한국항해항만학회지 제34권 제8호, pp. 649~657, 2010 (ISSN-1598-5725)
Journal of Navigation and Port Research
DOI : 10.5394/KINPR.2010.34.8.649

유전 알고리즘을 이용한 자동차 운반선사의 해상운송계획

† 박병주 · 최형림* · 강무홍**

† 경남발전연구원, * 동아대학교 경영정보과학부 교수, ** 동아대학교 경영정보과학과 대학원

Maritime Transportation Planning of a Car Shipping Company using Genetic Algorithm

† *Byung-Joo Park · Hyung-Rim Choi* · Moo-Hong Kang***

† *Gyeongnam Development Institute, 5-1 YongHo-dong Changwon city, Gyeongnam, 641-728, Korea*
, Department of MIS, Dong-A University, Busan 604-714, Korea*

요 약 : 자동차 운송선사들은 보다 많은 차량을 수송하고, 수송비용을 줄이기 위해서 보다 효율적인 운송계획을 통하여 자동차 운송선을 운용하고자 하지만 차량 해상운송 계획업무는 주로 실무자의 경험에 의존하여 수작업으로 이루어지고 있다. 해상운송은 국제 물류에서 차지하는 비중만큼이나 연구자의 높은 관심으로 다양하고 많은 연구들이 이루어져 왔지만, 자동차 운반선과 같이 해상운송 시장에서 작은 비중을 차지하는 경우에는 관심 부족으로 연구가 거의 이루어지지 못하였다. 이에 본 연구에서는 자동차 운반선사의 수작업 기반의 계획방식을 체계화된 알고리즘을 통해 최적의 해상운송 계획안을 제공할 수 있는 유전 알고리즘(genetic algorithm)을 제안하고, 제안된 알고리즘은 정수계획 모형으로 얻어진 최적해와 비교하여 평가한다.

핵심용어 : 유전 알고리즘, 자동차 운반선사, 해상운송 계획, 정수계획 모형

Abstract : *In order to achieve a sustainable competitive advantage in the expanding maritime transportation market, most shipping companies are making every effort to reduce transportation costs. Likewise, the car shipping companies, which carry more than 80% of total car import and export logistics volume, also do their utmost for transportation cost saving. Until now many researches have been made for efficient maritime transportation, but studies for car shipping companies have rarely been made. For this reason, this study has tried to develop a maritime transportation planning support system which can help to save logistics costs and increase a competitive power of car shipping companies. To this end, instead of manual effort to solve the routing problem of car carrier vessels, this study has proposed a genetic algorithm. The performance of the genetic algorithm will be evaluated by comparing with the optimal solution of integer programming model.*

Key words : *genetic algorithm, car shipping company, routing problem, integer programming*

1. 서 언

국제 물동량의 대부분을 처리하고 있는 해상운송의 경우, 2005년도 물동량은 약 5조 달러(66.6억 톤)를 기록하였다. 이는 1947년부터 2005년까지 연평균 9.5%(중량으로는 4.8%) 성장한 것이다(Mitsui, 2007). 국제 물류시장의 성장은 시장에 대한 매력도를 높여 시장 참여자의 수적 증가와 시장의 경쟁심화를 가져오고 있다. 이로 인해 물류서비스 공급자에게 효율적인 서비스 제공을 통한 가격 및 품질 경쟁력 강화의 필요성이 커지고 있다. 해상운송은 국제 물류에서 차지하는 비중만큼이나 연구자의 높은 관심으로 타 운송영역에 비해 다양하고 많은 연구들이 이루어져 왔다. 하지만 자동차 운반선과 같이 해상운송 시장에서 작은 비중을 차지하는 경우에는 관심 부족으로 연구가 거의 이루어지지 못하였다.

자동차 수출 물동량 역시 자동차 생산량과 함께 증가하고 있다. 2006년도 기준으로 연간 약 11,900,000대의 자동차를 수송하는 자동차 운반선 해상운송 시장이 형성되어 있다. 세계 자동차 시장 확대에 따른 수출입 물량의 지속적인 증가는 자동차 운반선사에 자동차 운반선의 대형화와 같은 자동차 수출입 물동량의 처리 능력을 향상시키기 위한 노력을 요구 하고 있다. 그러나 자동차 운반선의 선복량 증가가 수출 차량 증가에 미치지 못하여 자동차 운반선의 선복량 부족 현상이 발생하고 있다. 이에 자동차 운송선사들은 보다 많은 차량을 수송하고, 수송비용을 줄이기 위해서 보다 효율적인 운송계획을 통하여 자동차 운송선을 운용하고자 한다. 그러나 자동차 운송선사의 차량 해상운송 계획업무는 주로 실무자의 경험에 의존하여 수작업으로 이루어지고 있어 계획의 수립, 평가 그리고 관리에 있어 비효율적이며, 물량의 생산일자, 생산량, 선박

† 교신저자 : 연회원, bjpark@gndi.re.kr 055)239-0110
* 종신회원, hrchoi@dau.ac.kr 051)200-7477,
** 연회원, mong@donga.ac.kr 051)200-7477

의 도착일정과 같은 변동사항들을 반영하여 계획을 수정하는 데 많은 어려움을 겪고 있다. 차량 해상운송 계획을 보다 체계적이고, 효율적으로 수립하기 위해서는 차량 해상운송 계획에 필요한 정보를 바탕으로 최적의 운송계획을 수립하고, 그 후 변동되는 정보들은 실시간으로 반영하여 계획을 재 수정할 수 있는 차량 해상운송시스템이 요구된다. 하지만 현실적으로 이러한 문제들을 해결하기 위한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 자동차 운반선사의 수작업 기반의 계획방식을 체계화된 최적화 시스템을 통해 자동화하여 최대 이익 또는 최소 비용을 얻을 수 있게 하는 최적의 해상운송 계획안을 제공하고, 이후 변경된 자료를 반영하여 사용자가 계획의 내용을 재조정할 수 있도록 하는 유전 알고리즘(genetic algorithm)을 개발하고자 한다.

