

# 화물컨테이너 운송을 위한 시뮬레이티드 어닐링 기반의 차량경로계획

이상현<sup>\*</sup> · 최해정

국방대학교 운영분석학과

## Simulated Annealing Based Vehicle Routing Planning for Freight Container Transportation

Sang-Heon Lee · Hae-Jung Choi

Department of Operations Research, Korea National Defense University, Seoul 122-875

This paper addresses vehicle routing planning in freight container transportation systems where a number of loaded containers are to be delivered to their destination places. The system under consideration is static in that all transportation requirements are predetermined at the beginning of a planning horizon. A two-phased procedure is presented for freight container transportation. In the first phase, the optimal model is presented to determine optimal total time to perform given transportation requirements and the minimum of number of vehicles required. Based on the results from the optimal model, in the second phase, ASA(Accelerated Simulated Annealing) algorithm is presented to perform all transportation requirements with the least number of vehicles by improving initial vehicle routing planning constructed by greedy method. It is found that ASA algorithm has an excellent global searching ability through various experiments in comparison with existing methods.

**Keyword:** vehicle routing, fleet sizing, simulated annealing, freight container transportation

### 1. 서론

오늘날 국제화와 개방화의 물결에 따른 국가 간 경쟁의 심화, 정보기술 및 통신망의 급속한 발달, 그리고 후발 개발도상국의 급격한 추격 등 급변하는 외부 환경에서 국내 기업들이 경쟁력을 확보하기 위한 방안으로 물류에 대한 중요성이 더욱 강조되고 있다. 특히 수출입 물량과 관련되는 국제물류의 기본 흐름은 컨테이너를 통한 수송이 대부분을 차지하고 있어, 컨테이너 물류의 생산성 향상에 대한 보다 많은 연구 및 투자가 요구되고 있다.

경제적인 측면에서도 국내 물류비용은 국민총생산의 12%

를 차지하고 있으며, 물류비용 30% 절감은 국가 경제의 5% 이상의 증가 효과가 있다. 반면, 미국, 일본 등 선진국들의 물류비용은 국민총생산의 8~9% 정도로써, 선진국들에 비해 상대적으로 높은 비율이다. 물류비용은 고스란히 제품가격에 반영되어 가격 경쟁력을 떨어뜨리는 요인이 되고 있으며, 물류비용을 1%만 줄여도 연간 1조원 정도를 절약할 수 있다.

물류비용에서 가장 중요한 것이 수송비용으로 국내 총 물류비 중에서 수송비용이 차지하는 비율이 60~70% 수준이고, 그 비율은 매년 증가하고 있다. 화물운송은 상품의 생산과 소비 활동과 관련된 일련의 활동을 위한 물류 체인의 연결 역할을 해주기 때문에 효율적이고 원활한 화물운송은 경제에 미치는

<sup>\*</sup>연락처 : 이상현 교수, 122-875 서울시 은평구 수색동 205번지 국방대학교 운영분석과, Fax : 02-309-6233,

E-mail : leesangh@kndu.ac.kr

2006년 12월 접수, 1회 수정 후 2007년 03월 게재확정.

영향이 매우 크다. 합리적인 화물운송을 위하여 화물을 일정한 표준 중량 및 용적으로 단위화시켜 일괄적으로 하역, 운송하는 단위적재(unit load) 운송 시스템을 적용하고 있으며 단위 화물운송을 대표하는 컨테이너에 의한 운송은 경제성, 신속성, 안전성의 이점을 갖고 운송, 보관, 하역 등 물류 전 과정을 합리적으로 일관 운송할 수 있는 도구이다. 컨테이너에 의한 운송은 수출입 물량의 대부분이 컨테이너에 의해 이루어진다는 점에서 매우 중요한 수단이다.

특히 우리나라 컨테이너 처리 항만은 부지가 협소하여 컨테이너 터미널 내에서 물량을 처리하는 On-Dock 처리 가능 물량은 제한적이고, 53%에 해당하는 물량이 터미널에서 떨어져 시내에 산재해 있는 ODCY(off-dock container yard: 부두 밖 장치장)와 ICD(inland container depot: 내륙컨테이너 통관기지)에서 처리되고 있어 항만과 이들 장치장 사이 그리고 장치장 간에 차량 이동이 빈번히 발생한다. 또한 철도수송을 위한 철도 CY와 터미널과의 운송, 터미널과 재래 부두와의 화물운송, 컨테이너 야드들 간의 운송 등 컨테이너화물 운반 작업이 수행되고 있다. 이와 같은 컨테이너 터미널 주변의 여러 지점 간의 빈번한 컨테이너 운반은 물류비용 증가뿐 아니라, 도시의 교통체증, 매연, 안전 등의 문제를 야기하기 때문에, 효율적인 차량운영은 매우 중요한 문제로 부각되고 있다.

일반적으로 운송시스템에서 차량경로문제는 차량의 용량이 1 이상이고 주어진 차량집결지에서 차량 용량제약을 만족하면서 모든 고객을 1회 방문하는 문제인데 반하여 컨테이너 운송문제는 한 번에 한 개의 컨테이너만을 운송하는 차량으로 구성된 운송 시스템에서 상차 지점과 하역 지점이 주어진 다수의 컨테이너 물량을 일정한 수의 트럭으로 다회 방문을 통하여 수송하는 문제이다.

본 연구에서는 화물컨테이너 운반시스템에서 최소의 차량으로 일정한 시간(예: 1일 8시간)내에 주어진 컨테이너를 운반하는 차량 경로계획을 설정하는 절차를 제시한다. 제시된 절차는 우선 공차이동 시간을 최소화 하는 최적화 모형을 이용하여 차량의 소요 대수 하한값(lower bound)을 결정하고, 이를 기초로 시뮬레이티드 어닐링(SA, Simulated Annealing)을 기반으로 하는 차량경로계획을 수립한다. 제시된 절차는 실험을 통하여 기존의 방법과 비교하여 그 효용성을 검증한다.

## 2. 컨테이너 운송시스템

일반적인 컨테이너 운송이란 컨테이너에 미리 화물을 적입하여 운송하는 unit load 시스템의 일종으로 송하인으로부터 최종 수하인에 이르기까지 컨테이너로 화물을 운송하기 위해 물류의 전 구성요소를 결합하는 것을 말한다. 이와 같은 단위물량 시스템 특징으로 인해 운송수단이 바뀌더라도 적입된 내용물들은 재적입이나 적출 없이 그대로 운송이 가능하므로 신속성, 경제성, 안전성 등의 측면에서 큰 이득을 볼 수 있다.

컨테이너 물류는 크게 컨테이너 터미널 내에서의 물류와 컨테이너 운송물류로 구분되며, 컨테이너 운송물류는 다시 해상 운송, 항공운송, 육상운송으로 나눌 수 있다. 또한 육상운송의 경우도 운송수단에 따라 공로운송과 철도운송으로 구분되며, 다시 공로운송은 컨테이너 운송업체의 관리방식에 따라 장거리운송, 근거리운송 및 셔틀운송으로 나눌 수 있다. 장거리 및 근거리운송은 수출입 물량의 주체가 되는 화주 위치가 어느 정도 멀리 있는가에 따라 구분되며, 셔틀운송의 경우는 컨테이너 터미널과 터미널의 임시 버퍼 기능 및 빈 컨테이너의 적재기능을 담당하는 ODCY 간의 컨테이너 운송, 터미널과 재래 부두 간의 환적(transshipment) 화물을 위한 운송, 그리고 철도수송을 위한 연결운송 등이 이 범주에 속한다.

컨테이너 내륙수송은 항만 컨테이너 터미널(port container terminal)에서 수출 컨테이너의 선적/loading)과 수입 컨테이너의 양하(unloading)가 이루어져 컨테이너 터미널이 컨테이너의 수요와 공급의 중착점이 되며, 컨테이너 터미널의 임시 버퍼 기능과 빈 컨테이너의 적재 기능을 담당하는 ODCY도 컨테이너 터미널의 역할을 담당한다. 따라서 컨테이너 내륙수송을 위한 차량배차는 컨테이너 터미널과 ODCY에서 내륙수송을 위한 차량배차가 이루어지며, 컨테이너 화주가 위치한 내륙의 거점 도시들이 컨테이너 화물의 수요/공급지가 된다. 따라서 항만 컨테이너 터미널 또는 ODCY를 컨테이너 화물수송을 위한 차량배차 터미널로 간주할 수 있다.

