

## 컨테이너 터미널의 자원 할당계획에 관한 연구

장양자<sup>1†</sup> · 장성용<sup>2</sup> · 양창호<sup>3</sup> · 박진우<sup>1</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 산업공학과 / <sup>2</sup>서울산업대학교 산업공학과 / <sup>3</sup>한국해양수산개발원

## Study on the Resource Allocation Planning of Container Terminal

Yang-Ja Jang<sup>1</sup> · Seong-Yong Jang<sup>2</sup> · Chang-Ho Yang<sup>3</sup> · Jin-Woo Park<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-744

<sup>2</sup>Department of Industrial & Information Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul, 139-743

<sup>3</sup>Korea Maritime Institute, Seoul, 138-730

We focus on resource allocation planning in container terminal operation planning problems and present network design model and genetic algorithm. We present a network design model in which arc capacities must be properly dimensioned to sustain the container traffic. This model supports various planning aspects of container terminal and brings in a very general form. The integer programming model of network design can be extended to accommodate vertical or horizontal yard configuration by adding constraints such as restricting the sum of yard cranes allocated to a block of yards. We devise a genetic algorithm for the network design model in which genes have the form of general integers instead of binary integers. In computational experiments, it is found that the genetic algorithm can produce very good solution compared to the optimal solution obtained by CPLEX in terms of computation time and solution quality. This algorithm can be used to generate many alternatives of a resource allocation plan for the container terminal and to evaluate the alternatives using various tools such as simulation.

**Keywords:** resource allocation, network design, genetic algorithm

### 1. 서론

국제 컨테이너 수송 분야에서 두드러진 변화는 크게 선박을 대형화하여 규모의 경제를 실현하고, 항만에서 체류하는 시간을 단축하여 비용을 절감하려는 노력으로 나타나고 있다. 컨테이너 터미널에서 발생하는 비용이 컨테이너 총 수송원가의 상당 부분을 점유하고 있기 때문에 각국의 주요 항만들은 터미널 운영방식을 개선하는 등 운영효율화 노력에 박차를 가하고 있다. 항만시설 확충은 막대한 재원이 요구될 뿐 아니라 운영면에서도 높은 인건비와 부족한 노동력 확보문제를 해결해야 하기 때문에, 단위 면적당 생산성의 향상을 이룩하기 위하여 자동화된 터미널에 대한 시도가 꾸준히 이어져 오고 있다.

자동화 컨테이너 터미널에는 부두의 안벽에 설치되어 컨테

이너 선박으로부터 컨테이너를 하역하고, 부두에 있는 컨테이너를 선박에 선적하는 선측 장비인 컨테이너 크레인, 터미널 내에서의 컨테이너 이동을 위한 AGV, 야드 트랙터 등의 이동 장비와 컨테이너를 야드에 적재하거나, 적재된 컨테이너를 이동 장비에 실어주는 역할을 하는 트랜스퍼 크레인 등의 야드 장비가 운영되고 있다. 효율적이고 생산성 높은 자동화 컨테이너 터미널을 설계하고 운영하기 위해서는 터미널 선측 장비, 이동 장비, 야드 장비 등의 자동화된 기계 및 메카트로닉스 등의 요소 기술뿐 아니라 이러한 요소 기술들을 활용한 자동 제어 및 관리 시스템 기술에 대한 연구 개발도 대단히 중요하다.

컨테이너 터미널의 운영은 상당히 많은 의사 결정 사항들을 포괄하는 복잡한 프로세스이다. 컨테이너 터미널의 운영을 위한 의사 결정 문제는 <그림 1>에서 보는 바와 같이 크게 선박

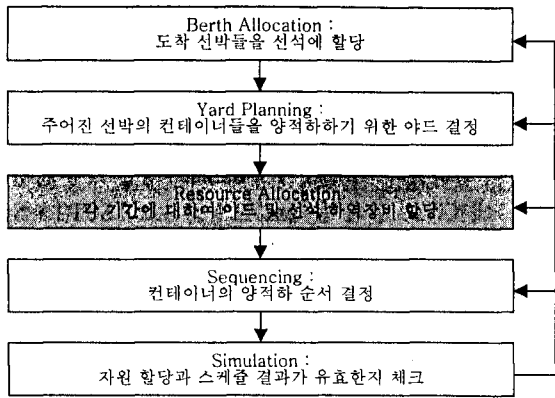


그림 1. 컨테이너 터미널의 운영계획.

계획(Berth Allocation), 야드 운영계획(Yard Planning), 자원 할당계획(Resource Allocation) 및 컨테이너 하역작업 일정계획(Sequencing) 문제로 구성되어 진다. 선박계획은 도착 예정되어 있는 선박을 선석에 할당하는 계획이고, 야드 운영계획은 기존의 컨테이너 야드 분포를 입력으로 받아 선박에 양·적하되는 컨테이너의 야드 배치를 최적화하는 계획이다. 자원 할당계획은 컨테이너의 야드 배치가 알려져 있는 상황에서 컨테이너의 이동을 위해 필요한 자원들을 선박에 할당하는 계획이고, 컨테이너 하역작업 일정계획은 야드 및 선석 자원이 할당되어 있을 때 이러한 자원들을 이용하여 작업 시간을 최소화하도록 컨테이너의 양·적하 순서 목록을 작성하는 작업이다. 특히 최근에는 컨테이너 터미널에서 사용하는 장비가 고가이기 때문에 장비를 효율적으로 운영하고자 하는 노력이 점점증하고 있다. 효율적인 컨테이너 터미널의 운영을 위해서는 다양한 의사 결정을 지원하는 규칙, 모형, 절차 및 알고리즘 등이 요구된다.

그러나 선박계획, 야드 운영계획 및 컨테이너 하역작업 일정계획 문제에 대하여는 시뮬레이션 및 알고리즘을 활용하는 연구들이 이루어져 왔으나 자원 할당계획에 대한 연구는 Zaffalon(1998, 1999)의 연구를 제외하고는 전무한 실정이다. 특히 Zaffalon(1999)에서는 이탈리아 LSCT(La Spezia Container Terminal)의 자원 할당계획을 모형화하여 해를 구하고, 실제 데이터와 비교한 결과 약 1/3의 운영비용절감 효과를 확인하였다. 이에 본 연구에서는 컨테이너 터미널의 중요한 자원인 선석 크레인, 야드 크레인, AGV 등의 자원 할당계획을 위한 모형과 해법을 제시하고자 한다.

앞으로 2장에서 컨테이너 터미널의 운영에 관한 기존 연구들을 살펴보고, 3, 4장에서는 선박에 양·적하되는 컨테이너의 야드 분포가 알려져 있는 상황에서 자원을 효율적으로 할당하기 위한 자원 할당계획 모형을 소개한다. 5장에서 자원 할당계획 모형에 대한 유전자 알고리즘 해법을 제시하고, 6장에서는 컨테이너 터미널의 시뮬레이션 데이터를 이용한 실험 결과를 보여준다. 7장에서 결론과 추후 연구 과제를 제시하고자 한다.

