

제약만족탐색 기법을 이용한 수출 컨테이너 장치장 계획

손예진* · 류광렬* · 김갑환**

Space Allocation of Export Container Yard by Constraint Satisfaction Search

Ye Jin Son* · Kwang Ryel Ryu* · Kap Hwan Kim**

요 약

컨테이너 터미널의 수출 장치장은 수출될 컨테이너들이 지속적으로 반입되어 해당 선박에 선적되기까지 일시적으로 보관되는 장소이다. 장치장의 공간 활용도를 높이면서 선적 시 작업의 능률을 극대화하기 위해서는 여러 가지 제약조건과 장치 규칙에 따라 컨테이너들의 장치 위치를 결정해야 할 뿐 아니라, 소정의 기간을 대상으로 그 동안 반입 예정인 전 컨테이너들에 대한 적절한 공간할당 계획을 미리 수립해 두어야 한다. 본 논문에서는 수출 장치장 계획 문제를 제약조건만족 문제로 보고 이를 효과적으로 해결하기 위한 탐색 기법을 제시하고 있다. 대규모의 탐색공간으로부터 효율적으로 해를 찾기 위해 dependency-directed backtracking 기법을 적용하였고, 탐색 중에 제약조건을 만족하는 해를 찾기 어렵다고 판단될 경우에는 일부 제약조건을 완화하여 해를 재 탐색하는 제약조건 완화 기법을 적용하였다. 실제 부산 신선대 컨테이너 터미널의 데이터를 이용한 실험 결과 만족할 만한 수준의 계획을 빠른 시간 내에 수립할 수 있음을 확인하였다.

Key words : 수출 장치장 계획, 제약만족 탐색, dependency-directed backtracking

1. 서론

컨테이너 터미널의 수출 장치장은 수출될 컨테이너들이 지속적으로 반입되어 해당 선박에 선적되기까지 일시적으로 보관되는 장소이다. 컨테이너 터미널의 주요 고객인 선사들은 선박의 접안 시간을 줄임으로써 항만 시설 이용료를 절감하고 선박의 운행 일정을 단축하기를 원한다. 이러한 요구조건을 만족시키기 위하여 컨테이너 터미널에서는 수출 장치장의 한정된 공간을 효율적으로 활용하고 컨테이너의 적하 작업을 능률적으로 신속히 함으로써 선박의 접안 시간을 최대한 단축하기 위한 노력을 기울인다. 장치장의 공간 활용도를 높이면서 선적 시 작업의 능률을 극대화하기 위해서는 여러 가지 제약조건과 장치 규칙에 따라 컨테이너들의 장치 위치를 결정해야 할 뿐 아니라, 소정의 기간을 대상으로 그 동안 반입 예정인 전 컨테이너들에 대한 적절한 공간할당 계획을 미리 수립해 두어야 한다. 장치에 관한 규칙과 제약조건의 예들을 보면, 선적 작업 시간의 단축을 위해서는 선적될 선박이 접안할 선석에 가까운 위치에 컨테이너가 장치되는 것이 좋고, 동일 선박에 선적될 컨테이너들은 서로

인접한 공간에 배치되는 것이 좋으며, 동일 선박에 선적될 컨테이너들이라도 목적 항구와 크기별 유형에 따라 그룹화 해서 배치해야 한다는 것 등이 있다. 또한 장치장의 하역 장비들 간에 충돌이 생기지 않도록 컨테이너들의 장치 위치를 결정하여야 하며, 운반장비의 이동제한 특성으로 인하여 컨테이너가 장치될 공간이 제한되기도 한다. 이처럼 수출 장치장 공간 계획은 한정된 공간에서 서로 복잡하게 영향을 주는 여러 가지 제약 조건들을 만족시키면서 계획 기간 동안 반입되는 컨테이너들을 모두 수용해야 하는 고난도의 문제이다.

본 논문은 수출 장치장 계획 문제를 제약조건만족 문제(CSP: Constraint Satisfaction Problem)로 보고 이를 효과적으로 해결하기 위한 탐색 기법을 제시하고 있다. 이 문제가 특히 어려워지는 것은 계획 대상 기간이 길 경우 처리해야 할 컨테이너의 수가 대단히 많음으로 인해 탐색공간의 규모가 폭발적으로 증가한다는 데 있다. 그렇다고 계획 대상 기간을 너무 짧게 할 경우에는 미래 상황을 충분히 고려하지 못하게 됨으로써 어느 시점에 가서는 특정 선박의 물량에 대한 장치 공간이 부족하게 된다거나 혹은 과다하게 여유 공간이 생기는 등 최적의 공간할당 계획을 수립할 수 없게 된다.

CSP에서 탐색의 양을 줄이기 위해서는 변수의 순서 및 변수값의 순서를 휴리스틱하게 지정해 주는 방법이 효과적인 경우가 많다(백영수, 2000). 장치장 계획 문제에서는 컨테이너들이 변수가 되고 컨테이너의 장치 위치가 바로 변수값이 된다. 본 논

* 본 연구는 한국과학재단 지정 지능형통합항만
관리연구센터의 지원에 의한 것입니다.

