

# 연동계획과 확장된 기억 세포를 이용한 재고 및 경로 문제의 복제선택해법\*

양 병 학\*\*

A Clonal Selection Algorithm using the Rolling Planning and an  
Extended Memory Cell for the Inventory Routing Problem

Byounggak Yang\*\*

## ■ Abstract ■

We consider the inventory replenishment problem and the vehicle routing problem simultaneously in the vending machine operation. This problem is known as the inventory routing problem. We design a memory cell in the clonal selection algorithm. The memory cell store the best solution of previous solved problem and use an initial solution for next problem. In general, the other clonal selection algorithm used memory cell for reserving the best solution in current problem. Experiments are performed for testing efficiency of the memory cell in demand uncertainty. Experiment result shows that the solution quality of our algorithm is similar to general clonal selection algorithm and the calculations time is reduced by 20% when the demand uncertainty is less than 30%.

Keywords : Inventory Routing problem, Artificial Immune System, Clonal Selection Algorithm, Memory Cell, Rolling Planning

## 1. 서 론

본 연구는 재고 및 차량경로 문제(IRP: inventory

routing problem)를 다루고 있다. IRP란  $n$ 개의 고객  
이 공간적으로 분포해있고, 계획기간  $T$ 동안에 배  
송을 반복적으로 시행하는 문제이다[5]. IRP는 계

논문접수일: 2008년 11월 06일 논문수정일(1차: 2009년 01월 12일, 2차: 02월 26일)

논문게재확정일: 2009년 03월 02일

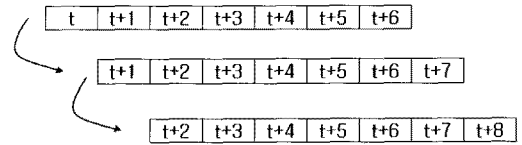
\* 이 논문은 2009년도 경원대학교 지원에 의한 결과임.

\*\* 경원대학교 산업정보시스템공학과

획기간초기에 현재의 재고량과 고객의 수요가 알려진 상태에서 각 기간마다 고객에게 배달할 양, 배달 시기 및 배달 경로를 결정해야 한다. 이때 차량의 용량, 품질의 방지, 창고의 용량, 차량경로의 가능성을 만족하면서 재고비와 수송비의 합을 최소화해야 한다. 이에 비하여 차량경로 문제(VRP: vehicle routing problem)는 배송 경로만을 최적화하는 문제이다. 일반적으로 재고 관리 문제와 VRP는 서로 독립적인 의사결정문제이지만 최근에는 재고 비용과 차량경로 비용을 합한 총 비용을 최소화하는 경우가 많이 있다. 할인점 체인사업의 경우 중앙창고에서 각 할인점으로 제품을 공급할 때 할인점의 재고 수준을 중앙센터에서 관리하여 보충량과 배달경로를 주기적으로 계획하고 있다[8]. 또한 공급자 주도 재고 관리 시스템에서도 공급자가 고객의 재고 관리와 배송을 책임지고 있어서 IRP를 적용하고 있다[12]. 본 논문에서는 모바일 자판기 사업을 중심으로 연구를 진행하려고 한다. 최근 통신 기술의 발전으로 원격에서 자판기의 재고 정보를 실시간에 조회할 수 있는 기술들이 개발되었다[15]. 이런 환경에서 자판기 사업자들은 재고 비용과 차량경로 비용의 합을 최소화하려고 하며 이는 IRP의 한 형태가 된다[14, 17].

만약 IRP에서 하루만의 계획을 수립한다면 IRP는 VRP로 축소된다. VRP가 NP-hard 계열의 문제 유형이므로 IRP 역시 강한 NP-hard로 알려져 있다[2]. IRP의 난이도가 높아서 많은 연구자들이 최적해법보다는 휴리스틱, 타부 서치와 유전해법 등을 사용하고 있다. IRP의 또 다른 특징은 <그림 1>처럼 다기간의 연동계획이라는 점이다. IRP에서 오늘부터 계획기간내의 미래까지의 보충량과 배송 경로들을 결정하는 것이다. 이 계획은 다음날 다시 수립되고, 이는 매 기간마다 반복되는 연동 계획의 성질을 가지고 있다. 따라서 IRP는 매주기마다 유사한 문제를 반복적으로 해결하고 있다. 우리는 IRP의 연동 계획을 이용하여 좀 더 효율적인 해법

을 제시하려고 한다.



<그림 1> 첫 번째 기간에 수립된 IRP는 이후 연동적으로 재수립된다.

본 연구에서는 IRP를 위한 해법으로 인공면역시스템(artificial immune system)의 한 분야인 복제선택해법(clonal selection algorithm)을 사용하려고 한다. 이미 IRP를 복제선택해법으로 해결한 연구에서 복제선택해법의 유용성은 알려져 있다[17]. 우리는 복제선택해법의 기법 중 기억 세포(memory cell)를 확장하여 과거의 우수해를 현재의 초기해로 이용하는 방법을 제시하려고 한다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 기존의 연구동향을 제시하고 있다. 먼저 IRP에 대한 연구 동향을 제시하고, 복제선택해법을 설명하며, 본 논문의 기초가 된 IRP를 위한 기존의 복제선택해법을 자세히 소개한다. 제 3장에서는 연구의 핵심인 연동계획을 이용한 확장된 기억 세포의 설계에 대하여 다루고 있으며 제 4장에서는 개선된 복제선택해법의 효용성을 알아보기 위한 비교 실험 내용을 다루고 있다. 마지막으로 제 5장에서는 본 연구의 결론을 설명하려고 한다.

## 2. 기존 연구 고찰

### 2.1 재고 및 차량경로 문제

본 연구에서 해결하려는 IRP는 Yang[17]에 의해 수리식이 제시되어있으며, 이를 수정 보완하여 설명하겠다. 먼저 문제의 가정은 다음과 같다.

- 차량은 단수로 당일 모든 자판기를 서비스 할 수 있다.
- 제품의 종류는 단일 제품을 가정한다.