## 2. 기존 연구 현황

컨테이너 터미널에 대한 연구는 시뮬레이션 연구가 주를 이루고 있다. Hayuth(1994)은 시뮬레이션 방법이 주로 처리량, 선박 구성, 선박 도착 패턴 및 터미널 레이아웃의 변화에 대한 효과를 분석하기 위하여 사용된다고 하였다. 시뮬레이션 모형은 중요 인자와 설비 활용률 등의 터미널 성능 지수를 평가해 주기 때문에 터미널의 의사 결정을 지원하기 위한 도구로서도 활용된다(Tolujev, 1994). 국제적으로 컨테이너 터미널의 운영 문제에 시뮬레이션 모형을 활용한 연구와 실제 사례가 꾸준히 보고되고 있으며(Gambardella, 1998; Merkurjev, 1998), 컨테이너 터미널 설계 문제에 적용한 연구 사례도 보고되었다. Mosca(1993)은 터미널의 운영 상황을 유효하게 표현하는 시뮬레이션 모형을 개발하고, 터미널 자동화를 위하여 새로 도입된 장비의 타당성을 검토하였다. Merkurjev(1998)은 항만의 전체적인 운영 상황을 시뮬레이션하여 항만 설계의 도구로서 활용하였다. 이상의 시뮬레이션 모델들은 터미널 운영자들을 교육시키거나 터미널의 설계를 위한 보조로서의 역할을 수행할 뿐 진정한 최적화 도구로서의 역할은 하지 못하였다(Tolujev, 1996).

최근에는 최적화 기법을 접목한 시뮬레이션 모형에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. Bruzzone(1998)은 선박계획과 야드 레이아웃을 위한 유전자 알고리즘을 제시하였다. Gambardella(1998)은 야드계획, 선박계획 및 컨테이너 양·적하 계획에 최적화 전략을 도입하여 그 결과를 시뮬레이션으로 확인하는 방법론을 취하였다.

Bontempi(1997)은 컨테이너 터미널 운영을 최적화하기 위한 시스템을 소개하였다. 이 연구에서 컨테이너 터미널 운영 시스템은 장기간의 컨테이너 수요를 예측하는 수요예측 모듈, 컨테이너 야드 배치 결정, 터미널 자원 할당계획 수립 및 컨테이너 양·적하 작업 순서를 결정하는 중기 계획 모듈, 중·장기 계획의 유효성을 검증하는 시뮬레이션 모듈로 구성되었다. 컨테이너 야드 배치계획은 하나 이상의 효율적인 컨테이너 적재 정책을 도출하기 위하여 먼저 잡삽 일정계획 문제를 풀어서 컨테이너 양·적하 작업을 최적화하는 야드 구성(yard configuration)을 결정하고, 그 야드 구성과 편차가 가장 작아지도록 컨테이너를 적재하는 정책을 생성하였다. 터미널 자원 할당계획 모듈은 네트워크 설계 문제로 모형화하고 그 해법으로 상업용 패키지인 Genesis를 활용한 유전자 알고리즘을 제시하였다. 컨테이너 양·적하 작업 순서를 결정하는 일정계획 모듈에서는 1단계에서 터미널의 상황에 대한 자료를 근거로 잡삽 일정계획 문제로 모형화하고, 타부 탐색 기법을 활용한 해법으로 양·적하 작업 목록을 작성하였다(Off-line Scheduling). 다음 2단계에서는 예상치 못한 상황이 발생했을 경우에 반응적인 일정계획(Reactive Scheduling)을 수행하였다. 시뮬레이션 모듈은 객체 지향 분석 및 설계 기법을 응용하여 시뮬레이션 클래스를 설계하고, ModsimIII를 이용하여 모델링하였다.

Gambardella(1998) 등은 시뮬레이션 모듈을 Planner 에이전트, Operator 에이전트, Component 에이전트로 구성된 분산 에이전트 시스템으로 설계하였다. Planner 에이전트는 yard planner, ship planner로 구성하고, Operator 에이전트는 야드 크레인, 선석 크레인 및 셔틀 트럭의 운영자이며, Component 에이전트는 야드, 선박, 열차와 트럭으로 구성하였다. Zaffalon 등은 이탈리아 LSCT(La Spezia Container Terminal)의 운영을 위한 자원 할당계획 및 컨테이너 일정계획 시스템을 개발하였다. 먼저 첫단계에서 야드와 선박 간의 컨테이너 양·적하를 네트워크 플로우로 가정하여 네트워크 설계문제로 공식화하고 각 교대조에 대하여 장비 및 인력 할당계획을 수립하였다. 각 교대조가 사용할 자원이 결정되면 선박에서의 컨테이너 양·적하 순서를 결정하기 위하여 유연 잡샵 일정계획 문제(Flexible Job Shop Scheduling Problem)로 모형화하고 Mastroilli의 발견적 기법을 활용하여 컨테이너 양·적하 순서 목록을 작성하였다. 3단계에서는 시뮬레이션 모델을 통하여 자원 할당계획 및 컨테이너 일정계획 결과가 유효한지 확인하였다.

Zaffalon(1999)은 기술 보고서에서 수요 예측 모듈, 계획 모듈, 시뮬레이션 모듈로 구성된 터미널 운영 시스템을 소개하고 계획 모듈 중 자원 할당 문제에 대한 해법을 제시하였다. 자원 할당 문제에서 고려하는 자원은 기계 및 인력으로서 자원의 목적은 예정된 수량의 컨테이너를 이동시키는 것이다. 터미널에서 중요한 비용 요소가 자원이므로 자원을 효율적으로 운영하는 것이 터미널 수익에 대해서 매우 중요한 영향을 미치게 된다. 자원 운영계획은 터미널을 수송 네트워크 문제로 모형화하고, 예정된 수량의 컨테이너를 수송할 수 있도록 네트워크의 아크 용량을 결정하는 문제이다. 경영 과학 분야에서 이러한 문제를 네트워크 설계 문제로 분류하고 있다. 특히 기본적인 네트워크 설계 문제를 확장하여 다수의 기간

(Multiple period) 수용, 예정된 선박의 숫자 일반화, 동일한 선박에 대하여 양하와 적하 흐름을 모두 표현, 선박의 최종 작업 기한 반영, 하나의 선박에 대하여 동시에 작업할 수 있는 선석 크레인의 숫자 제한, 열차와 트럭을 동일하게 처리할 수 있는 모형을 수립하였다. 이 연구에서 Zaffalon 등은 자원 운영계획 문제를 네트워크 설계 문제로 모형화하고 LSCT(La Spezia Container Terminal)의 실제 사례에 대하여 CPLEX로 해를 구하였다. 네트워크 설계 문제는 매우 복잡한 혼합 정수계획 모형으로서 적절한 시간 내에 최적해를 구하기 곤란하기 때문에 해를 구하는 시간을 1분으로 제한하여 근사해를 구하였다. 그 결과 선형계획법으로 완화된 모형의 최적해와의 평균 차는 약 6.7%였고, 터미널 실제 데이터와 비교했을 때 약 1/3의 비용 절약 효과를 얻을 수 있었다. 그러나 문제의 크기가 더욱 증가하게 되면 계산 시간 때문에 빠른 해를 구할 수 있는 알고리즘이 요구되어 진다.

### 3. 자원 할당 문제를 위한 네트워크 설계 모형

자원 할당계획을 작성하기 위하여 다음과 같은 상황을 가정한다.

