

공급자 재고 관리 환경하의 차량 경로 문제

양 병 학*

*경원대학교 산업정보시스템공학과

A Vehicle Routing Problem in the Vendor Managed Inventory System

Byoung Hak Yang*

*Dept. of Industrial Engineering, Kyungwon University

Abstract

The inventory routing problem (IRP) is an important area of Supply Chain Management. The objective function of IRP is the sum of transportation cost and inventory cost. We propose an Artificial Immune System(AIS) to solve the IRP. AIS is one of natural computing algorithm. An hyper mutation and an vaccine operator are introduced in our research. Computation results show that the hyper mutation is useful to improve the solution quality and the vaccine is useful to reduce the calculation time.

Keywords : VMI, IRP, AIS

1. 서 론

VMI (Vendor Managed Inventory)는 공급사슬관리의 주요한 도구 중에 하나이다. 고전적인 시스템에서는 수요자가 재고관리를 하고, 수요자의 주문에 의해 공급자의 수송이 발생한다. 따라서 재고관리와 수송문제는 별개의 독립적인 문제였다. 그러나 VMI환경에서는 공급자가 주도적으로 영업점의 재고 관리를 하게 된다.

공급자는 영업점의 재고 수준을 확인하고 주문량을 결정하여 배송해야 한다. 따라서 VMI환경에서는 수송과 재고관리는 결합된 문제가 된다. VMI가 아니더라도 재고와 배송계획을 통합해야 하는 상황으로는 자판기 산업, 할인체인점의 순회 배송 등을 들 수 있다. 국내에 보급된 자판기의 수는 100만대 이상으로 알려져 있고, 최근의 모바일 통신 기술은 자판기 내부에서 재고 정보를 모바일 통신 네트워크를 이용하여 공급자에게 전달할 수 있다[20]. 이런 시스템에서는 자판기의 재고

수준을 원격에서 탐지할 수 있으므로 배송계획에서 자판기의 재고 수준을 감안할 수 있게 된다. 대형 할인점 업체의 경우 중앙 창고에서 각 할인점으로 수송 및 재고 관리를 동시에 수행하여야 한다. 이와 같이 배송 계획과 재고 계획을 통합할 필요성이 점점 증가하고 있다. 배송과 재고를 통합한 연구 분야를 Inventory Routing Problem (IRP)라 하며 이와 유사한 분야로 Periodic Vehicle Routing Problem (PVRP)가 있다. 본 연구에서는 원격에서 자판기의 재고를 탐지할 수 있는 상황에서의 재고-배송계획에 대한 해법을 찾아보려고 한다. 자판기의 내부에 통신 모듈을 장착하여, 자판기의 재고 및 판매 정보를 통신망을 통하여 외부로 송출하는 시스템은 이미 2000년대 초반부터 실용화되었다.

자판기의 재고 정보는 인터넷 서버에 저장되고 관련자들은 인터넷과 무선 통신망을 통하여 자판기의 내부 정보를 탐색할 수 있다[20]. 이런 상태에서는 자판기의 보충은 새로운 방식이 필요하다.

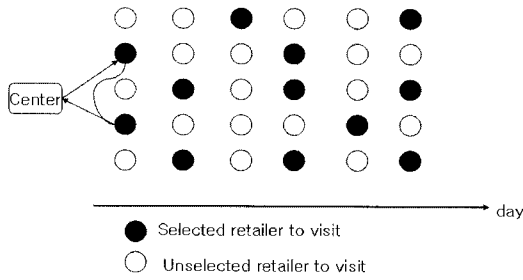
† 이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (KRF-2007-313-D00906).

† 이 논문은 2007년도 경원대학교 지원에 의한 결과임

† 교신저자: 양병학, 경기도 성남시 수정구 복정동 산65 경원대학교 산업정보시스템공학과

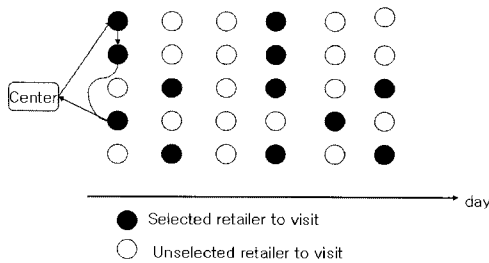
M·P: 010-2772-5368, E-mail: byang@kyungwon.ac.kr

2008년 6월 접수; 2008년 8월 수정본 접수; 2008년 8월 게재확정



[그림 1] 6일간의 일일 배송 계획의 개념도. 흑색점은 재고가 소진 되어 방문을 기다리는 자판기를 의미한다.

[그림 1]는 하나의 영업소와 5개의 자판기로 이루어진 물류망을 나타내고 있다. 수평축은 시간의 흐름을 나타낸다. 흑색점은 재고 수준을 감안하여 재고가 소진되는 시점을 표시하고 있다. 따라서 흑색점으로 표시된 수요지는 그 이전에 배송을 받아야 한다. 첫 번째 날에 두 개의 수요지에서 배송이 필요하다. 만약 이런 기준으로 배송계획을 수립한다면 평범한 차량경로계획 문제를 매일 반복해 해결하는 상황이다. 그런데 필요에 따라 소진일보다 먼저 배송을 한다면 [그림 2]처럼 이후 재고소진일은 변하게 된다.



[그림 2] 첫 번째 날 인위적으로 배송을 변경하면 이후 자판기의 재고 소진일이 변경된다.

현재의 배송계획의 변화는 현재 배송 비용의 변화, 수요지의 재고 비용 변화, 미래의 배송 비용의 변화를 가져오게 됨으로 우리의 목적은 총비용, 즉 계획기간 동안의 배송과 재고 비용의 합을 최소화 하는 것이다.