* 부산대학교 공과대학 컴퓨터공학과

** 부산대학교 공과대학 산업공학과

문에서는 컨테이너들의 반입 순서 및 최적 장치 위치를 고려하여 변수의 순서와 변수값의 순서를 지정하는 휴리스틱을 사용함으로써 탐색의 효율을 개선하였다. 또한, 이와 같은 순서지정 휴리스틱 뿐만 아니라 추가로 dependency-directed backtracking 기법을 적용함으로써 대규모의 탐색공간에 효과적으로 대처할 수 있게 하였다. Dependency-directed backtracking은 보통의 chronological backtracking과 달리 backtrack을 발생시킨 원인을 찾아내어 한꺼번에 멀리까지 되돌아갈 수 있게 함으로써 불필요한 탐색을 대폭 줄여준다. 이 외에도, 본 논문에서는 제약조건들을 모두 만족시키는 해를 찾기 어렵다고 판단될 경우 조정 가능한 일부 제약조건을 완화하여 재 탐색을 수행하는 제약조건 완화 기법을 도입함으로써 최적이지 않더라도 현실적으로 대안이 되는 장치계획을 도출할 수 있게 하고 있다. 실제 부산 신선대 컨테이너 터미널의 데이터를 이용한 실험 결과 본 논문에서 제시하는 제약만족 탐색 기법을 이용하여 만족할 만한 수준의 계획을 빠른 시간 내에 수립할 수 있음을 확인하였다.

다음 장에서는 수출 장치장 계획 문제를 상세히 설명하고 관련 연구들을 소개한다. 3장에서는 이 문제를 CSP의 관점에서 정형화하고, 4장에서는 dependency-directed backtracking 기법을 이용하여 탐색의 양을 줄이는 방안을 제시한다. 다음 5장에서 실험결과를 정리하고, 6장에서 결론을 맺는다.

2. 수출 장치장 계획 문제

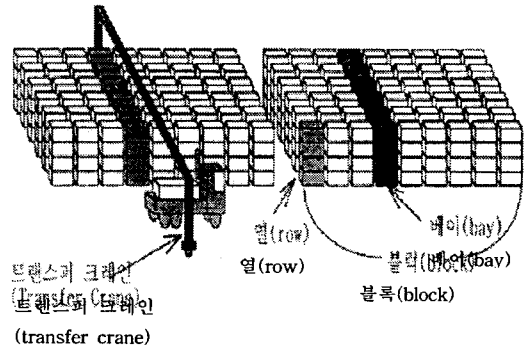
2.1 대상 문제의 개요

[그림 1]에 보인 것과 같이 컨테이너 터미널에는 장치장에 장치되어 있는 컨테이너를 배에 선적하는 작업이 일어나는 선석(Berth)이 있으며, 선석 앞쪽으로 수출 컨테이너들이 놓여 질 수 있는 수출 컨테이너 장치장이 있다.

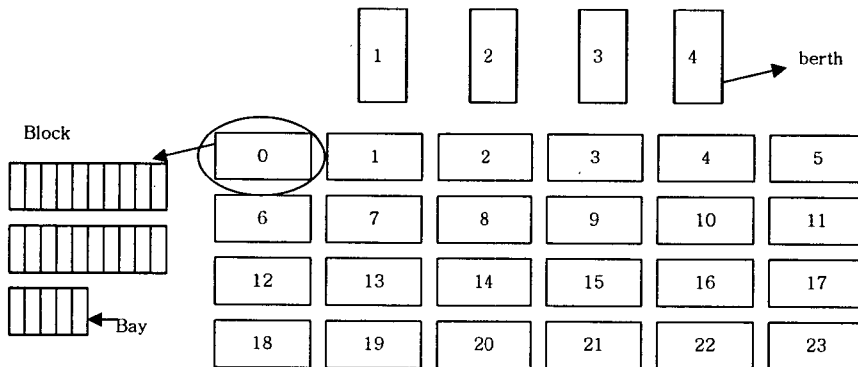
각 선석에 배가 접안하면 장치장에 장치되어 있는 컨테이너들을 선박에 실어야 하는데 이 적하 작업은 보통 선석에 있는 Quay Crane에 의해서 수행된다. 장치장은 기본적으로 블록(Block)단위로 구분되며, 각 블록은 배이라는 단위로 구분된다.

블록은 총 24개가 있으며 각 블록은 총 25개의 배이로 구성되어 있다. 각 단위 배이에는 21개까지의 컨테이너를 장치할 수 있는데, 하나의 배이에는 동일 배, 동일 목적항, 동일 size의 컨테이너만 놓일 수 있다. 각 블록을 상세히 묘사하면 [그림 2]와 같다.

동일 블록 내에서의 이동이나 인접 블록까지의 컨테이너 이동은 보통 트랜스퍼 크레인(T/C)이라는 장비를 사용하며 블록과 선석 사이의 이동에는 야드 트레일러(Y/T)가 쓰인다. 수출 장치장의 임의의 블록내의 배이에 선석에 접안한 선박에 실릴 컨테이너가 놓여 있을 때, 먼저 트랜스퍼 크레인(T/C)이 해당 컨테이너를 야드 트레일러(Y/T)에 실어준다. 이 야드 트레일러는 컨테이너를 싣고 적하 작업이 일어날 선석으로 컨테이너를 운반하고 운반된 컨테이너를 Quay Crane(Q/C)이라는 장비가 배의 정해진 위치에 적하한다.