- 선석의 개수는 주어져 있다.
- 선박의 예상 도착 시간 및 서비스 종료 시간은 미리 주어져 있다.
- 선박에 양·적하되는 컨테이너들의 야드 위치는 미리 알려져 있다.
- 선박 한대에 대하여 동시에 한대 이상의 선석 크레인으로 양·적하 작업을 할 수 있다.
- 서로 다른 선박으로 양·적하되는 컨테이너들은 동일한

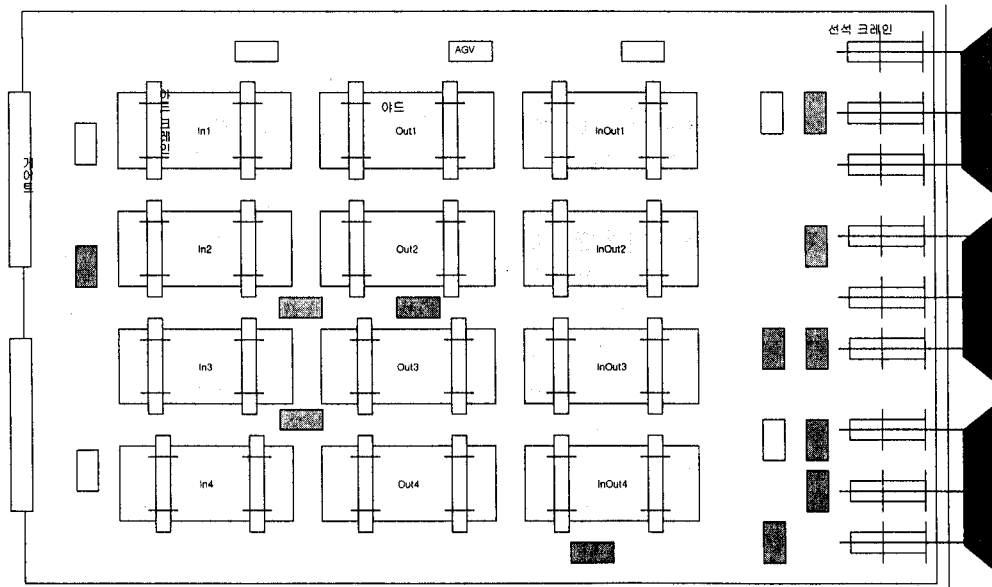


그림 2. 컨테이너 터미널의 배치.

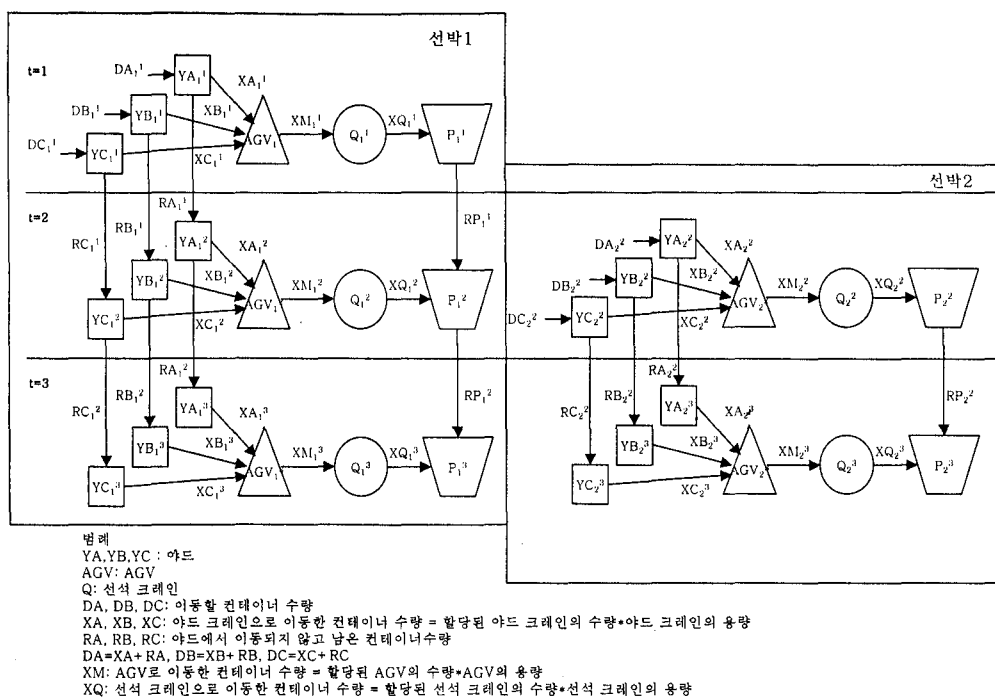


그림 3. 자원 할당계획의 네트워크 설계 모형.

야드를 공유할 수 있다.

- 야드 자원들은 선박에 대하여 공유되어 사용된다.
- 자원들의 컨테이너 양하 처리 시간과 적하 처리 시간은 동일하다

컨테이너 터미널은 <그림 2>에서 보여지듯이 선석, 야드, 게이트 등의 구역으로 구성되어 있고, 컨테이너 이동을 위한 장비인 선석 크레인(Quay Crane), 야드 크레인(Yard Crane), AGV 등을 이용하여 컨테이너 장비를 이송한다. 이밖에도 내륙 수송을 위한 철도와 특수 저장을 위한 냉동 창고와 탱크, 화물 작업을 위한 공간 등이 존재한다.

자원 할당계획은 컨테이너 터미널의 각 노드 간(야드-AGV, AGV-선석 크레인, 선석 크레인-선박 등)에 컨테이너 이송을 위하여 필요한 자원을 할당하는 의사 결정 문제이므로 <그림 3>과 같이 할당된 자원의 수량이 네트워크의 용량이 되는 네트워크 설계 문제로 모형화할 수 있다.

<그림 3>은 기간 1에 도착하는 선박  $P_1$ 과 기간 2에 도착하는 선박  $P_2$ 의 양·적하되는 야드, 컨테이너 수량 및 시점이 주어져 있는 상황에서 각 선박에 할당되는 야드 크레인과 AGV 및 선석 크레인의 수량을 결정하는 네트워크 설계 문제를 보여주고 있다. 선박  $P_1$ 에 대한 서비스는 기간 1에서 시작해서 기간 3에 종료되어야 하며, 선박  $P_2$ 의 서비스는 기간 2에서 시작해서 기간 3에 종료되어야만 한다. 야드 YA, YB, YC와 AGV를 연결하는 아크는 각 기간에서 선박  $P_1$ 과  $P_2$ 로 양·적하되어야 하는 컨테이너의 수량을 표시한다. AGV와 선석 크레인 Q를 연결하는 아크는 선박에 할당된 AGV의 수량(즉, 용

량)을 나타내고, 선석 크레인 Q와 선박을 연결하는 아크는 선박에 할당된 선석 크레인의 수량(즉, 용량)을 표시한다. 각 야드에서 기간 1에서 2로 연결되는 아크는 기간 1에서 양·적하되지 못한 컨테이너들이 다음 기간으로 넘어가는 것을 의미한다. 네트워크에서 소스(source)와 싱크(sink)를 제외한 모든 노드에서의 흐름은 보존되어야 한다. 즉, 인입량과 인출량이 같아야만 한다.

위의 네트워크 설계 모형에서 다음과 같이 고려할 몇 가지 사항들이 있다.