실제 대부분의 컨테이너 운송업체에서는 물량 운송을 위해 필요한 차량을 대략 결정하여 우선적으로 차량을 확보한 후 배차계획을 수립하여 운영하며, 장거리, 근거리 및 철도운송 등은 이후 독립적으로 배차를 수행하고 있다. 수출입 컨테이너 화물 경우 전형적인 작업시간인 아침 8시부터 오후 6시까지 서비스가 이루어진다. 환적화물 경우는 재래부두와의 연결 때문에 대부분의 물량 처리가 야간에 이루어진다. 즉 셔틀운송의 경우 주·야간 운송이 별도로 수행되며, 이에 따라 각각 차량의 주·야간 확보도 별도로 운영한다.

## 3. 기존연구 고찰

기존의 화물수송에 대한 연구는 주로 한 차량이 한 번에 여러 요구를 대응해 주어야 할 때, 하나 또는 복수차량이 어떤 순서대로 방문할 것인가를 다루고 있다. 차량용량제약이 없는 Traveling Salesman Problem(TSP)과 multiple TSP, 그리고 차량 routing 및 scheduling 문제가 이에 속하고 이에 대한 연구가 광범위하게 수행되어 왔다.

컨테이너 운송에 대한 차량 경로문제는 TSP 문제와는 여러 면에서 차이가 있다. 우선 TSP는 하나의 지점을 한 번 방문하지만 컨테이너 운송은 한 지점에 차량이 운반할 컨테이너 수만큼 다회 방문해야 한다. 또한 각 컨테이너는 목적지가 있으므로 컨테이너를 상차한 후에는 목적지로 이동해야만 한다.

이는 일반적인 선후제약이 있는 pickup and delivery 문제와 유사하다. 또한 하나의 차량은 한 개의 컨테이너만을 운반한다는 용량 제약 상황이 추가되는 것도 TSP와 구별되는 특징이다. TSP는 NP-Hard 문제로서 문제 크기가 커지면 최적해를 찾을 수 없다. 따라서 컨테이너 운반 경로설정문제를 위하여 일반적으로 heuristic 접근법을 사용한다.

Maxwell and Muckstadt(1981)는 단위화물 운반환경에서 각 장소마다 제품이 들어오고 나가는 양의 차이를 나타내는 순 흐름(net flow)을 계산하고 이를 공차운행과 연관시켜 공차운행을 최소화하는 최소차량운행 모델을 제시하였다. Crainic *et al.* (1993)은 공 컨테이너 수송문제를 다룬 대표적인 연구로써, 공 차량과 공 컨테이너의 관리에 관한 수송 시스템의 문제구조와 특성들을 분류하여 단일 화물에 대한 수리적 모형을 제시하였다. Kim *et al.*(1997)은 시간창, 운전자 휴식시간 등 실질적인 제약사항을 만족하면서 동적 상황이 feedback 구조를 통해 반영되는 우선순위 규칙의 차량배차방법으로 공차운행을 최소화하는 시스템을 구현하였다. Yun and Choi(1997)는 컨테이너 화물 수송모형에서 다수의 수요/공급지, ODCY, 그리고 컨테이너 터미널간의 컨테이너 수송문제에 대한 시뮬레이션 모델을 개발하여 컨테이너 수송문제를 다루었다. 이 연구에서 다수의 수요/공급지와 터미널간의 컨테이너 수송을 위한 운영문제를 다루었으나 차량은 무한히 주어지는 것을 가정하였다. Yun *et al.*(1999)은 방문시간의 제약이 있는 컨테이너 터미널에서 공차 이동과 빈 컨테이너 이동시간을 최소화하는 배차 계획을 위한 혼합정수모형을 설계하고, 새로운 배차 휴리스틱을 제안하였다. Ko *et al.*(2000, 2002)은 컨테이너 셔틀운송에 대한 물리적 네트워크를 논리적 네트워크로 변환하여 multiple TSP 수리모형을 제시하고, insertion 기법을 기반으로 한 heuristic을 통해 차량 경로계획을 수립하였으며, 이후 두 종류의 컨테이너와 확률적인 컨테이너 상하차 시간을 고려한 차량 운영계획절차를 제시하였다. Koo and Jang(2002)은 단위화물 운반 요청이 동적으로 발생하는 경우에 여러 차량 배차환경에서 차량운행시간을 예측하는 모형을 제시하고, 이를 기반으로 Koo and Suh(2002)는 대기모형을 이용하여 차량 보유대수를 결정하는 절차를 제시하였다. Lehmann *et al.*(2002)은 컨테이너 운송이 실시간으로 발생하는 자동화된 컨테이너 항만에서 기존의 모든 운반요청과 AGV를 함께 고려하여 우선순위 규칙을 기반으로 한 many-to-many AGV 배차절차를 제시하였다. Koo *et al.*(2003)은 화물 컨테이너 운송환경에서 일정한 수의 차량을 가지고 타부서치를 기반으로 하는 알고리즘을 통해 작업완료시간을 최소화하는 최적 차량경로를 제시하고 이를 타 알고리즘과 성능비교를 통해 우수성을 입증하였다. Ko *et al.*(2004)은 국내 운송업체에서 활용하는 세 가지 형태의 차량을 고려하여 차기 연도의 운송물량 처리를 위한 차량 대수결정을 위해 타부서치 기반의 방법을 제시하였다.

본 연구는 운반물량 및 이동시간 정보가 확정적인 운송환경에서 총 운행시간을 최소화하는 최적의 차량경로계획 수립에

관한 내용으로써, pickup지점과 delivery지점이 계획초기에 확정된 운반물량들의 작업을 완료하기 위한 최소비용의 차량경로들을 구하는 문제인 multiple vehicle static dial-a-ride problem에 대한 SA의 적용 가능성과 그 성능을 입증한데 의미가 있다고 할 수 있다.

## 4. 차량운영계획 및 최적화 모형

### 4.1 문제 정의 및 가정 사항

본 연구에서 다루는 문제는 한 번에 한 개의 컨테이너만을 운송할 수 있는 차량들로 구성된 운송 시스템에서 상차 지점과 하역 지점이 주어진 다수의 컨테이너 물량을 일정한 수의 트럭으로 다회 방문을 통해 수송하는 문제이다. 계획기간 초기에 차량집결지에는 여러 대의 차량이 1일 작업을 수행하기 위하여 준비 중에 있고, 하루 일과를 마친 차량은 차량집결지로 돌아온다. 그리고 운반되어야 할 컨테이너의 물량과 목적지는 계획기간 초기에 정해져 있다. 이 외에, 본 논문에서 다루는 컨테이너 운반 시스템의 환경은 다음 가정 사항들을 기초로 하고 있다.

첫째, 각 지점 사이의 차량이동시간과 컨테이너 물동량에 대한 정보는 계획기간 초기에 확정적으로 주어져 있다.

둘째, 다른 각 지점들로 운반되어야 할 모든 컨테이너들은 계획기간 초에 운반을 위해 준비되어 있다.

셋째, 하나의 컨테이너는 하나의 차량에 의해 운반되고, 하나의 차량은 한 번에 하나의 컨테이너만을 운반할 수 있다.

넷째, 화물을 차량이 운반하는 시간에는 차량이동시간과 물건을 상차 및 하차하는 시간이 포함된다.

실제 컨테이너화물 운송환경에서는 여러 가지 비 확정적이고 동적인 요소가 발생할 수 있지만, 상기 가정 사항들을 전제로 한 정적환경에서의 차량 최적경로 계획수립은 물류비용을 감소시킬 수 있는 근본적인 대안이 된다고 볼 수 있다.

### 4.2 차량운영계획 절차

차량운영계획 절차는 <Figure 1>에 요약되어 있다. 우선 계획초기에 컨테이너 운반물량 데이터와 차량 이동시간 데이터가 주어지면 Maxwell and Muckstadt(1981)의 최적화 모형을 근간으로 하여 차량대수의 하한값을 확인한다. 차량의 총 작업시간은 적재운반시간과 공차이동시간의 합으로 표현되고, 적재운반시간은 운반물량 데이터와 차량이동시간 데이터가 주어지므로 확정적이다. 그러나 공차이동시간은 차량운영에 따라 변동이 있으므로 최적화 모형은 일정한 대수의 차량으로 운반작업 수행 시 공차이동시간을 최소로 하는 것을 목표로 한다.

최적화 모형을 통해 얻은 결과는 주어진 차량 대수로 운행할 수 있는 최소 공차이동시간을 나타낸다. 실제로 차량을 운

영하면서 생기는 공차이동시간은 항상 이 최적화 모형을 통해 얻은 이상적인 최소 공차이동시간보다 크거나 같고, 절대로 작을 수는 없다. 차량 대수는 총 차량운행시간을 계획기간의 시간으로 나누어 얻는다.

