 접안 기간도 영향을 받게 된다. 선석 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, 그럴 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 일정 계획 문제에는 선석이나 CC 배정과 관련한 여러 변수들 사이에 결

대적으로 지켜져야 할 시간 공간적 제약들이 존재한다는 측면 외에도, 터미널 운영 효율에 유리하도록 접안 위치를 선정해야 한다든지 선사의 희망 입출항 시간을 최대한 준수해야 하는 등 최적화적 요소가 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[1], 일반적인 CSP 나 최적화 문제와는 다른 방식의 해결 방안을 필요로 한다.

기존의 연구에서는 최적의 선석 및 크레인 일정계획 수립을 위해 제약만족 탐색기법의 틀 속에서 휴리스틱 교정기법을 효과적으로 결합하는 방안을 제시하였다[2]. 이 방법에서는 먼저 제약만족 탐색기법을 이용하여 초기해를 구한 후, 휴리스틱 교정기법을 이용하여 해의 질을 개선시키는 방향으로 제약만족 탐색을 재 실행하는 과정을 반복한다. 본 논문에서는 현재해보다 더 좋은 해를 보다 빠르게 유도하기 위해 반복적 개선 탐색 도중에 도출된 해의 목적함수 값을 이용하여 제약조건을 추가하는 방법을 제시하였으며 최종적으로 이 방법을 기존의 휴리스틱 교정기법과 결합함으로써 휴리스틱 교정기법의 성능을 향상시켰다.

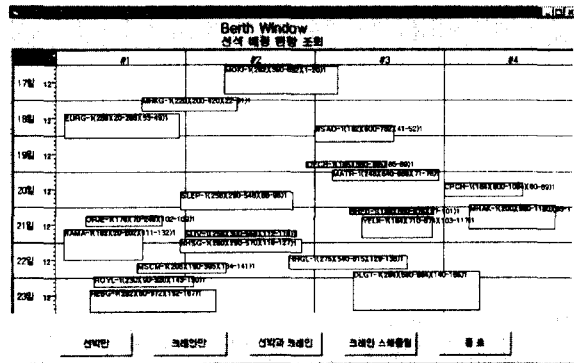
2. 대상 문제

선석계획은 월간 선석계획과 주간 및 일일 선석계획으로 나누어진다. 월간 선석계획은 선사와 항만 터미널의 협의 계약인 장기 Calling Schedule 과 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 필요시 CC를 다시 할당하고 선석 배정을 확정한다. 선석 배정시 각 선박은 터미널 운영 효율상 유리하도록 취급 컨테이너들이 장치되어 있는 곳과 가까운 위치에 접안시키는 것이 좋다. 물론, 선석 배정은 계획 기간 내의 모든 선박들에 대해 서로 접안 위치와 접안 기간에 겹치는 부분이 없어야 한다.

크레인 일정계획은 각 선박에 대해 선석계획 시 부여 받은 접안 위치에서 입항예정시간부터 시작하여 출항예정시간 전까지 모든 서비스를 마칠 수 있도록 CC를 할당하는 계획을 말한다. CC들은 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 2~5기의 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 별도가 아니라 동시에 이루어져야 한다.

본 논문에서 구현한 선석 및 크레인 일정계획 시스템은 부산 신선대 컨테이너 터미널(PECT: Pusan East Container Terminal)을 대상으로 실험되었다. <그림 1>은 주간 선석 및 크레인 일정계획의 예이다. <그림 1>에서 가로축은 안벽에 해당하고 세로축은 시간을 의미한다. 각 사각형은 해당 선박이 가로축 길이 만큼의 안벽을 세로축만큼의 기간 동안 점유함을 표시하고 있다. 따라서, 어떠한 사각형도 서로 겹치지 않아야 시행 가능한 계획이 된다.



<그림 1> 선석계획의 예

3. 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. 윤철영 등은 본 논문의 실험 대상인 신선대 컨테이너 터미널의 선석 및 크레인 운영을 최적화하는 모델을 소개하였다[3]. 이 연구에서는 선석당 크레인수를 2기에서 5기로 증가시킴으로써 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.