고객 방문 시기와 배달량은 기존의 경로 계획에서는 주문시 고객이 제시한 입력 자료였다. 그러나 IRP에서는 고객 방문 시기, 배달량, 경로 계획을 동시에 결정하여야 한다. IRP나 PVRP는 관련 연구 동향을 조사해보면 문제의 복잡성으로 완벽하게 배송과 재고문제를 통합한 해법이 개발되지 않았다. 대부분의 연구는 2단 계로 나누어서 문제를 단순화 시킨 후 계층적으로 문제를 해결하였다. 최근 전자계산학 분야에서는 의사결

정을 위한 도구로서 자연연산 (Natural Computing) 분야의 연구가 활발히 진행되고 있다. 이미 잘 알려진 인공신경망, 진화 해법, 개미 해법 등이 그 예일 것이다.

본 연구에서는 또 하나의 흐름인 인공면역시스템 (AIS : Artificial Immune System)을 해결 도구로 사용하려고 한다. 인공면역시스템에 대한 설명은 3장에서 다시 설명하기로 한다. Yang[21]의 연구에 의하면 인공면역시스템은 시간의 흐름에 따라 변하는 상황에 적합한 해법이라고 알려져 있다. 본 연구는 자판기 사업에서 재고-차량 계획법 문제를 위한 해법으로 인공면역시스템을 개발하는 것이다.

2. 연구 동향

본 연구와 관련된 연구 동향을 살펴보자. IRP는 다음과 같이 크게 3가지 분류가 존재한다.

일일 IRP : IRP를 하루 단위로 해결한다. 당일 반드시 배달해야하는 주문을 제외하고는 미래로 연기시키는 해를 제공한다. IRP의 초기 연구들이 주로 다루었다.

유한기간 운영적 IRP: 차량이 결정된 상태에서 유한한 계획 기간 동안 차량 경로 계획을 다루는 문제이다.

현재의 관리 비용과 미래의 관리 비용의 상충 관계를 다루게 된다. 수송비, 서비스수준, 재고수준, 자원계약 등을 고려하게 된다[6].

무한 기간 IRP : 장기적인 안정 상태의 수송, 재고, 주문비의 최적화를 다루고 있다. 장기적인 관점에서 최적 방문주기를 결정하고 이 패턴으로 각 고객을 방문한다는 전제하에 경로 계획을 설정한다. 운영적인 계획 이라기보다는 전략적 계획에 유용한 방법이다.

다음으로 PVRP는 각 고객을 계획기간동안 여러 번 방문할 수 있다. 따라서 각 고객별로 방문할 패턴을 결정하고 결정된 패턴에 따라 일일 차량경로 계획을 풀게 된다. PVRP는 계획 기간 동안의 총 수송비용을 최소화하게 된다. PVRP에서는 IRP와 달리 재고비용을 다루지 않는다. PVRP의 전형적인 문제들은 식료품점 배송문제나 폐휴지의 정기적 수거 문제 등이 있다. 본 연구와 관련된 주요 연구 결과를 분석하면 다음과 같다. Golden et al. [12]은 일일 IRP문제에 대하여 방문 필요성을 계산하는 방안을 제시하였다. 방문 필요성이 큰 방문지들은 우선적으로 방문지로 결정하였다. 경로는 TSP를 이용하여 구했으며 TSP가 비가해이면 방문지에서 방문 필요성이 작은 방문지를 제거하여 다시 경로 계획을 수립하였다. Dror et al.[10]은 방문 비용과 품질 비용을 이용하여 총비용을 최소화하는 보충일을 설정하였다. 보충일이 단기 계획 기간 내에 있으면 방

문지로 설정하고 이들에 대한 경로 계획을 수립하였다.

Chien et al. [7]는 일일 IRP문제를 연속적인 의사 결정문제로 취급하였다. 그들은 하루의 이익을 하루 매출과 판매 손실로 정의하고 이익을 최대화하는 의사 결정을 하였다. 당일의 의사 결정 결과는 다음날의 의사 결정에 입력 자료가 되었다. 그들은 이를 정수 계획법으로 모형화하고 라그랑지안 완화법으로 해를 구하였다. Jaillet et al.[13]은 두 주간의 IRP문제에 대하여 연동 계획 기간 접근법을 소개하였다. 그들은 두 주간의 계획이 서로 연동하는 상황에서 첫 주의 경로계획을 수립하였다. Anily와 Federgrunen [1]은 수요지를 특정 지역으로 할당하고 할당된 지역별에 속한 수요지에 동일한 주기로 배송하는 전략을 제시하였다. Renaud et al.[18]은 복수창고 VRP문제를 IRP의 한 형태로 해석하고 타부 서치 전략을 제시하였다. Bard et al. [4,5]은 위성창고가 있는 IRP문제를 다루었다. 그들은 IRP에 다단계로 분해전략을 도입하였다. 먼저 각 고객 중 보충주기에 도달할 고객을 선정하였다. 이들 중에서 추가 비용을 최소화하는 관점에서 방문 고객을 결정하였다.

다음으로 방문이 결정된 고객들에 대한 차량 경로 계획을 수립하였다. 차량경로계획은 절약기법, Sweep 법과 GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure)법을 사용하였다. Lao와 Leong[14]은 경로, 고객, 서비스라는 3개의 에이전시를 도입하였다. 경로 에이전시는 고객을 기존 경로에 삽입하거나, 현 경로를 두 개로 분할하였다. 고객 에이전시는 한 경로상의 배송량을 다른 경로로 배분하고 품질이 예상되는 수요지에 새로운 경로를 발생시켰다. 서비스 에이전시는 경로 에이전시처럼 경로에 새로운 방문지를 삽입하고, 방문지의 방문 시기를 조정하거나, 배송량을 조정하였다.