- 자판기별 수요는 기간에 무관하게 일정하다.
- 차량의 용량은 제한되어 있다.
- 자판기의 용량만큼 보충한다.
- 품질은 허용하지 않는다.

$$\sum_i x_{ijt} - y_{jt}, \forall j, \forall t \tag{6}$$

$$u_{it} - u_{jt} + Ux_{ijt} \leq U-1, \forall t, \forall i, \forall j \tag{7}$$

$$0 \leq u_{it} \leq U \tag{8}$$

$$0 \leq I_{it} \leq m_i, \forall i, \forall t \tag{9}$$

$$x_{ijt} \in \{0, 1\} \tag{10}$$

$$y_{jt} \in \{0, 1\} \tag{11}$$

IRP의 수리 모형식은 다음과 같다[17].

주요지수

$t$ : 계획기간(최대T)

$V$ : 자판기 및 창고의 집합

$i \in V$ : 자판기 및 창고의 지수

( $i=0$ : 창고,  $I > 0$ : 자판기)

상수

$c_{ij}$ :  $i$ 와  $j$ 간 경로비용. 단  $i, j \in V$

$h$ : 일일 재품당 재고비용

$s$ : 주문비용

$d_i$ : 자판기  $i$ 의 일일수요

$m_i$ : 자판기  $i$ 의 용량

$C$ : 차량용량

$M$ : 제약식 조절을 위한 큰 값

$U$ : 불법경로 방지식을 위한 큰 값

변수

$I_{it}$ : 자판기  $i$ 의  $t$ 시점재고수준

$r_{it}$ : 자판기  $i$ 의  $t$ 시점보충량

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

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

$u_{ijt}$ : 불법경로방지변수

$$\text{Min} \sum_i \sum_j \sum_t c_{ij} x_{ijt} + \sum_i \sum_j hI + \sum_i \sum_j sy : \text{Yang}[17]$$

s.t

$$I_{it} + 1 = I_{it} - d_i + r_{it}, \forall i, \forall t \tag{1}$$

$$0 \leq r_{it} \leq My_{it}, \forall i, \forall t \tag{2a}$$

$$r_{it} + M(1-y_{it}) \geq m_i - I_{it-1}, \forall i, \forall t \tag{2b}$$

$$r_{it} \leq m_i - I_{it-1}, \forall i, \forall t \tag{2c}$$

$$\sum_i r_{it} \leq C, \forall t \tag{3}$$

$$\sum_i x_{ijt} - \sum_j x_{ijt} = 0, \forall j, \forall t \tag{4}$$

$$\sum_i x_{i0t} \leq 1, \forall t \tag{5}$$

수리식을 살펴보면 식 (1)은 재고관계식이다. 식 (2a)는 자판기를 방문하지 않는 경우 보충량은 영이어야 하고, 식 (2b)와 식 (2c)는 방문하면 자판기 최대용량까지 보충한다는 식이다. 식 (3)은 차량의 용량제약식이다. 식 (4)는 한 자판기에 들어오는 차량의 수와 나가는 차량의 수는 같아야 한다는 수식이다. 식 (5)는 창고에 들어오는 차량은 한 대 이하라는 제약식이다. 식 (6)은 보충하도록 지정된 자판기에만 차량이 방문가능하다는 식이다. 식 (7)과 식 (8)은 일반적으로 사용되는 불법경로 방지 제약식이다. 식 (9)는 자판기의 용량제약식이다[17].

IRP를 유형별로 살펴보면 일일IRP, 유한기간 IRP, 무한기간 IRP와 확률적 IRP로 나뉘는데 본 연구에서는 유한기간 IRP를 다루고 있다. 유한기간 IRP는 유한한 계획 기간 동안 수송비, 서비스수준, 재고수준, 자원제약 등을 고려하여 운영측면에서의 IRP를 다루고 있다. 우리가 다루는 유한기간 IRP의 주요 연구 동향을 살펴보면 먼저 Renaud et al. [13]은 IRP를 위해서 타부 서치를 사용하였다. Bard et al.[4]은 IRP에 다단계 분해전략을 도입하여 1단계에서 방문일정을 결정하고 2단계에서 여러 가지 휴리스틱으로 방문경로를 결정하였다. Campbell and Savelsbergh[6]은 1단계에서 경로 추정비용으로 방문일정을 결정하였고 2단계에서는 방문경로를 삽입 휴리스틱에 의해서 해결하였다. Rusdiansyah and Tsao[14]는 1단계에서 각 수요지별 최적 방문주기를 결정했다. 이 방문주기에 근거하여 방문일정과 초기 방문 경로를 결정하였다. 2단계에서는 경로 계획을 휴리스틱으로 수정하였다. Aghezzaf et al. [2]은 IRP를 복수차량경로문제로 변형하였다. 해법으로는 열생성 기법을 기반으로 부분문제를 형성

하고 절약기법으로 경로를 설정하였다. Abdelmaguid and Dessouky[1]는 통합된 IRP의 유전해법을 제시하였다. 주기별 보충량을 개체로 지정하고, 돌연변이와 교차를 수행했으며 개체평가지 경로는 휴리스틱을 사용하였다. Aziz and Moin[3]은 방문 일정만으로 개체를 표현한 유전 해법을 제시하였다. 그들은 Sweep 방법을 이용하여 모든 수요지를 방문하는 단일 경로를 구했다. 개체 평가 시에는 방문경로는 미리 결정된 단일 경로를 이용하였다. Yu et al.[18]은 하나의 주문을 여러 차량이 나누어 처리하는 것을 허용하는 확장된 IRP 문제를 다루었다. 해법으로는 라그랑지안 완화를 사용하였다. Zhou et al.[20]은 3단계 공급사슬에서의 IRP 문제를 다루었다. 해법으로는 지역 탐색 휴리스틱을 제시했으며 자신들이 제시했었던 타부 서치[19]보다 우수하다고 보고하였다. Boudia and Prins[5]는 모집단 관리를 이용한 memetic 해법을 IRP에 적용하였다. memetic 해법은 진화해법에 지역탐색을 추가한 것으로 실험을 통하여 GRASP보다 우수함을 보였다. Yang[17]은 IRP를 위한 복제선택해법을 도입

하고 진화 해법과 비교하였다. 그가 제시한 복제 선택해법은 본 논문의 제 2.2절과 제 2.3절에서 자세히 설명되어 있다.