2. 관련연구

효율적인 자동차 운반선의 해상운송계획을 수립하기 위해서는 최소의 선박에 최대 물량을 할당하고, 각 선박들은 최단거리 또는 최소비용으로 그 물량들을 수송하고 출발지로 돌아오도록 해야 한다. 이는 모든 고객 또는 화주의 요구를 충족시키면서 운송비용을 최소로 하는 차량 경로를 결정하는 차량경로문제(vehicle routing problem)와 유사한 문제라 할 수 있다. 차량경로문제는 NP-hard 문제이기 때문에 작은 크기의 문제를 제외하고는 최적해를 찾는데 아주 긴 계산시간을 필요로 한다(Lenstra and Kan, 1981). 그래서 합리적인 시간 내에 차량경로문제를 해결하기 위해 다양한 휴리스틱 방법론(Laporte et al., 2000; Pisinger and Ropke, 2007) 또는 유전 알고리즘(genetic algorithm) (Baker and Ayechew, 2003), 타부서치(tabu search) (Gendreau et al., 1994; Ho and Haugland, 2004), 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing) (Osman, 1993) 그리고 ant colony optimization (Bell and McMullen, 2004)과 같은 메타 휴리스틱 방법론들이 제안되어졌다. 차량경로선정과 스케줄링 문제는 여러 논문에서 폭넓게 다루어져 왔지만, 선박 경로선정과 스케줄링 문제에 대한 연구는 상대적으로 부족하였다. 해상 운송의 형태는 일반적으로 정기선(liner), 부정기선(tramp), 산업운송선(industrial)으로 구분 된다(Lawrence, 1972). 정기선과 부정기선의 경로선정과 일정계획 문제는 크게 다르며, 연구자들은 정기선의 경로선정 문제(Fagerholt, 1999) 보다는 부정기선의 경로선정 문제를 많이 다루었다. 본 연구에서 다루는 자동차 운반선 문제 또한 부정기선 경로선정 문제에 해당된다. 부정기선 경로선정 문제에서 선대(fleet) 내 선박의 적재능력(capacity), 화물의 시간제약(time window) 등의 실제적인 제약을 만족시키는 적절한 화물을 최적으로 할당하는 선박 선대 스케줄링에 관한 연구가 있어 왔다.

Ronen(1986)는 하나의 출발지(depot)에서 많은 목적지 항구로 벌크 또는 세미 벌크 화물 선적과 관련된 스케줄링 문제를 해결하기 위해 3개의 다른 알고리즘을 제안하였다. 이 논문에서 선박들은 다른 용량을 가졌으며, 목적지를 방문한 후 출발지로 돌아오도록 되어 있었다. 그러나 선박에 대한 시간 제약은 고려되지 않았다. Brown 등(1987)은 중동에서 북미까지 유사한 크기의 원유 수송 선박의 라우팅과 스케줄링 문제를 다루기 위해 set partitioning 접근법을 사용하였다. 선박들은 한 항구에서만 원유를 싣고 그리고 다른 한 항구에서 그 원유를 내릴 수 있었다. 이 논문은 적재와 하역 주기에 대한 시간 제약을 고려하였다. Fagerholt와 Christiansen(2000)은 시간제약과 다중 할당 문제를 포함한 수거와 배송(pickup and delivery)이 이루어지는 드라이 벌크선 스케줄링 문제를 다루었다. 선대 내의 각 선박은 몇몇의 더 작은 적재 공간으로 나뉠 수 있는 유연한 화물 적재공간을 가졌다. 그들은 결합된 선박 스케줄링과 할당문제에 대해 2단계로 구성된 set partitioning 접근법을 제안하였다. 그리고 Jetlund와 Karimi (2004)는 액체 화학물질을 수송할 때 할당된 다중 적재공간을 가진 선대에 대해 최대 이익을 낼 수 있도록 스케줄링 하기 위한 혼합정수계획 모형과 분해(decomposition) 알고리즘을 제시하였다. 시간제약을 가진 각 제품들은 주어진 선적 스케줄에 따라 적재 항구에서 목적지 항구로 수송되어야 하였다. Al-Khayyal과 Hwang(2007)은 다양한 액체 벌크 화물의 수거와 배송에 할당된 이종의 선대에 대한 라우팅과 스케줄을 최소 비용에 할 수 있는 수리 최적화 모형을 개발하였다. 이 논문에서는 공급항에서 수요항으로 각 배로 어느 정도의 제품을 수송할 것인지를 결정할 때, 각 항 마다 관리되고 있는 각 제품들의 재고수준을 고려하도록 하였다. Brønmo 등(2007)은 부정기선의 스케줄링 문제를 위한 다중 시작 국소 탐색 휴리스틱을 제안하였고, Fagerholt(2001)는 소프트한 시간제약을 가진 다중 선박의 수거와 배송 문제를 해결하기 위한 set partitioning에 기반한 접근법을 제안하였다. 한편 Kim과 Lee (1997)는 벌크선의 스케줄링 문제를 해결하기 위한 최적화 기반 의사결정지원시스템의 프로토타입을 개발하였다. 이와 같이 다양한 연구에도 불구하고, 개발된 방법론들이 현업에 잘 적용되지 못하고 있다. 이는 대부분의 해운 운송 산업의 종사자들이 아주 보수적인 사고와 전통을 가지고 있으며, 새로운 아이디어들을 잘 받아들이지 않으려 하는 특징 때문이다(Ronen, 1993). 현재도 대부분의 해상운송 업체들은 작업자의 경험을 바탕으로 수작업으로 계획을 세우고 있다(Fagerholt, 2004).

기존 차량경로문제에서는 차량의 경로를 결정하기 전에 필요한 입력 자료가 모두 알려져 있어야 하며, 이들이 변하지 않아야 한다. 그러나 현실 문제에 적용되기 위해서는 이들 가정들을 완화해야 한다. 현실문제에서 차량의 이동시간, 고객의 주문과 같은 입력 자료들은 언제라도 바뀔 수 있기에, 최근 동적 차량경로문제에 대한 관심이 커지고 있다(Du et al., 2005). 동적 차량경로문제에서는 입력 자료가 바뀔 때마다, 바뀐 정보와 현 상태를 반영하여 효율적으로 재계획을 세우는 것이 중요하다. Park 등(2008)은 자동차 운반선의 routing 문제와 계획 수립 이후 실행단계에서 빈번하게 발생하는 변동을 반영

할 수 있는 정수계획모형(Integer Programming)에 기반한 해상운송 계획지원시스템을 개발하였다.