에이전시들의 상호 작용에 의해서 IRP문제의 해를 탐색하였다. Baptista [3]의 경우에는 1단계에서 각 수요지별로 방문주기 또는 방문 패턴을 결정하였다. 그리고 그 방문패턴을 기준으로 차량경로 계획을 해결하였다. 2단계에서는 계획기간동안의 차량경로들을 하나의 해로 보고, 차량 경로들을 수정하였다. Campbell과 Savelsbergh [6]의 경우에는 연동 계획에 의해서 해를 결정하였다. 1단계에서 실제 차량 경로비용이 아닌 경로 추정비용으로 배달할 수요지들과 배달량을 결정하여 경로 계획을 고려하지 않고 배달할 수요지들을 군집화하였다. 2단계에서는 1단계에서 결정된 배달 수요지들에 대한 차량경로계획을 삽입 휴리스틱에 의해서 해결하였다. Gaur와 Fisher[11]의 경우에는 먼저 수요지들을 지역 군집으로 나누었다. 지역으로 군집에 속한 수요지들은 동시에 재고 보충을 실시하였다. 1단계에서는 수요지 군집을 2단계에서는 차량 경로 문제를 해결

하였다. Rusdiansyah와 Tsao [19]의 연구에서는 1단계에서 각 수요지별 계획기간동안의 방문횟수를 결정했다. 방문 회수는 배달비용과 재고비용으로 이루어진 총 비용으로 최적화 했고, 방문회수가 정해지면 재고비용을 최소화 하기위해 한 수요지의 방문주기는 일정하게 고정하였다. 그리고 그런 방문 주기에서 결정된 방문일별로 초기 경로계획을 수립했다. 2단계에서는 전체 계획기간동안의 경로계획에 대한 수정작업을 실시했다.

Aziz와 Moin[2]은 IRP에 대한 유전 해법을 제시하였다. 그들은 Sweep 방법을 이용하여 모든 수요지에 대한 단일 경로를 구했다. 다음으로 개체는 기간별 방문 여부로 결정하였다. 그러면 이 문제는 차량 경로 문제를 새로 풀지 않고, Sweep 방법에 의해 미리 결정된 경로를 사용하여 경로 문제가 약화된 형태의 IRP가 된다. Yu et al. [22]은 IRP문제에 대한 정수계획법 모형을 제시하고 라그랑지안 완화를 이용하여 배정 문제를 반복적으로 풀어서 근사해를 구하는 방법을 제시하였다. Zhao et al. [23]은 수요지 분할 정책을 발전시켰다.

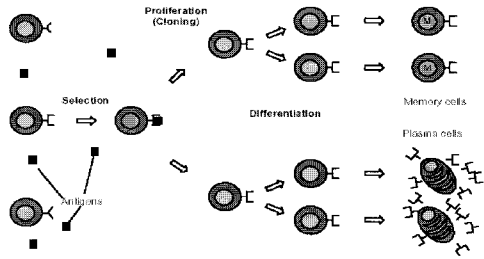
지역을 분할하면서도 한 수요지가 여러 지역에 배정될 수 있게 하였다. 한 지역내의 수요지는 동일한 주기에 방문하는 전략이다. 이렇게 부분 집합을 구하게 되면 IRP문제는 모든 방문지를 동일한 주기로 방문하는 부분 문제로 분해된다. 부분 집합을 구하는 방법으로는 타부 서치를 사용하였다. Raa와 Aghezzaf[17]는 실용적인 IRP를 제시하였다. 먼저 수요지를 부분 집합으로 분할하고, 분할된 수요지 부분 집합을 차량 경로별로 다시 분할하였다. 각 차량별로 적정 방문 주기를 설정하였다. 경로를 설정하는 방법으로는 삽입과 절약 기법이 사용되었다. 기타 상세한 IRP에 대한 연구 동향은 Moin과 Salhi[15]에 의해서 제시되었다. 기존의 연구들은 IRP의 난이도 때문에 2단계로 나누어서 문제를 해결하였다. 즉, 1단계로 담당 구역을 설정하거나, 또는 방문일정을 설정하였다. 이때에는 차량 경로에 대하여는 고려하지 않았다. 2단계에서는 1단계에서 설정된 방문 일정에 따라 차량 경로계획을 설정하였다. 이는 복잡한 문제를 간단한 2문제로 분리한 접근 방법으로 우수한 해를 찾을 수 있는 기회를 상실하는 약점이 있다.

우리는 IRP를 통합형으로 해결하려고 한다.

3. 인공면역시스템

메타 휴리스틱의 여러 해법들은 생명계의 적응 현상을 컴퓨터 계산 과정에 응용하고 있다. 면역시스템은 패턴인식문제에서 주어진 패턴을 항원으로 간주하거나 최적화 분야에서 주어진 제약식 또는 목적함수식을 항

원이라고 간주하고, 그에 대응하는 패턴 인식 결과 또는 최적해를 적절한 항체라고 정의한다면 면역시스템 자체가 훌륭한 의사결정도구가 될 수 있다는 의미가 된다. 인공면역시스템은 기존의 진화 해법이나 신경망 해법처럼 적용 범위가 다양하고 문제마다 적용하는 방법론도 다양한 것으로 알려져 있다[9].