IRP에 대한 연구 논문들에서 보듯이 IRP의 가장 큰 특징은 연동계획이라는 점이다. 오늘 수립한 IRP 계획은 내일 다시 수립하는 IRP 계획과 계획 기간이 중첩 된다. 그러나 지금까지의 연구에서는 IRP의 과거 계획을 이용하여 현재의 해를 탐색하는 접근방법은 찾아볼 수 없었다. 우리는 이미 해결했던 과거의 IRP의 해를 현재의 IRP에서 활용하는 방안을 도입하려고 한다.

## 2.2 복제선택해법

본 연구에서 사용되는 복제선택해법은 인공지능 시스템의 한 종류로 De Castro[7]에 의하여 제시되었으나 아직 많은 연구자들에게 생소한 분야일 수 있어 De Castro[7]와 Yang[16, 17]의 연구 결과에서 소개된 내용을 다시 제시하려고 한다.

인공면역시스템에는 크게 복제선택해법, 부정적

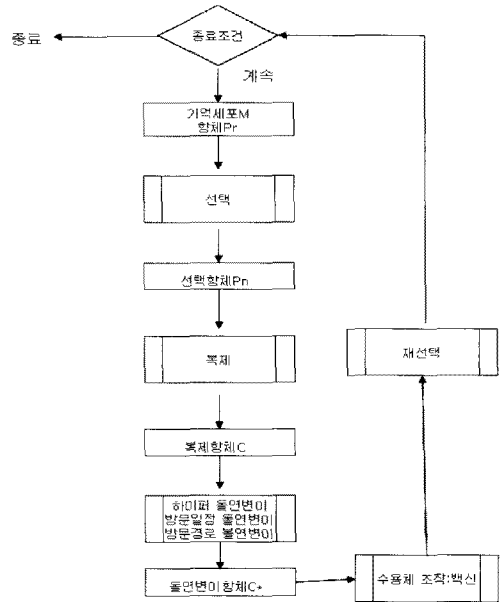
〈표 1〉 유한기간 IRP에 대한 시대별 주요 연구 결과

연구자	년도	해법	특징
Renaud et al.[13]	1996	타부서치	복수창고 VRP로 해석
Bard et al.[4]	1998	세이빙, Sweep, GRASP	선방문주기, 후경로문제
Lao와 Leong[9]	2002	에이전시	
Campbell와 Savelsbergh[6]	2004	방문주기 : 정수계획법 경로 : 삽입 휴리스틱	선방문주기, 후경로문제
Rusdiansyah와 Tsao[14]	2005	휴리스틱	선방문주기, 후경로문제
Aghezzaf et al.[2]	2006	열생성 기법과 정략기법	복수차량경로문제로 변형
Abdelmaguid와 Dessouky[1]	2006	유전 해법	보충량에 의한 개체 표현
Aziz와 Moin[3]	2007	유전 해법	경로비용 단순화
Zhao et al.[19]	2007	타부서치	지역분할
Yu et al.[18]	2008	정수계획법	주문의 분리 처리 허용
Zhao et al.[20]	2008	지역탐색 휴리스틱	3단계 공급사슬
Yang[17]	2008	인공면역시스템 (복제선택해법)	백신과 하이퍼 돌연변이 사용. 진화해법과 비교
Raa와 Aghezzaf[12]	2009	삽입과 절약기법	
Boudia와 Prins[5]	2009	memetic 해법	진화해법+지역탐색+모집단 관리

선택 해법, 면역네트워크의 3가지 해법이 존재한다 [7]. 이 중 조합최적화 문제에는 복제선택해법이 주로 사용되고 있다. 인공면역 시스템을 복제선택해법 중심으로 설명하면 다음과 같다. 인체의 면역시스템은 대단히 효율적인 항원 인식과 항체 제조 능력을 가지고 있다. 인공면역 시스템은 이러한 자연계의 면역 시스템을 의사 결정 시스템으로 이용하려는 것이다. 우리 몸에 항원이 들어오면 면역시스템은 적합한 항체를 찾아 이를 복제한다. 이를 복제 선택(clonal selection)이라 한다. 이때 항체의 적합도를 높이기 위해 항체는 돌연변이 과정을 거치게 되며 이를 적합도 성숙기(affinity maturation)라 한다. 적합도 성숙기는 하이퍼 돌연변이(hyper mutation)와 수용체 조작(receptor editing)이라는 두 가지로 구성되어 있다. 하이퍼 돌연변이는 복제된 항체 중에서 항원에 대한 적합도가 높은 항체에서는 낮은 돌연변이를 유도하고, 항체와의 적합도가 낮은 항체에 대하여는 높은 돌연변이를 유도하는 면역 시스템만의 독특한 돌연변이 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. 이 두 가지 방법에 의해 우수한 항체를 탐색하면서도 일부 열등한 항체를 모집단내에 유지시켜 다양성을 추구할 수 있게 된다. 일부 연구자들은 수용체 조작보다 적극적인 방법으로 백신(vaccine)요법을 도입하였다. 백신요법은 우수하다고 알려진 항체로부터 우수한 형질들을 추출하여 열등한 항체에 주입하여 항체를 개선하는 방법이다. 또한 인공면역 시스템에서는 탐색 중에 발견된 우수한 항체들을 기억세포에 저장하여 우수해를 보호하는데 사용한다[7, 16, 17].

지금까지 논의된 복제선택해법을 IRP에 적용한 해법은 Yang[17]에 의해서 <그림 2>와 같이 제시

되었다.



<그림 2> Yang[17]의 연구에서 제시된 IRP를 위한 인공면역시스템(복제선택해법)

### 2.3 IRP를 위한 복제선택해법

Yang[17]의 연구에서 제시되었던 복제선택해법의 각 기능을 설명하면 다음과 같다.