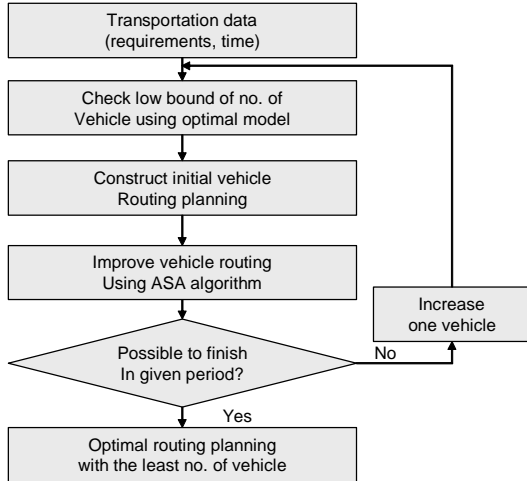


Figure 1. Fleet sizing and vehicle routing procedure

최적화 모형을 통해 차량 하한값이 결정되면, 그 차량대수를 가지고 Greedy 방법을 적용하여 각 차량의 초기 경로계획을 수립한다. 초기 경로계획이 수립되면, 최적 경로계획이 수립될 수 있도록 해를 향상시키기 위하여 메타 휴리스틱 중에 하나인 전역 탐색능력이 우수한 SA를 기반으로 하는 알고리즘을 수행한다. 알고리즘을 수행하여 얻은 각 차량의 최적경로와 작업완료시간을 확인하여 운반 작업이 계획기간 내에 완료되는지 확인 후, 계획기간 내에 완료되면 현재의 차량대수가 운영상 최소한의 차량이며, 공차운행을 최소로 하는 최적 차량경로가 된다. 만약 알고리즘 수행결과, 운반 작업이 계획기간 내에 완료되지 못하면 차량의 수를 1대 증가시켜 다시 알고리즘 수행을 반복한다. 이러한 단계를 수행하여 운반 작업이 계획기간 내에 완료되면 현재 차량대수가 운영상의 최소차량대수가 되고, 이때 얻어진 각 차량의 경로는 공차운행을 최소화하는 최적 운반경로가 된다.

### 4.3 최적화 모형을 통한 차량 하한 값 설정

컨테이너 화물운송용 차량 대수를 결정하기 위해서는 공장 내부에서 AGV(Automated Guided Vehicle)의 최소차량 대수를 결정하기 위해 개발된 Maxwell and Muckstadt(1981)의 접근 방법을 동일하게 적용할 수 있다. 그러나 그 모형의 결과로부터 얻어지는 해만으로는 차량운송경로를 파악할 수 없으므로 추가적인 운송경로 선정 알고리즘이 보충되어야 하며, 또한 차량이 하루의 마지막 적재컨테이너 운반을 마친 후에 실제적으로는 수행하지 않는 공차운행이 추가되어, 컨테이너 운송모형과 같이 1회 차량운행시간이 AGV시스템과는 달리 총 운행시간

에 영향을 줄 수 있는 상황에서는 부정확한 추정 값을 제공할 수 있으나, 근사적인 차량 대수 추정이 쉽게 이루어질 수 있다는 점에 그 유용성이 있다. 최적화 모형을 적용하기 위한 용어를 정의하면 아래와 같다.

#### <Notation>

- $d_1$  : 차량 출발기지
- $d_2$  : 차량 도착기지
- $N$  : 운영하고자 하는 대략적인 차량대수
- $Nmin$  : 운영에 필요한 최소필요 차량대수
- $x_{ij}$  : 차량이 공차로 지점  $i$ 에서 지점  $j$ 로 이동하는 횟수
- $v_{ij}$  : 지점  $i$ 에서 지점  $j$ 로 운반되어야 할 적재 컨테이너 수
- $t_{ij}^a$  : 지점  $i$ 에서 지점  $j$ 로 컨테이너 이동 소요 시간(적재, 하역시간 포함)
- $t_{ij}^b$  : 지점  $i$ 에서 지점  $j$ 로 공차로 이동 소요 시간
- $nf(i)$  : 지점  $i$ 에서의 차량 순 흐름

컨테이너 화물운송에서는 차량이 어느 한 지점에서 다른 지점으로 컨테이너 화물을 배달한 경우에 배달을 완료한 지점에서 다른 지점으로 배달할 컨테이너 화물이 없는 경우에는 운반을 기다리는 컨테이너 화물이 있는 다른 장소까지 공차인 상태로 이동해야만 한다. 모든 컨테이너 화물의 픽업 지점 및 배달지점은 정해져 있으므로 각 지점에서 운반할 컨테이너 화물이 주어지고 각 지점 간의 차량이동시간이 정해져 있으면 차량이 컨테이너 화물을 운반하는 시간은 일정하다. 차량의 총 운행시간은 화물의 운반시간과 공차로 이동하는 시간으로 구성되어 있으므로, 화물을 적재하고 운반하는 시간이 일정한 상태에서는 차량의 총 이동시간이 공차로 이동하는 시간에 직접적인 영향을 받는다. 필요한 차량 대수 하한값( $Nmin$ )은 식 (1)처럼 차량의 총 운행시간을 차량 1대의 가용시간으로 나누어 구할 수 있다.

$$Nmin = \frac{\text{화물 운반시간} + \text{공차 운행시간}}{\text{차량 가용시간}} \quad (1)$$

본 연구에서는 화물운반시간이 상수 값을 가지게 되므로, 공차 운행시간을 최소로 하는 문제와 동일하다고 볼 수 있다. 총 차량운행시간은 식 (2)와 같이 적재 운행시간, 차량출발/도착기지와 운반지점 간 운행시간 그리고 각 운반지점 간 공차 운행시간의 합으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{총 차량운행시간} = & \sum_i \sum_j t_{ij}^a v_{ij} + \sum_j t_{d_1j}^a x_{d_1j} \\ & + \sum_i \sum_j t_{ij}^b x_{ij} + \sum_j t_{id_2}^b x_{id_2} \end{aligned} \quad (2)$$

지점  $i$ 에서의 차량 순 흐름  $nf(i)$ 를  $i$ 가 목적지인 즉,  $i$ 에서 가용하게 되는 차량 수와  $i$ 에서 나가는 물량 즉, 필요한 공차 수의 차이로 정의하면 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$nf(i) = \sum_j v_{ji} - \sum_j v_{ij} \quad (3)$$

식 (4)처럼 차량 순 흐름,  $nf(i)$ 가 양수인 경우에는 필요한 차량보다 가용한 차량이 더 많은 상태이고, 그 수만큼 공차로 다른 지점으로 이동하여야 한다.

$$\sum_j x_{ij} = nf(i) \quad (4)$$

이와 반대로 식 (5)처럼 차량 순 흐름이 음수인 경우는 음수인 만큼 공차가 들어와야 함을 의미한다.

$$\sum_j x_{ji} = -nf(i) \quad (5)$$

또한 출발 및 도착기지에서는 식 (6)을 만족하여야 한다.

$$\sum_j x_{d_1j} = \sum_i x_{id_2} = N \quad (6)$$

이러한 제약조건을 만족하면서 총 차량운행시간을 최소화하는 수리 모형은 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_i \sum_j t_{ij}^a v_{ij} + \sum_j t_{d_1j}^b x_{d_1j} \\ & + \sum_i \sum_j t_{ij}^b x_{ij} + \sum_i t_{id_2}^b x_{id_2} \end{aligned} \quad (7)$$

Subject to

$$\begin{aligned} \sum_j x_{ij} = nf(i), & \quad \text{for } \forall i \in nf(i) > 0, \\ & \quad \forall j \in nf(j) < 0 \\ \sum_j x_{ji} = -nf(i), & \quad \text{for } \forall i \in nf(i) < 0, \\ & \quad \forall j \in nf(j) > 0 \\ \sum_j x_{d_1j} = \sum_i x_{id_2} = N, & \quad \text{for } \forall i \in nf(i) > 0, \\ & \quad \forall j \in nf(j) < 0 \end{aligned}$$

$$x_{ij} \geq 0 \text{ 인 정수}$$

총 차량운행시간( $Z$ )을 차량의 1일 가용시간으로 나누면 하루 만에 작업을 완료하기 위해 운행해야 하는 차량 대수의 하한 값을 식 (8)과 같이 얻을 수 있다.

$$Nmin = \frac{Z}{\text{available time per day}} \quad (8)$$

$Nmin$ 과  $N$ 이 틀릴 경우, 다시 제약식의  $N$  값에  $Nmin$ 을 대입하여 모형을 수행하는 과정을 반복함으로써  $N = Nmin$ 을 만족하게 되면, 최종적으로  $Nmin$ 이 최소차량대수가 되며, 목적함수 값  $Z$ 는  $Nmin$ 의 차량으로 운행할 경우의 최소 총 운행시간이 된다.