3. 자동차 운반선사의 라우팅 문제

3.1 문제 정의

자동차 운반선의 라우팅 문제는 여러 척의 자동차 운반선이 하나의 출발 지점에서 목적지가 정해져 있는 차량들을 싣고, 그 차량들을 여러 목적지 항에 배송 한 후, 다시 출발점으로 돌아오는 최소비용의 경로를 선정하는 문제이다. 여기서 각 선박마다 최적의 차량 할당과 운항 경로가 결정되어야 한다. 자동차 운반선의 라우팅 문제에서 차량을 선박에 할당 할 때에는 선박의 운항 비용이 최소가 될 수 있도록 동시에 고려되어야 한다. 모든 차량들은 목적지를 가지고 있어 선박에 할당된 차량 그룹의 목적지에 따라 각 선박이 방문해야 하는 목적지 항이 결정되기 때문이다.

자동차 운반선의 라우팅 문제는 차량경로문제와 유사한 문제이다. 그러나 일반적인 차량경로문제는 짧은 계획기간(planning horizon) 내에서 차량과 고객에게 전달되어야 할 물품들이 모두 준비되어 있고, 모든 고객은 한 차량에 의해 한번 방문 된다. 그러나 자동차 운반선의 라우팅 문제에서 선박은 트럭과 달리 운항주기가 길어 긴 계획기간 내에서 계획되어지고, 계획기간 내에서 모든 선박의 이용 가능한 일자가 다르고, 목적지로 운송되어야 할 차량도 일별로 생산되어 모든 목적지는 여러 선박에 의해 방문 된다는 특징이 있다. 이는 같은 목적지로 운송되어야 할 차량이 일 단위로 생산 되고, 선박은 운영비용이 너무 높아 대기에 따른 손실비용을 줄이고, 다음 계획기간에 선박 부족의 악영향을 주지 않기 위해 출발지에서 대기 없이 운항하는 것을 원칙으로 하고 있어 계획 기간 내에 하나의 목적지를 여러 선박이 방문하게 된다.

자동차 운반선의 라우팅 문제는 계획기간 내 선박의 이용 가능한 일자와 차량의 생산일정 등의 미리 알려진 자료를 바탕으로 한다. 계획 기간 내 선박의 이용 가능한 일자, 선박의 적재용량 그리고 선박의 속도는 모두 다르다. 또한 자동차 운반선의 특성 때문에 수거와 배송이 동시에 이루어지지 않으며, 차량들은 목적지 항에 도착되어야 하는 시간 제약을 가지고 있지 않다. 또한 계획기간 내에 모든 선박은 출발지를 재방문 하지 않는다. 그래서 자동차 운반선의 라우팅 문제는 긴 계획기간 내 계획된 선박의 도착일과 차량 생산일정을 토대로, 화주의 요구에 의해 차량을 목적지로 적재용량이 다른 여러 선박들을 이용하여 최소비용으로 운송해야 하는 확장되고, 현실적인 차량경로문제라 할 수 있다. 또한 자동차 운반선의 라우팅 문제는 긴 계획기간 내에서 차량의 생산일정과 선박의 도착일정에 관한 정보의 변경이 잦아, 차량의 생산일정과 선박의 도착 일정이 변경되었을 때 이들 정보를 반영하여 재계획 하거나, 계획 내용을 수정할 수 있어야 한다.

3.2 자동차 운반선사의 해상운송계획 절차

자동차 운반선의 라우팅 문제를 해결하기 위해서는 제품(차량)의 특성을 먼저 이해할 필요가 있다. 자동차는 생산시점에 각 차량별 고유 번호가 생성된다. 수출차량은 목적지에 대한 정보도 함께 생성되기 때문에 같은 차종이더라도 고유번호 별로 수송된다. 또한 자동차 제조업체(화주)의 수출 차량에 대한 생산 일정과 실제 생산결과(실제 수송해야 할 물량)의 오차가 발생하기 때문에 화주의 생산일정과 생산량을 점검하고 운송계획을 수정하는 과정이 필요하다.

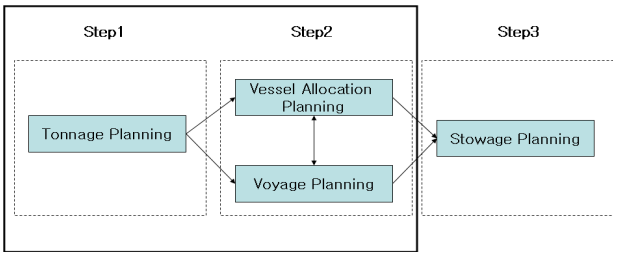

Fig. 1 Maritime transportation planning of a car shipping company

자동차 운반선사의 해상운송계획은 크게 총량계획(tonnage planning), 항해계획(voyage planning), 선박할당계획(vessel allocation planning), 선적계획(stowage planning)으로 구분되고, 자동차 운반선사의 해상운송계획 과정은 Fig. 1과 같이 3단계로 구분된다. 계획의 첫 단계인 총량계획은 중장기적인 관점에서 기간별 수송 물량과 이를 처리하기 위해 요구되는 선복량 사이에 균형을 유지할 수 있도록 선복량을 확보, 유지, 관리하는 계획 단계이다. 이는 선박을 조달하는 데 많은 시간이 소요되기 때문에 각 선박에 대한 선박 할당과 항해 계획을 하기 전에 선복량을 안정적으로 관리하기 위함이다. 따라서 총량 계획은 연간 생산계획 정보를 이용하여 1년간의 총량 계획을 세우고, 현 계획시점에서 향후 3개월의 좀 더 정확한 생산계획 정보를 통해 연간 총량 계획 내용을 생산계획 정보에