Li 등은 선석계획 문제를 단일서버(선석)에서 여러 개의 작업(선박)을 동시에 수행가능한 경우의 일정계획문제로 생각하여 First-Fit-Decreasing (FFD) 알고리즘에 기반한 휴리스틱을 제시하였다 [4]. Daganzo 는 각 접안 대상 선박별 베이별로 각 시간대에 할당할 CC의 수를 결정하는 휴리스틱 기법을 제시하였다[5]. Peterkofsky 등은 여러 척의 선박이 대기하고 있는 상태에서 여러 기의 크레인을 이용하여 총 접안시간의 가중합을 최소화하기 위하여 선박의 작업순서와 크레인의 할당 수를 결정하는 문제를 다루었다[6].

류광렬 등은 제약만족 탐색기법 적용 시 변수와 변수값의 순서 지정 휴리스틱을 사용함으로써 그 탐색속도를 획기적으로 개선하였으며 반복적인 개선을 위해 휴리스틱 교정기법을 사용하였다[2]

4. 반복적 개선 탐색 기법

선석 및 크레인 일정계획 문제는 제약조건 만족 문제로 정형화 될 수 있다. 각 선박의 입항예정시간, 출항예정시간, 접안위치, 각 CC의 각 선박에 대한 서비스 여부, 각 CC의 서비스 시작시간, 완료시간이 변수로 표현된다. 선박의 입출항 예정시간과 CC서비스의 시작 및 완료시간에 관한 변수의 도메인은 전체 일정계획 대상 기간의 1시간 단위 간격 값들의 집합이다. 선박의 접안 위치 즉 선수의 위치를 나타내는 변수는 안벽의 총 길이에 대한 10m 간격의 1차원 좌표값들을 도메인으로 가진다. 마지막으로, 각 선박에 대한 각 CC의 서비스 여부는 0과 1로 표시된다.

접안 위치와 관련하여 CC의 이동 가능 범위 때문에 안벽의 시작과 끝 부분에 너무 가깝게 선박이 접안할 수 없다는 제약이 있으며 선박들 상호간에는 시공간적으로 적정한 안전 간격을 지키도록 되어 있다. 각 선박의 접안시간과 출항시간은 CC의 서비스 시작 및 완료 시간과 제약 관계에 있다. 즉, 한 선박에 배정된 CC들은 모두 그 서비스 시작시간이 그 선박의 접안 이후라야 하고, 완료시간은 출항 이전이어야 한다. 이 외에도 크레인들 간의 설치 위치 및 이동 범위가 고정되어 있어 두 대의 크레인이 같은 시간에 서로 엇갈려 서비스를 할 수 없다는 제약을 비롯하여 여러 가지 제약조건들이 존재한다.

선박의 접안 위치는 컨테이너들이 장치되어 있는 곳과 가까운 위치에 접안시키는 것이 좋고 입항 시간은 희망 입항 시간(ETA: Estimated Time of Arrival)을 최대한 준수하는 것이 좋으며 출항 시간은 희망 출항 시간(ETD: Estimated Time of Departure)보다 늦어지지 않는 것이 좋다. 따라서 대상 문제의 목적 함수는 (수식 1)과 같이 표현된다. $P(i)$, $EP(i)$ 는 각각 선박 i 의 접안 위치와 선호 접안 위치를 의미하고 $A(i)$, $D(i)$ 는 각각 선박 i 의 입항 시간과 출항 시간을 의미한다.

$$Obj = Minimize \left(\sum_{i=1}^n (|EP(i) - P(i)| + |ETA(i) - A(i)| + Max(0, D(i) - ETD(i))) \right) \dots (수식 1)$$

제약조건 만족 문제에 있어서 변수 및 변수값의 탐색 순서를 어떻게 하는 것이 탐색의 양을 줄이는데 가장 효과적인지 판단하기란 쉽지 않다. 대개는 backtracking 을 최소화할 수 있을 것으로 기대되는 휴리스틱을 동원하여 변수 및 변수값의 순서를 지정하고 있다[7,8].

본 논문에서는 접안 위치, 입항 시간, 출항 시간, 크레인 시작 시간, 크레인 완료 시간 변수들 사이의 순서는 실험적으로 결정하였으며 선박의 접안 위치 변수들 내에서의 순서는 기존의 연구에서와 마찬가지로 ETA의 순서로 지정하는 휴리스틱을 사용하였다 [2]. 변수값 순서 지정 휴리스틱은 본 문제의 최적화적 요소와 관련하여 (수식 1)의 값을 최소화할 수 있는 값들을 먼저 지정하는 방식을 사용하였다. 예를 들어 어떤 선박의 접안 위치는 선호 접안 위치와 가까운 위치를 먼저 지정하고 입항 시간 또한 ETA와 가까운 값들을 먼저 지정하며 출항 시간은 ETD 보다 작은 값들 중 ETD와 가까운 값들을 먼저 지정한다.