[그림 3] 항원에 대응하는 적합한 항체를 선택하는 과정. [8]

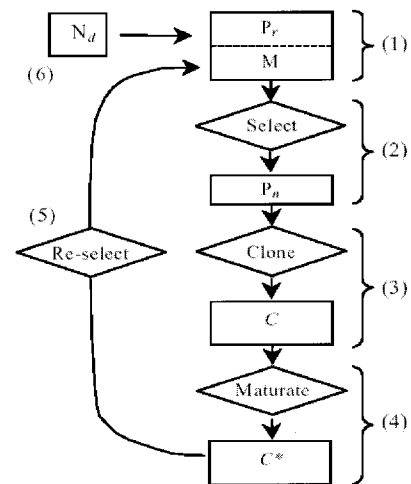
인체의 면역시스템은 대단히 효율적인 항원 인식과 항체 제조 능력을 가지고 있다. 인공면역시스템은 이러한 자연계의 면역시스템을 의사 결정 시스템으로 이용하려는 것이다. 자연계의 면역시스템에 대하여 알아보고 그로부터 파생된 인공면역시스템의 기법에 대하여 알아보자. 먼저 항원(Antigen)이 침입하면 인체는 현존하는 항체(Antibody) 중에서 침입한 항원에 가장 적합한 항체를 선택한다. 선택된 항체들은 항원을 공격하기 위해서 대량으로 복제(Cloning)된다. 이 복제단계에서 항원과의 적합성을 높이기 위해 일부 항체는 돌연변이를 일으킨다. 면역시스템이 찾아낸 가장 적합한 항체는 더 이상의 돌연변이 변화를 중지하고 항원에 대항하는 혈장 세포 (Plasma Cell)를 생성하여 항원을 제거한다.

그리고 최종적으로 선정된 항체는 미래를 위하여 기억세포 (Memory Cells)에 저장된다. 우리 몸에 항원이 들어오면 면역시스템은 적합한 항체를 찾아 이를 복제한다. 이를 복제 선택이라 한다. 이때 각 항체의 복제 비율은 항원-항체간의 적합도(Affinity) 비율을 기준으로 한다. 따라서 특정 항원이 들어오면 면역시스템은 스스로 학습에 의하여 항체의 비율과 항체의 총수를 조절하게 된다. 모집단 중에서 항원에 적합한 항체의 수는 증가하게 된다. 또한 특정 항체에 대한 침입 사실은 기억세포의 형태로 저장되어 2차 침입 시에는 빠른 시간에 적절한 항체를 생성하는 학습 능력을 가지고 있다. 적합도 성숙기란 항체의 적합도를 높이기 위한 항체 염색체의 돌연변이 과정을 의미한다. 적합도 성숙기는 하이퍼 돌연변이 (Hyper Mutation)와 수용체 조

작 (Receptor Editing)이라는 두 가지로 구성되어 있다.

우수한 항체를 복제만 한다면 항원에 적합한 새로운 항체를 찾을 수 없다. 면역시스템은 항체에 돌연변이를 일으켜서 항체의 다양성을 추구하며 이를 통해 적합한 항체를 만들어 낼 수 있다. 하이퍼 돌연변이는 복제된 항체 중에서 항원에 대한 적합도가 높은 항체에서는 낮은 돌연변이를 유도하고, 항체와의 적합도가 낮은 항체에 대하여는 높은 돌연변이를 유도하여 항원에 더 적합한 항체를 얻으려는 과정이다. 하이퍼 돌연변이의 이러한 특성은 적합한 항체를 찾아주기도 하지만 필요 없는 항체나 유해한 자가 면역 항체를 생산하기도 한다. 이러한 유해 세포들은 파괴 절차(Death Process)에 의하여 일부분을 제외한 대부분이 제거된다. 수용체 조작이란 유해하다고 판정된 항체를 제거하지 않고 그 항체의 수용체를 완전히 다른 수용체로 만들어내는 과정이다. 수용체 조작은 돌연변이보다 더 적극적인 탐색 방법이다. 이 두 가지 방법에 의해 우수한 항체를 탐색하면서도 일부 열등한 항체를 모집단내에 유지시켜 다양성을 추구할 수 있게 된다. 일부 연구자들은 수용체 조작보다 적극적인 방법으로 백신요법을 도입하였다.

백신요법은 우수하다고 알려진 항체로부터 우수한 형질들을 추출하여 열등한 항체에 주입하여 항체를 개선하는 방법이다. De Castro [8]는 복제 선택과 적합도 성숙기를 이용한 복제 선택 해법(Clonal Selection Algorithm)을 제시하였다. 그는 데이터 마이닝, 지식 탐색과 자료 계층화 등에 적용하였다. 복제 선택 과정을 최적화 문제에 따라 설명하면 다음과 같다.



[그림 4] 기본적인 클론 선택 해법. [8]

먼저 항원은 제약식과 목적함수식으로 설정할 수 있다. 문제의 해를 항체라고 정의할 수 있다. 최적해는

항원과의 적합성이 높은 항체이다. 제약식 항원과의 적응성은 제약식을 만족하는지의 여부, 목적함수 항원과의 적합성은 목적함수식의 값으로 정의할 수 있다. 항체를 표현하는 방식은 문제마다 달라질 수 있으나 기본적으로 진화해법에 사용하는 개체 표현식을 사용하면 된다. De Castro[8]가 제시한 복제 선택 과정은 [그림 4]와 같다.

4. 인공면역시스템해법의 개발

우리가 다루는 문제를 정리하면 다음과 같다.

- 차량은 단수로 당일 모든 자판기를 서비스 할 수 있다.
- 자판기는 보관 용량이 제한되어 있고 동일한 유형이다.
- 제품의 종류는 단일 제품을 가정한다.
- 차량의 용량은 제한되어 있으나 자판기들의 규모에 비하여 일반적으로 더 큰 용량을 가지고 있다.
- 일단 보충이 결정되면 자판기의 용량만큼 보충한다.
- 품질은 허용하지 않는다.

수리모형에 사용할 변수는 다음과 같다.