[그림2] 블록 상세 그림



[그림1] 컨테이너 터미널의 수출장치장 모형

수출 장치장 공간 할당 계획은 계획 기간 동안 선석에 접안하는 선박들의 정보와 각 선박에 실릴 컨테이너 정보, 계획 기간 동안의 장치장 상황을 입력 받아 선적 작업을 효율적으로 할 수 있도록 장치장의 배에 컨테이너를 할당하는 계획이다. 수출 장치장 공간 할당 계획의 경우 계획 기간 내에서의 장치장 상황은 동적으로 바뀐다. 즉, 계획기간 중간에 입의 선박의 출항에 의해 할당 가능한 공간이 추가적으로 발생하게 되는데, 이 추가적으로 발생한 할당 가능 공간을 계획에 반영하여야 한다. 이런 동적인 상황을 공간 할당 계획에 반영하기 위하여 단계(stage)라는 개념을 도입하였다. 단계별 계획기간을 일정 시간 간격으로 나눈 것으로 선박의 출항에 의해 새로이 생기는 할당 가능한 공간을 이용할 수 있도록 한 것으로, 각 단계에서의 공간 할당 시에는 직전 단계에서 생기는 새로운 빈 배에 공간을 할당 할 수 있도록 한다.

장치장에는 21개의 컨테이너들이 꼭 차 있는 배이, 21개 미만의 컨테이너들이 장치되어 있는 배이, 비어있는 배이가 있다. 21개가 꼭 차있는 배이에는 더 이상의 컨테이너를 장치할 수 없지만 21개 미만인 배이에는 같은 그룹(동일 배, 동일 목적항, 동일 size)의 컨테이너를 21개가 될 때까지 추가로 장치할 수 있고 빈 배이에는 새로운 컨테이너 그룹을 장치할 수 있다. 계획 기간 동안 각 단계에서 실제 스케줄링을 수행하기 전에 장치장 상황을 보고, 컨테이너가 21개 미만이 장치되어 있는 배이에 같은 그룹(동일배, 동일 목적항, 동일 size)의 입력 컨테이너로 21개까지 채울 때까지 미리 할당 하는 전처리(PreProcessing)를 한다. 전처리(PreProcessing) 이후 남아 있는 입력 컨테이너들을 동일그룹(동일 배, 동일 목적항, 동일 size)으로 최대 21개씩 컨테이너 그룹으로 묶어서 이 컨테이너 그룹들을 여러 제약 사항들을 고려하여 빈 배이에 할당하는 실제 스케줄링을 수행하도록 한다. 동일 그룹의 컨테이너들이 모두 21개씩 존재하는 것이 아니므로 한 그룹의 컨테이너 개수는 다양할 수 있다. 각 컨테이너 그룹은 선적 작업의 효율을 위해서 해당선박이 접안한 선석 가까이에 장치하는 것이 좋고, 트랜스퍼 크레인의 이동거리가 짧을수록 많은 작업을 짧은 시간에 할 수 있게 되어 선적 효율을 높일 수 있으므로 동일 선박에 선적될 컨테이너 그룹들이 인접 블록에 장치되어 있는 것이 좋다. 하나의 블록에 여러 개의 선박에 실릴 컨테이너들이 장치되어 있으면 그 블록에서 작업하는 트랜스퍼 크레인들간에 간섭이 생길 수 있으므로 하나의 블록에 놓일 수 있는 선박의 종류를 제한하는 것이 좋다.

2.2 관련 연구

Mounira(Mounira,1993)는 컨테이너 터미널의 공간할당 문제를 처음으로 다루었고 문제 자체를 상세히 묘사하고 있다는 점에서 가치가 인정된다. 예약 공간, 장치 공간, 신규 여유 공간들의 수출 장치장의 공간 할당 문제를 이해하기 위한 다양한 개념을 소개하고 있다.

Kim(Kim,1994)의 논문은 수출 컨테이너를 장치장에 어떻게 할당 할 것인가 하는 문제를 다루고

있다. 구체적인 개별 컨테이너의 장치 위치를 결정하기 보다는 사전에 장치구역을 선박별로 계획하는 문제를 다루고 있다. 이 논문은 미래의 타 선박의 출항에 따른 추가 공간의 확보와 컨테이너의 반입에 따른 공간의 추가 요소를 동시에 고려하는 동적 공간 할당에 관한 연구를 최초로 수행하였다는 점에서 의의가 있다. 이 논문은 Straddle Carrier 시스템의 경우에만 공간할당 계획 문제를 정의하고 Quadratic Programming으로 모델링을 하고 LINDO로 해를 구하였다.

컨테이너 터미널의 공간할당 계획 문제를 다룬 박강태(박,1997)의 논문은 수출 컨테이너 장치장의 공간할당 계획을 일반적으로 수학적 모델링 하였으며 이 모델링에 대한 해법을 제시하였다. 그리고 Lagrangean Relaxation에 기초한 발견적 기법을 제시하였고, 제약 조건을 이용한 탐색기법을 연구하였다.

Kim(Kim, 1997)의 논문은 수출 컨테이너 장치 문제 중에서 도착하는 수출 컨테이너에 대해서 구체적인 장치위치를 결정하는 슬롯위치 결정문제를 동적 계획법을 이용하여 모델링 하였다. 이 논문에서는 도착하는 수출 컨테이너에 대하여 무게를 고려하여 재취급이 최소화되는 장치 위치를 결정하는 방법을 제시하였다.

전체적으로 컨테이너 터미널 운영에 관한 연구는 그 중요성에 비하여 너무나 미미한 실정이고 수행된 몇몇 연구도 설비투자 분석적인 측면이나 성능 평가적인 측면에 치우쳐 있고 실제 운영 능률을 향상시키기 위한 방법 자체에 대한 연구는 거의 찾기 힘든 실정이다.