계약만족 탐색기법을 적용한 결과로 얻게 되는 해는 일단 주어 진 제약조건을 모두 만족한다. 더욱이 변수 및 변수값 순서지정 휴리스틱을 사용할 경우 선박의 집안 위치들도 가능한 최적 위치에 가깝게 결정된다. 그러나, 변수 순서에 의해 우선 순위가 낮은 선박의 경우 불필요하게 선호 위치에서 멀리 떨어져 집안하는 경우가 발생하게 된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 기존의 휴리스틱 교정기법에서는 보다 최적에 가까운 해를 구하기 위해 현재해를 분석한 결과를 바탕으로 일부 변수들에 대해 도메인 내의 변수값의 순서를 재 조정한 후 다시 계약만족 탐색 과정을 호출하는 방식을 취하고 있다[2].

실험 결과에 의하면 휴리스틱 교정기법을 적용할 경우 해의 질이 초기해보다 훨씬 더 좋아지며 부가적인 소요 시간도 얼마 되지 않음을 확인하였다. 그런데 현재해를 분석할 때 모든 선박들의 변경 가능한 모든 조합에 대한 조사가 불가능하므로 개별 선박의 이동 가능 여부만을 조사하게 된다. 이 문제로 인해 모든 선박들에 대한 이동이 불가능하다고 판단되면 더 좋은 해의 탐색이 가능한 데도 불구하고 프로그램은 종료하게 된다. 본 논문에서는 이와 같은 단점을 보완하기 위해 (수식 2)와 같이 목적함수 값이 현재해의 목적함수 값보다 작다는 제약조건을 추가한 후 반복적 탐색 과정을 반복하는 방법을 사용하였다. 이 제약조건은 다음 단계의 계약만족 탐색 시 현재 해보다 더 좋은 해를 구하기 위해 집안 위치, 입항 시간, 출항 시간을 결정하는 데 큰 영향을 미치게 된다. 최종적으로 휴리스틱 교정기법에 (수식 2)를 추가함으로써 휴리스틱 교정기법의 성능을 향상시켰다.

$$\text{AddConstrant } (Obj < \text{CurObjValue}) \dots\dots (수식 2)$$

5. 실험 결과

실험 대상으로 사용한 자료는 실제 부산 신선대 컨테이너 터미널의 주간 선석계획 자료로서 [표 1]과 같이 총 25 개의 데이터 Set 을 사용하였다. 계약만족 탐색기법의 구현을 위해 상용 도구인 ILOG Solver 를 이용하였으며 실험은 Pentium III 800Mhz PC 에서 수행되었다.

실험 결과는 [표 1]과 같다. 방법 1 은 최초 계약만족 탐색 결과이며 방법 2 는 초기해로부터 휴리스틱 교정기법을 반복적으로 적용한 결과이다. 방법 3 은 현재해의 목적함수 값을 새로운 제약조건으로 추가하는 방법을 반복적으로 적용한 결과이고 방법 4 는 방법 2 와 방법 3 을 결합했을 때의 실험 결과이다. 각 실험에 대한 초 단위 수행 시간(Sec)과 목적함수 값(Obj)을 표기하였으며 음영 처리된 결과는 각 데이터 Set 에 있어서 모든 실험들 중 가장 좋은 결과를 표시한 것이다. 각 실험에 대해 최대 수행 시간은 5분으로 제한하였으며 실험 2 와 실험 4 에서 5분이 경과하기 전에 중단된 경우는 최적해를 의미한다.

[표 1]에서 보는 바와 같이 모든 데이터 Set 에 있어서 휴리스틱 교정기법과 목적함수를 새로운 제약조건으로 추가한 방법을 결합했을 때 가장 좋은 성능을 발휘함을 알 수 있다. 휴리스틱 교정기법만으로 매우 짧은 시간 내에 초기해보다 더 좋은 해를 구할 수 있었지만 많은 데이터 Set 에서 방법 4 보다 좋지 않은 결과를 보였다.