Table 1 Data needed in the maritime transportation lanning

구분	활용 데이터	데이터 내용 및 크기	데이터 수령 시기	데이터 제공자
Tonnage Planning	연간 생산계획	각 월별 총 생산물량(1년)	전년도 11월 말	화주
	월간 생산계획	각 월별 총 생산물량 (3개월)	전월 말	
Vessel Allocation & Voyage Planning	수출국별 생산물량	차종, 수출국가별 물량 (1개월)	전월 말	
	일별 생산물량	차종, 수출국가, 날짜별 생산물량 (1개월)	매일	

맞게 수정한다. 이후 총량 계획의 결과를 바탕으로 단기처리 물량(당월처리 물량)을 수송하기 위한 선박 할당과 항해계획이 이루어진다. 본 연구에서 다루는 자동차 운반선의 라우팅 문제는 선박 할당과 항해계획을 동시에 해결하는 것이다. Table 1은 각 계획에서 필요로 하는 자료들을 보여준다.

자동차 운반선사의 경우 화주(자동차 제조업체)의 생산일정과 실제 생산된 양에 대해서 오차가 발생하기 때문에, 보다 정확한 계획을 위해서 자동차 운반선의 라우팅 문제는 단기적으로 해결하여야 한다. 매월 제공되는 보다 정확한 자료(차종 및 수출국가 별로 제공되는 구체적인 단기 물량 정보)를 토대로 1개월의 운송계획을 세운다. 그래서 자동차 운반선의 라우팅 문제는 1개월 단위로 해결한다. 항해계획은 각 선박의 목적지 방문순서를 결정하고, 선박할당 계획은 각 선박에 어떤 물건을 얼마만큼 적재할 것인가를 결정한다. 자동차 운반선의 라우팅 문제는 수송해야 할 각 차량(화물)이 제품 고유번호와 수송 목적지에 대한 정보를 가지고 있기에 선박에 어떤 차량을 적재하는가에 따라 선박의 목적지가 결정되고, 각 선박의 목적지 방문순서가 운항비용에 영향을 미치기 때문에 선박할당과 항해 계획을 동시에 해결한다.

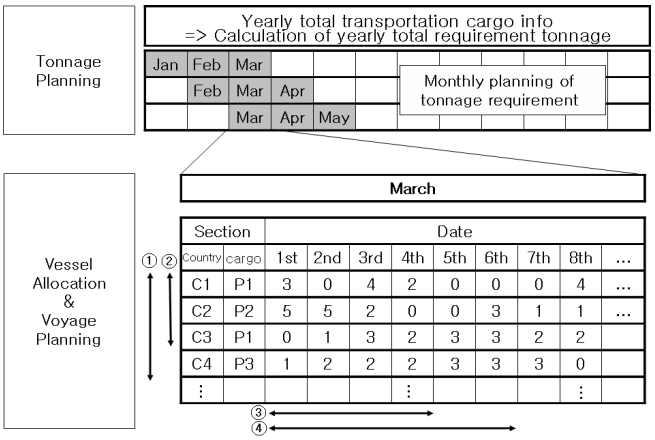

Fig. 2 Routing problem of car carrier vessels

선박할당에서 어떤 차량을 얼마만큼, 어느 선박에 할당할 것인지를 결정하기 위해서는 선박의 적재 용량과 도착일정을 고려하여 생산일자가 비슷한 물량들을 목적지별로 묶어서 할당해야 한다(Fig. 2 참조). 이는 수송해야 할 차량이 매일 생산됨에 따라 특정 목적지의 일별 물량으로는 각 선박의 선복량을 채울 수 없기 때문이다. 따라서 선박 할당을 할 때는 목적지와 일별 생산량을 어떻게 그룹핑하는 것이 항해 비용을 줄일 수 있는지도 함께 고려되어야 한다. 선박할당에서 한 목적지의 일별 생산량은 하나의 묶음으로 한 선박에 할당되도록 한다.

3.3 정수계획(Integer Programming) 모형

자동차 운반선의 라우팅 문제는 자동차 운반선이 출발 지점에서 배송할 차량을 싣고 목적지 노드를 순서대로 방문하고 다시 출발점으로 돌아오는 최소 선박 수 또는 최소 비용(최대 이익)이 되도록 각 선박에 대한 차량 할당과 선박의 항해경로를 결정하는 문제이다. 본 연구에서 다루는 자동차 운반선의 라우팅 문제의 기본적인 가정과 정수 계획 모형은 다음과 같다.

- 계획 범위 내 배송해야 할 차량 수량과 목적지는 미리 알려져 있음
- 차량의 생산일정과 선박의 도착일정은 미리 알려져 있음
- 차량을 수송할 선박의 수와 적재용량은 미리 알려져 있음
- 각 선박마다 다른 적재용량과 속도를 가지고 이에 따른 다른 비용구조(고정비 포함)를 가짐
- 각 항구마다 다른 하역비용을 가짐
- 계획 기간 내에 처리되지 못한 차량은 다음 달로 이월함

1) 기호

i = 노드(목적지) (i = 0, 1, ...,N) ∴0=depot
j = 노드(목적지) (j = 0, 1, ..., N)
k = 일자 (k = 1, 2, ..., K)
s = 선박의 수 (s = 1, 2, ..., S)

2) 파라미터

TP_{ijs} : 선박 s의 노드 i 에서 j 까지 운항비
DC_{sj} : 선박 s의 노드 j에서 하역비
PQ_{jk} : 목적지가 j이고 k일자에 생산된 차량대수
PS_{jk} : 목적지가 j이고 k일자에 생산된 차량의 생산일자
AL_s : 선박 s의 depot에서 도착일자
CP_s : 선박 s의 capacity
CO_{jk} : 목적지가 j인 k 일자에 생산된 차량을 다음 달로 이월함으로써 생기는 패널티 비용