항체 : 항체는 <그림 3>과 같이 방문일정과 방문경로의 정수 행렬 표현을 사용하였다. 좌측 행렬은 t시점에 자판기를 방문하는지 여부를 나타내는 이

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

방문일정                      방문경로                      기간



재고비용의 산출              경로비용의 산출

<그림 3> Yang[17]이 제시한 항체의 구조

진변수이다. 우측의 행렬은 t시점의 차량경로이다. 이 항체에서 방문일정에 의하여 재고비용이 산출되고, 방문경로에 의하여 경로비용이 산출된다[17].

복제(cloning) : 각 항체를 평가하고, 모집단에서 가장 우수한 항체의 목적함수값(최우수적합도)와 가장 열등한 항체의 목적함수값(최열등적합도)를 구한다. 항체의 상대적합도에 의해서 항체의 복제율(cloning rate)을 결정하였다.

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

최우수항체는 100% 확률로 복제되며, 최열등항체는 100% 확률로 탈락된다. 그 중간의 항체는 상대적합도의 확률로 복제된다[17].

하이퍼 돌연변이 : 먼저 하이퍼 돌연변이율의 최대값과 최소값을 설정하고 상대적합도에 따라 하이퍼 돌연변이율을 다음과 같이 결정하였다.

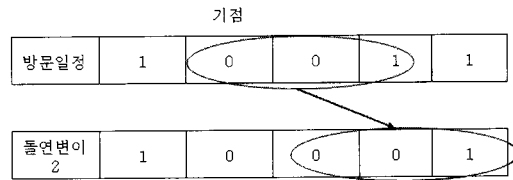
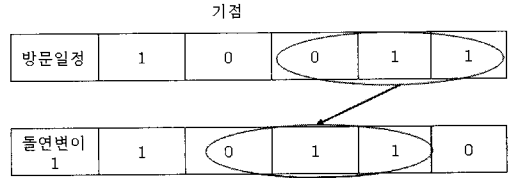
$$m_{\text{hyper}} = (m_{\text{min}} - m_{\text{max}}) \times \text{상대적합도} + m_{\text{max}}$$

$m_{\text{max}}$  : 최대돌연변이율  
 $m_{\text{min}}$  : 최소돌연변이율  
 $m_{\text{type}}$  : 하이퍼돌연변이율

이렇게 산출된 하이퍼 돌연변이율에 근거해서 선택된 항체에 대하여 방문일정에 대한 돌연변이와 방문경로에 대한 돌연변이를 실시하였다[17].

방문일정 돌연변이 : 방문일정 돌연변이란 각 자판기별로 방문할 일정을 변경시키는 것이다. 항체의 자판기별 방문일정에서 랜덤하게 선택된 날짜를 기점으로, 기점 이후의 방문일정을 하루씩 당기는 방문일정 돌연변이 1과 하루씩 미루는 돌연변이 2를 사용하였다. <그림 4>에서 5일짜리 IRP를 위한 방문일정의 항체가 있다. 기점을 2일로 랜덤하게 선택했다면 방문일정 돌연변이 1은 3일, 4일, 5일의 방문일정을 각각 2일, 3일, 4일로 당겼다. 마지막 5일에는 방문하지 않는 것으로 설정하였다. 방문일정 돌연변이 2를 적용한다면 2일, 3일, 4일의 방문일정을 각각 3일, 4일, 5일로 미루었고 2일의 일정은 방문하지 않는 것으로 설정하였다. 방문

일정 돌연변이 후 품질 방지를 위하여 품질이 발생하는 시점에는 방문하도록 항체를 수정하였다[17].



<그림 4> Yang[17]이 제시한 방문일정 돌연변이

현 경로		1	2			3	4	
돌연변이 1		2				3	1	4
돌연변이 2					3	1	2	4
돌연변이 3					3	2	1	4
돌연변이 4		3	2				1	4
돌연변이 5		3				1	2	4
돌연변이 6		3	4				1	2
돌연변이 7		1	3				2	4

<그림 5> Prins[11]가 제시한 방문경로 돌연변이

방문경로 돌연변이 : 방문경로 돌연변이는 VRP의 경로 개선을 위한 방법으로 이미 많은 진화 해법에서 연구되었다. 그 중 우수하다고 알려진 Prins [11]가 제시한 VRP를 위한 7가지 경로 돌연변이 방법을 이용하였다. 먼저 <그림 5>에서 첫 번째 행은 현재의 경로를 나타낸다. 그 중 자판기 1과 2가 서로 인접해있고 자판기 3과 4가 인접해있다고 하자. 경로 돌연변이는 선택된 자판기 1, 2, 3, 4간의 교환을 의미한다. 나머지 자판기들은 표현의 편리를 위해서 빈칸으로 표시되어 있다. 먼저 경로 돌연변이 1은 경로 상에서 자판기 1의 방문을 자판기 3과 4사이에 삽입하는 것이다. 경로 돌연변이 2

는 자판기 1과 2의 방문을 제거하고 자판기 3과 4 사이에 자판기 1과 2를 삽입한다. 돌연변이 3은 자판기 3과 4사이에 자판기 2와 1을 삽입한다. 돌연변이 4는 자판기 1과 3을 서로 교환한다. 돌연변이 5는 자판기 3을 자판기 1의 위치로 교환하고 자판기 1, 2를 자판기 3의 위치로 교환한다. 돌연변이 6은 자판기 1과 3을 교환하고 동시에 자판기 2와 4를 교환한다. 돌연변이 7은 자판기 2와 3의 방문순서를 서로 교환하는 돌연변이이다. 우리는  $m_{upper}$  (하이퍼 돌연변이율)에 의하여 선택된 항체의 경로에서 랜덤하게 선택된 자판기들에 대하여 이 7가지 경로 돌연변이 중 하나를 실시하여 항체의 경로를 변경 시켰다[17].