3. 제약 만족 탐색 기법

3.1 제약 만족 탐색 기법의 개요

CSP는 변수들의 집합과 도메인(Domain)들의 집합 및 변수들간의 제약 조건으로 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 탐색 방식으로 이루어 진다. 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 계속 하고 그렇지 못하면 그 변수의 도메인에서 다음 값을 할당한다. 만약 도메인 내의 모든 값들이 전부 제약 조건을 위배하여 도메인 내의 모든 값들이 제거된 domain empty 상태가 되면, 직전의 변수로 되돌아가(backtracking) 그 변수의 지정값을 다음 값으로 바꾼다. 직전 변수에서도 제약 조건을 만족하는 값을 찾을 수 없다면 되돌아가기(backtracking)을 계속 해야 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 제약 만족 탐색기법에서는 제약 조건을 이용하여 탐색공간을 줄이는 방안으로서, 전향검사(forward checking)을 통한 도메인 축소(domain reduction) 기법을 활용하고 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 제약 조건상 모순 되는 값들을 파악하여 미 할당 변수의 도메인으로부터 미리 제거함으로써 예측 가능한 backtracking을 사전에 방지하게 된다. 이와 같은 제약 조건의 전파를 통한 도메인의 축소는 제약조건에 관한 추론 기능을 강화할수록 그 효과가 더욱 커지게 되지만 추론 자체가 필요로 하는 추가의 계산 부담도 따라서 커지므로 주의가 필요하다.

제약 만족 탐색 기법에서 변수와 변수값의 수가 많은 경우 backtracking이 발생하였을 때 바로 직전 변수로 돌아가서 그 변수의 지정값을 바로 다음 값을 지정하는 chronological backtracking 기법을 적용할 경우 exhaustive한 search가 발생하여 탐색 규모가 커지기 때문에 많은 탐색시간이 소요된다. 제약 만족 기법에서는 backtrack 발생으로 인한 탐색공간을 줄이기 위해서 dependency directed backtracking(DDBT) 기법을 활용할 수 있다. 이 DDBT는 다양한 문제 해결에 적용되는 방법으로 CSP는 물론 planning, logic programming에도 적용된다. 기본 개념은 탐색시에 backtrack이 발생하였을 때 바로 직전 변수로 돌아가는 것이 아니라 backtrack 발생의 결정적인 요인을 찾아서 적절한 지점으로 backtrack을 함으로써 탐색 공간을 줄일 수 있다. 또한 제약 조건 만족 기법은 제약 조건들에 의해 해를 찾을 수 없는 경우가 발생하게 되는데, 이러한 경우에는 조정 가능한 제약 조건을 완화하여 재 탐색하여 해를 찾을 수 있다.

제약 만족 기법의 효율에 영향을 미치는 또 다른 요소로는 변수의 탐색 순서 및 각 도메인으로 부터 선택하는 값의 순서를 들 수 있다. 대상 문제를 잘 분석하여 이들 순서를 적절히 가져가면 backtracking이 줄어들어서 그렇지 못한 경우보다 훨씬 빨리 해를 찾을 수 있게 된다.

3.2 변수와 도메인

본 논문에서는 반입되는 컨테이너 그룹이 할당될 배이가 변수가 된다. 즉 변수 x_i 는 동일 배, 동일 목적항, 동일 size의 컨테이너 그룹 i 가 할당될 배이를 나타낸다. 이 변수의 도메인은 모두 정수의 유한집합으로 이루어진다. 변수의 도메인은 수출 장치장의 모든 배이들의 집합이다. 즉 변수 x_i 의 도메인은 $x_i = \{1, 2, 3, \dots, B\}$ (B 는 Bay의 개수)로 나타내어 질 수 있다.

3.3 제약 조건

수출 장치장 계획 문제는 선적 작업을 신속하기 위해서 고려해야할 여러 가지 제약 사항들이 있는데, 제약 사항들은 다음과 같다.

