

## 공생 진화알고리즘을 이용한 확장된 hub-and-spoke 수송네트워크 설계\*

신경석\*\* · †김여근\*\*

### Extended Hub-and-spoke Transportation Network Design using a Symbiotic Evolutionary Algorithm\*

Kyoung Seok Shin\*\* · Yeo Keun Kim\*\*

#### ■ Abstract ■

In this paper, we address an extended hub-and-spoke transportation network design problem (EHSNP). In the existing hub location problems, the location and number of spokes, and shipments on spokes are given as input data. These may, however, be viewed as the variables according to the areas which they cover. Also, the vehicle routing in each spoke needs to be considered to estimate the network cost more correctly. The EHSNP is a problem of finding the location of hubs and spokes, and pickup/delivery routes from each spoke, while minimizing the total related transportation cost in the network.

The EHSNP is an integrated problem that consists of several interrelated sub-problems. To solve EHSNP, we present an approach based on a symbiotic evolutionary algorithm (symbiotic EA), which are known as an efficient tool to solve complex integrated optimization problems. First, we propose a framework of symbiotic EA for EHSNP and its genetic elements suitable for each sub-problem. To analyze the proposed algorithm, the extensive experiments are performed with various test-bed problems. The results show that the proposed algorithm is promising in solving the EHSNP.

Keyword : Hub-and-spoke, Hub Location Problem, Location-Routing Problem, Evolutionary Algorithm

논문접수일 : 2006년 3월 27일      논문게재확정일 : 2006년 5월 30일

\* 이 논문은 정부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(R05-2004-000-10909-0).

\*\* 전남대학교 산업공학과

† 교신저자

## 1. 서 론

현대 물류시스템에서는 분산된 공급지와 수요지, 그리고 다양한 종류와 크기의 화물량을 가진다. 이러한 물류시스템에서 물류비용의 절감과 고객서비스 향상을 위해 효율적인 물류네트워크 설계 문제는 중요하게 다루어지고 있다. 물류 효율화를 위한 원칙은 대량화와 공동화를 통한 규모의 경제를 이루는 것이다. Hub-and-spoke 네트워크는 이를 잘 반영할 수 있는 수송네트워크 구조이다[5].

Hub-and-spoke 네트워크는 몇 개의 허브(hub)들과 이들 허브에 연결된 스포크(spoke)들로 구성되며, 대부분의 화물량이 기점에서, 기점과 연결된 허브를 통해, 종점과 연결된 허브를 경유하여 종점으로 가는 수송 경로를 갖는다. 이 구조는 다양하고 많은 화물량이 허브에 모여지고, 공동화되어, 재분배됨으로써 규모의 경제와 함께 운영의 집중화(centralization of operations)를 이룰 수 있다는 장점을 갖는다. 이러한 hub-and-spoke 네트워크 구조는 항공 수송에서 사용되기 시작하여, 점차 항만 물류, 우편 및 택배 시스템, 통신 시스템, 에너지 시스템 등에서 널리 사용되고 있다[8].

Hub-and-spoke 네트워크 설계에 관한 연구는 주로 허브의 입지선정 문제(Hub Location Problem ; HLP)를 다루고 있다. HLP는 지점들 간의 화물량 및 관련 비용이 주어진 상태에서, 네트워크 상의 총 물류비가 최소가 되도록 허브 입지선정(location)과 함께 남아있는 지점들을 어떤 허브에 할당(allocation)할 것인가를 결정하는 문제이다[5]. 여기서 허브가 아닌 지점들은 스포크가 된다. HLP는 크게 허브 수가 미리 주어진 경우[2, 8-10, 18, 19]와 입지선정과 함께 허브의 수도 결정하는 문제[1, 4, 23, 26]로 분류될 수 있다. 또한 허브의 용량제약[8, 19], 허브를 통한 수송 외에 스포크 간의 직접수송 허용여부[2, 9, 18]에 따라 다양하게 분류될 수 있으며 이에 관한 여러 연구가 이루어졌다.