3) 변수

$$x_{ijs} = \begin{cases} 1, & \text{만약 선박 } s\text{가 노드 } i \text{ 에서 } j \text{ 까지 운행하면} \\ 0, & otherwise \end{cases}$$

$$y_{sjk} = \begin{cases} 1, & \text{만약 선박 } s\text{가 목적지가 } j\text{이고 } k\text{일자에 생산된 차량을 적재하면} \\ 0, & otherwise \end{cases}$$

$$y_{sj} = \begin{cases} 1, & \text{만약 선박 } s\text{가 목적지 } j\text{를 방문하면} \\ 0, & otherwise \end{cases}$$

$$z_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{만약 목적지가 } j\text{이고 } k \text{ 일자에 생산된 차량을 다음달로 이월하면} \\ 0, & otherwise \end{cases}$$

$$Min \sum_{i=0}^{N} \sum_{j=0, j\neq i}^{N} \sum_{s=1}^{S} TP_{ijs} \cdot x_{ijs} + \sum_{s=1}^{S} \sum_{j=0}^{N} DC_{sj} \cdot y_{sj} + \sum_{j=1}^{N} \sum_{k=1}^{K} CO_{jk} \cdot z_{jk} \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{s=1}^{S} \sum_{j=1}^{N} \sum_{k=1}^{K} PQ_{jk} \cdot y_{sjk} + \sum_{j=1}^{N} \sum_{k=1}^{K} PQ_{jk} \cdot z_{jk} = \sum_{j=1}^{N} \sum_{k=1}^{K} PQ_{jk} \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^{K} y_{sjk} - M \cdot y_{sj} \leqq 0, \quad \text{for all s, j=1,...,N} \tag{3}$$

$$\sum_{j=1}^{N} y_{sj} - M \cdot y_{s0} \leqq 0 \quad \text{for all s} \tag{4}$$

$$\sum_{i=0 i \neq j}^{N} x_{ijs} = y_{sj} \quad \text{for all s, j} \tag{5}$$

$$\sum_{i=0, i \neq j}^{N} x_{jis} = y_{sj} \quad \text{for all s, j} \tag{6}$$

$$\sum_{i \in T} \sum_{j \in T} x_{ijs} \leqq |T| - 1 \quad \text{for all s, } |T| \neq 0, (i \neq j) \tag{7}$$

$$\sum_{s=1}^{S} y_{sjk} + z_{jk} = 1 \quad \text{for all k, j=1,...,N} \tag{8}$$

$$\sum_{s=1}^{S} PS_{jk} \cdot y_{sjk} - \sum_{s=1}^{S} AL_s \cdot y_{sjk} \leqq 0 \quad \text{for all j, k} \tag{9}$$

$$\sum_{j=1}^{N} \sum_{k=1}^{K} PQ_{jk} \cdot y_{sjk} \leqq CP_s \quad \text{for all s} \tag{10}$$

$x_{ijs}, y_{sjk}, y_{sj}, z_{jk} = \{0,1\}$ for all s, i, j, k

M은 아주 큰 수

T는 목적지들의 모든 가능한 부분집합

목적함수 식 (1)은 차량들이 선박에 할당된 뒤, 선박 운항에서 발생하는 운송비용, 하역비용 그리고 이월비용의 총합을 최소화한다. 식 (2)는 계획기간 내 선박에 적재되어 배송되거나 다음 달로 이월된 총 차량의 수는 계획기간 내 생산된 총 차량의 수와 같게 한다. 식 (3)은 선박 s에 목적지 j로 가는 k일자에 생산된 차량이 실렸을 때, 선박 s가 한번 그 목적지 j를 방문하도록 선박 s의 y_{sj} 값을 1로 만들어 준다. 목적지 j로 가는 여러 k일자의 차량이 동시에 선박 s에 실렸을 때도 한번만 목적지 j를 방문하도록 한다. 선박 s에 목적지 j로 가는 차량이 실리지 않은 경우는 y_{sj} 값을 0으로 만든다. 식 (4)는 차량을 적재하고 출항한 모든 배를 출발지로 되돌아오도록 만든다. 선박 s가 한 목적지라도 방문하게 되면 y_{s0} 값이 1이 된다. 식 (5)와 (6)은 한 선박이 각 목적지에 한번만 방문하도록 한다. 또한 선박 s가 방문한 목적지에서 다시 출발하여 다음 목적지로 가는 연속적인 경로를 만들어 준다. 식 (7)은 선박 s의 이동 경로에서 생기는 부분경로를 제거한다. 식 (8)은 목적지 j로 가야 하는 k 일자에 생산된 차량들을 한 배에만 적재되게 한다. 일단위로 생산된 차량들을 그룹으로 묶어 한 선박에 적재되도록 한다. 식 (9)는 목적지가 j인 차량의 생산 일정이 출발지에서 선박의 도착일정 보다 앞서거나 같은 경우에만 선박 s에 적재될 수 있도록 한다. 선박 운영에서 대기에 따른 손실비용을 줄이기 위해, 선박이 도착한 다음 날 바로 출발하도록 하였다. 이 제약식에서 선박이 출발지에서 머무는 시간은 조정가능 하다. 식 (10)은 선박 s에 적재된 총 차량의 수가 그 선박의 적재용량을 초과할 수 없도록 한다.

4. 차량 운송선사용 해상운송계획을 위한 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 다양한 메타 휴리스틱 기법들 중에서도 가장 폭넓게 사용되고 있는 방법론으로 다양한 차량경로문제에서 적용되었다(Baker and Ayechew, 2003). 유전 알고리즘은 확정적 방법론에서 다루는 의사결정 변수 대신 기호로 코딩된 염색체를 이용하고, 문제에 대해 크게 관련된 지식을 필요로 하지 않으며 단지 진화를 위해 설계된 유전 연산 후의 목적함수를 평가하는 과정을 통해 최적화 문제에 적용되어질 수 있다는 장점이 있다. 유전 알고리즘은 문제 종속 접근법으로, 최적화 문제에 유전 알고리즘을 적용하는데 있어 가장 중요한 것은 해결 하고자 하는 문제를 기호를 이용하여 염색체로 표현하는 것이다. 본 연구에서 다루고자 하는 자동차 운송선의 라우팅 문제를 하나의 염색체로 표현하기 위해 결정되어야 할 사항들을 동시에 표현 하여야 한다. 이를 통해 차량의 선박할당과 선박의 항해경로를 동시에 결정할 수 있도록 하여야 한다.