수출 장치장의 야드 트레일러의 효율 향상과 관련하여 컨테이너가 장치될 배이를 컨테이너가 선적될 선박의 해당 선석과의 거리가 가까운 곳부터 배정하도록 한다. 즉 컨테이너를 장치장으로부터 선석까지 이동시키는 야드 트레일러의 이동 거리를 단축 하여 선적작업을 빨리 할 수 있도록 한다. 컨테이너를 장치장에 내리고 들어내는 작업을 수행하는 트랜스퍼 크레인도 횡 이동을 주로 하며 종 이동은 어려운데, 트랜스퍼 크레인이 장치장 내에서 작업 수행을 위해 종 이동을 해야 하는 경우에도 현재 작업 중인 행의 바로 뒤 행으로의 이동은 불가능하며, 한 행을 건너 뛰어 이동할 수 있다는 제약사항이 있다. 이런 장비의 특성에 의해서 동일 선박에 선적될 컨테이너들은 동일한 행에 장치되어야 한다. 다시 말해 동일 선박에 선적될 컨테이너는 모두 짝수 행에만 장치되거나, 혹은 모두 홀수 행에만 장치되어야만 한다. 선적 작업이 일어나는 블록에 공간을 할당 하면 동시에 여러대의 트랜스퍼 크레인이 동일 블록에서 작업을 수행하여 간섭을 일으킬 수 있다. 이를 방지하기 위하여 선적 작업이 계획된 블록에는 공간을 할당 하지 않도록 한다. 그리고 만일 한 블록 내에 여러 배에 실릴 컨테이너들이 섞여 있으면 여러 대의 트랜스퍼 크레인이 동시에 한 블록에서 작업을 수행하여 트랜스퍼 크레인들 간에 간섭을 일으킬 수 있으므로 이를 배제하기 위해 한 블록에 놓일 수 있는 배의 종류를 제한 하도록 한다. 본 수출 장치장 문제에서는 최대 3 종류의 배만 한 블록에 놓여 질 수 있도록 하는데, 만일 장치장 공간에 비해 컨테이너 물량이 많아 한 블록에 3종류 이상의 배에 선적되는 컨테이너 물량을 장치하여야 한다고 판단될 때에는 이 제약 조건은 조정될 수 있다. 동일 선박에 실릴 컨테이너들이 할당된 블록의 개수가 너무 많거나 혹은 너무 멀리 떨어진 블록에 장치되면 작업의 효율을 나쁘게 할 수 있으므로 동일 선박에 실릴 컨테이너들이 할당될 수 있는 블록의 개수를 3개까지 제한 하도록 한다. 컨테이너는 size가 20ft, 40ft 2종류가 있는데 20ft 컨테이너는 하나의 배에 장치될 수 있으나 40ft 컨테이너는 연속된 2개의 배에 장치 하여야 하며 20ft 컨테이너와 40ft 컨테이너는 동일 배에 할당될 수 없고 40ft 컨테이너들이 서로 엇갈려서 할당될 수도 없다. 마지막으로 동일 단계(Stage)에서 이미 컨테이너 그룹이 놓여진 공간에는 다른 컨테이너 그룹을 할당 할 수 없도록 하여야 한다.

3.4 변수 및 변수값 순서의 결정

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)

수출장치장 공간할당 계획문제에서 컨테이너들이 장치될 베이를 나타내는 변수들에 대해 아무런 탐색 순서를 두지 않는다면, 예를 들어 반입 예정 시간이 뒤인 컨테이너가 먼저 베이를 배정 받을 경우 반입 예정 시간이 앞서는 컨테이너가 배정될 베이를 찾지 못해 backtracking을 해야하는 상황이 발생할 수 있다. 따라서, 컨테이너의 반입예정 순서를 변수의 순서에 반영하는 것은 효과적인 변수 순서지정 휴리스틱이 된다. 본 논문의 계획시스템에서는 컨테이너의 반입 순서로 변수순서를 지정하였다. 또한 본 계획 시스템은 2.2절에서 설명하였듯이 선적 효율을 위해서 컨테이너가 선적될 선박의 해당 선석에 가능한 가까운 위치에 컨테이너를 장치하는 것이 좋다. 따라서 컨테이너가 할당될 베이 변수의 도메인은 컨테이너가 선적될 선박들의 해당 선석과 가까운 곳부터 순서지정을 하였다.

4. Dependency-Directed Backtracking

본 논문의 수출 장치장 계획 문제는 일주일의 계획 기간 동안에 반입되는 수출 컨테이너 물량을 장치장의 베이에 여러 가지 제약 조건을 위배하지 않고 할당하여야 하는 문제로 많은 변수와 변수값이 존재한다. 이렇게 많은 변수와 변수값이 존재할 경우 backtrack 발생시에 많은 탐색 공간을 필요로 하게 되는데, 이런 경우에는 dependency directed backtracking 기법을 적용하여 탐색공간을 효율적으로 줄여 탐색 시간을 단축 할 수 있다.

Dependency-directed backtracking 기법은 해를 찾는 탐색 과정에서 어떤 변수의 변수값이 모두 제약 조건에 위배하여 backtrack을 하여야 할 때 chronological backtracking 기법처럼 직전 변수로 돌아가서 변수의 다음 지정값을 할당하는 것이 아니라, backtracking이 발생한 시점의 상황을 분석하여 현재 변수의 변수값이 모두 제약조건에 위배되는 원인을 제공하는 원인 변수를 찾아서 그 원인 변수로 되돌아가서 원하는 지정값을 할당함으로써 불필요한 탐색을 줄일 수 있다. 그러나 backtracking의 원인이 되는 변수가 어떤 변수 인지를 판단하는 것은 쉬운 일이 아니다.

본 논문의 수출 장치장 계획 문제에서는 backtracking 발생시에 탐색공간을 줄이기 위하여 다음과 같이 다양한 dependency-directed backtracking 기법을 적용하였다.

4.1 블록과 관계된 제약조건을 고려한 backtracking

이 backtracking 기법은 동일 선박에 선적되는 컨테이너 그룹들이 3개까지의 블록에만 흩어져서 놓일 수 있는 제약조건을 고려한 기법이다. 계획 기간 동안의 각 단계에서의 공간 계획시에 같은 배에 선적될 컨테이너 그룹들이 장치장의 3개의 블록까지 흩어져서 할당 되었을 때, 그 컨테이너 그룹들이 할당되어있는 3개의 블록에 남아 있는 빈 베이의 수가 그 배에 실리는 앞으로 할당하여야 할