본 연구에서는 HLP에 스포크 입지선정과 함께 스포크에서의 차량경로를 함께 고려하는 확장된

hub-and-spoke 수송네트워크 설계문제를 정의하고 이를 해결하기 위한 알고리즘을 제안한다. 기존의 HLP에서 각 스포크는 그 위치와 화물량이 미리 주어져 있다. 하지만 스포크 역시 스포크가 담당하는 고객들의 위치와 담당하는 지역에 따라 그 위치와 수, 그리고 화물량이 변할 수 있다. 본 연구에서는 위와 같은 상황에서 (1) 허브와 스포크의 수와 위치, (2) 허브에 스포크의 할당과 스포크에 고객의 할당, 그리고 (3) 스포크에 할당된 고객 서비스를 위한 차량경로를 동시에 통합적으로 결정하는 문제를 다룬다.

스포크와 허브 간 연결을 고려하지 않고, 스포크의 수와 위치를 결정하는 문제와 차량경로문제만을 보면 물류센터(warehouse/depot/spoke) 입지선정과 경로문제(location-routing problem : LRP)가 된다 [7, 11, 14, 17, 21, 25, 27]. 따라서 본 연구에서 다루는 문제는 HLP와 LRP가 결합된 문제라고도 볼 수 있다.

HLP와 LRP는 각기 복잡도가 높은 조합최적화 문제로서 NP-hard로 알려져 있다[7, 17]. 따라서 본 연구에서 정의한 문제 역시 복잡도가 높은 NP-hard이다. 이러한 유형의 실세계 문제를 해결하기 위해 수리모형에 의한 최적화 기법을 적용하는 데는 한계가 있다. 본 연구에서는 공생 진화알고리즘(symbiotic evolutionary algorithm) 기반의 방법론에 의해 문제를 해결하고자 한다. 공생 진화알고리즘은 자연의 공생 진화과정을 모방한 일종의 메타휴리스틱 탐색기법으로, 상호 의존적인 여러 부분문제들로 구성된 복잡도가 높은 결합문제를 통합적으로 해결하는 데 효율적인 것으로 알려져 있다[22].

진화알고리즘을 이용하는 HLP에 관한 연구로는 Helm and Venkataramanan[13], Helm[12] 그리고 Topcuoplu *et al.*[26]이 있다. 하지만 본 연구에서 다루는 유형의 문제를 해결하기 위해 진화알고리즘, 특히 공생 진화알고리즘을 적용한 연구는 아직 이루어지지 않고 있다. 조사한 바에 의하면, HLP와 LRP를 결합한 연구는 Zäpfel and Wasner[28]의 연구가 유일하다. 이 연구에서는 허브가 하나인 문제를 다루었고, 여러 부분문제를 동시에 통합적으로

해결하지 않고 각 부분문제를 순차적-반복적으로 해결하는 발견적 방법을 사용하였다. 이러한 접근 방법은 본 연구에서 다루는 문제와 같이 여러 부분 문제가 상호 종속된 복잡하고 동적인 문제를 해결하는 데는 한계가 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 제2장에서는 본 연구에서 다루는 문제를 정의한다. 제3장에서는 제2장에서는 공생 진화알고리즘의 개념, 특징, 그리고 구체적인 절차를 설명한다. 제4장에서는 다루는 문제에 공생 진화알고리즘을 적용하기 위해 개발한 진화 구성요소들을 설명한다. 제5장에서는 개발된 알고리즘의 효율성을 보이기 위한 실험과 그 분석 결과를 제시한다. 마지막으로 제6장은 요약과 결론으로 구성되어 있다.