가. 양·적하 흐름의 구분

적하는 야드에서 선박으로 컨테이너가 흘러가는 것으로 모형화하고, 양하는 선박에서 야드로 컨테이너가 흘러가는 것으로 모형화해야 한다. 그러나 직관적으로 자원할당을 최적화하기 위하여 모형에서 고려하고 있는 요소는 야드와 선박 간의 양·적하되는 컨테이너의 수량이므로 양·적하를 위하여 사용되는 자원의 처리 시간이 동일하다면 컨테이너 흐름 방향은 하나로 통일하여도 된다.

나. 한 기간에 두 대 이상의 선박을 처리하는 경우

상기의 네트워크 설계 모형은 이산적인 시간(기간)을 가정하고 있으므로, 하나의 선석에서 한 기간에 두 대 이상의 선박의 양·적하를 수행해야 하는 경우를 반영하기 위하여 약간의 고려를 해야 한다. 두 대 이상의 선박이 하나의 선석에서 동일한 기간에 연이어 작업을 하게 되므로 <그림 4>에서 AGV<sub>1</sub>과 AGV<sub>2</sub>, 그리고 Q<sub>1</sub>과 Q<sub>2</sub>는 동일한 자원이어야 한다. 따라서 기

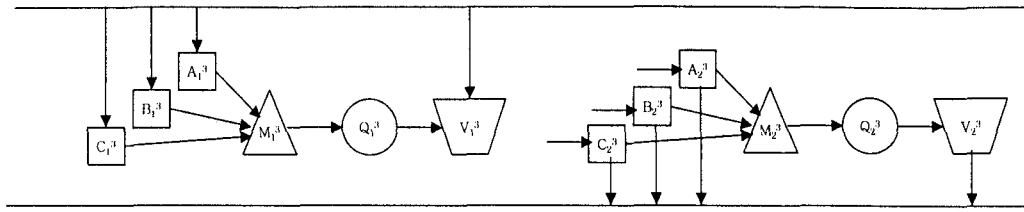


그림 4. 한 기간에 두 대 이상의 선박을 처리하는 경우.

간  $t$ 에서  $P_1$ 과  $P_2$ 를 위하여 양·적하된 컨테이너의 수량은 기간  $t$ 에 할당된 자원의 용량을 넘지 못한다는 제약을 고려해야 한다.

다. 납기의 표현

컨테이너 터미널에서 서비스를 받는 선박의 입·출항 일정은 터미널에 미리 알려져 있다. 만약 터미널에서 선박의 출항 일정에 맞추어 컨테이너를 양·적하하지 못하면 벌금을 부담해야 할 뿐만 아니라 컨테이너 터미널의 평판에 악영향을 주게 된다. 따라서 모형에서는 출항 전에 컨테이너 양·적하가 모두 끝나도록 모형화되어 있다.

라. 기간의 설정

일반적으로 컨테이너 터미널의 자원 할당은 교대조가 바뀔 때 같이 변동되는 것이 자연스럽다. 모형에서는 각 기간에 야드에 할당되는 야드 크레인의 수량, 선석에 할당되는 선석 크레인의 수량, AGV의 수량이 변경되므로 기간의 설정은 교대조가 근무하는 시간으로 설정할 수 있다. 그러나 반드시 교대조의 근무 시간을 사용해야 하는 것은 아니고, 컨테이너 터미널의 상황, 각 국의 근로 여건, 또는 자원 할당을 위해 적절한 시간을 고려하여 설정할 수 있다.

4. 자원 할당계획의 수리 모형

계획 기간에 대하여 수익을 최대화하는 자원 할당 문제를 네트워크 설계 모형에 의하여 다음과 같은 정수계획문제(Integer Programming Problem)로 수식화할 수 있다.

입력 파라미터 및 변수 정의:

- $P$  : 선박의 집합
- $Y$  : 야드의 집합
- $N$  : 야드, AGV, 선석 크레인, 선박의 집합
- $tp_1$  : 선박  $p$ 의 컨테이너 작업 시작 기간
- $tp_n$  : 선박  $p$ 의 컨테이너 작업 종료 기간
- $d_{itp_1}^p$  : 야드  $i$ 에서 선박  $p$ 로 이동해야 하는 컨테이너 수량
- $I, j$  : 야드, AGV, 선석 크레인, 선박
- $A$  : 아크의 집합,
- $A'$  : 야드와 AGV를 연결하는 아크
- $A''$  : 야드와 야드를 연결하는 아크
- $A^*$  : AGV와 선석 크레인을 연결하는 아크
- $A^+$  : 선석 크레인과 선박을 연결하는 아크
- $A^\circ$  : 선박과 선박을 연결하는 아크
- $A = A' \cup A'' \cup A^* \cup A^+ \cup A^\circ$
- $u_{ij}$  :  $(i, j)$  아크에 할당된 자원의 기간당 용량

$$\text{Min } \sum_{t \in T} \left[ \sum_{(i,j) \in A} (f_Y y_{ijt} + \sum_{p \in P} c_Y x_{ijt}^p) + \left( \sum_{(i,j) \in A} * f_A y_{ijt} + \sum_{p \in P} c_A x_{ijt}^p \right) + \left( \sum_{(i,j) \in A} f_C y_{ijt} + \sum_{p \in P} c_C x_{ijt}^p \right) \right] \quad (1)$$

s.t.

$$d_{itp_1}^p = r_{itp_1}^p + \sum_j x_{ijt}^p, \quad i \in Y, p \in P \quad (2)$$

$$r_{i(t-1)}^p = r_{it}^p + \sum_j x_{ijt}^p, \quad i \in Y, p \in P, t = tp_1 + 1, \dots, tp_n - 1 \quad (3)$$

$$\sum_{j \in A^* \cup A^+} x_{jtp_n}^p = \sum_{i \in Y} d_{itp_1}^p, \quad p \in P \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N-Y} x_{ijt}^p - \sum_{j \in N-Y} x_{jit}^p = 0, \quad i \in N-Y, p \in P \quad (5)$$

$$\sum_{p \in P} x_{ijt}^p \leq u_{ij} y_{ijt}, \quad (i, j) \in A' \cup A^* \cup A^+, t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{(ij) \in A'} y_{ijt} \leq YC, \quad t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{(ij) \in A^*} y_{ijt} \leq AGV, \quad t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{(ij) \in A^+} y_{ijt} \leq CC, \quad t \in T \quad (9)$$

$$x_{ijt}^p, y_{ijt}, r_{it}^p \in \text{integer}$$

수식 1. 네트워크 설계 문제의 정수계획 모형

- $f_c/f_A/f_Y$  : 선석 크레인/AGV/야드 크레인의 고정 비용
- $cc/c_A/c_Y$  : 선석 크레인/AGV/야드 크레인의 변동 비용
- $CC$  : 선석 크레인의 총수량
- $AGV$  : AGV의 총수량
- $YC$  : 야드 크레인의 총수량
- $x_{ijt}^p$  : 시간  $t$ 에 선박  $p$ 에 대한 아크( $i, j$ )의 수송량
- $y_{ijt}$  : 시간  $t$ 에 ( $i, j$ ) 아크에 할당된 자원의 수량
- $r_{it}^p$  : 시간  $t$ 에 양  $\cdot$  적하지 못하고 야드 또는 선박  $i$ 에 남은 컨테이너 수량