## 5. ASA 알고리즘을 이용한 해 유도과정

### 5.1 ASA 알고리즘

본 연구에서는 multiple vehicle static dial-a-ride문제에 대한 해

법으로 구조가 단순하면서도 전역탐색능력이 우수한 SA 알고리즘을 이용하여 기본적인 해법을 구성하고 해 공간 탐색시간이 오래 걸리는 단점을 보완하기 위하여 변형된 방법인 ASA (Accelerated SA) 알고리즘 적용을 제시하고자 한다.

조합 최적화문제의 한 해법으로써 Kirkpatrick *et al.*(1983)이 제안한 SA 알고리즘은 기존의 반복적인 개선(iterative improvement)에 근거한 휴리스틱기법들이 국부 최적해에 빠져버리는 단점을 보완한 최적화기법으로 현재까지 CAD를 비롯한 다양한 분야에서 응용되고 있다.

현재 일반적으로 사용되고 있는 SA 알고리즘의 기본 형태는 Metropolis 알고리즘을 기본으로 하여 어닐링에서의 온도를 낮추는 과정을 덧붙여서 얻는 방법으로 볼 수 있다. 목적함수를 최소화(또는 최대화)하는 조합최적화문제에서 현재해  $X$ 를 선택하고,  $X$ 의 이웃해  $Y$ 를 얻어 이동하는 과정을 반복함으로써 전체 해 공간을 탐색하며, 이 탐색결과 근사 최적해를 얻을 수 있다. 이웃해로의 이동은 현재해의 비용보다 목적함수가 개선시킬 수 있는 경우에 허용되는데, 이 과정을 반복하다보면 지역 최적해에 빠지는 결과를 가져올 수도 있다. 따라서 SA는 온도  $T$ 에 대한 에너지변화에 따른 확률  $\exp\left(\frac{\Delta C}{T}\right)$ (metropolis criterion)에 의해 비용이 큰 이웃해로의 이동도 허용함으로써 SA가 지역 최적해에 빠졌을 경우, hill climbing 방법을 통해 이를 탈피할 수 있도록 하여 준다.

본 연구에서는 SA 알고리즘의 단점인 수렴시간을 단축하기 위하여 ASA 알고리즘을 적용하여 해 유도과정으로 구성하고 다양한 이웃해 생성을 위한 효과적인 전이(transition)방법을 사용하였다. ASA 알고리즘은 SA 알고리즘의 기본구조를 변화시키지 않으면서 내부루프에서 마코프 체인의 평형성을 더욱 강화시켰기 때문에 SA 알고리즘의 장점과 이론적 조건은 그대로 유지하면서도 수렴속도가 매우 빨라질 수 있다. <Figure 2>는 본 연구의 해 유도과정으로 적용한 ASA 알고리즘의 기본 형태이다.

```

INITIALIZE(X, T, L);
X_best=X;
Counter1=0;; Counter2=0;
repeat;
  Costold=C(X);, Check=0;
  for i=1 to L do
    Y=PERTURB(X);
    if (C(Y)≤C(X)) or (exp((C(X) - C(Y))/ T)>random(0, 1))
      then X=Y; {accept the movement}
    if (C(X)≤C(X_best)) then
      X_best=X;; Counter2=0;; Check=1;
    else Counter2=Counter2+1;
  endfor;
  Costnew=C(X);
  UPDATE(T, Costnew, Costold, Check);
  if (Costnew=Costold) then Counter1=Counter1+1;
  else Counter1=0;
until (Counter1>M or Counter2>N);

```

Figure 2. ASA algorithm

5.2 최적해 수립과정

최소 공차이동 차량경로계획 수립을 위해 ASA 알고리즘을 통한 최적해로의 수립과정은 다음과 같다.

Step 0: 알고리즘 수행을 위한 파라미터를 설정한다. 또한 초기해를 생성하여 현재해로 저장한다.

- <parameter>
- $X[V][S]$ : 각 차량의 최초 경로계획(초기해)
- $V$ : 차량 대수
- $S$ : String length(차량의 경로나열을 위한 저장 공간)
- $T$ : 컨트롤 파라미터(온도)
- $\alpha$ : 냉각 스케줄
- $L$ : 내부루프 반복 수
- $Pvalue$ : 이웃해  $Y$  생성을 위한 현재해 변경율(%)
- $M$ : 외부루프 반복기준
- $N$ : 내부루프 내 최소점 갱신간격기준

Step 1: 현재해  $X$ 로부터  $Pvalue$  만큼 변경된 이웃해  $Y$ 를 생성한다. 예를 들어 이웃해  $Y$  생성을 위한  $Pvalue$ 를 5%로 설정했다면, 총 물동량의 5%만큼을 동일 차량 경로 내에서, 혹은 다른 차량의 경로와 순서를 바꾸거나, 현재 차량의 경로에서 삭제 후 다른 차량경로에 추가된다.

Step 2: 이웃해  $Y$ 가 생성되면 현재해  $X$ 와 이웃해  $Y$ 의 성능을 비교해서 현재해로의 수락여부를 결정한다. 목적함수 값  $C(X)$  또는  $C(Y)$ 는 총 차량운행시간이 되며, 총 운행시간은 각 차량의 운반 작업수행시간과 공차 이동시간의 합으로 표현된다. 총 차량운행시간이 단축되거나 또는 그렇지 않은 해라고 할지라도 받아들일 수 있는 기준으로 사용하게 될 식  $\exp\left(\frac{C(X)-C(Y)}{T}\right) > \text{random}(0,1)$ 을 만족하면 이웃해  $Y$ 를 현재해  $X$ 로 받아들인다. 그 외의 경우에는 현재해  $X$ 를 그대로 두고 다시 이웃해  $Y$ 를 생성한다.

Step 3: 이웃해  $Y$  생성시 각 차량 운행시간이 하루작업시간을 초과하게 되는 차량경로계획은 비 가능해로 가정하여, 이 경우에는 목적함수  $C(Y)$  값이 되는 차량 총 운행시간에 벌금(penalty)항을 두어 점차 비 가능해의 범위를 벗어나게 한다.

Step 4: 이러한 Step 1, 2, 3 절차를 반복하면서 총 차량운행시간이 최소가 되는 해를 계속 기억해 나간다. 내부루프 수  $L$  만큼 절차반복을 완료하게 되면, 현재까지 저장된 최소 총 차량운행시간의 갱신여부를 판단할 수가 있으며, 갱신이 되었다면 온도  $T$ 를 기하 스케줄로 낮추어 주고 다시 Step 1, 2, 3의 내부루프 반복과정을 수행한다. 반대로 갱신이 되지 않았으면, 현재 온도  $T$ 를 그대로 두고 다시 내부루프 반복과정을 수행한다.

Step 5: 종료조건은 Step 0에서 설정한  $M$  이상 외부루프를 반복할 동안 해의 개선이 없거나, 내부루프에서 최소점 갱신간격이  $N$  이상 되는 경우에 종료한다. 또한 여러 다양한 종료조건으로 사용하기 위해 필요에 따라 최적화 모형에서 구한 최소 공차이동 총 차량운행시간을 만족할 때까지 절차를 수행, 또는 정해진 일정시간 동안 절차를 수행하여 최적해를 도출하는 등의 변형 적용도 가능하다. 여기서 도출되는 해는 공차이동을 최소화하는 각 차량의 최적경로가 되고, 각 차량의 운행시간 중 가장 오래 걸리는 시간이 총 작업완료시간이 되며, 총 차량운행시간은 각 차량운행시간의 합으로 표현된다.

상기절차를 도식화하면 <Figure 3>과 같다.