## 2. Hub-and-spoke 수송 네트워크 설계문제

### 2.1 문제 정의

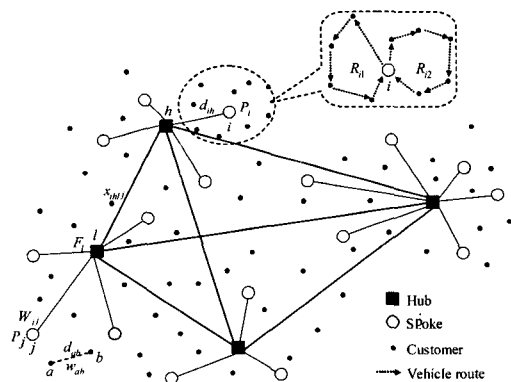
본 연구에서 다루는 hub-and-spoke 수송네트워크 설계문제는 전통적인 HLP를 스포크 입지선정과 스포크에서의 차량경로를 함께 고려하는 문제로 확장한 형태이다. Hub-and-spoke 수송네트워크에서 스포크는 흔히 차량을 이용하여 물건을 고객으로부터 수집(pickup)하거나 고객에게 배달(delivery)하는 지역국에 해당한다. 지역국(스포크)은 자신이 담당하는 고객(수요지점)으로부터 화물을 수집하여 이를 해당 지역국이 연결된 집중국(허브)으로 수송하고, 여기서 다른 지역국으로부터 도착한 화물들과 함께 종착지점에 따라 재분류하여 다른 집중국으로 보낸다. 그리고 이 집중국에서는 다시 분류하여 각 지역국으로 수송하고, 지역국은 이를 고객에게 배달한다. 이러한 수송시스템은 스포크의 위치와 그 수에 따라 물류 비용이 달라진다. 따라서 본 연구에서는 전통적인 hub-and-spoke 수송네트워크 설계와는 달리 스포크의 위치와 수도 결정변수로 간주한다. 또한 물류비용에서 스포크가 담당하는

지역에 있는 화물의 수집과 배달을 위한 차량의 운영비용을 산정하기 위해 차량경로문제(vehicle routing problem ; VRP)를 함께 고려한다. 본 연구에서는 수송네트워크 설계의 관점에서 보기 때문에 시간별 차량일정계획은 다루지 않고 차량경로계획만을 다룬다. 본 연구에서 다루는 문제를 기존 문제와 구별하기 위해 EHSNP(Extended Hub-and-Spoke transportation Network Problem)의 약자로 표기하기로 한다. [그림 1]은 EHSNP의 구조를 보여주고 있다.

본 연구에서 정의한 hub-and-spoke 수송네트워크 설계문제는,

- ① 스포크 수와 위치선정 문제
- ② 스포크에 고객의 할당 문제
- ③ 허브 수와 위치선정 문제
- ④ 허브에 스포크의 할당 문제
- ⑤ 각 스포크에 할당된 고객들의 차량경로 문제

의 5개의 부분문제로 구성되고, 상호종속적인 이들 부분문제의 각 결정변수를 동시에 결정하는 문제이다. 따라서 이 문제는 부분이 아닌 전체의 관점에서 통합적으로 해결되어야 한다.



[그림 1] EHSNP의 네트워크 구조

EHSNP의 목적함수는 네트워크 설계시 고려하는 총비용의 최소화로 둔다. 관련 비용요소로는 크게 설치비용, 수송비용, 그리고 스포크에서 차량 운영비용으로 나눌 수 있다. 설치비용은 허브와 스포

크를 설치하는데 필요한 비용이며, 수송비용은 허브-허브, 허브-스포크, 스포크-허브 간 수송비용이 있다. 이들 각 구간의 수송비는 화물의 크기와 거리에 비례한다. 스포크에서 차량운영과 관련된 비용으로는 필요한 차량의 고정비와 수집과 배달을 위한 운송비용이다. 목적함수 표현을 위한 기호와 목적함수  $z$ 는 다음과 같다.

• 기호정의

- $d_{fg}$  : 지점(고객위치, 허브 후보지)  $f$ 와  $g$ 간 거리.
- $w_{fg}$  : 지점(고객위치, 허브 후보지)  $f$ 에서 지점  $g$ 로의 화물량.
- $P_i$  : 고객위치  $i$ 에서 스포크 설치비용.
- $F_h$  : 허브 후보지  $h$ 에서 허브 설치비용.
- $S$  : 설치된 스포크 집합.
- $H$  : 설치된 허브 집합.
- $W_{ij}$  : 스포크  $i$ 에서 스포크  $j$ 로의 화물량,  $i, j \in S$ .
- $R_{iq}$  : 스포크  $i$ 에 생성된  $q$ 번째 경로,  $i \in S$ .
- $x_{iklj} = \begin{cases} 1, & \text{스포크 } i \text{에서 허브 } k \text{와 } l \text{을 경유하여} \\ & \text{스포크 } j \text{로 수송되면} \\ 0, & \text{그렇지 않으면} \end{cases}$   
 $i, j \in S, k, l \in H$ .