4.1 초기 해의 생성

국소 탐색법에서 초기 해는 최종 해에 많은 영향을 미친다. 일반적으로 유전 알고리즘은 초기 해를 임의대로 발생시켜 사용하고 있으나, 자동차 운송선사의 문제는 계획기간이 길어 문제가 크기 때문에 좋은 초기 해로 모집단을 생성하여 진화하도록 하여 빠른 시간 내에 더 나은 최종 해를 구할 수 있도록 하였다. 자동차 운송선사의 라우팅 문제에선 차량의 선박할당과 선박의 운항경로를 동시에 결정하여야 하는데, 선박들이 최소의 운항으로 화주의 차량들을 배송하기 위해서는 같은 목적지를 가지는 차량을 생산일자를 고려하여 적절하게 할당하도록 하여야 한다. 또한 모집단 생성에서 중요한 것은 해의 다양성이다. 다양한 초기해를 생성하여 조기 수렴(premature convergence) 현상을 줄이도록 하였다. 차량의 선박 할당은 처음에는 랜덤하게 하고, 다음에는 할당된 선박에 우선순위를 두어 같은 목적지의 차량은 같은 선박에 적재되도록 하였다. 초기해의 생성과정은 다음과 같고, 사용된 기호는 3.3절에 사용된 것과 같다.

단계 1) k =1

단계 2) 기항지의 집합 P = {1, 2, ..., J}에서 임의의 기항지 j를 선택한다. 만약 집합 P = ∅ 이면, 단계 7로 간다.

단계 3) 기항지 j의 k일자 생산량에 대해 적재가능한 선박의 집합 Q = {s| $PS_{jk} - AL_s \leq 0$, for all s}를 생성한다.

만약 Q = ∅ 이면, 그 생산량은 다음 달로 이월시키고 단계 6으로 간다.

단계 4) 집합 Q에서 이미 물량을 선적한 선박을 우선 선택한다. 물량을 선적한 선박이 없을 경우에는 임의대로 한 선박을 선택한다.

단계 5) 기항지 j의 k일자의 생산량을 그 선박에 적재한다.

단계 6) 만약 k<K 이면, k=k+1로 하고 단계 3으로 가고, 그렇지 않으면 그 기항지 j를 집합 P에서 삭제하고 단계 1로 간다.

단계 7) Stop

4.2 염색체 표현방법

자동차 운반선의 라우팅 문제를 유전 알고리즘으로 해결하기 위해서는 먼저 문제의 해를 염색체로 표현하여야 한다. 제안된 유전 알고리즘의 염색체 표현은 선박의 번호를 반복시키는 형태로 이루어진다. 하나의 유전인자(gene)는 그 기간에 해당하는 물량이 유전인자로 표현된 선박에 할당되는 것을 의미한다. 예를 들어 목적지가 3개이고, 계획기간의 일자가 5이고 선박이 3척일 경우는 Fig. 3과 같이 표현된다. Fig. 3의 염색체 표현에서는 목적지 1로 보내질 첫째 날(k=1) 생산된 차량들은 선박 1에 할당된다. 또한 목적지 2로 보내질 첫째 날 생산된 차량들은 선박 2에 할당된다. 그리고 각 선박들의 목적지 방문 순서는 두 번째 박스의 2-1-3의 순서를 따른다. 이 유전인자들은 목적지의 번호가 중복되지 않도록 임의대로 생성한다.

k	1	2	3	4	5
목적지 1	1	2	1	3	2
목적지 2	2	1	1	2	3
목적지 3	1	1	2	3	3

방문순서	2	1	3

Fig. 3 Representation of chromosome

예를 들어 Fig. 3과 같이 표현된 염색체에서 선박 1은 세 목적지의 차량을 모두 적재하였기 때문에 세 목적지를 다 방문하게 되는데, 그 때 방문순서는 목적지 2 - 1 - 3 순서가 된다. 이 염색체 표현을 통해 차량의 선박할당과 선박의 항해경로를 동시에 결정할 수 있다. 만약 선박 2가 목적지 2와 3의 차량만을 적재 했을 경우에는 선박 2의 방문 순서는 2 - 3 순서가 된다.

4.3 유전연산자

초기 해로 얻은 염색체들이 가지고 있는 좋은 순서관계를 유지하면서 진화과정에서 조금씩 해를 개선시켜 나갈 수 있는 연산자가 필요하다. 본 연구에서는 교차 연산자로 Fig. 4와 같은 일점 교차를 사용하였으며, 방문순서를 결정하는 두 번째 유전인자들은 부모 중 좋은 목적함수를 얻을 수 있는 것을 자식에게 유전시키도록 하였다. 선박의 경유 순서의 차이는 선박의 긴 이동거리와 시간 때문에 큰 결과의 차이를 내기에 부모 중 하나의 개체에서 더 나은 목적함수를 가진 개체에서 그대로 유전되도록 하였다.

돌연변이 연산자는 Fig. 5와 같이 각 행마다 첫 번째와 마지막 유전인자를 제외한 한 개의 유전인자를 임의대로 선택한 후 좌우의 유전인자와 비교하여 같은 경우 좌우의 유전인자로 복제하였다.

부모 1

목적지 1	1	2	1	3	2
목적지 2	2	1	1	2	3
목적지 3	1	1	2	3	3

	2	1	3

난수	1	1	1	2	2

부모 2

목적지 1	2	1	2	2	3
목적지 2	2	1	3	3	2
목적지 3	2	1	2	2	2

	1	2	3

자식 1

목적지 1	1	2	1	2	3
목적지 2	2	1	1	3	2
목적지 3	1	1	2	2	2

1	2	3

Fig. 4 Example of crossover

목적지 1	1	2	1	3	2
목적지 2	2	1	1	2	3
목적지 3	1	1	2	3	3

목적지 1	1	1	1	3	2
목적지 2	2	1	1	2	3
목적지 3	1	1	2	3	3

Fig. 5 Example of mutation

선택(Selection) 방법은 부모 중 부(父)에 해당하는 개체는 한 집단 내에서 정해진 순위 내의 우수한 개체를 선택하고, 모(母)는 전체 집단 내에서 임의대로 선택하는 씨종자 선택방법(Park et al., 2003)을 사용한다. 세대의 구성은 현 세대에서 선택방법과 유전 연산자를 통해 새롭게 구성하고 엘리티즘을 사용한다.