[수식 1]의 수리 모형에서 식(1)은 비용의 최소화를 위한 목적함수이다. 비용은 각기간에 할당된 선석 크레인, AGV, 야드 크레인의 고정 비용과 컨테이너 이송으로 야기되는 변동 비용의 합으로 표현한다. 식(2)와 (3)은 모든 야드와 선박에서 시간  $t$ 에 양  $\cdot$  적하지 못 한 수량이 다음 시간  $t+1$ 의 수요가 되는 것을 표현한 수식이다. 식(4)는 선박의 양  $\cdot$  적하가 끝나야 하는 납기 시점에서 모든 수요를 만족해야 하는 제약을 나타내고, 식(5)는 야드를 제외한 모든 노드에서 들어가는 컨테이너 수량과 나가는 컨테이너 수량이 같아야 하는 제약을 표현하고, 식(6)은 양  $\cdot$  적하되는 컨테이너 수량이 할당된 자원의 용량을 초과할 수 없다는 제약을 나타낸다. 식 (7), (8), (9)는 가능한 자원의 수량에 대한 제약이다.

### 5. 자원 할당계획을 위한 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)

네트워크 설계 모형은 수송, 통신, 물류 및 생산-분배 시스템과 같이 매우 넓은 영역에서 활용되고 있다. Crainic(2000)은 서비

스 네트워크 설계 문제에 대한 State-of-the-art를 제시하였다. 가장 일반적인 네트워크 설계 문제인 multi-commodity capacitated network design(MCND) 모형을 기반으로 하여 다양한 형태의 네트워크 설계 문제를 열거하였다. 네트워크 설계 문제의 해법으로 가장 광범위하게 이용되는 방법론은 Lagrangian Relaxation과 같이 하나 이상의 제약식을 완화하여 좀더 단순한 형태의 문제를 만드는 것이다. 완화된 문제의 해는 분지한 계법(Branch and Bound Method)의 하한을 생성한다.

네트워크 설계문제는 모형화했을 때 혼합 정수계획 문제가 되며, NP-Complete 문제에 해당한다. 작은 크기의 문제는 최적해 도구(예를 들어 CPLEX, LINDO)로 짧은 시간 내에 해를 구할 수 있으나 현실적인 크기의 문제에 대해서는 원하는 시간 내에 해를 구하기 어렵다. 문제의 크기가 증대하고 빠른 해법에 대한 요구가 증가함에 따라 타부 탐색, 시뮬레이티드 어닐링 및 유전자 알고리즘과 같은 메타 휴리스틱도 점진적으로 많이 활용되고 있다. 본 연구에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 자원 할당계획을 구하였다.

#### 5.1 유전자 알고리즘의 개요

유전자 알고리즘은 복잡도가 높은 문제에 대하여 최적은 아니지만 상대적으로 좋은 해를 제공하는 발견적 탐색 기법으로 알려져 있다. 일반적인 유전자 알고리즘의 해법 절차는 다음과 같다.

단계 1. 파라미터를 초기화한다.

- 종료 조건
- 세대  $t$ 의 모집단,  $P(t)$
- 모집단의 크기,  $N$
- 교차율,  $P_c$ .

표 1. 자원 할당계획 문제의 입력 데이터 일부

선박	선석	입항일시	출항일시	in_yard1	in_yard2	in_yard3	in_yard4	out_yard1	out_yard2
1	2	2000-1-1 10:30	2000-1-1 19:00	117	109	73	65	127	109
2	1	2000-1-1 12:27	2000-1-2 0:23	138	128	85	75	149	128
3	3	2000-1-1 12:35	2000-1-2 0:25	107	101	67	60	118	101
4	1	2000-1-2 8:40	2000-1-3 2:00	108	102	68	62	119	102
5	3	2000-1-2 10:45	2000-1-2 21:20	98	93	62	56	108	93
6	2	2000-1-2 18:05	2000-1-3 11:00	87	85	57	53	99	85
7	3	2000-1-2 22:45	2000-1-3 7:55	102	96	64	57	112	96
8	1	2000-1-3 6:40	2000-1-4 11:20	113	106	71	63	124	106
9	3	2000-1-3 12:35	2000-1-4 5:00	100	95	63	57	111	95
10	2	2000-1-3 21:05	2000-1-4 23:30	133	124	82	72	144	124
11	3	2000-1-4 6:35	2000-1-5 2:20	87	83	56	52	97	83
12	1	2000-1-4 12:50	2000-1-5 4:03	98	92	62	56	108	92
13	3	2000-1-5 3:20	2000-1-5 16:25	97	92	61	57	107	92
14	2	2000-1-5 14:35	2000-1-6 5:43	114	106	71	62	124	106
15	1	2000-1-5 20:58	2000-1-6 10:15	108	102	68	61	119	102
16	3	2000-1-6 7:53	2000-1-6 23:42	109	101	68	61	119	102
17	2	2000-1-6 11:40	2000-1-7 2:00	108	100	68	61	118	101
18	1	2000-1-7 15:05	2000-1-8 8:10	119	109	74	65	129	110
19	2	2000-1-7 17:55	2000-1-8 5:25	103	97	65	58	113	97
20	3	2000-1-8 0:35	2000-1-8 17:35	110	103	68	61	120	103

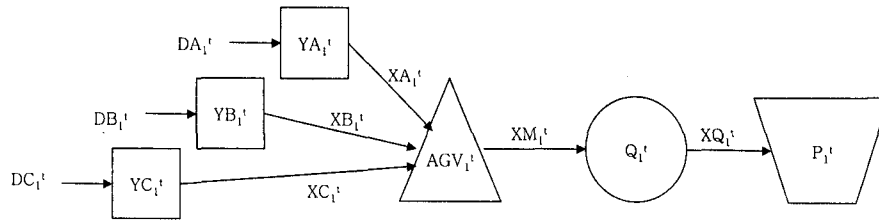


그림 5. 네트워크 설계 문제의 예제.

- 돌연변이율,  $P_m$
- 벌금률,  $P_p$

- 단계 2. 초기 모집단을 만든다.
- 단계 3.  $P(t)$ 에 있는 모든 개체의 적응도를 평가한다.
- 단계 4.  $t=t+1$ 로 두고  $P(t-1)$ 로부터  $P(t)$ 를 선별한다.  
가능해가 없다면 초기 최고 비가능해를 기록한다.
- 단계 5. 교차(Crossover)
  - ①  $[0, 1]$ 에서 난수를 발생시켜  $r < P_c$ 이면 그 개체를 교차하는 개체로 둔다. 모든 개체에 대해서 이를 행한다.
  - ② 교차 대상 개체 중에서 임의로 쌍(두 부모)을 만든다.
  - ③ 각 쌍의 개체를 교차하여 두 자손을 생산한다.  $P(t)$ 에서 교차된 부모 개체를 제거하고 생산된 자손을  $P(t)$ 에 삽입한다.
- 단계 6.  $P(t)$ 를 돌연변이(Mutation)시킨다. 개체의 각 원소에 대해  $[0, 1]$  사이의 난수  $r$ 을 발생하여,  $r < P_m$ 이면 그 원소를 돌연변이 한다.
- 단계 7. 적응도 평가를 한다. 비가능해에 벌금(Penalty)을 부과하고 가능해가 없으면 최고 비가능해를 기록한다.
- 단계 8. 종료 조건을 만족하면 끝낸다. 그렇지 않으면 단계 4로 간다.