Minimize

$$z = \sum_{i \in S} \sum_{k \in H} \sum_{l \in H} \sum_{j \in S, j \neq i} W_{ij}(\alpha d_{ik} + \beta d_{kl} + \gamma d_{lj})x_{iklj} + \sum_{i \in S} \sum_q c(R_{iq}) + \sum_{i \in S} P_i + \sum_{h \in H} F_h \quad (1)$$

여기서 첫째 항은 화물량과 거리에 따른 수송비용을 의미한다.  $\alpha$ 는 스포크에서 허브까지 수송비용 계수이고,  $\beta$ 는 허브 간 수송비용 계수, 그리고  $\gamma$ 는 허브에서 스포크까지의 수송비용 계수이다. 둘째 항은 설치된 스포크에서 각 고객에 대해 수집과 배달을 위한 차량 운영비용이다. 여기서 차량운영비용  $c(R_{iq})$ 는 차량 고정비와 운송비의 합으로 주어진다. 따라서 스포크에서의 차량 운영비용은 각 스포크에 생성된 차량경로에 필요한 비용들의 합이다. 셋째와 넷째 항은 스포크와 허브의 설치비용을 각각 나타낸다.

본 연구에서 다루는 제약과 가정은 다음과 같다.

- 1) 모든 고객의 위치는 스포크의 후보지가 된다.
- 2) 허브의 후보지는 고객의 위치와는 상관없이 별도로 주어진다.
- 3) 허브의 용량제약과 직접수송은 고려하지 않는다.
- 4) 스포크에서 차량은 그 종류가 모두 동일하며, 수집과 배달이 별도로 이루어진다고 본다.
- 5) 차량 용량은 한계가 있으며, 또한 차량 서비스시간(이동시간 + 수집/배달 시간)은 제한이 있다.

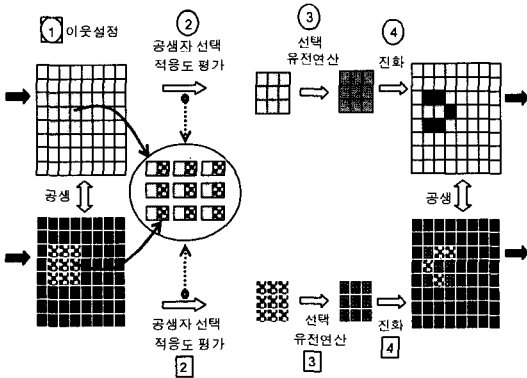
위 1)과 2)에서 스포크는 일종의 지역국으로 볼 수 있어, 그 위치는 고객 위치 중에 설치 되는 것이 적절한 반면, 허브는 일종의 집중국으로 볼 수 있어 그 입지는 고객의 위치보다는 별도의 입지에 설치될 수 있음을 고려하였다. 3)에서 허브 용량제약과 스포크의 직접수송은 고려하는 것이 보다 현실적이나, 이 경우 문제의 복잡도는 매우 커지게 된다. 따라서 이는 추후 연구주제로 남겨두었다. 스포크에서 차량운영과 관련된 제약은 차량경로문제에서 흔히 사용되는 가정을 따랐다. 수집과 배달이 동시에 이루어지는 상황을 다룬 연구[3]가 있으나 이는 단기적인 차량운영계획을 다루는 차량경로문제에 해당된다. 일반적으로 네트워크 설계는 장기적인 의사결정에 속하고 차량경로문제는 중·단기 의사결정에 속하는 문제이다. 따라서 설계문제에서 차량경로문제는 가능한 합리적인 비용 산출에 그 목적이 있으며 구체적인 차량운영계획을 위한 것은 아니므로 4)와 5)와 같이 가정하였다. 특히, 가정 5)에서 차량운영비용 산출을 위해 차량용량과 차량의 서비스시간을 고려하였다. 여기서 서비스 시간 제한은 근로시간의 제한을 의미한다.