남아있는 컨테이너 그룹들의 수보다 작은 경우, 이미 그 3개의 블록에 할당 되어 있는 다른 배에 실리는 컨테이너 그룹들 중에 가장 최근에 할당된 컨테이너 그룹을 다른 블록으로 옮기도록 하여 남아 있는 컨테이너 그룹이 할당될 수 있는 공간을 미리 더 확보하도록 하였다. 그 3개의 블록에 더 이상 옮길 다른 컨테이너 그룹이 없는 경우 그 블록의 해당 행의 점유율과 반대편 행의 점유율을 비교하여 반대편 행의 점유율이 더 작을 경우에는 반대편 행으로 옮기고 반대편 행의 점유율이 더 많은 경우에는 그 배의 종류가 놓일 수 있는 블록의 수를 늘여서 제약조건을 완화하도록 하였다. 이것은 제약 조건에 의하여 동일 배에 실리는 컨테이너 그룹은 3개 블록까지만 놓여 질 수 있기 때문에 어떤 배에 실리는 컨테이너 그룹들이 할당된 블록의 개수가 3개가 되는 시점에서 앞으로 남은 컨테이너 그룹들이 3개의 블록에 다 놓여 질 수 있을지를 미리 판단을 해서 남은 컨테이너 그룹들이 현재의 행에서 3개의 블록 안에 모두 할당 될 수 없다고 판단되는 경우에는 반대편 행이 점유율이 낮으면 반대편 행으로 그 컨테이너 그룹들을 모두 옮기도록 하고, 반대편 행이 현재 행의 점유율 보다 높을 경우에는 반대편 행에서도 마찬가지로 3개의 블록 안에 다 놓일 수 없다고 판단하고 그 배 종류가 놓일 수 있는 블록의 수를 하나 더 늘여 제약조건을 완화하는 것이다. 동일 선박에 실리는 컨테이너 그룹은 동일 행에 놓여져야 하는 제약 조건에 의해, 컨테이너 그룹이 선호하는 선석과 가까운 행에 컨테이너 그룹이 물리기 쉬운데 위와 같이 행을 바꿔 주는 것은 컨테이너 그룹이 한쪽 행에 집중적으로 장치되는 것을 분산시킬 수 있다.

4.2 행과 관계된 제약조건을 고려한 backtracking

이 backtracking 기법은 동일 선박에 선적될 컨테이너 그룹은 동일 행에 선적되어야 한다는 제약 조건을 고려한 backtrack 기법이다. 탐색 과정에서 어떤 컨테이너 그룹이 제약 조건에 의하여 더 이상 장치할 수 있는 베이가 존재하지 않아 domain이 empty되는 상황이 발생하여 backtrack을 해야 할 때 domain empty가 발생한 컨테이너 그룹과 같은 종류의 배에 선적해야 할 남아있는 컨테이너 그룹의 수보다 해당 행에서 할당할 수 있는 빈 베이의 개수가 적을 경우에는 그 컨테이너 그룹이 할당되어야 할 행의 점유율과 반대편 행의 점유율을 비교하여 반대편 행의 점유율이 작을 경우에는 반대편 행으로 옮기고, 반대편 행의 점유율 많을 경우에는 그 컨테이너 그룹의 해당 배에 선적되는 컨테이너 그룹들이 놓일 수 있는 블록의 수를 늘이도록 한다. 반대로 domain empty가 발생한 컨테이너 그룹과 같은 종류의 배에 선적해야 할 남아 있는 컨테이너 그룹의 수보다 해당 행에서 할당 할 수 있는 빈 베이의 개수가 많을 경우에는 backtrack하여 해를 찾도록 한다. 이때에는 바로 직전의 컨테이너 그룹으로 backtrack하는데, 직전 컨테이너 그룹이 할당 되어 있던 행이 현재 domain이 empty된 컨테이너 그룹이 할당되어야 할 행의 반대 행인 경우는 그냥 건너뛰고 다시 그 이전의 컨테이너 그룹으로 backtrack하여 그 컨테이너 그룹이 동일 행에 할당

되어 있다면 그 컨테이너 그룹에 할당되었던 배의 바로 다음 배를 변수값으로 지정하지 않고, 다른 블록에 속한 배를 다음 변수값으로 지정한다. 이것은 직전 변수로 backtrack 할 때에 반대편 행에 장치된 컨테이너 그룹을 건너 뛰는 것은 같은 행에 놓인 컨테이너 그룹만 backtracking 시에 서로 영향을 끼치기 때문에 반대편 행에 놓여 있는 컨테이너 그룹은 backtrack 시에 건너 뛰는 것이다. 또한 이전 컨테이너 그룹으로 돌아가서 다음 변수값을 다른 블록에 있는 배를 변수값으로 지정하는 것은 특정 블록내의 배에 할당 하였을 때 domain이 empty 되는 컨테이너 그룹이 생긴다면 그 블록내의 다른 배에 할당하여도 마찬가지로의 결과가 나타나기 때문에 다른 블록의 배를 다음 변수값으로 할당하여 재탐색 한다. 계획 기간중의 각 단계에서 해를 탐색할 때 backtracking이 발생하여 그 단계의 첫번째 컨테이너 그룹까지 backtrack하여도 해를 구하지 못할 경우에는 domain empty가 발생하는 컨테이너 그룹의 해당 배에 선적되는 컨테이너 그룹들 중에서 제일 먼저 반입된 컨테이너 그룹이 도착한 단계로 돌아가서, 그 컨테이너 그룹이 기존에 할당 되었던 배의 해당 행이 아닌 반대편 행에 할당 하여 재탐색 한다. 이 또한 한쪽 행에 컨테이너들이 몰려서 장치된 것을 분산시키기 위한 것이다. 그런데 domain empty가 발생하는 컨테이너 그룹의 해당 배에 선적되는 컨테이너 그룹 중에서 제일 먼저 반입된 컨테이너 그룹이 현재의 계획 기간 이전에 도착한 경우에는 장치 위치를 바꿀 수 없으므로 이를 대체할 컨테이너 그룹을 찾아야 된다. 즉 domain empty가 발생하는 컨테이너 그룹과 같은 블록에 할당 되어 있는 다른 배에 선적되는 대체 컨테이너 그룹을 찾아서 그 컨테이너 그룹의 해당 배에 선적되는 컨테이너 그룹들이 중에서 처음 도착한 날짜가 현재의 계획 기간 안에 속할 경우에, 그 컨테이너 그룹이 처음 도착한 단계로 돌아가서 기존에 할당 되었던 배의 해당 행의 반대편 행에 할당 하도록 한다. 대체 컨테이너 그룹을 결정할 때에 그 블록 내에서 가장 최근에 도착한 배에 선적되는 컨테이너 그룹을 선택할 수 있고 가장 일찍 도착한 배에 선적되는 컨테이너 그룹을 선택할 수 있다. 같은 블록 내에서 대체 컨테이너 그룹을 찾을 수 없는 경우에는 같은 행의 다른 블록에서 찾도록 한다.