일반적인 유전자 알고리즘의 절차는 이상과 같으나 네트워

크 설계 문제에 대하여 유전자 알고리즘을 적용하기 위하여 다음과 같은 유전자 알고리즘의 구성 요소들을 고려하였다. 어떤 문제에 유전자 알고리즘을 적용한다는 것은 유전자 알고리즘의 절차를 따르되 문제의 특성에 맞게 알고리즘의 구성 요소인 해의 표현(유전자 설계와 개체의 표현), 유전연산자(교차, 돌연변이), 적응도 평가방법, 해의 가능성 유지방법, 목적함수가 다수개일 경우의 대처 방안 및 알고리즘의 병렬 처리 여부 등을 재구성하는 것을 의미한다.

### 5.2 유전자 설계

네트워크 설계 문제의 해는 각 아크에 할당된 자원의 수량으로서 정수로 구성된 벡터(0, 1, 2, 3, ..., 1)와 같은 형태가 되므로, 유전자 알고리즘에서 정수 벡터가 유전자로서 작용하게 된다. 예를 들어 <그림 5>에서 기간 1에 선박  $P_1$ 에 할당된 자원이, 각 야드 YA, YB, YC에 야드 크레인 2대, 1대, 1대가 배정되고, AGV가 10대, 선석 크레인이 2대 할당된 경우이면 이때의 유전자는 기간 1, 선박  $V_1$ 에 대해서(2, 1, 1, 10, 2)가 된다. 유전자의 성분은 야드 크레인의 총수, AGV의 총수 및 선석 크레인의 총수를 상회하지 않는 범위에서 임의로 선택되어진다. 자원 할당계획은 모든 대상 기간에 대하여 자원 할당을 수행하기 때문에 유전자는 모든 기간에 대하여 할당된 자원의 대수가 된다(<표 2>).

표 2. 자원 할당계획에 대한 유전자 알고리즘의 개체 표현

PERIOD	CC1	CC2	CC3	AGV1	AGV2	AGV3	IN1	IN2	IN3	IN4	OUT1	OUT2	OUT3	OUT4	INOUT1	INOUT2	INOUT3	INOUT4
0	3	4	2	25	2	1	1	0	0	1	4	5	0	0	1	1	0	4
1	2	3	4	16	3	5	2	1	2	2	0	1	1	0	2	2	1	1
2	4	3	2	15	13	2	0	2	4	1	1	3	0	1	0	0	1	0
3	3	4	2	2	23	0	3	2	3	1	1	3	1	0	1	0	0	3
4	3	2	4	7	13	5	2	4	2	1	2	2	0	0	0	0	0	1
5	2	3	4	13	15	0	1	0	4	2	1	4	0	0	2	2	1	0
6	4	2	3	27	0	0	1	2	4	3	4	0	0	1	1	0	1	0
7	4	2	3	1	19	3	3	1	0	2	0	0	2	4	0	4	2	0
8	2	3	4	4	3	5	3	2	2	0	0	0	0	1	0	3	0	4
9	3	4	2	2	1	1	3	0	0	1	1	0	4	1	1	3	0	2
10	3	3	3	8	8	3	0	1	1	3	1	2	0	2	1	0	2	0
11	4	2	3	9	2	6	3	4	0	2	0	0	0	0	3	1	2	0
12	3	3	3	2	12	1	3	5	0	0	0	1	0	0	3	0	0	0
13	4	3	2	14	2	13	2	0	6	3	2	1	0	0	0	3	0	0

5.3 선택(Selection)

모집단의 모든 부모들을 rank based quadratic procedure (David, 1995)를 이용하여 선택한다. rank based quadratic procedure 는 먼저 모든 부모들을 적응도(fitness)를 기준으로 정렬하여 1 부터  $N$ 까지의 순서를 부여한다. 0과  $\sqrt{N}$  사이에서 임의의 숫자를 생성하여 그 값을 제공하고 소수점 아래를 절삭한 다음 1 을 더한다. 이 값이 선택할 부모의 순서가 된다. 두 번째 부모의 선택도 같은 절차를 따른다. 동일한 부모가 선택되면 서로 상이한 부모가 선택될 때까지 반복한다.

5.4 교차(Crossover)

교차 방법에는 유전자의 임의의 한 점을 기준으로 절단하여 두 부모로부터 각각 절단된 한 부분의 스트링씩을 상속받아 자손을 생산하는 일점 교차와 두 개의 절단점을 갖는 이점 교차, 그리고 한 부모로부터 부분적인 순서를 받아들이고, 다른 부모로부터 각 성분의 상대적인 순서를 유지하여 받아들이는 순서 교차 등이 있다(김억근, 1997).

본 연구에서 자손 생산은 이점 교차의 일반화된 형태인 일 양 교차(uniform crossover)를 사용한다. 이 교차 방법은 두 부모의 같은 위치에 있는 유전 성분 중에서 하나의 성분을 선택하여 자손의 그 위치에 상속하는 방법이다. 예를 들어 두 부모가  $X_1, X_2$ 라면

$$X_1 = (3, 2, 5, 7, 4)$$

$$X_2 = (2, 2, 3, 5, 5)$$

이고, 임의로 생성한 템플릿이(1, 1, 0, 1, 0)일 때, 그 자손은

$$C_1 = (3, 2, 3, 7, 5)$$

$$C_2 = (2, 2, 5, 5, 4)$$

와 같은 형태가 된다.

본 연구에서 각 개체는  $n$  기간에 대한 자원 할당계획이므로  $n$  기간에 대하여 템플릿을 생성하고 자손이 기간별로 유전 성분을 상속받도록 하였다. 즉, 기간이 4일 때 템플릿이 (1, 0, 1, 0)이라면 자손 1은 부모 1의 기간 1과 기간 3의 자원 할당계획을, 부모 2의 기간 2와 기간 4의 자원 할당계획을 상속받는다. 자손 2는 부모 1과 2로부터 나머지 기간에 대한 자원 할당을 상속받게 된다. 따라서 각 기간의 가용한 자원 수량에 대한 제약을 어기지 않는 자손의 생성이 가능하다.

5.5 돌연변이(Mutation)

돌연변이는 개체 또는 유전 성분 단위로 이루어질 수 있는데, 여기서는 유전 성분 단위, 즉, 기간에 대하여 돌연변이가 발생한다. 모집단의 크기가  $N$ , 모집단의 돌연변이율이  $m$ 이면 한 세대에서 평균( $N \times m \times$ 대상 기간수)개의 기간에서 돌연변

이가 일어난다. 돌연변이될 기간이 선택되면 그 기간에 대한 자원 할당을 새로이 구하였다.

5.6 적응도 평가

제약식이 있는 수치 최적화 문제에서 제약식을 다루는 방법에는 가능해를 유지하는 방법과 비가능해를 허용하되 벌금 함수를 이용하는 방법이 있다.

본 유전자 알고리즘에서는 비가능해를 모집단에 포함시켜서 세대를 진행한다. 최적해는 가능해와 비가능해의 경계상에 존재하기 때문에 비가능해를 허용하는 것이 최적해에 근접하는 유효한 방법으로 알려져 있다. 그러나 비가능해에 대한 벌금 함수의 설계를 위한 일반적인 규칙은 제안되지 않고 있다.