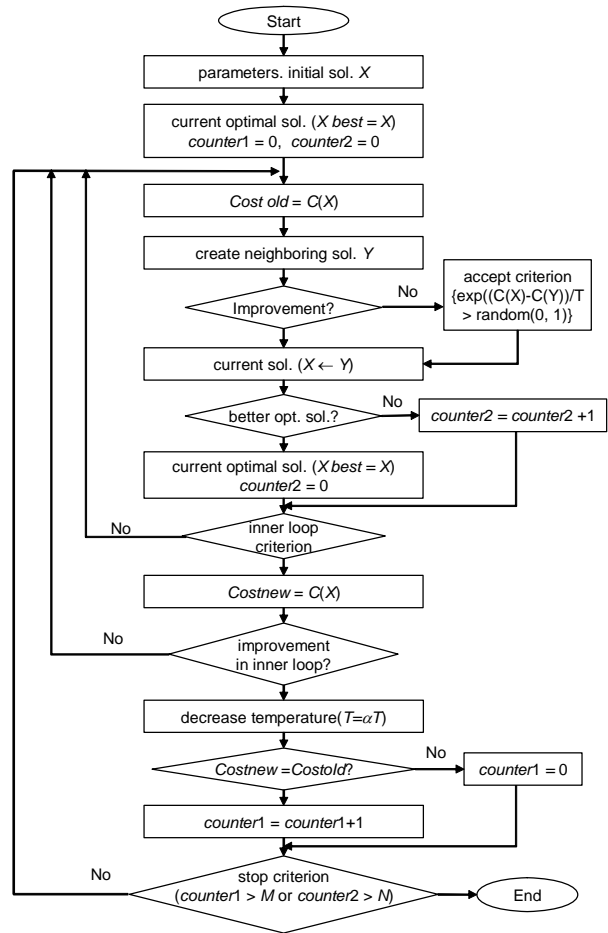


Figure 3. Flow chart of ASA algorithm

5.3 해 표현방법

본 논문에서 각 차량의 경로계획으로 표현되는 해는 <Figure 4>와 같이 운반되는 화물컨테이너의 상·하역 지점들을 순서대로 나열한 것으로 표현된다.

$X[V][S]$  : solution of vehicle routing planning  
 $V$  : number of vehicles  
 $S$  : number of unit routing of each vehicle(string length)

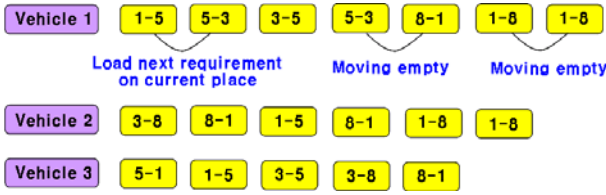


Figure 4. Expression forms of solution

각 차량의 단위경로는 운반물량의 상차지점과 하역지점으로 표현된다. 또한, 전체 운반 작업 수행과정 최적화 목적 하에 차량출발지에서 최초 상차지점까지의 이동시간과 마지막 운반 작업을 수행 후 차량도착지로 복귀하는 이동시간은 0으로 가정한다. 이전 단위 경로의 하역지점과 다음 단위 경로의 상차지점이 동일한 경우는 하역을 마친 후 그 지점에서 바로 상차하여 다음 하역지점으로 작업을 수행하는 것이며, 이전 단위 경로의 하역지점과 다음 단위 경로의 상차지점이 다른 경우에는 공차로 이동하여 그 다음 작업을 수행하는 것으로 볼 수 있다.

차량 수는 최적화 모형을 통해 구한 소요차량 대수 하한 값을 이용하여 대수를 설정한다. 각 차량 경로는 단위물동량의 나열된 형태이다. ASA 알고리즘에서 운반 작업 수행시간뿐만 아니라 공차 이동시간을 고려하여 운행시간을 계산할 수 있도록 코드화 하였다.

5.4 초기해 생성

초기해 생성단계는 Greedy 방법을 이용하여 공차이동을 최소화 하면서 모든 차량이 비슷한 작업완료시간을 가지도록 차량 경로를 설정한다. 이를 위하여, 모든 작업차량 중 현재 가장 빨리 작업이 완료된 차량에 아직 할당되지 않은 작업들 중 공차 이동시간이 가장 작은 작업을 할당한다. 이와 같은 개념을 적용한 초기해 생성과정을 단계별로 정리하면 다음과 같다.

- Step 1: 이용 가능한 차량 대수  $V$ , 지점 간의 컨테이너 운반 물량 집합  $Set\_J$ , 각 운반 작업 지점 간의 이동시간 행렬  $[t_{ij}]$  데이터를 준비한다.
- Step 2: 모든 차량의 완료시간을 0으로 초기화한다.  
 $T[i] = 0, i = 1, \dots, V$ .  
 여기서  $T[i]$ 는 차량  $i$ 가 최초 작업을 시작하여 마지막 작업을 완료하는 데까지 걸리는 시간이다. 각 차량경로는 차량이 운반해야 할 작업물량 순서이다. 모든 차량의 경로 역시 할당된 작업이 없는 상태로 구성한다.
- Step 3: 운반 작업  $V$ 개를 임의로 선택하여 한 개씩 각 차량에 할당한다. 선택된 작업물량들은  $Set\_J$ 에서 삭제

한다. 각 차량의 완료시간을 선택된 컨테이너가 있는 장소로의 공차이동시간, 해당 컨테이너를 운반하는 시간의 합으로 수정한다.

- Step 4: 작업이 할당된 모든 차량을 대상으로 최소완료시간을 가진 차량을 선정한다. 현재 차량경로의 마지막 작업을 마친 후에 공차이동거리가 가장 짧은 작업을  $Set\_J$ 에서 선정하여 차량의 마지막 작업 바로 뒤에 할당한다. 선택된 작업은  $Set\_J$ 에서 삭제하고, 차량의 완료시간도 수정한다.

- Step 5: 모든 작업물량이 배정될 때까지 Step 4를 반복한다.

초기해 생성 알고리즘을 수행하면 각 차량경로와 작업완료 시간 정보를 가진 초기해가 구성되고, 각 차량의 작업완료시간의 합으로 총 차량운행시간을 구할 수 있다. 초기해가 완성되면 이를 기반으로 ASA 알고리즘을 수행하여 공차이동을 최소화하는 각 차량의 최적경로를 구하게 된다.

5.5 이웃해 생성

이웃해를 생성하기 위해 Lin and Kernighan(1973)이 제시한 TSP문제에서의 2-전이(transition)방법에 근거하여 다양한 가능해를 얻기 위한 전이방법을 사용한다. 이 방법은 총 작업물량 개수 중 일정 비율만큼의 작업물량을 랜덤하게 선택하여 2-전이방법을 반복 수행하는 것으로 <Figure 5>와 같이 임의의 작업물량을 랜덤하게 선택하여 선택된 작업물량을 임의의 다른 작업물량과 서로 교환하여 가능해를 구한다.

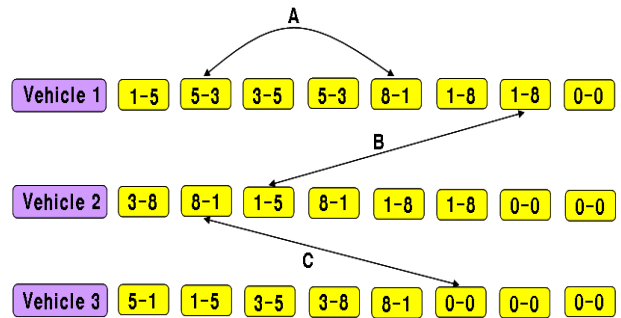


Figure 5. Two-transition method

이러한 2-전이는 초기에 설정된 전이율(transition rate)에 따라 랜덤하게 그 비율만큼의 작업물량이 선택되어 수행된다. 각 차량경로를 나타내는 각각의 초기해는 각 차량마다 그 string length(해의 길이)에 있어서 편차가 존재한다. <Figure 5>에서 보는 바와 같이 초기에 적절한 string length를 모두 동일하게 설정하여, 초기해 생성과정 수행 후 물량을 배정하고 남은 공간은 0의 값으로 초기화된 가상경로 개념을 도입하여 해 탐색능력을 강화시킬 수 있다. 만약 이러한 장치가 없으면 초기해가 어떻게 설정되는가에 따라 최적해에 있어서도 각 차량의 작업

물량 개수는 초기해와 동일하게 같을 수밖에 없으며, 또한 작업물량의 순서를 바꿀 수는 있지만 어느 한 차량의 작업물량을 다른 차량의 작업에 배당할 수 없으므로, 해의 탐색범위가 많이 제한되어질 수밖에 없다.

<Figure 5>에서 A의 경우와 같은 2-전이 발생하면 동일 차량의 경로 내에서 작업 순서를 바꾸는 것으로 볼 수 있다. 또한 B의 경우와 같이 전이가 발생하게 되면 다른 차량과의 작업물량 교환으로 볼 수 있으며, C의 경우로 전이가 발생하면 현재 차량에서 선택된 작업물량을 삭제하여 다른 차량의 작업에 추가하는 것으로 볼 수 있다. 이러한 과정을 랜덤하게 선택, 반복함으로써 현재해에서 변경가능한 모든 가능성을 확보하여 해의 전역탐색 능력을 강화시킬 수 있다.