이와 같이 backtracking이 발생 하였을 때 원인이 되는 원인 변수로 backtrack하여 원하는 변수값을 할당함으로써 불필요한 변수로 backtrack 하는 경우를 없애게 되어 탐색 공간을 효율적으로 줄일 수 있다.

5. 실험 결과

실험 대상으로 사용한 자료는 부산 신선대 컨테이너 터미널의 2001년 5월 1일 부터 5월 19일까지의 반입되는 수출 컨테이너 정보와 컨테이너의 해당 선박자료를 사용하였는데, 5월 1일부터 5월 12일까지의 컨테이너 물량은 초기 장치장 데이터로 사용하였으며 5월 13일부터 5월 19일까지의 일주일

동안의 컨테이너 물량을 실제 스케줄링 할 입력 데이터로 사용하였다. 5월 13일부터 5월 19일까지 반입된 컨테이너 개수는 총 5978개 이고 이 컨테이너들이 선적 될 배의 종류는 총 80대 이다. 본 실험에서는 chronological backtracking 기법을 사용하여 실험을 하였고, 본 논문에서 제시한 제약 기법의 dependency directed backtracking 방법론의 효과를 알아보기 위하여 여러 가지 실험을 하였다. 프로그램은 C++을 이용하여 구현하였고 모든 실험은 CPU 1.7G MHz PC 상에서 수행되었다.

본 수출 장치장 계획 문제를 단순히 chronological backtracking 기법을 적용하였을 때 해를 탐색하는데 걸리는 시간이 24시간 이상 소요 되어도 해를 찾을 수 없었다. 본 논문에서 실험한 수출 장치장 공간할당 계획문제의 경우 변수가 500개 이상이며 변수값이 600개로 많은 변수와 변수값이 존재하는데, chronological backtracking은 backtracking 시에 exhaustive하게 search를 하여 많은 탐색 시간이 소요되었고 실제로 해가 존재하는지 판단할 수 없었다.

dependency-directed backtracking과 제약 조건 완화 기법을 적용하여 다음과 같은 여러 가지 실험을 하였고 결과는 다음과 같다.

<표 1> dependency-directed backtracking 실험결과

실험	Case1	Case2
실험 1	362초	371초
실험 2	64초	76초
실험 3	43초	53초

<표 1>에서 실험 1의 Case1은 행과 관계된 제약조건을 고려한 backtrack 기법을 적용하였는데, 해를 탐색하는 과정에서 domain empty된 컨테이너 그룹의 발생으로 인하여 backtrack 할 때 domain empty가 발생한 컨테이너 그룹의 행을 다른 행으로 바꿀 수 없어 대체 컨테이너 그룹의 행을 변경해야 하는 경우에 backtrack이 발생한 시점에서 가장 일찍 도착한 배의 종류에 선적되는 컨테이너 그룹을 선택하였다. 또한 이전 변수로 backtrack할 때 다른 행에 장치된 컨테이너 그룹을 skip하지 않았고, 다음 변수값을 이전에 할당 받았던 블록이 아닌 다른 블록에 속한 배를 변수값으로 선택하도록 하였다. 실험 1의 Case2는 Case1의 경우에서 대체 컨테이너 그룹을 backtrack이 발생한 시점에서 가장 늦게 도착한 배의 종류에 선적되는 컨테이너 그룹을 선택하도록 하였다. 실험 2의 Case1 역시 행과 관계된 제약조건을 고려한 backtrack 기법을 적용하였는데, 해를 탐색하는 과정에서 domain empty된 컨테이너 그룹의 발생으로 인하여 backtrack 할 때 domain empty가 발생한 컨테이너 그룹의 행을 다른 행으로 바꿀 수 없어 대체 컨테이너 그룹의 행을 변경해야 하는 경우에 가장 일찍 도착한 배의 종류에 선적되는 컨테이너 그룹을 선