6. 결론 및 향후 과제

선석 및 크레인 일정계획은 복잡한 제약조건을 가진 최적화 문제이다. 본 논문에서는 기존의 계약만족 탐색기법과 휴리스틱 교정기법을 보완하기 위한 반복적 개선 탐색 방안을 제시하였다. 최적해를 유도하기 위한 반복적인 계약만족 탐색 기법의 적용 시 현재해의 목적함수 값을 이용하여 새로운 제약조건을 추가함으로써 다음 계약만족 탐색 시에는 보다 좋은 해를 쉽게 찾을 수 있도록 유도하였으며 휴리스틱 교정기법과 함께 결합하여 사용함으로써 더 좋은 계획을 수립할 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서 제시한 방법은 기존의 방법에서 사용하고 있는 반복적 개선 탐색 과정을 기본 틀로 하고 있기 때문에, 해상 운송의 특성상 선사측의 입출항 일정 변경 요청이 잦아 계획 자체가 수시로 변경 수립되어야 한다는 요구조건에도 쉽게 부응하고 있다. 일정 변경 요청이 들어오면 그에 따라 집안 위치 변수의 순서지정을 변경하여 계약만족 탐색을 재 수행한 후, 필요 시 반복적 개선 탐색 과정을 다시 적용하기만 하면 되기 때문이다. 향후, 보다 규모가 큰 문제에 대한 적용을 통한 성능 개선 및 보완 작업과 함께 실제로 일정 변경 요청에 대응하여 계획을 수립하고 재조정하는 실험이 필요하다.

[표 1] 실험 결과

data Set	선박 개수	방법 1 (초기해)		방법 2 (Repair)		방법 3 목적함수		방법 4 (2+3)	
		Sec	Obj	Sec	Obj	Sec	Obj	Sec	Obj
1	15	2	63	3	27	300	27	300	27
2	14	2	8	2	8	300	8	300	8
3	13	1	27	3	6	300	20	29	6
4	14	1	12	3	7	300	12	12	7
5	13	2	9	2	2	300	9	3	2
6	17	2	71	4	38	300	43	300	33
7	17	2	16	2	16	300	11	300	11
8	16	2	13	2	13	300	13	300	13
9	16	2	20	2	20	300	11	300	11
10	20	3	28	3	28	300	18	300	18
11	16	2	41	3	23	300	28	300	19
12	17	2	19	2	19	300	16	300	16
13	16	1	9	3	5	20	5	18	5
14	15	2	118	1	118	300	85	300	85
15	14	2	10	2	10	300	10	300	10
16	18	2	31	2	31	300	24	300	24
17	16	1	12	2	12	300	7	300	7
18	16	1	40	3	39	300	39	300	33
19	17	1	44	4	38	300	32	300	31
20	17	1	54	3	52	300	39	300	38
21	14	2	9	2	9	122	7	122	7
22	14	2	90	2	90	300	90	300	90
23	16	2	48	2	48	300	27	300	27
24	13	1	29	1	29	300	16	300	16
25	13	2	11	2	11	91	7	92	7

참고 문헌

- [1] Baratak, R., "Constraint Programming: In Pursuit of the Holy Grail", *Proceedings of WDS99 (invited lecture), Prague*, 1999.
- [2] 류광렬, 김갑환, 백영수, 황준하, 박영만, "계약만족 탐색과 휴리스틱 교정기법을 이용한 최적 선석 및 크레인 일정계획", *한국지능정보시스템학회논문지*, 제 6 권 제 2 호, pp. 1-14, 2000.
- [3] 윤철영, 문성혁, "컨테이너터미널 사용자비용을 최소화 하는 선석과 크레인의 최적구성에 관한 연구", *한국항만학회지*, 제 9 권 제 2 호, pp. 39-49, 1995.
- [4] Li, C-L., Cai, X. and Lee, C-Y., "Scheduling with Multiple-job-on-one-processor Pattern", *IIE Transactions* 30, pp. 433-445, 1998.
- [5] Daganzo, C. F., "The Crane Scheduling Problem", *Transportation Research*, Vol. 24B, no.3, pp. 159-172, 1990.
- [6] 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.
- [7] Tsang, E., *Foundations of Constraint Satisfaction*. Academic Press: Limited, 1996.
- [8] Russell, S. and Norvig, P., *Artificial Intelligence A Modern Approach*. Prentice Hall, 1995.