### 6. 수치예제 및 알고리즘 성능 분석

#### 6.1 수치예제

본 연구에서는 최적해를 구하기 위하여 VC++로 구현하고 컴퓨터는 Pentium-IV CPU 1.80 GHz, RAM: 256M을 사용하였다. 소요차량 대수 하한 값 결정을 위한 최적화 모형은 LINGO 9.0 모델링 시스템을 이용하여 실험하였다. Ko et al.(2000)의 데이터를 사용하여 동일한 환경의 문제를 통해 기존의 다른 방법으로 수행한 결과와 비교할 수 있도록 하였다.

<Table 1>과 <Table 2>는 각 지점 간 컨테이너 운반량과 차량운행시간을 나타낸다. 예를 들어 지점 A에서 물건을 픽업하여 지점 E로 배달되는 횟수는 15회이다. 지점 A로 물건이 운반되는 총 횟수는 24회, 이곳으로부터 물건이 실려 나가는 횟수가 64회이므로 다른 지점에서 지점 A로 40대의 공차가 와야 한다.

상기 데이터를 통해 적재 컨테이너 운반시간은 4,620분(운반량×이동시간)임을 알 수 있으며, 차량의 1일 운행가능시간인 480분하에 최적화모형의 제약식에 적용되는 대략적인 차량대수는 10대로 설정한다( $N = 4,620 / 480$ ). 차량집결지( $d_1, d_2$ )와 각 운반지점 간 거리는 0으로 가정한다.

Table 1. Transportation requirements

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A					15			47	2
B					28				
C					22			5	2
D									
E	3		10						1
F									
G									
H	21		2						
I								4	

Table 2. Transportation time(min)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	-	50	30	35	40	35	30	30	30
B	50	-	30	35	40	35	30	35	35
C	30	30	-	5	10	25	30	35	35
D	35	35	5	-	5	20	25	30	30
E	40	40	10	5	-	15	20	25	25
F	35	35	25	20	15	-	10	15	15
G	30	30	30	25	20	10	-	5	5
H	30	35	35	30	25	15	5	-	5
I	30	35	35	30	25	15	5	5	-

최적화모형을 통해 해를 도출하면, 공차이동시간은 2,150분으로써 총 차량이동시간은 6,770분이 된다. 주어진 운반물량을 하루 만에 소화하기 위해선 최소한 차량을 15대는 보유하고 있어야 한다. 최소 차량대수  $N_{min}$ 과 제약식에 적용한  $N$ 값이 틀리므로,  $N$ 값에 15대를 적용하면, 총 차량이동시간은 6,570분이 되며 최소차량대수  $N_{min}$ 은 14대( $6,570 / 480 = 13.7$ )가 되고 다시  $N$ 값에 14대를 적용하여 모형을 수행하면 총 차량이동시간은 6,610분으로 최소 차량대수  $N_{min}$ 은 14대( $6,610 / 480 = 13.8$ )로써  $N_{min}$ 과  $N$ 이 같은 값을 갖게 된다.

이로써 하루 만에 주어진 작업을 완료하기 위한 최소 차량대수는 14대이며, 이상적인 총 차량 운행시간은 6,610분임을 알 수 있다. LINGO 9.0 모델링 시스템을 이용하여 차량 14대로 작업시 최적화 모형의 해를 도출하였으며, <Figure 6>은 공차이동을 최소화하는 수송모형의 해를 나타낸 것으로, 여기서 해는 최적의 공차 이동 흐름을 나타낸다.

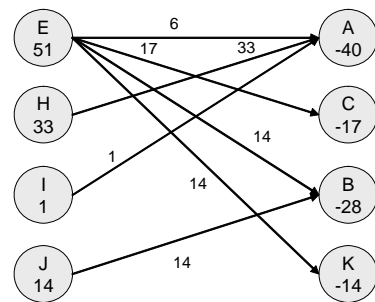


Figure 6. Optimal flow of empty vehicles

차량 14대로 가상노드를 적용한 최적화 모형수행결과,  $E \Rightarrow A$ 는 6회,  $E \Rightarrow C$ 는 17회,  $E \Rightarrow B$ 는 14회,  $E \Rightarrow K$ 는 14회,  $H \Rightarrow A$ 는 33회,  $I \Rightarrow A$ 는 1회, 그리고  $J \Rightarrow B$ 는 14회의 공차 운행이 발생하며 이때의 최소 공차 운행시간은 1,990분이 된다.

ASA 알고리즘을 수행하여 각 차량의 최적경로계획을 수립하기 위해 초기온도, 냉각률, 현재해 변경비율 등을 변화시켜 최적의 값을 도출한다. 초기온도는 전역 최적해의 수렴에 큰 영향을 주므로 적절한 초기온도를 구하기 위하여 총 반복횟수



를 10,000회로 설정 후 50°, 80°, 100°, 130°, 150°로 다르게 적용하여 각각 5회씩 예비 실험한 결과, 총 차량운행시간을 기준으로 <Table 3>과 같이 가장 우수한 근사 최적해를 얻는 100°를 초기온도로 설정한다.

**Table 3.** Performance of initial temperature (unit: min)

Initial temperature	50°	80°	100°	130°	150°
Total vehicle time	6,733	6,724	6,705	6,723	6,725

적당한 변화로 이웃해를 생성하기 위한 현재해의 변경비율은 2%, 4%, 6%, 8%로 설정하여 동일하게 실험한 결과 <Table 4>와 같은 결과를 얻을 수 있으며, 이웃해 변경비율 또한 근사 최적해의 수렴 값에 영향을 미치는 것을 알 수 있고, 비율이 커질수록 해의 전역탐색능력이 감소되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 가장 우수한 결과를 보인 2%를 이웃해 생성을 위한 현재해의 변경비율로 설정한다.

**Table 4.** Performance of perturbing rates (unit: min)

Perturbing rate	2%	4%	6%	8%
Total vehicle time	6,709	6,827	6,914	7,048

기타 요소로 냉각률은 기하 스케줄로써 0.95로 설정하고, 종료조건으로 외부루프를  $M$ 번 반복하는 동안 목적함수 값의 변화가 없거나, 최소점을 갱신하는 사이의 간격  $N$ 번 이상이 되면 종료하는 방식을 적용한다. 이때  $M, N$  값은 원하는 해의 질과 실험조건에 따라서 적절하게 설정할 수 있으며, 전역 최적해를 얻었을 경우 종료하는 기준을 적용할 수도 있다.

최적화 모형에서 얻어진 차량 대수 하한 값인 14대를 가지고 ASA 알고리즘을 수행한 결과, 총 차량 운행시간은 6,610분이 소요되고, 480분 작업 후 모든 작업이 종료되었다. 결론적으로 최적화 모형에 의해 도출된 최소차량대수로 공차이동시간을 최소로 하는 최적의 총 차량운행시간을 구할 수 있으며, 모든 작업들 또한 하루 작업시간 안에 종료할 수 있는 각 차량들의 최적 경로계획을 확인할 수 있다.

예를 들어, 최종 해에서 차량 1의 최적경로는 다음과 같다 (지점 A는 1, B는 2 등으로 표시함).

차량출발지 → 1 → 8 → 1 → 8 → 1 → 8 → 1 → 8 → 1 → 5  
 → 2 → 5 → 3 → 5 → 2 → 5 → 3 → 5 → 차량도착지

여기서 ‘→’는 두 지점 간의 적재 운행, 그리고 ‘↔’는 공차운행을 나타낸다. 차량 1의 적재 운행시간은 330분이고 공차 운행시간은 150분으로 차량의 총 운행시간은 480분이라는 것을 알 수 있다. 또한 14대 차량의 운행시간의 합인 총 차량 운행시간도 6,610분임을 확인할 수 있다.

**6.2 알고리즘 성능 분석**

수치예제에서 초기해 생성방법으로 첫 물량은 랜덤하게 할당하는 방법을 사용하여 매번 다른 초기해가 생성되지만, 최적화 모형을 통해 계산된 차량 대수 하한 값인 14대를 적용했을 경우, <Table 5>에서처럼 ASA 알고리즘을 통해서 모든 작업을 480분 안에 완료할 수 있는 최적 경로를 확인할 수 있다.