$t : 1, \dots, T$ 계획기간

$i : \begin{cases} 0 \text{ 창고} \\ 1, \dots, N \text{ 자판기} \end{cases}$

$c_{ij} : (i, j)$ 간 차량당 경로비용

h : 일일 제품당 재고비용

su : 주문비용

d_i : 일일 자판기의 수요

m_i : 자판기 i 의 최대재고 수준

C : 차량용량

$bigM$: 제약식 조절을 위한 큰 값

U : 불법경로 방지식을 위한 큰 값

INV_{it} : 자판기 i 의 t 시점 재고수준

r_{it} : 자판기 i 의 t 시점 보충량

$x_{ijt} = \begin{cases} 1, \text{ 경로}(i,j) \text{가 } t \text{시점에 사용} \\ 0, \text{ 경로}(i,j) \text{가 } t \text{시점에 사용되지 않음} \end{cases}$

$y_{it} = \begin{cases} 1, \text{ 자판기 } i \text{에 } t \text{시점에 방문} \\ 0, \text{ 자판기 } i \text{에 } t \text{시점에 방문하지 않음} \end{cases}$

u_{it} : 불법경로방지 변수

본 연구에서 다루는 재고-차량계획법 문제의 수리모형식은 다음과 같다.

Vendor Managed Inventory Routing Problem:

$$\text{Min } \sum_i \sum_j \sum_t c_{ij} x_{ijt} + \sum_i \sum_t h INV_{it} + \sum_i \sum_t su y_{it}$$

s.t.

$$INV_{i,t+1} = INV_{it} - d_i + r_{it}, \forall i, \forall t \quad (1)$$

$$0 \leq r_{it} \leq y_{it} bigM, \forall i, \forall t \quad (2a)$$

$$r_{it} + (1 - y_{it}) bigM \geq (m_i - INV_{it} + d_i), \forall i, \forall t \quad (2b)$$

$$\sum_i r_{it} \leq C, \forall t \quad (3)$$

$$\sum_i x_{ijt} - \sum_j x_{ijt} = 0, \forall q, \forall t \quad (4)$$

$$\sum_i x_{ijt} \leq 1, q = 0, \forall t \quad (5)$$

$$\sum_i x_{ijt} = y_{jt}, \forall q, \forall t \quad (6)$$

$$\sum_j x_{ijt} = y_{it}, \forall q, \forall t \quad (7)$$

$$u_{it} - u_{jt} + U x_{ijt} \leq U - 1, \forall t, \forall i, \forall j \quad (8)$$

$$0 \leq INV_{it} \leq m_i, \forall i, \forall t \quad (9)$$

$$x_{ijt} \in \{0, 1\} \quad (10)$$

$$y_{it} \in \{0, 1\} \quad (11)$$

$$0 \leq u_{it} \leq U \quad (12)$$

수리식을 살펴보면 (1)은 재고관계식이다. (2a)는 자판기를 방문하지 않는 경우 보충량은 영이어야 하고, (2b)는 방문하면 자판기 최대용량까지 보충한다는 식이다. (3)은 차량의 용량식이다. (4,5,6,7)차량경로와 관련된 식이다. (8)과 (12)는 불법경로 방지식이다. (9)는 창고의 용량제약식이다. 위의 수리식을 분석해 보면 수많은 일일 VRP문제가 부분 문제로 내포되었음을 알 수 있다. 계획 기간별로 재고 균형식이 포함되어 있다. 결정변수는 계획기간별 방문 일정, 일일 차량 경로와 재고 보충 계획이다. 가능한 일일 VRP문제의 총수는 특정일에 자판기에서 방문할 조합의 수로 $2n$ 개이다. 따라서 해결해야 할 문제의 복잡성이 상당함을 알 수 있다. 인공면역시스템에 사용할 항체(개체)는 다음과 같다.

[표 1] 항체의 표현

| | | | | | | | | | |
|----------|----------|----------|-------|----------|----------|----------|----------|-------|----------|
| $S_{:1}$ | S_{12} | | | $S_{:N}$ | R_{11} | R_{12} | | | $R_{:N}$ |
| | | | | | | | | | |
| S_{t1} | ..... | S_{tn} | ..... | ..... | R_{t1} | ..... | R_{tn} | ..... | ..... |
| | | | | | | | | | |
| S_{T1} | ..... | ..... | ..... | S_{TK} | R_{T1} | ..... | ..... | ..... | R_{TK} |

항체 : 항체는 [표 1]과 같은 형태로 설계하였다. 좌측 행렬의 St_n 는 t 시점에 자판기를 방문하는지 여부를 나타내는 이진변수이다. 우측의 Rtn 은 t 시점의 차량 경로 중 n 번째 방문자판기이다. 그런데 방문 경로 중에서 실제 방문하는 자판기는 St_n 에서 방문하도록 지정한 경우만 유효하다.

[표 2] 자판기의 평균 수요와 초기 재고

| | | | | |
|------|---|----|---|---|
| 자판기 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 평균수요 | 5 | 4 | 3 | 4 |
| 초기재고 | 5 | 10 | 4 | 5 |

이해를 위하여 다음과 같은 예를 살펴보자. 4개의 자판기와 계획기간 4일의 문제에서 각 자판기의 평균 수요와 초기재고가 [표 2]와 같이 주어졌다. 자판기의 용량이 모두 10이라고 가정한다. 창고의 방문 경로 상의 지수를 0 이하하자. 항체의 예가 [표 3]과 같이 주어졌다고 하자.

그러면 시점1의 경로는 방문 경로(3,1,2,4)와 방문 여부(1,0,1,1)로부터 자판기2를 방문지에서 제거한다. 그러면 실제 방문 경로는 (0,3,1,4,0)로 경로비용을 평가한다.