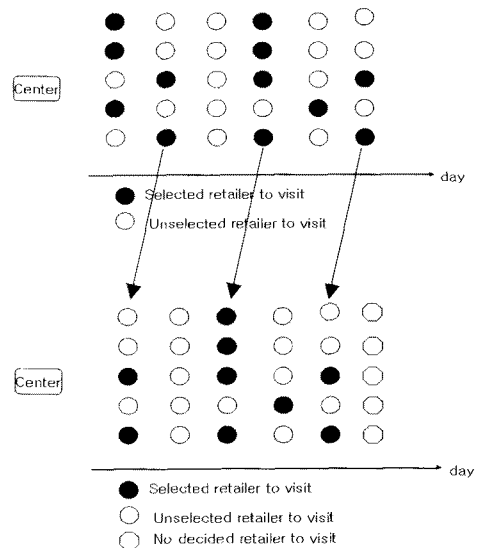
백신 : 차량경로를 찾는 휴리스틱 해법 중에는 Sweep방법이 있다. Sweep법에서는 먼저 평면상에 창고와 자판기의 위치를 작도한다. 다음으로 창고에서 수평방향으로 연장선을 작도한다. 연장선을 시계방향으로 회전시키면서 만나는 자판기의 순서대로 경로를 설정한다. 우리는 이 Sweep법으로 전체 자판기를 방문하는 마스터 경로를 구했다. 이후 랜덤하게 선택된 열등 항체의 일부 경로를 마스터 경로의 일부와 교환하였다[17].

Yang에 의하면 복제선택해법이 기존의 진화해법보다 우수하였으며, 하이퍼 돌연변이는 해의 품질을 높여주고, 백신은 연산 속도를 절감하였다 [17]. 그의 연구에서도 IRP가 연동 계획이라는 사실을 고려하지 않아서 매주기마다 새로운 IRP를 해결하였다. 그런데 IRP는 연동 계획으로 과거의 IRP해가 현재의 IRP문제의 중요한 정보가 될 수 있다. 우리는 IRP의 연동 계획을 기반으로 기억 세포를 새롭게 설계하려고 한다.

### 3. 기억 세포의 설계

자연계의 면역 시스템에서는 특정 항체에 대한 침입 사실은 기억 세포의 형태로 저장되어 2차 침입 시에는 빠른 시간에 적절한 항체를 생성하는 학습 능력을 가지고 있다[7]. 자연계에서 항원 A가

최초에 침입하면 일정기간 동안 면역시스템은 변화가 없다. 적합한 항체 A를 생성하게 된 면역시스템에서 항체 A의 개체수가 급격히 상승한다. 항원 A가 제거되면 항체 A의 개체수도 감소하게 된다. 이후에 항원 A가 다시 침입했다면 1차 침입 시와 비교하여 반응시간이 단축된다[7]. 많은 복제선택해법에서도 이 기억 세포를 활용하고 있다. 그러나 그들이 사용하는 기억 세포는 진화 해법의 엘리트 리스트처럼 해법 진행 중의 우수해를 임시로 보관하는 용도였다[16]. <그림 2>에서 제시된 기존의 IRP를 위한 복제선택해법에서도 기억 세포는 해법의 진행 과정 중에 발견된 우수한 해를 기억하는 용도로 사용되었다[17]. 그러나 자연 면역 시스템은 이미 치료한 항원에 대한 우수한 항체를 보관한다. 자연계에서 기억 세포의 의미는 이미 해결한 문제의 해를 기억하고 있다가 유사한 다른 문제에 사용하는 것으로 볼 수 있다. 우리는 기억 세포를 자연계에서 사용되는 원래의 의미로 재조명하고 IRP의 특성을 조사하였다. IRP는 다기간의 의사 결정 문제이며 연동계획이다. 즉, 오늘의 IRP는 오늘부터

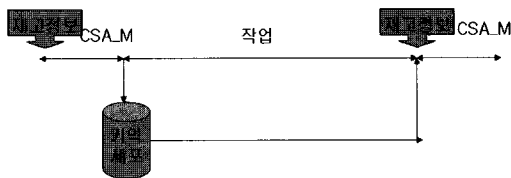


<그림 6> 과거의 해로부터 기억세포의 추출. 과거해에서 첫 번째 날의 계획을 제거하고 순차적으로 방문일정 및 경로를 복사한다. 마지막 날은 랜덤함수에 의해서 생성한다.

계획기간 T동안의 재고 및 차량경로 계획을 제시하는 것이다. <그림 1>을 보면 다음날의 IRP는 전일에 구한 IRP 중 첫날을 제외하고 마지막 날을 추가한 것이다. 따라서 오늘의 IRP와 내일의 IRP는 계획기간의 대부분이 중첩된다. 우리는 오늘 구한 IRP의 해가 내일 구할 IRP의 초기해로서 우수하게 사용될 수 있다고 판단하여 IRP의 해를 다음 기간의 초기해로 사용하기 위해 기억 세포에 저장하였다.

<그림 6>에는 전일에 구한 IRP의 해가 다음날의 해로 전이되는 과정을 보여주고 있다. 새 계획의 마지막 T기간에 대하여는 알려진 해가 없으므로 랜덤함수에 의해서 초기해를 생성한다. 이렇게 제시된 기억 세포는 복제선택해법의 초기 항체 집단에 하나의 항체를 만드는 역할을 한다.

<그림 7>은 이를 동안에 기억 세포를 이용하여 IRP를 해결하고 작업하는 개념도가 제시되었다. 첫날 당시의 재고정보를 이용하여 복제선택해법으로 해를 구하였다. 이 해는 기억 세포에 저장되어 다음날 복제선택해법의 초기해로 사용된다.



<그림 7> 전일에 구한 복제선택해법의 해가 기억세포에 저장되어 다음날의 복제선택해법의 초기해로 사용된다. 이때 다음날의 재고정보가 예상과 비슷하면 기억세포에 저장된 초기해는 유용할 것으로 예상된다.