**Table 5.** Performance in case of 14 vehicles (unit: min)

Classification	Max. vehicle time	Total vehicles time
ASA	480	6,610
Tabu search	500	6,925
Insertion	520	7,085
Greedy	540	7,230

<Table 5>에서 ASA 알고리즘은 Tabu Search 방법보다는 작업 완료시간이 4%, 총 차량운행시간은 4.55% 해가 향상되고, Greedy 방법보다 작업 완료시간이 11.11%, 총 차량운행시간은 8.57% 해가 각각 향상되었다. 또한 <Table 6>은 차량을 한 대 더 늘려서 총 15대의 차량을 운영할 경우에 각 방법별 작업 완료시간과 총 차량운행시간을 보여주고 있다. 제시된 ASA 알고리즘에서 작업완료시간과 총 차량운행시간은 Tabu Search 방법에 비해 1.1%, 2.5% 향상되고, Greedy 방법보다는 9%, 6.1% 향상되었다. 해의 향상율이 다소 감소한 것은 ASA 알고리즘으로 이미 전역 최적해에 도달하여 해의 개선 폭이 타 방법에 비해 상대적으로 작았기 때문이다. 또한 ASA 알고리즘을 통해 구한 총 차량운행시간인 6,570분은 15대의 차량으로 최적화모형을 수행한 결과와 동일하여 최적해에 도달했음을 알 수 있다.

**Table 6.** Performance in case of 15 vehicles (unit: min)

Classification	Max. vehicle time	Total vehicles time
ASA	455	6,570
Tabu search	460	6,740
Insertion	495	6,860
Greedy	500	7,000

<Table 6>에서 보면 차량을 15대 운영하더라도 Insertion 방법 및 Greedy 방법은 하루 내에 작업을 완료할 수 없고, Tabu Search 방법은 480분 내에 작업을 완료할 수 있으나 작업 완료 시간 및 총 차량 운행시간에서 ASA 알고리즘이 공차이동을 최소화하는 매우 효율적이고 경제적인 차량경로계획이라는 것을 알 수 있다.

차량이 증가하면 모든 방법에서 작업완료시간 및 총 차량 운행시간은 감소한다. 하루 작업시간이 480분으로 제한되었다면 <Table 7>과 같이 ASA 알고리즘은 14대, Tabu Search 방법은 15대, Insertion 방법은 16대, 그리고 Greedy 방법으로는 17대 이

상의 차량이 필요하다는 것을 알 수 있다.

Table 7. The minimum number of vehicles required (unit: No.)

Classification	Min. no. of vehicles	Reference
ASA	14	Work-time constraint : 480 min
Tabu search	15	
Insertion	16	
Greedy	17	

<Figure 7>은 차량 대수 변동에 따른 총 차량운행시간을 비교하고 <Figure 8>은 차량 대수 변동에 따른 작업완료 시간을 비교한 것이다. 결과에서 볼 수 있듯이, ASA 알고리즘을 통한 차량의 최적 경로계획이 총 운행시간 및 작업 완료시간 면에서 모두 우수한 결과를 산출하는 것을 확인할 수 있다.

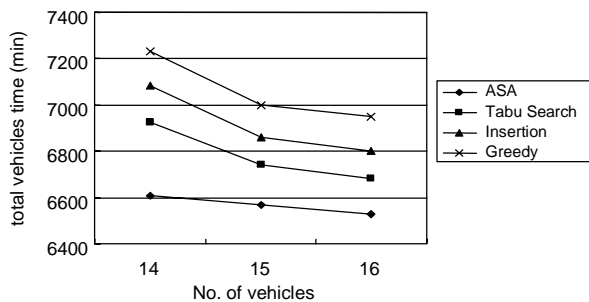


Figure 7. Change of total vehicles time to perform transportation

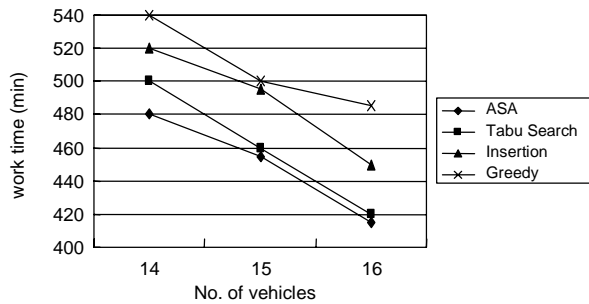


Figure 8. Change of work time to perform transportation

다양한 상황 하에서 ASA 알고리즘의 성능을 시험하기 위하여 Koo et al.(2003)에서 랜덤하게 생성한 10개의 데이터를 활용하였다. 이는 동일한 데이터 사용을 통해 기존 방법들과 비교 실험하기 위함이다. 실험 데이터들은 수치예제의 2~3배 규모의 물량으로써, 실 지점 수가 20개이며, 지점 간 이동시간은 10개 데이터 모두 동일하다. 기존의 Insertion 방법과 Greedy 방법을 개선한 것이 Tabu Search 방법이므로, 알고리즘 성능은 Tabu Search 방법에 대해서만 비교한다. <Table 8>은 무작위 운반상황에서 하루 작업시간 480분 내에 모든 물량을 운반하는데 필요한 최소 차량대수를 나타낸다.

Table 8. Minimum number of vehicles to perform in 480 min. (unit: No.)

Classification	ASA	Tabu search	Reduction
Data 1	11	12	1
Data 2	18	18	·
Data 3	19	19	·
Data 4	17	18	1
Data 5	20	20	·
Data 6	23	24	1
Data 7	18	20	2
Data 8	23	23	·
Data 9	20	20	·
Data 10	23	24	1

ASA 알고리즘 수행결과, Data 1, 4, 7에서는 최적화 모형의 차량 하한 값으로도 최적경로를 수립할 수 있으며, Tabu Search 방법에 비해 전체적으로 총 6대의 차량 절감효과가 있다. 또한 평균적으로 0.6대의 차량이 절감이 가능한 것을 확인할 수 있다. <Table 9>는 10개의 랜덤생성 무작위 운반상황에서 동일한 차량 대수로 작업할 경우 총 차량운행시간을 나타낸다. 총 차량운행시간은 모든 상황에서 6.0~11.3% 향상된 결과를 얻었으며, 이는 동일한 차량 대수로 일정시간 내에 작업을 완료 하더라도, 그만큼 불필요한 차량운행을 줄임으로써 효율적인 차량 경로계획을 수립할 수 있음을 보여준다.

Table 9. Total time to perform by same number of vehicles

Classification	No. of vehicles	ASA	Tabu search	Improvement (%) <sup>*</sup>
Data 1	12	5,080	5,509	7.8
Data 2	18	7,923	8,515	7.0
Data 3	19	8,314	8,914	6.7
Data 4	18	7,557	8,508	11.2
Data 5	20	8,717	9,504	8.3
Data 6	24	10,299	11,296	8.8
Data 7	20	8,242	9,297	11.3
Data 8	23	9,943	10,576	6.0
Data 9	20	8,791	9,539	7.8
Data 10	24	10,081	11,253	10.4

\* : Improvement rate of ASA in comparison with Tabu Search

<Figure 9>는 운반 상황별 총 차량운행시간을 비교한 것이다. 모든 상황에서 ASA 알고리즘을 통한 차량 경로계획이 총 차량 운행시간을 평균 796분 단축하는 약 8.6% 정도 향상된 효율적인 경로라는 것을 알 수 있다.

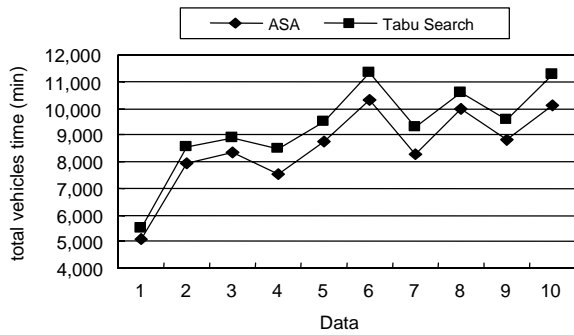


Figure 9. Total vehicles time in 10 situations

<Table 10>은 4.3절의 최적화 모형의 결과에서 얻어진 총 차량운행시간 하한 값과 ASA 알고리즘을 통해 도출한 최적의 총 차량운행시간을 비교한 것이다. 최적화 모형의 하한 값은 S/W(Optimization with spreadsheet, solver)를 이용하여 구했으며, 이는 차량 순 흐름을 기준으로 생성된 가장 이상적인 총 차량 운행시간을 의미하는 것이므로, ASA 알고리즘을 통한 최적의 총 차량운행시간보다 항상 작거나 같은 값을 제공한다. 최적화 모형의 하한 값을 기준으로 ASA 알고리즘의 성능을 평가한 결과, 각 상황별로 0.73%에서 5.02%만큼 차이가 있으며, 평균적으로는 2.52%만큼의 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 ASA 알고리즘이 평균적으로 2.52% 이내의 우수한 해를 제공할 수 있음을 의미한다.