마차가지로 시점2에서는 (0,2,0), 시점3에서는 (0,4,1,3,0), 시점4의 경로는 (0,2,3,0)가 된다. 이에 따라 이 항체의 경로 비용은 각각의 경로 비용의 합으로 구해진다.

[표 3] 항체의 예

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 1 | 1 | 3 | 1 | 2 | 4 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 3 | 2 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 2 | 4 | 1 | 3 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 2 | 3 | 1 | 4 |

다음으로 재고비용의 추산은 각 기간별 자판기의 재고 수준을 식 (1)로부터 계산하여 구한다. 마지막으로 각 자판기 방문마다 주문비용이 더해지게 된다.

복제(cloning): 각 항체를 평가하고, 모집단에서 가장 우수한 항체의 목적함수값(최우수적합도)와 가장 열등한 항체의 목적함수값(최열등적합도)를 구한다. 항체의 상대적합도는 복제율을 결정하는데 사용한다.

$$\text{상대적합도} = \frac{\text{항체적합도} - \text{최열등적합도}}{\text{최우수적합도} - \text{최열등적합도}}$$

최우수항체는 100%확률로 복제되며, 최열등항체는 100%확률로 탈락된다. 그 중간의 항체는 상대적합도의 확률로 복제된다.

하이퍼 돌연변이 : 하이퍼 돌연변이란 항체의 상대적합도에 따라 적합도가 높은 항체는 낮은 돌연변이율을 적합도가 낮은 항체는 높은 돌연변이율을 적용하는 것이다. 이렇게 산출된 돌연변이율에 의해서 다음의 돌연변이를 실시하였다.

방문일정 돌연변이 : 돌연변이 시작일은 랜덤하게 설정한 후 돌연변이 시작일 이후의 방문일정을 모두 앞당기거나 뒤로 미루도록 한다. 뒤로 미루는 경우 돌연변이 시작일은 방문하지 않는 것으로 설정한다. 당기는 경우 계획 마지막 날은 방문하지 않는 것으로 설정한다.

예) 방문 일정이 (1 0 0 1 0 0 1)이고 선택된 돌연변이 시작일이 3일이며 일정을 당기는 경우에는 돌연변이 된 방문 일정(1 0 1 0 0 1 0)이 된다. 같은 경우에 일정을 미루는 경우 돌연변이 된 방문 일정(1 0 0 0 1 0 0)이다.

가능해 보정 : 방문 일정 돌연변이에서는 돌연변이 되는 부분일정의 앞이나 뒤에 방문하지 않는 일정을 추가하고 있다. 전체 일정중 방문회수가 줄어들게 되는 현상이 발생한다. 또한 재고 균형식에 의해 재고 수준을 평가하면 재고 부족이 발생할 수 있다. 이를 보정하기 위해 돌연변이로 재고부족이 예상되면 재고 부족일에 방문하도록 일정을 수정한다.

방문경로 돌연변이 : 현재 기존 경로에 방문 순서가 인접한 자판기가 (a,b)와 (c,d)가 있다고 하면 Prins[16]가 제시한 다음과 같은 다양한 돌연변이가 가능하다.

- 경로돌연변이 1 : a를 c뒤로 삽입
- 경로돌연변이 2 : (a,b)를 c뒤로 삽입
- 경로돌연변이 3 : (a,b)를 제거하고 (b,a)를 c뒤로 삽입
- 경로돌연변이 4 : a와 c를 교환
- 경로돌연변이 5 : (a,b)와 c를 교환
- 경로돌연변이 6 : (a,b)와 (c,d)를 교환
- 경로돌연변이 7 : (a,b)와 (c,d)를 (a,c)와 (b,d)로 교환

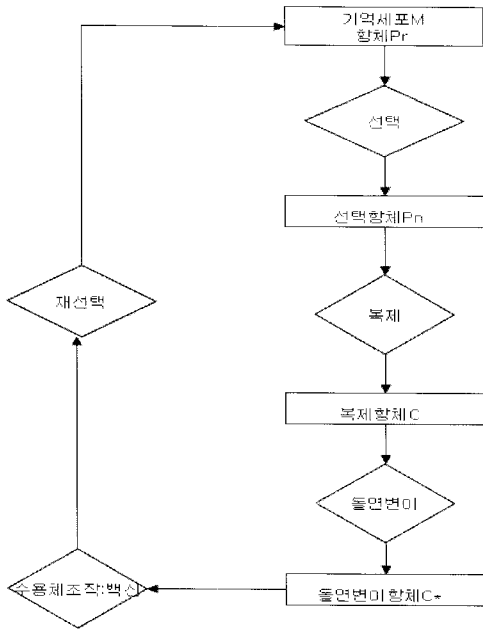
우리는 이 7가지 경로돌연변이를 하이퍼 돌연변이율에 의해 선택된 항체에게 수행하였다.

백신 : Sweep방법에 의해 모든 자판기에 대한 마스터 경로를 구했다. 이후 해법 중에 열등한 항체들에 대하여 마스터 경로를 주입하는 것이 유리한지 비교하여 마스터 경로가 유리한 항체의 경로를 수정하였다.

기억세포 : 해법수행 중 발견된 가장 우수한 항체를 기억세포에 저장하였다. 이 기억세포의 항체는 항상 항체 집단에서 유지 되도록 하였다.

초기해 : 초기해는 기본적으로 랜덤함수에 의해서 항체를 생성하였다. 초기해의 성능을 우수하게 하기 위해

일부 항체는 마스터 경로를 사용하였다. 또한 일부 항체는 경로 비용을 절감해주는 지역 탐색(2-Opt, Or-opt, 점교환 등)을 사용하였다.