<그림 8>에는 기억 세포에 저장된 항체가 초기해로 변환되는 과정을 제시하였다. 기억 세포에는 기간 1에서 4까지의 IRP의 해가 보관되었다. 기간 2가 되면 IRP는 기간 2에서 5까지의 연동계획이다. 기간 2에서 4까지는 기억 세포 속에 저장된 항체를 복사하여 사용하고 기간 5에 대하여는 랜덤함수를 이용하여 방문일정과 방문경로를 생성하였다. 만약

다음날의 재고가 전일에 예상한 재고와 비슷하다면 기억 세포에 저장된 초기해의 성능은 우수할 것으로 예상된다. 그러나 수요의 불확실성이 높은 환경에서는 실제 재고가 예측재고와 차이가 많이 나서 초기해의 우수성을 보장하기 어려울 것으로 예상된다. 이를 실험으로 조사하려고 한다. <그림 9>에는 기억 세포를 이용한 복제선택해법의 흐름도가 제시되었다. <그림 2>의 기존의 복제선택해법과 비교해보면, 기존 복제선택해법에서는 기억 세포가 해법의 중간에 우수해를 보관하는 용도로 사용되지만, 본 연구에서는 기억 세포가 해법의 진행 전에 해결한 과거의 해를 저장하는데 사용되는 것을 알 수 있다. 기억 세포에서 추출된 초기항체 외에도 랜덤함수에 의한 일반적인 초기항체를 생성하여 초기항체 집단을 생성하였다. 본 연구에서 개발된 복제선택해법은 다음과 같다.

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



0	1	0	0	1	3	2	1
1	0	1	1	2	4	1	3
0	1	1	0	2	3	1	4
1	0	1	1	4	3	1	2

<그림 8> 기억세포에 저장된 기간1에서 4까지의 항체를 이용하여 기간 2에서 5까지 문제의 초기해를 생성하였다. 기간 2에서 4까지는 기억 세포속의 해를 이용하였고 기간 5는 랜덤함수에 의해서 생성하였다.

- 기억 세포를 이용한 복제선택해법  
(CSA\_M : Clonal Selection Algorithm with Memory cell)  
단계 1 : 과거해로부터 추출한 기억 세포(M)와 랜덤 함수에 의하여 초기 항체들을 생



성한다. 생성된 초기 항체(Pr)들로부터 모집단 (P)을 구성한다.

단계 2 : 모집단 P에서 n개의 우수한 개체(Pn)를 선택한다.

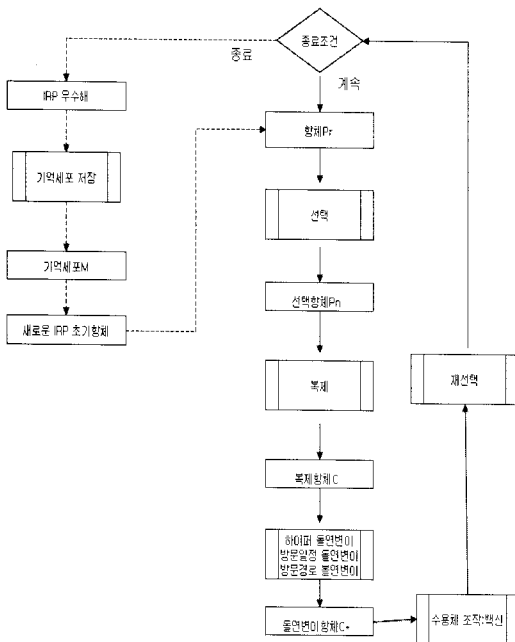
단계 3 : n개의 우수해를 개체별 적합도의 비례하여 복제한다. 임시적으로 복제 모집단(C)의 크기는 증가한다.

단계 4 : 복제 모집단에 개체별 적합도에 따라 하이퍼 돌연변이를 수행한다. 선택된 항체에 대하여 방문일정 돌연변이와 경로 돌연변이를 수행한다. 성숙된 모집단(C\*)을 형성한다.

단계 5 : 성숙된 모집단 C\*에서 개선된 개체를 선택하여 모집단 P를 대체한다.

단계 6 : 종료 조건을 만족하면 단계 7로, 만족하지 않으면 단계 2로 간다.

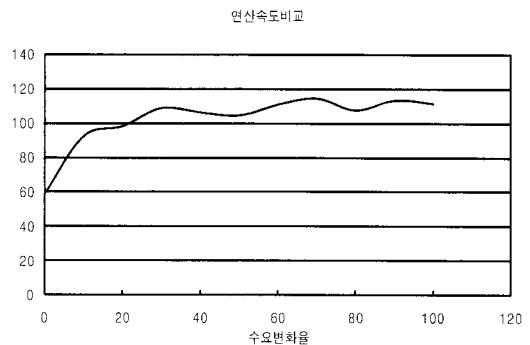
단계 7 : 최우수 항체를 기억 세포(M)에 저장하고 종료한다.



〈그림 9〉 기억 세포를 확장한 복제선택해법 (CSA\_M : Clonal Selection Algorithm with Memory cell)

#### 4. 기억 세포의 성능 실험

비교 실험을 위한 기존의 해법은 Yang[17]에 의해 개발된 인공면역 시스템(복제선택해법)인 AISHV (Artificial Immune System with Hyper mutation and Vaccine)을 사용하였다. AISHV는 과거의 해를 이용하지 않고 IRP를 해결하는 경우이며 이번 연구에서 개발된 CSA\_M과 비교하였다. CSA\_M은 비주얼 스튜디오 환경에서 개발되었다. Moin과 Shalhi[10]에 의하면 VRP와 달리 IRP에 대한 표준 문제는 아직 발표되어 있지 않고 있어서 IRP 연구자들은 자신들의 실험 문제를 사용하고 있다. 우리는 Yang[17]의 연구에서 사용되었던 문제들과 동일한 문제들을 이용하였다. 문제의 크기는 자판기의 수가 10개에서 100개까지이고 각각 15개의 문제로 구성되어 있다. 차고지는 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.



〈그림 10〉 수요변화율에 따른 연산속도의 비교 (CSA\_M/AISHV의 백분율. 단위%) 수요변화율이 30% 이하인 경우 기억 세포가 연산 속도를 절감시켜준다.