4.4 해의 수정 과정

유전연산 수행 후 선박의 적재용량을 넘긴 비실행 가능해가 생기게 되는데 이를 실행가능해로 바꾸기 위한 과정이 필요하다. 비실행 가능해를 실행가능해로 바꾸는 과정은 다음과 같으며, 적재용량을 초과한 선박의 물량을 다른 선박으로 할당할 때는 비용의 증가 폭이 가장 작은 선박으로 재할당 되도록 하였다. SQ_s는 선박 s에 적재된 총 차량의 수를 의미하고, PO_{sj}는 선박 s에 적재된 차량 중 기항지 j로 가는 총 자동차의 수를 의미한다.

단계 1) 선박의 용량을 초과한 선박 집합 O = {s| $SQ_s \geq CP_s$, for all s}와 선박의 적재 용량이 남아 있는 선박 집합 E = {s| $SQ_s < CP_s$, for all s}를 생성한다.

단계 2) 집합 O에서 임의대로 한 선박을 선택하고, $SQ_s - PO_{sj} \leq CP_s$ 를 가능하게 하는 PO_{sj}를 찾는다. 만약 그런 PO_{sj}가 없다면 가장 크기가 작은 PO_{sj}를 찾는다.

단계 3) 선택된 PO_{sj}를 집합 E의 선박 중 PO_{sj}를 적재할 수 있는 여유를 가진 모든 선박을 찾는다. 만약 여유를 가진 선박이 없다면 다음 달로 이월 한다. PO_{sj}를 적재한 후 각 선박의 수익의 증가 폭을 계산한 뒤, 가장 큰 수익의 증가 폭을 산출한 선박에 선택된 PO_{sj}를 할당한다.

단계 4) 만약 O = ∅이면, Stop 그렇지 않으면 단계 1로 이동

유전 알고리즘의 평가 함수는 3.3절의 정수 계획 모형과 같이 운송비용, 하역비용 그리고 이월비용의 합으로 한다.

5. 수행도 평가

자동차 운송선사의 라우팅 문제에서 제안된 유전 알고리즘으로 얻은 결과를 정수계획법으로 얻은 최적해와 비교하기 위해 현실 문제를 조금 축소한 예를 사용하였다. 실험에는 사용가능한 선박의 수, 각 선박의 선복량, 선박의 가용일자(도착일자), 각 선박의 연비 등을 달리하였다. 선박마다 다른 연비는 운항비용 계산에 포함되어진다. 그리고 각 항구마다 하역비와 정박료를 다르게 책정하였다.

제안된 유전 알고리즘에서 사용할 교차율과 돌연변이율을 결정하기 위한 실험을 하였다. 실험에 사용된 문제의 크기는 목적지항의 수 7, 선박의 수 7 그리고 31일자로 하였다. 교차율은 0.7, 0.75, 0.8, 0.85일 경우와 돌연변이율 0.05, 0.1, 0.15일 경우에 대해 실험하였다. 그리고 모집단의 크기 100, 세대수 100, 엘리티즘 크기 50 그리고 씨종자 선택 크기를 50으로 하였다. 50회 반복 실험에서 얻은 최소해와 평균해에 대한 실험결과는 Table 2와 같다.

Table 2 The results of parameter test

교차율 \ 돌연변이율	0.05		0.1		0.15	
	최소	평균	최소	평균	최소	평균
0.7	160,686	180,893	171,521	185,789	165,246	181,935
0.75	162,650	181,567	165,820	181,508	163,981	181,624
0.8	165,994	181,308	161,352	181,862	160,947	181,179
0.85	165,658	182,337	159,558	180,936	154,543	180,769

Table 3 Computational results of the proposed GA and optimal solution

목적지 항수	선박수	기간	IP		GA			
			최적해	시간 (초)	최소해	시간 (초)	최적성 (%)	평균해
3	3	10	49,062	0.66	49,062	1.98	100	49,062
		20	54,995	0.88	54,995	2.43	100	54,995
		31	71,832	0.55	71,832	2.87	100	71,832
4	4	10	63,939	0.96	63,939	3.56	100	65,717
		20	91,381	1.64	91,381	4.11	100	93,035
		31	106,969	3.1	106,969	4.9	100	109,553
5	5	10	98,752	10.17	99,119	8.42	99.63	110,163
		20	99,057	102	99,423	10.21	99.63	108,593
		31	101,872	1,310	102,238	12.33	99.64	115,245
7	7	10	133,793	18,000	136,624	13.58	97.88	161,373
		20	131,768	18,000	134,914	15.81	97.61	162,513
		31	146,445	18,000	147,780	21.34	99.10	174,439
9	9	10	-	-	173,448	32.1	-	207,986
		20	-	-	186,575	41.34	-	228,687
		31	-	-	239,836	59.78		296,851

실험 결과를 통해 교차율은 0.85, 돌연변이율은 0.15로 결정하였다. Table 3에서는 정수계획법으로 최적해를 구할 수 있는 다양한 크기의 문제에서, 유전 알고리즘으로 얻은 결과와 최적해를 비교 하였다. 유전 알고리즘에서 모집단의 크기는 500, 세대수는 200, 엘리티즘 크기 50, 씨종자 크기 50으로 하였다. 수리모형의 최적해를 얻기 위해서 ILOG CPLEX 10.0을 사용하였고, 유전 알고리즘은 Java 2 Standard Edition 1.5를 기반으로 하여 개발하였다.