[그림 5] 재고 차량 계획 문제를 위한 인공지능해법

이상을 정리하면 재고-차량 경로 문제를 위한 인공지능해법(AIS)은 [그림 5]과 같다.

AIS와 비교를 위한 해법으로는 일반 진화 해법을 선택했다. 진화 해법을 위한 초기해, 돌연변이등은 AIS에서 제시된 방법과 동일하며 AIS에서 사용하지 않은 교차 연산만을 추가하였다. 우리는 재고-차량계획법 문제를 위한 AIS해법과 진화해법을 비교하기로 한다.

5. 실험결과

VRP문제에 대한 표준 문제는 이미 잘 알려져 있어서 연구자간에 비교 실험에 유용하다. 그러나 불행이도 IRP분야에서는 아직 표준화된 문제들이 구성되어 있지 않아서 대부분 랜덤하게 생성한 자신의 문제들로 해법을 개발하고 있다[15]. 본 연구에서는 Beasley의 ORLIB의 문제를 이용하였다. 이 문제들은 2차원 상에 10개에서 10000개까지의 점의 위치에 관한 문제들이다.

그 중 문제가 크기가 10개에서 100개까지인 문제들을 이용했으며 각 크기별로 15개의 문제가 준비되어 있다. 창고는 2차원상의 중앙에 있는 것으로 가정했고, 점과 점간의 거리는 직선거리를 사용하였다. 계획기간은 7일, 자판기의 용량은 300개, 자판기의 일일 수요는

최소 10에서 최대 100까지 랜덤하게 설정하였으며, 기간 0의 초기재고도 랜덤하게 설정하였다. 프로그램은 비주얼 스튜디오로 개발하였으며, 비교를 위한 기준해법으로 진화해법(GA)과 인공지능시스템(AIS)을 각각 비교하였다. 인공지능시스템은 다음의 네 가지 해법을 제시하였다.

- AISHV : 하이퍼 돌연변이와 백신을 사용
- AISH : 하이퍼 돌연변이를 사용
- AISV : 백신을 사용
- AIS : 단순한 AIS

비교를 위해 GA로 구한 해들의 목적함수값을 기준으로 AIS해법들의 목적함수값들을 [표 4]에 제시하였다.

[표 4] 각 해법별 목적함수의 값

| 문제크기 | AIS | AISV | AISH | AISHV | GA |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 10 | 14.8 | 14.6 | 14.6 | 14.6 | 14.7 |
| 20 | 28.5 | 28.1 | 28.1 | 28.1 | 29.3 |
| 30 | 41.9 | 41.6 | 41.3 | 41.3 | 45.3 |
| 40 | 54.3 | 53.5 | 53.2 | 53.1 | 63.9 |
| 50 | 67.8 | 66.8 | 66.4 | 66.1 | 82.7 |
| 60 | 79.7 | 78.5 | 77.9 | 77.7 | 99.5 |
| 70 | 92.1 | 91.2 | 90.6 | 90.2 | 116.1 |
| 80 | 104.4 | 102.6 | 102.3 | 102.0 | 133.7 |
| 90 | 116.9 | 115.8 | 115.3 | 114.9 | 149.8 |
| 100 | 129.2 | 127.1 | 126.6 | 125.8 | 170.1 |

문제의 크기가 증가함에 따라 모든 AIS해법들의 목적함수값이 GA에 비하여 개선되는 것을 알 수 있었다. 즉, 문제의 크기가 큰 문제일수록 AIS의 유효성이 증가하였다. AIS간에는 AISH와 AISHV가 상대적으로 우수하였다. 따라서 하이퍼 돌연변이가 해의 품질을 개선하는데 유리하다고 볼 수 있다. 그러나 그 차이는 미미하였다.

[표 5] 각 해법별 평균 연산시간

| 문제크기 | AIS | AISV | AISH | AISHV | GA |
|------|-------|------|------|-------|-------|
| 10 | 3.4 | 2.5 | 2.1 | 2.3 | 6.1 |
| 20 | 14.5 | 5.9 | 7.0 | 7.6 | 16.7 |
| 30 | 22.5 | 6.7 | 12.5 | 9.5 | 35.5 |
| 40 | 36.3 | 13.2 | 13.7 | 13.5 | 49.8 |
| 50 | 44.8 | 16.6 | 20.7 | 20.1 | 63.4 |
| 60 | 64.5 | 29.7 | 32.2 | 27.0 | 87.1 |
| 70 | 84.5 | 32.1 | 38.6 | 39.7 | 131.4 |
| 80 | 89.0 | 42.1 | 44.2 | 32.5 | 130.8 |
| 90 | 113.7 | 43.3 | 45.3 | 42.4 | 168.9 |
| 100 | 143.3 | 70.5 | 63.9 | 62.9 | 236.9 |

[표 5]에는 AIS해법들과 GA의 연산시간을 제시하였다. GA와의 연산 시간의 비율은 문제의 크기가 증가하는 것과는 무관하게 일정하게 유지되고 있었으며 전체 문제 크기에서 연산 속도가 절감되었다. AIS간에는 단순 AIS의 연산 속도가 불리하게 나왔고, AISV의 연산 속도가 가장 우수한 것으로 나타났다. 연산속도에서는 백신의 사용이 유리한 것으로 보인다. 그러나 연산속도의 차이가 AISHV, AISH, AISV간에 심하게 차이가 난다고 볼수는 없다. 이상의 결과를 살펴보면 GA해법에 비하여 AIS해법이 시간과 해의 품질면에서 우수한 것으로 보인다. 또한 해의 개선을 위해서는 하이퍼 돌연변이가, 속도의 개선에서는 백신을 사용하는 것이 유리한 것으로 보인다.