실험은 계획시점 첫날 IRP의 해를 구하고, 다음 날 새로운 IRP를 해결해야 하는 이틀간의 상황을 가정하였다. CSA\_M의 경우에는 첫날 구한 IRP의

해를 기억 세포에 저장한 후 다음날 초기해로 사용하였고, AISHV는 전일의 IRP해를 이용하지 않았다. 계획 시점에서 예측한 각 자판기의 판매량은 자판기의 평균 수요이다. 하루가 지난 뒤 발생한 실제 수요는 예측한 평균 수요와 달라져 있을 것이다. 실제 수요가 평균 수요와 유사하다면 기억 세포의 해는 상당히 효율적일 것으로 예측되며 실제 수요가 예측 수요와 차이가 많이 난다면 기억 세포의 유용성은 약화 될 것으로 예측된다. 이를 검증하기 위하여 실제 수요를 수요 변화율에 따라 변화

시키면서 기억 세포의 유효성을 실험하였다.

$$\text{실제수요} = \text{평균수요} \times \left(1 \pm \frac{\alpha}{100}\right)$$

단,  $\alpha$ 는 수요변화율내의 랜덤변수

수요 변화율은 0%에서 100%까지 변화시켰다. 수요 변화율이 0%라면 실제 수요가 평균 수요와 같이 발생하는 경우이다. 150개 표준문제들에 대하여 CSA\_M와 AISHV의 계산 시간과 목적함수 값을 구하였다. 먼저 <표 2>에서 수요 변화율에

<표 2> 수요 변화율에 따른 연산 시간의 비교(CSA\_M/AISHV의 연산시간 백분율. 단위 %)

		자판기의 수										
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	전체
수요 변화 율	0	83.3	56.8	63.1	82.2	41.5	42.1	49.8	46.0	64.2	60.9	59.0
	10	90.8	73.1	82.6	78.3	73.0	116.9	88.7	113.0	105.4	103.8	92.5
	20	90.6	63.6	93.2	94.5	93.9	91.5	142.4	98.3	110.8	104.2	98.3
	30	117.2	79.9	90.0	99.1	103.9	133.8	92.9	145.1	102.6	124.5	108.9
	40	98.6	69.9	90.7	107.0	100.0	90.8	122.4	109.9	133.7	140.9	106.4
	50	100.9	80.4	96.9	122.2	71.5	100.5	141.3	116.6	113.7	102.9	104.7
	60	91.7	105.7	97.3	119.6	118.2	120.7	127.9	103.0	114.3	111.8	111.0
	70	116.0	101.8	98.4	117.1	115.8	139.8	103.4	118.9	125.7	108.5	114.5
	80	100.7	91.2	107.6	113.6	123.5	101.1	98.7	105.8	122.7	111.9	107.7
	90	105.7	116.4	121.0	110.1	105.7	114.0	135.0	104.8	101.8	120.4	113.5
	100	98.0	113.1	113.7	103.9	114.4	99.4	98.4	144.2	132.9	97.6	111.6

<표 3> 수요 변화율에 따른 목적 함수 값의 비교(CSA\_M/AISHV의 목적함수값 백분율. 단위 %)

		자판기의 수										
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	전체
수요 변화 율	0	99.4	99.6	99.4	99.3	100.1	99.5	99.8	99.9	99.7	99.8	99.7
	10	99.0	99.7	100.1	100.3	100.2	99.9	100.1	99.9	100.0	100.0	99.9
	20	98.8	100.0	99.6	99.5	99.9	99.7	99.7	99.7	99.9	100.2	99.7
	30	99.7	99.5	99.8	99.8	99.8	99.8	100.0	99.9	100.1	99.9	99.8
	40	99.2	99.7	99.6	99.7	99.8	100.1	99.8	99.9	99.8	100.0	99.8
	50	99.9	99.4	99.4	99.9	100.1	100.1	99.8	100.2	100.1	100.2	99.9
	60	99.1	98.8	99.9	99.8	99.8	99.9	99.9	99.9	100.0	100.0	99.7
	70	99.7	99.5	99.7	100.0	100.1	99.7	100.0	99.9	100.0	100.1	99.9
	80	99.7	99.8	100.1	100.2	99.9	100.1	100.1	100.0	100.0	100.1	100.0
	90	99.6	99.7	99.6	99.7	100.0	100.1	99.9	100.1	100.0	99.9	99.9
	100	99.2	99.9	99.8	99.9	100.2	100.2	100.0	100.0	100.0	100.1	99.9

따라 기억 세포를 사용하는 경우의 계산 시간 단축 효과를 보여주고 있다. 수요변화율이 0%인 경우에 연산 시간은 59% 정도로 감소하였다. 수요변화율이 증가하면 연산 속도의 개선 효과가 나빠지며 수요 변화율이 30% 이상인 경우에는 연산 속도의 개선효과가 없었으며 오히려 더 많은 연산 시간이 요구되었다. 이 실험 결과에 의하면 수요 변화율이 30% 이하인 곳에서는 기억 세포를 사용하는 것이 연산 속도의 개선에 효과적인 것으로 나타났다. 자판기의 수가 증가함에 따라 연산 속도의 개선 효과가 약화되는 현상을 볼 수 있다. 따라서 수요의 불확실성이 높거나, 관리 자판기의 수가 큰 경우 연산 속도를 개선하기 위한 또 다른 연구가 필요하다고 판단된다. <그림 10>에 의하면 수요 변화율이 30%를 넘는 경우 CSA\_M의 연산시간이 AISHV의 110% 정도이며 수요변화율이 증가하여도 이 비율은 안정적인 상태를 유지했다. 이는 수요 변화율이 크면 기억 세포에 보관된 해와 최적해의 유사성이 약해서 최적해를 탐색하는 시간이 많이 걸리는 것으로 보인다. CSA\_M과 AISHV간의 목적 함수값은 수요변화율에 무관하게 CSA\_M이 개선된 것으로 분석되었다. 그러나 평균 개선율은 0.2% 정도로 목적 함수값의 개선효과는 미약한 것으로 보인다. 이는 복제선택해법의 해가 이미 우수한 해를 제공하여 CSA\_M에서 더 이상 개선할 여지가 없었던 것이 원인으로 보인다.