택하고, 이전 변수로 backtrack할 때 이전변수가 다른 행에 장치된 컨테이너 그룹이면 skip하고 같은 행에 장치된 컨테이너 그룹으로 되돌아가게 하였다. 또한 같은 행에 장치된 컨테이너 그룹으로 backtrack하였을 때 다음 변수값을 이전에 할당되었던 베이의 다음 베이를 변수값으로 선택하지 않고 다른 블록에 속한 베이를 선택하도록 하였다. 실험 2의 Case2는 Case1의 경우에서 대체 컨테이너 그룹을 backtrack이 발생한 시점에서 가장 늦게 도착한 배의 종류에 선적되는 컨테이너 그룹을 선택하도록 하였다. 실험 3의 Case1은 실험 2의 Case1의 경우에서 블록의 특성을 고려한 backtrack 기법을 추가로 적용하였고 실험 3의 Case2는 실험 2의 Case2의 경우에서 블록의 특성을 고려한 backtrack 기법을 추가로 적용하였다.

<표 1>의 실험 결과를 보면 dependency-directed backtrack 기법을 적용함으로써 획기적으로 탐색시간이 단축되었음을 알 수 있다. 또한 여러 가지 dependency-directed backtrack 알고리즘을 함께 적용하였을 때 훨씬 더 탐색시간이 향상되는 것을 알 수 있다. 컨테이너 그룹들을 행들에 분산시켜 장치함으로써 불필요한 탐색을 줄여 탐색시간이 많이 단축되었고, 이전 변수로 backtrack할 때 domain empty가 발생한 컨테이너 그룹과 다른 행에 장치된 컨테이너 그룹은 건너뛰고 같은 행에 장치된 컨테이너 그룹으로 가서 이전에 할당되었던 블록이 아닌 다른 블록에 있는 베이를 변수값으로 선택함으로써 불필요한 탐색이 많이 줄었다. Case1, Case2 실험에서는 행을 바꿀 대체 컨테이너 그룹을 선택할 때 backtrack이 발생한 해당 시점에서 가장 일찍 도착한 배에 선적되는 컨테이너 그룹을 선택할 때 탐색시간이 좀더 향상되었다.

6. 결론

수출 장치장 공간 계획 문제는 복잡한 제약조건을 가지고 있으며 많은 변수와 변수값이 존재하는 문제이다. 본 논문에서는 이러한 문제를 효과적으로 해결하기 위해 변수와 변수값의 순서 지정 뿐 아니라 dependency-directed backtracking 기법과 제약조건 완화 기법을 적용한 제약만족 탐색 기법을 제시하였다. 특히, 본 연구에서는 블록과 행에 관련된 제약조건을 고려한 dependency-directed backtracking 기법을 적용함으로써 탐색시간을 획기적으로 줄일 수 있음을 확인하였다.

실제 부산 신선대 컨테이너 터미널에 반입되는 수출 컨테이너 자료로 실험한 결과 다양한 제약조건 하에서도 빠른 시간 내에 결과를 도출할 수 있었다. 수출 장치장 계획 문제에서는 특히 예정과 다르게 수출 컨테이너 물량이 반입되는 경우가 빈번하여 그 때마다 계획을 재수립하여야 하는데, 본 논문의 dependency-directed backtracking에 기반한 탐색 기법을 이용할 경우 큰 부담 없이 신속하게 계획을 재수립 할 수 있기 때문에 수출 장치장의 효율적인 운영에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] 이종술, 제약 만족 기법을 이용한 컨테이너 터미널의 수출 장치장 공간 할당 계획, 부산 대학교 석사 학위 논문, 2000
- [2] 김두열, 컨테이너 터미널의 수출 컨테이너에 대한 장치장 공간할당 계획 시스템, 부산 대학교 석사 학위논문, 1995
- [3] 박강태, 모델 변경 용이성을 고려한 컨테이너 터미널의 공간할당 계획, 부산 대학교 석사 학위 논문, 1997
- [4] B.Castilho and C.F Dagnazo, Handling strategies for import containers at marine terminals, *Transpn.Res*, Vol27B , No.2 pp.151-166 , 1993
- [5] D.J Kim and Y.T Park, A planning based slot assignment system for containers, *한국 지능 정보 시스템 학회 논문지*, 제 5 권, 제 1 호, 1999
- [6] K.H Kim, Y.M Park and K.R Ryu, Deriving decision rules to locate export containers in container yard, *Ejor*, 124(2000) , pp.89-101 , 1997
- [7] 백영수, 제약만족 탐색과 휴리스틱 교정 기법을 이용한 최적 선적 및 크레인 일정 계획, *한국 지능 정보 시스템 학회 논문지*, 제 6 권, 제 2 호, 2000
- [8] K.H Kim, D.Y Kim , Group Storage Methods at Container Port terminals, *The Material Handling Engineering Division 75th Anniversary Commemorative Volume ASME*, MH-Vol.2, pp.15-20, 1994
- [9] Baratak, R. , Constraint Programming: *In Pursuit of the Holy Grail* , *Proceedings of WDS99 (inv lecture)*. Prague, 1999
- [10] Kumar, V. , Algorithms for Constraint Satisfaction Problems: A Survey . *AI Magazine 1*, pp.32-44, 1992
- [11] Russell, S. and Norvig, P. , *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Prentice Hall, 1995
- [12] Tsang, E., *Foundations of Constraint Satisfaction*, Academic Press Limited, 1996
- [13] Tsang, E. and Voudouris, C., *Constraint Satisfaction in Discrete Optimization*, UNICOM Seminar, 1998