6. 결론

본 연구는 원격에서 자판기의 재고 정보를 알 수 있는 상황에서의 재고-차량 계획법 문제를 다루었다. 이러한 문제는 대형 할인점이나 VMI 환경하의 재고-차량 계획법 문제로 확장 될 수 있다. 재고-차량 계획법 문제는 전통적으로 2단계의 계층적 접근법들을 사용하고 있었다. 본 연구에서는 인공면역시스템이라는 자연 연산의 새로운 최적화 해법을 도입하여 재고-차량계획법 문제를 해결하였다. 인공면역시스템의 주요 수단 중에서 하이퍼 돌연변이와 백신 기법을 개발하였다. 실험 결과에 의하면 기존의 진화 해법에 비하여 수행시간 및 해의 품질면에서 인공면역시스템이 우월하였다. 인공면역시스템의 수단 중 백신은 연산 속도를 높이는 작용을 하였으며, 하이퍼 돌연변이는 해의 품질을 높이는 작용을 하였다. 본 연구에서는 인공면역시스템의 수단 중 기억세포에 대한 활용을 깊이 다루지 못했다. 추후에는 기억 세포를 응용한 해법의 개선을 추구할 예정이다.

7. 참고 문헌

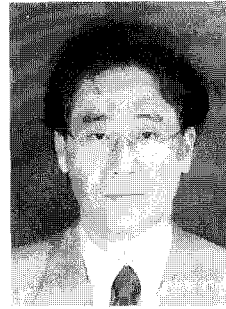
- [1] Anily S. & Federgruen A (1991), Structured partitioning problems, *Operations Research* 39, 130-149.
- [2] Aziz NAB & Moin NH (2007), Genetic algorithm based approach for the multi product multi period inventory routing problem, *Proceedings of International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 1619-1623
- [3] Baptista SRC & Oliveira ZE (2002), A period vehicle routing case study, *European Journal of Operational Research*, 139, 220-229.
- [4] Bard JL, Huang L, Dror M & Jaillet P (1998a), A branch and cut algorithm for the VRP with satellite facilities, *IIE Transactions*, 30, 821-834.
- [5] Bard JL, Huang L, Jaillet P & Dror M (1998b), A decomposition approach to the inventory routing problem with satellite facilities, *Transportation Science*, 32 (2) 189-203.
- [6] Campbell AM & Savelsbergh MWP (2004), A Decomposition Approach for the Inventory-Routing problem, *Transportation Science* 38(4) 488-502.
- [7] Chien TW, Balakrishnan A & Wong RT (1989), An integrated inventory allocation and vehicle routing problem, *Transportation Science* 23(2) 67-76.
- [8] De Castro LN & Von Zuben FJ (1999), Artificial immune systems, Part 1, Basic theory and applications, Technical Report, TR-DCA 01/99
- [9] De Castro LN (2006), Fundamentals of natural computing: an overview, *Physics of Life Reviews*, In Press, Corrected Proof
- [10] Dror M, Ball M & Golden B (1985), A Computational comparison of algorithms for the inventory routing problem, *Annals of Operations Research* 4(1) 1-23.
- [11] Gaur V, & Fisher ML (2004), A periodic inventory routing problem at a supermarket chain, *Operations Research* 52(6) 813-822.
- [12] Golden BL, Assad AA & Dahl R (1984), Analysis of a large scale vehicle routing problem with an inventory component, *Large Scale Systems* 7, 181-190.
- [13] Jaillet P, Huang L, Bard J & Dror M (2002), Delivery cost approximations for inventory routing problems in a rolling horizon framework, *Transportation Science* 36, 292-300.
- [14] Lao Y & Leong HW (2002), A Multi-agent Based Approach to the Inventory Routing Problem, *LNAI 2417*, 345 - 354
- [15] Moin MH & Salhi S (2007), Inventory routing problems: a logistical overview, *Journal of the Operational Research Society* 58, 1185-1194.
- [16] Prins C (2004), A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem, *Computers & Operations research* 31, 1985-2002.
- [17] Raa B & Aghezzaf EH (2007), A practical solution approach for the cyclic inventory routing problem, *European Journal of Operational Research*, Available

online 1 October 2007

- [18] Renaud J, Laporte G & Boctor FF (1996), A tabu search heuristic for the multidepot vehicle routing problem, *Computer and Operations Research* 23, 229-235.
- [19] Rusdiansyah A & Tsao DB (2005), An integrated model of the periodic delivery problems for vending-machine supply chains, *Journal of Food Engineering* 70, 421-434.
- [20] Yang B, Na I, Moon H & Park B (2001), An application Service Provider for Vending Machine Operations using Mobile Communication, *J. of the Korean Society of SCM* 19 (1) 29-34.
- [21] Yang B (2007), Introduction to a Novel Optimization Method: Artificial Immune Systems, *IE Interfaces* 20(4) 458-468.
- [22] Yu Y, Chen H & Chu F (2008), A new model and hybrid approach for large scale inventory routing problems, *European Journal of Operational Research* 189, 1022-1040.
- [23] Zhao QH, Wang SY & Lai KK (2007), A partition approach to the inventory/routing problem, *European Journal of Operational Research* 177, 786-802

저 자 소 개

양 병 학



서울대학교 산업공학과에서 학사, 석사, 및 박사학위를 취득하였고 동경공업대학교, 테네시 주립대학교에서 객원 연구원으로 활동하였다. 현재 경원대학교 산업정보시스템공학과 교수로 재직 중이다. 주요 관심분야는 물류관리, 공급사슬관리이다.

주소: 경기도 성남시 수정구 복정동 산65 경원대학교
산업정보시스템공학과