## 5. 결 론

이 연구에서 다루고 있는 IRP는 재고관리와 VRP를 동시에 다루는 문제이다. IRP에 대한 기존의 연구 방법으로는 크게 정수계획법을 완화한 해법, 휴리스틱 그리고 유전해법 등이 있다. 우리는 IRP를 해결하기 위해 복제선택해법이라는 새로운 최적화 해법을 도입하였다. 일반적인 복제선택해법에서 기억 세포는 해의 탐색과정에서 발견한 우수한 해를 저장하는 기능을 하고 이다. 그러나 우리는 기억 세포의 기능을 확장하여 과거의 문제에서 발견된

우수해를 저장하고 이를 이용하는 방법을 제시하였다. 이는 IRP가 연동계획이라는 특성을 이용한 것이다.

기억 세포를 이용한 복제선택해법의 연산 속도와 해의 품질에 관한 비교 실험을 하였다. 실험 결과에 의하면 기억 세포를 사용하면 해의 품질은 크게 변화가 없지만 연산 속도는 절약할 수 있었다. 그러나 판매와 재고 상황이 크게 변한 경우에는 오히려 연산 속도가 불리해지는 현상이 발생하였다. 또한 자판기의 수가 커지면 연산 속도의 개선 효과도 작아지는 현상이 발생하였다. 기억 세포는 수요 환경이 불안정한 곳에서는 사용하기 어려운 한계점이 존재한다.

향후에는 대형문제와 수요가 불안정한 상황에서 효율적인 해법을 찾아보려고 한다. 추진 중인 연구 방향으로는 불확실한 상황을 대비하기 위한 시나리오별로 기억 세포를 설계하는 방법을 추진하고 있으며, 차량이 운행 중인 시간을 이용하여 최적해법으로 IRP를 구하고 그 최적해를 기억세포로 활용하는 방법을 연구 중이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Abdelmaguid, T.F. and M.M. Dessouky, "A Genetic Algorithm Approach to the Integrated Inventory-Distribution Problem," *International Journal of Production Research*, Vol.44 (2006), pp.4445-4464.
- [2] Aghezzaf, E., B. Raa, and H. Landeghem, "Modeling Inventory Routing Problems in Supply Chains of High Consumption Products," *European Journal of Operational Research*, Vol. 169(2006), pp.1048-1063.
- [3] Aziz, N.A.B. and N.H. Moin, "Genetic Algorithm Based Approach For the Multi Product Multi Period Inventory Routing Problem," *Proceedings of International Conference on Industrial Engineering and Engineering Ma-*

- agement, (2007), pp.1619-1623.
- [4] Bard, J.L., L. Huang, P. Jaillet, and M. Dror, "A Decomposition Approach to the Inventory Routing Problem with Satellite Facilities," *Transportation Science*, Vol.32, No.2(1998), pp.189-203.
- [5] Boudia, M. and C. Prins, "A Memetic Algorithm with Dynamic Population Management for an Integrated Production-distribution Problem," *European Journal of Operational Research*, Vol.195(2009), pp.703-715.
- [6] Campbell, A.M. and M.W.P. Savelsbergh, "A Decomposition Approach for the Inventory-Routing Problem," *Transportation Science*, Vol.38, No.4(2004), pp.488-502.
- [7] De Castro, L.N. and F.J. Von Zuben, "Artificial Immune Systems, Part 1, Basic theory and applications," Technical Report, TR-DCA 01/99, 1999.
- [8] Gaur, V. and M.L. Fisher, "A periodic inventory routing problem at a supermarket chain," *Operations Research*, Vol.52, No.6(2004), pp.813-822.
- [9] Lao, Y. and H.W. Leong, "A Multi-agent Based Approach to the Inventory Routing Problem," *LNAI*, Vol.2417(2002), pp.345-354.
- [10] Moin, M.H. and S. Salhi, "Inventory Routing Problems : a Logistical Overview," *Journal of the Operational Research Society*, Vol.58 (2007), pp.1185-1194.
- [11] Prins, C., "A Simple and Effective Evolutionary Algorithm for the Vehicle Routing Problem," *Computers and Operations research*, Vol.31 (2004), pp.1985-2002.
- [12] Raa, B. and E.H. Aghezzaf, "A Practical Solution Approach for the Cyclic Inventory Routing Problem," *European Journal of Operational Research*, Vol.922(2009), pp.429-441.
- [13] Renaud, J., G. Laporte, and F.F. Boctor, "A Tabu Search Heuristic for the Multidepot Vehicle Routing Problem," *Computer and Operations Research*, Vol.23(1996), pp.229-235.
- [14] Rusdiansyah, A. and D.B. Tsao, "An Integrated Model of the Periodic Delivery Problems for Vending-machine Supply Chains," *Journal of Food Engineering*, Vol.70(2005), pp.421-434.
- [15] Yang, B., I. Na, H. Moon, and B. Park, "An Application Service Provider for Vending Machine Operations using Mobile Communication," *J. of the Korean Society of SCM*, Vol.19, No.1(2001), pp.29-34.
- [16] Yang, B., "Introduction to a Novel Optimization Method : Artificial Immune Systems," *IE Interfaces*, Vol.20, No.4(2007), pp.458-468.
- [17] Yang, B., "A Vehicle Routing Problem In the Vendor Managed Inventory System," *Journal of the Korea Safety Management and Science*, Vol.10, No.3(2008), pp.217-225.
- [18] Yu, Y., H. Chen, and F. Chu, "A New Model and Hybrid Approach for Large Scale Inventory Routing Problems," *European Journal of Operational Research*, Vol.189 (2008), pp.1022-1040.
- [19] Zhao, Q.H., S.Y. Wang, and K.K. Lai, "A Partition Approach to the Inventory/routing Problem," *European Journal of Operational Research*, Vol.177(2007), pp.786-802.
- [20] Zhao, Q.H., S. Chen, and C.X. Zang, "Model and Algorithm for Inventory/routing Decision in a Three-echelon Logistics System," *European Journal of Operational Research*, Vol.191(2008), pp.623-635.