본 연구에서는 할당된 자원을 이용하여 납기 안에 양·적하지 못한 컨테이너의 수량을 결정하고, 컨테이너 개당 벌금의 곱으로서 벌금 함수를 정의하였다. 매기간에 선박에 할당된 자원 중 병목 자원이 결정되면, 그 자원의 최대 용량이 그 기간에 양·적할 수 있는 컨테이너 수량이 되고, 양·적하지 못하고 남은 컨테이너는 다음 기간의 수요로 넘겨진다. 선박의 납기에 여전히 남아 있는 컨테이너가 있다면 비가능해로 판명된다. 이런 경우 개체의 적응도는 목적함수값에다 벌금값을 합산한 값이 된다.

비가능해가 최선해로 산출되는 확률을 낮추기 위하여 벌금을 높게 부과하였다.

6. 실험

컨테이너 터미널의 배치는 <그림 2>와 같이 선석 3개, 수출 컨테이너의 적재를 위한 4개의 야드(In1, In2, In3, In4)와 수출용 컨테이너를 적재하는 야드 4개(Out1, Out2, Out3, Out4), 환적용 야드 4개(InOut1, InOut2, InOut3, InOut4)로서 총 12개의 야드로 구성되어 있다. 각 선석에는 총 9대의 선석 크레인(CC)이 설치되어 있으며, 컨테이너 양·적하 수량에 따라 선석 크레인의 대수를 조정하여 양·적하 작업을 수행한다. 세 개의 야드(예를 들어, Out1, In1, InOut1)가 공통으로 6대의 야드 크레인(YC)을 사용하고 있다. 총 AGV 대수는 30이다.

현실적인 문제를 풀기 위하여 먼저 부산 소재 컨테이너 터미널의 1개월간 선박 입·출항 데이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과로 얻어진 컨테이너 터미널의 자원 수량과 용량은 다음과 같다. AGV는 자동 컨테이너 터미널을 가정하여 수량을 결정하였다.

선석 크레인 용량	: 22.0/hr
AGV 용량	: 99.684/hr
야드 크레인 용량	: 20.0/hr



그리고 선박에 대한 데이터는 다음과 같다.

선박도착 분포	: 5 + GAMM(663, 0.751)
선박당 양하 비율	: 47%
선박당 적하 비율	: 48%
냉동/특수 컨테이너 비율	: 5%
Yard 점유 개수	: 양하시 9.91/야드 적하시 7.95/야드
선박 접안시간	: 1035분

유전자 알고리즘의 파라미터는 다음 값을 사용하였다.

모집단의 크기( $m$ )	: 100
총 세대수( $n$ )	: 50
교차율( $P_c$ )	: 25
돌연변이율( $P_m$ )	: 5

각 자원의 고정 비용과 변동 비용은 Zaffalon(1999)를 참조하여 사용하였다.

자원 할당 문제에 입력으로 들어가는 선박 데이터의 예가 <표 1>에 나타나 있다.

본 연구에서 유전자는 각 기간에 할당된 자원의 수량인 (PERIOD, CC1, CC2, CC3, AGV1, AGV2, AGV3, IN1, IN2, IN3, IN4, OUT1, OUT2, OUT3, OUT4, INOUT1, INOUT2, INOUT3, INOUT4)의 형태를 가지고 있다. 따라서 유전자 알고리즘으로 구한 해는 <표 2>와 같다.

1개월의 선박 데이터 중 처음 1주일치에 대하여 12시간을

한 기간으로 가정하여(즉, 14개 기간에 대하여) 실험을 진행하였다. 자원의 용량을 10%씩 증가시키면서 실험한 결과 70%까지는 최적해를 구할 수 없었다. 실험은 자원의 용량을 180%까지 증가시키면서 진행되었으며, sun ultra60에서 진행되었다. 최적해는 CPLEX 6.5를 사용하여 구하였고, 유전자 알고리즘은 C++로 구현하였다.

실험 결과가 <표 3>에 정리되어 있다. 표에서 \*로 표시된 값은 CPLEX가 구한 최선의 정수해(Upper bound)이다.

목적함수 값에 대해서 유전자 알고리즘과 최적해의 성능을 비교해보면 <그림 6>과 같다. 모든 용량 변경 문제에 대하여  $\frac{(GA - Opt)}{GA} \times 100(\%)$ 의 성능을 비교한 결과 평균 0.80%로서 유전자 알고리즘을 이용하여 최적해와 매우 근접한 해를 구할 수 있었다.

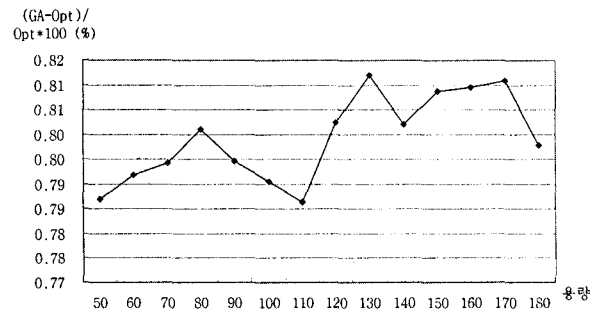


그림 6. 유전자 알고리즘과 최적해의 목적함수값 비교

표 3. 유전자 알고리즘과 최적해의 실험 결과

용량(%)	유전자 알고리즘(GA)		최적해(Opt)		Objective	Solution Time
	Objective	Solution Time(sec)	Objective	Solution Time(sec)	(GA-Opt)/Opt *100(%)	Opt/GA
50	2402095.05	2.25	2383341.42*	7655.09	0.79	3402.26
60	2402115.05	1.87	2383245.49*	8155.55	0.79	4361.26
70	2402105.05	2.14	2383177.32*	5347.47	0.79	2498.82
80	2402225.05	2.14	2383135.05	1854.44	0.80	866.56
90	2402075.05	2.20	2383135.05	9017.19	0.79	4098.72
100	2401925.05	1.97	2383085.05	905.59	0.79	459.69
110	2401715.05	2.19	2382975.05	648.94	0.79	296.32
120	2401985.05	2.42	2382865.05	844.84	0.80	349.11
130	2402205.05	1.75	2382855.05	419.49	0.81	239.71
140	2401955.05	1.76	2382845.05	266.15	0.80	151.22
150	2402115.05	1.75	2382845.05	338.69	0.81	193.54
160	2402135.05	2.20	2382845.05	450.60	0.81	204.82
170	2402155.05	2.09	2382835.05	540.43	0.81	258.58
180	2401845.05	1.87	2382835.05	559.31	0.80	299.10
Average	2402046.48	2.04	2383001.42	2643.13	0.80	1262.84

\*: 최적해가 아닌 최선해

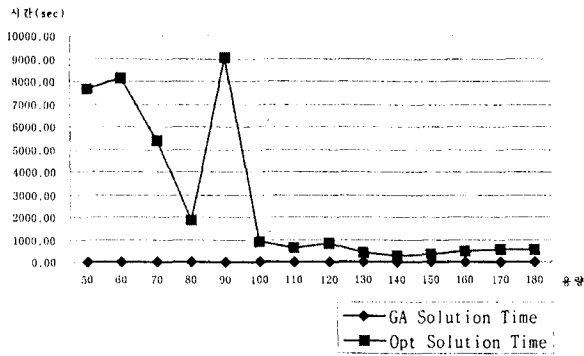


그림 7. 유전자 알고리즘과 최적해의 계산 시간 비교.