Table 10. Performance of ASA in comparison with lower bound (unit: min)

Classification	Lower bound ( $Z_L$ )	ASA ( $Z_A$ )	Gap(%)*
Data 1	4,837	5,080	5.02
Data 2	7,748	7,923	2.26
Data 3	8,224	8,314	1.09
Data 4	7,484	7,557	0.97
Data 5	8,554	8,717	1.90
Data 6	9,909	10,299	3.93
Data 7	8,182	8,242	0.73
Data 8	9,518	9,943	4.46
Data 9	8,512	8,791	3.27
Data 10	9,930	10,081	1.52

$$* : \text{Gap} (\%) = \frac{Z_A - Z_L}{Z_L} \times 100$$

Table 11. Run time of algorithm

Classification	ASA	Tabu search	Improvement(%)
Run-time	0.4~10	5~30	70

<Table 11>은 알고리즘 수행시간을 비교한 것이다. Tabu Search 방법이 최소 5분에서 최대 30분까지 소요된 반면, ASA

알고리즘은 최소 24초에서 최대 10분으로 Tabu Search 방법에 비해 약 70% 정도 향상되었다.

### 7. 결론

현재 국제시장은 단일화 및 개방화의 추세에 따른 국제무역의 양적인 증대와 일괄 수송체계의 보편화로 인해 컨테이너 수송량은 급속히 증대되고 있다. 이러한 환경에서 국가 경쟁력 강화를 위한 물류비용의 절감은 필수적인 것이며, 컨테이너 터미널과 주변 장치장 간의 화물컨테이너 운송계획은 수송비용 절감과 기타 여러 문제점 해결을 위해 효율적으로 수립되어야 할 것이다.

본 논문은 정적 환경에서 화물 컨테이너 운송을 위한 SA 기반의 차량경로계획 수립에 관한 내용으로, 특히 빈 컨테이너 운반도 고려하여 화물 컨테이너 운송체계를 통합적으로 다루었다. 본 연구에서 제시하는 최적의 차량경로계획 수립은 2단계로 구성된다. 1단계에서는 각 지점별로 차량의 순 흐름을 계산하여 공차이동을 최소화하는 Maxwell and Muckstadt(1981) 모형을 기초로 최적화 수리모형을 수립하여 최소 차량대수를 산출한다. 2단계에서는 1단계의 결과를 이용하여 SA의 장점을 그대로 유지하고 해의 수렴속도가 빠른 ASA 알고리즘을 이용하여 주어진 시간 내에서 최소의 차량으로 컨테이너를 운송할 수 있는 최적 차량경로를 설정하였다. 제시된 절차에 의하여 다양한 컨테이너 운송환경 하에서 기존의 방법과 결과를 비교 분석하여 효율성과 타당성을 검증하였다. 결론적으로 본 연구에서 제시한 ASA 알고리즘이 동일 환경에서 제시된 기존 해법보다 상대적으로 우수함을 보였다.

하지만, 본 연구에서는 컨테이너 운송환경의 차량경로문제에 SA 알고리즘의 적용가능성과 그 결과까지만 확인하였고 문제규모에 따른 향상도 및 상관관계는 유도하지 않아 이 분야에 대한 세밀한 연구가 필요하며, SA를 적용함에 있어 개별적으로 지정해 주어야 하는 파라미터들에 대해서도 보다 체계적인 분석을 통해 문제 규모별 알고리즘 운용방안 역시 적립해볼 필요가 있다. 그리고 SA 알고리즘의 효율성을 향상시키기 위한 방안인 다른 기법들과의 결합으로 하이브리드 탐색방법 적용도 고려할 수 있다. 본 연구에서는 모든 실질적인 시간과 용량제약에 관한 부분까지 다루고 있지는 않다. 컨테이너 유통경로는 물량이 증가할수록 그 유통경로 또한 복잡해져가므로, 화물 Pickup과 Delivery 시간제약이 있는 시간창을 가진 경우와 같이 실질적인 제약사항을 추가하는 것과 하나의 차량으로 1개 이상의 물량을 운반할 수 있도록 확장하는 등의 연구가 앞으로 이루어져야 할 것이다.

### 참고문헌

Bodin, L. D., Golden, B. L., Assad A. A., and Ball, M. O. (1983), Routing and Scheduling of Vehicles and Crews: The State of the Art, *Computers and*

- Operation Research*, 10(2), 63-211.
- Christofides, N. and Eilon, S. (1969), An Algorithm for the Vehicle Dispatching Problems, *Operations Research Quarterly*, 20, 309-318.
- Cordeau, J. F. and Laporte, G. (2003), The Dial-a-ride Problem: Variants, Modeling Issues and Algorithm, *Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies*, 1, 89-101.
- Crainic, T. G., Gendreau, M., and Dejax, P. J. (1993), Dynamic and Stochastic Models for the Allocation of Empty Containers, *Operations Research*, 41(1), 102-126.
- Danzig, G. B. and Ramser, J. H. (1959), The Truck Dispatching Problem, *Management Science*, 6, 80-91.
- Du, Y. and Hall, R. (1997), Fleet Sizing and Empty Equipment Redistribution for Center-Terminal Transportation Networks, *Management Science*, 43(2), 145-157.
- Kim, D. J., Lee, C. H., and Kim, B. S. (1997), Truck Dispatching Decision Support System for the Container Transportation Problem, *Journal of Korean Institute of Industrial Engineering*, 23(2), 275-288.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, Jr., and Vecchi, M. P. (1983), Optimization by Simulated Annealing, *Science*, 220, 671-680.
- Ko, C. S., Chung, K. H., and Shin, J. Y. (2004), Aggregate Container Transportation Planning in the Presence of Dynamic Demand and Three Types of Vehicles, *IE Interfaces*, 17(1), 71-77.
- Ko, C. S., Chung, K. H., and Shin, J. Y. (2000), Determination of Vehicle Fleet Size for Container Shuttle Service, *Korean Management Science Review*, 17(2), 87-95.
- Ko, C. S., Chung, K. H., Shin, J. Y., Kim, K. B., Yang, C. S., and Park, S. C. (2002), Determination of Vehicle Fleet Size for Container Transportation Service in a Stochastic Work Environment, *Journal of the Korean Production and Operations Management Society*, 12(3), 17-32.
- Koo, P. H. and Jang, J. (2002), Vehicle Travel Time Models for AGV Systems under Various Dispatching Rules, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 14, 249-261.
- Koo, P. H. and Suh, J. D. (2002), Fleet Sizing under Dynamic Vehicle Dispatching, *Journal of Korean Institute of Industrial Engineering*, 28(3), 256-263.
- Koo, P. H., Jang, D. W., and Lee, W. S. (2003), Fleet Sizing and Vehicle Routing for Static Freight Container Transportation, *IE Interfaces*, 16(2), 174-184.
- Kozan, E. and Preston, P. (1999), Genetic Algorithms to Schedule Container Transfers at Multimodal terminals, *International Transactions in Operational Research*, 6, 311-329.
- Lehmann, M., Grunow, M., and Gunther, H. O. (2002), Dispatching Multi-Load AGVs in an Highly Automated Container Port Environment, *Proceedings of the Fourth APIEMS, Taipei, Taiwan*.
- Lin, S. and Kernighan, B. W. (1973), An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling Salesman Problem, *Oper. Res.*, 21, 498-516.
- Maxwell, W. L. and Muckstadt, J. A. (1981), Design of Automated Guided Vehicle Systems, *IIE Transactions*, 14(2), 114-124.
- Osman, I. H. (1993), Meta-strategy Simulated Annealing and Tabu Search Algorithm for the Vehicle Routing Problem, *Annals of Operation Research*, 41, 421-451.
- Savelsbergh, M. W. P. and Sol, M. (1995), The General Pickup and Delivery Problem, *Transportation Science*, 29, 17-29.
- Yun, W. Y., Ahn, C. G., and Choi, Y. S. (1999), A Truck Dispatching Problem in the Inland Container Transportation with Empty Container, *Journal of the Korean Operations Research and Management Science Society*, 24(4), 63-80.
- Yun, W. Y. and Choi, Y. S. (1997), Development of an Object-Oriented Simulation Model for the Operation Evaluation of the Off-Dock Container Yard, *the Korea Society for Simulation*, 6(1), 109-122.



**이상현**

육군사관학교 전자공학과 학사  
 US Naval Postgraduate School OR 석사  
 Georgia Institute of Technology 산업공학 박사  
 현재: 국방대학교 운영분석학과교수  
 관심분야: 네트워크, 메타 휴리스틱, 로지스틱스, SCM, 시뮬레이션



**최해정**

공군사관학교 항공공학 학사  
 국방대학교 OR 석사  
 현재: 국방기술품질원기술기획2팀  
 관심분야: 메타휴리스틱, 최적화