선박의 수, 목적지항의 수, 일자에 대해 다양한 크기의 문제를 임의대로 생성하였고, 유전 알고리즘은 10회 반복 실험에서 얻은 최고해를 제시하였다. 실험 환경은 Intel Core2Duo 2.33GHz (메모리 DDR2 2GB)에서 실험하였다. 최적성은 제안된 유전 알고리즘 결과 값을 평가하기 위해 (1 - (제안된 유전 알고리즘 결과 값 - 최적해)/최적해) × 100 으로 계산하였다. 정수계획법으로 얻은 결과에서 목적지항 7, 선박의 수 7, 기간 10 이상의 문제에서는 연산시간을 4일을 넘겨도 최적해를 구할 수 없어, 5시간의 시간제약을 주어 얻은 결과 값과 비교하였다.

목적지 항 및 선박 수가 4이하의 문제에서는 최적해를 구할 수 있었으며, 목적지 항 및 선박수가 5인 문제에서는 최적해의 99% 수준 이상의 해를 얻을 수 있었다. 그리고 IP로는 해를 구할 수 없었던 큰 문제에서도 유전 알고리즘을 통해 아주 짧은 시간 내에 좋은 해를 구할 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 자동차 운반선사의 효율적인 해상운송계획 수립을 위해 유전 알고리즘을 개발하였다. 제안된 유전 알고리즘은 기존의 수작업 계획 방식을 자동화하여 비용의 관점에서 최적의 대안을 사용자에게 제공한다. 또한 계획 수립 이후 발생하는 급작스런 변경사항을 반영하기 위해 사용자가 수작업으로 계획을 알고리즘 차원에서 수정 가능하도록 하였다. 이를 통해 너무 복잡하여 수작업으로 해결하기 어려웠던 현실 문제를 알고리즘을 통해 최대한 빠른 시간 내에 좋은 질의 해를 제공할 수 있도록 하였다. 수행도 평가에서 얻은 최적해와의 근접성은 본 연구에서 제시한 유전 알고리즘의 우수성을 보여주며, 빠른 수행시간은 현실 문제에 충분히 적용할 수 있는 실용성을 보여준다 하겠다.

후 기

"이 논문 또는 저서는 2010년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구임" (지역거점연구단육성사업/차세대물류IT기술연구사업단)

참 고 문 헌

[1] Al-Khayyal, F. and Hwang, S.J.(2007), "Inventory constrained maritime routing and scheduling for multi-commodity liquid bulk, part I: application and model", European Journal of Operational Research 176, pp.106-130.

[2] Baker, B.M. and Ayechew, M.A.(2003), "A genetic algorithm for the vehicle routing problem", Computers and Operations Research 30, pp.787-800.

[3] Bell, J.E. and McMullen, P.R.(2004), "Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem", Advanced Engineering Informatics 18, pp.41-48.

[4] Brønmo, G., Christiansen, M., Fagerholt, K. and Nygreen, B.(2007), "A multi-start local search heuristic for ship scheduling - a computational study", Computers and Operations Research 34, pp.900-917.

[5] Brown, G.G., Graves, G.W. and Ronen, D.(1987), "Scheduling ocean transportation of crude oil", Management Science 33, pp.335-346.

[6] Du, T.C, Li, E.Y. and Chou, D.(2005), "Dynamic vehicle routing for online B2C delivery", Omega 33, pp.33-45.

[7] Fagerholt, K.(1999), "Optimal fleet design in a ship routing problem", International Transactions in Operational Research 6, pp.453-464.

[8] Fagerholt, K.(2001), "Ship scheduling with soft time windows: an optimisation based approach", European Journal of Operational Research 131, pp.559-571.

[9] Fagerholt, K.(2004), "A computer-based decision support system for vessel fleet scheduling - experience and future research", Decision Support Systems 37, pp.35-47.

[10] Fagerholt, K. and Christiansen, M.(2000), "A combined ship scheduling and allocation problem", Journal of the Operational Research Society 51, pp.834-842.

[11] Gendreau, M., Hertz, A. and Laporte, G.(1994), "A tabu search heuristic for the vehicle routing problem", Management Science 40, pp.1276-1290.

[12] Haghani, A. and Jung, S.J.(2005), "A dynamic vehicle routing problem with time-dependent travel times", Computers and Operations Research 32, pp.2959-2986.

[13] Ho, S.C. and Haugland, D.(2004), "A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and split deliveries", Computers & Operations Research 31, pp.1947-1964.

[14] Jetlund, A.S. and Karimi, I.A.(2004), "Improving the logistics of multi-compartment chemical tankers", Computers and Chemical Engineering 28, pp.1267-1283.

[15] Kim, S.H. and Lee, K.K.(1997), "An optimization-based decision support system for ship scheduling",

Computers and Industrial Engineering 33, pp.689-692.
[16] Laporte, G., Gendreau, M, Potvin, J.Y. and Semet, F.(2000), "Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem", International Transactions in Operational Research 7, pp.285-300.
[17] Lenstra, J. and Kan, R.(1981), "Complexity of vehicle routing and scheduling problems", Networks 11, pp.221-227.
[18] Lawrence, S.A.(1972), International sea trnasport: the year ahead, Lexington Books, Lexington, MA.
[19] Mitsui O.S.K Lines, LTD.(2007), Investor Guidebook.
[20] Osman, L.H.(1993), "Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem", Annals of Operation Research 41, pp.421-451.
[21] Park, B.J., Choi, H.R. and Kim, H.S.(2003), "A Hybrid GA for Job Shop Scheduling Problems", Computers and Industrial Engineering 45, pp.597-613.
[22] Park, B.J., Choi, H.R., Kim, H.S. and Jung, J.U.(2008), "Maritime Transportation Planning Support System for a Car Shipping Company", International Journal of Navigation and Port Research 32, pp.295-304.
[23] Pisinger, D. and Ropke, S.(2007), "A general heuristic for vehicle routing problems", Computers and Operations Research 34, pp.2403-2435.
[24] Ronen, D.(1986), "Short-term scheduling of vessels for ship bulk or semi-bulk commodities originating in a single area", Operations Research 34, pp.164-173.
[25] Ronen, D.(1993), "Ship scheduling: the last decade", European Journal of Operational Research 71, pp.325-333.

원고접수일 : 2010년 8월 11일
심사완료일 : 2010년 9월 19일
원고채택일 : 2010년 10월 4일