<그림 7>은 유전자 알고리즘을 이용해서 해를 구한 시간과 최적해를 구하는 데 걸린 시간을 보여주고 있다. 자원 용량 증가가 100%(시물레이션 데이터의 2배) 이상이 되면 최적해를 구하는 데 걸리는 시간은 평균 552.67초로써 10분안에 최적해를 구할 수 있었다. 그러나 용량 제약이 tight해지면 최적해를 구하기 위한 시간은 매우 빠른 속도로 증가하여 결국 70%부터는 Sun Workstation ultra60에서 최적해를 구할 수 없었다. 그에 비해 유전자 알고리즘은 통계적으로 정해진 횟수만큼 계산을 하기 때문에 상대적으로 균일한 시간(평균 2.04초) 안에 해를 구할 수 있었다.

<그림 8>에서 최적해의 계산 시간은 유전자 알고리즘 계산 시간의 1000배 이상이 소요된다는 것을 알 수 있다.

이상의 결과를 종합해 보면 자원의 용량이 상대적으로 부족한 상황에서 최적해를 구하기 위해서는 매우 성능이 뛰어난 하드웨어가 필수적이며 해를 구하는 시간은 매우 클 것으로 예상된다. 그에 비하여 유전자 알고리즘은 짧은 시간 안에 최적해와 근접한 해를 구할 수 있으며, 유전자 알고리즘의 임의적 특성 때문에 동일한 문제에 대하여 실행시마다 새로운 해를 구할 수 있다. 이는 곧 다양한 대안의 산출을 의미하며, 사용자는 시물레이션 등을 통한 대안의 평가를 통해서 원하는 해를 선택할 수 있다. 특히 사용자가 대안을 평가할 수 있도록 하기 위해서는 짧은 실행시간이 필수적이기 때문에 유전자 알고리즘은 매우 훌륭한 도구가 될 것으로 예상된다.

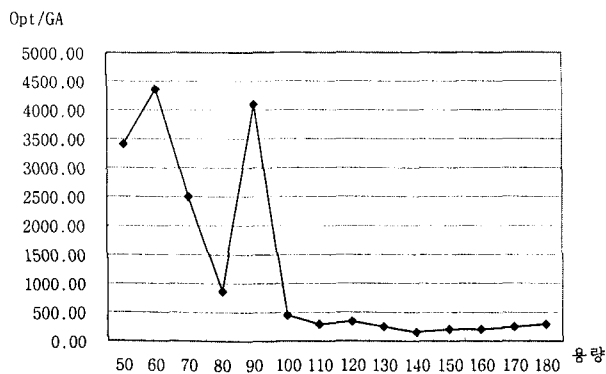


그림 8. 유전자 알고리즘과 최적해 계산 시간의 상대적 비교.

## 7. 결론

본 연구에서는 컨테이너 터미널 운영계획에서 기존의 연구가 부족했던 자원 할당계획을 위한 네트워크 설계 모형과 유전자 알고리즘을 제시하였다. 네트워크 설계 모형은 컨테이너 터미널의 다양한 환경을 지원하고 있으며, 자원 할당계획을 위한 매우 일반적인 형태를 제공하고 있다. 본문에서 제시한 수리 모형을 확장하여 수직형, 수평형 야드 배치를 지원할 수 있도록 야드 크레인 수량 합을 제한하는 제약식을 첨가할 수도 있다. 유전자 알고리즘의 일반적인 형태인 바이너리 코딩의 틀을 벗어나 자원의 수량을 유전자로 가지는 개체 표현을 이용하여 네트워크 설계 문제를 유전자 알고리즘을 이용하여 해결할 수 있었다.

실험 결과 유전자 알고리즘은 매우 빠른 시간 안에 최적해와 평균 0.8%의 차이를 보이는 해를 구할 수 있었다. 따라서 본 알고리즘을 활용하면 다양한 대안을 생성하고, 이를 시물레이션으로 평가하는 등의 의사 결정 활동이 가능할 것이다.

네트워크 설계 모형에 대하여 시물레이티드 어닐링이나 타부 탐색 기법 등도 대안이 될 수 있을 것이라 생각된다.

## 참고문헌

Bontempi, G., Gambardella, L. M. and Rizzoli, A. E. (1997), Simulation and Optimization for Management of Intermodal Terminals, *European Simulation Multiconference, Istanbul*, June, 1-4.

Bruzzone, A. (1998), Simulation and Genetic Algorithms for Ship Planning and Shipyard Layout, *SIMULATION*, 71(2), 74-83.

Crainic, T. G. (2000), Service Network Design in Freight Transportation, *European Journal of Operational Research*, 122, 272-288.

Davis, L. (1991), *Handbook of Genetic Algorithms*, Van Nostrand Reinhold, New York.

Gambardella, L. M., Rizzoli, A. E. and Zaffalon, M. (1998) Simulation and Planning of an Intermodal Container Terminal, *Simulation*, 71(2), 107-116.

Hassan, S. A. (1993), Port Activity Simulation: An Overview, *Simulation Digest*, 23(2), 17-36.

Hayuth, Y., Pollatschek, M. A. and Roll, Y. (1994), Building a Port Simulator, *Simulation*, 63(3), 179-189.

Kim, Y-K., Yoon, B-S. and Lee, S-B. (1997), *Metaheuristic: Genetic Algorithm, Simulated Annealing, and Tabu Search*, Yeongji Moonhwas, Seoul, Korea.

Merkuryev, Y., Tlujew, J., Blumel, E., Novitsky, L., Ginters, E., Viktorova, E., Merkuryeva, G. and Pronins, J. (1998), A Modeling and Simulation Methodology for Managing the Riga Harbour Container Terminal, *Simulation*, 71(2), 84-95.

Mosca, R., Giribone, P. and Bruzzone, A. (1993), Management Problems of a System of Flat-cars for Handling Containers, *Proceedings of the 1993 European Simulation Symposium*.

Mosca, R., Giribone, P. and Bruzzone, A. (1994), Simulation and Automatic Parking in a Training System for Container

- Terminal Yard Management, *Proceedings of ITEC*, the Hague, April, 26-28.
- Prekel, H. (1992), A Harbor Simulation with SIMAN/CINEMA and the Pros and Cons of Animation, *Proceedings of the 1992 European Simulation Symposium*.
- Tolujev, J., Merkurjev, Y., Blumel, E. and Kikitins, M. (1996), Port Terminal Simulations: State of the Art-A Survey, *ANCAI*.
- Zaffalon, M., Rizzoli, A. E., Gambardella, L. M. and Mastrolilli, M. (1998), Resource Allocation and Scheduling of Operations in an Intermodal Terminal, *10th European Simulation Symposium and Exhibition*, Oct., 26-28.
- Zaffalon, M. and Gambardella, L. M. (1999), A Network Design Approach to the Allocation of Resources in an Intermodal Terminal, *Technical Report IDSIA-08-98, IDSIA*.