### 3. EHSNP를 위한 공생 진화알고리즘

#### 3.1 알고리즘의 특징

공생 진화알고리즘은 생물계에서 협조적인 공생(symbiosis) 관계를 갖는 서로 다른 종들이 상호작용

용하고 상호적용하며 공진화하는 과정을 모방한 진화알고리즘이다. 전통적인 진화알고리즘은 전체 해(entire solution)를 하나의 개체로 표현하여 하나의 모집단을 운영하는 반면, 공생 진화알고리즘은 각 부분문제를 각각의 종으로 보고 이들 각 부분문제의 해, 즉 부분해(partial solution)를 개체로 표현하여 부분문제를 위한 모집단을 형성하고, 이들 모집단을 복수개 운영하면서 해를 탐색하는 기법이다. 공생 진화알고리즘에서 각 모집단의 개체는 상대 모집단의 개체(다른 모집단의 개체)들과 결합하여 적응도가 평가되고, 적응도에 따라 선택과 유전연산을 통해 자손을 생산한다. [그림 2]는 2개의 모집단을 갖는 공생 진화알고리즘 구조에서 모집단의 일부가 진화하는 이웃진화에 의한 진화과정을 보여주고 있다. 이웃진화에 대해서는 다음 절에서 상세히 설명한다.



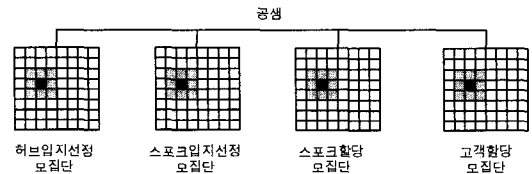
[그림 2] 2개의 모집단을 갖는 공생 진화알고리즘의 구조

공생 진화알고리즘은 부분문제로 이루어진 복잡하고 동적인 통합문제를 해결하는 데 있어 전통적인 진화알고리즘에 비해 우수한 해를 제공하는 것으로 알려져 있다[20]. 특히 공생 진화알고리즘은 타 기법에 비해 목적 및 제약의 추가와 변경이 용이하고, 문제 상황의 변화에 대한 적응력이 높으며, 각 부분문제별로 구성요소를 연구하여 그에 따른 결과를 이용한 통합이 용이하다는 장점을 갖는다. 또한 부분문제들을 순차적이 아닌 동시에 해결한다

는 특징으로 인해 서로 관련된 여러 부분문제들로 구성된 통합문제의 해결을 위한 하나의 효율적 방법론으로 사용되고 있다[15, 16].

### 3.2 구조와 절차

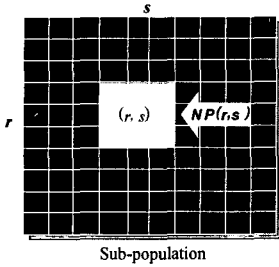
자연계에서 다양한 종들이 상호작용하고 상호적용하는 메커니즘이 존재하듯이, 통합문제를 다루는 공생 진화알고리즘에서도 성격이 서로 다른 여러 부분문제들이 유기적으로 작용하면서 좋은 해를 탐색할 수 있는 모집단 구조와 진화 메커니즘이 요구된다[16, 22]. 이는 모집단의 수와 구조, 그리고 진화 전략, 공생자 선택 등과 관련된다.



[그림 3] EHSNP를 위한 공생 진화알고리즘의 구조

‘2.1절 문제 정의’에서 기술했듯이 EHSNP는 크게 5개의 부분문제로 이루어져 있다. 본 연구에서는 [그림 3]과 같이 4개의 모집단을 운영한다. 그리고 스포크에서의 차량경로는 계산의 복잡도를 줄이기 위해 발견적 기법(heuristic)에 의해 구하였다.

본 연구에서 각 부분모집단은 토러스(torus)형태의 2차원 격자구조로 구성된다. 그리고 진화전략은 모집단 단위가 아닌 이웃진화를 사용한다. 이웃진화는 다양한 우수 개체들이 적소(niche)를 형성하도록 하여, 해의 조기수렴을 방지할 뿐만 아니라 해 공간의 효율적 탐색을 가능하게 한다[15]. 또한, 진화 형태는 안정상태 유전알고리즘(steady-state genetic algorithm)을 따른다. 안정상태 유전알고리즘은 높은 적응도를 갖는 개체가 생산되는 즉시 재생산에 참여하는 방법으로, 우수한 자손 개체가 갖는 유전정보의 이용을 높일 수 있다[16]. [그림 4]는 한 모집단의 위치  $(r, s)$ 에서  $(3 \times 3)$  크기의 이웃  $NP(r, s)$ 를 보여주고 있다.



[그림 4] 이웃 정의

EHSNP를 위한 공생 진화알고리즘의 구체적인 절차는 다음과 같다. 절차에서  $N$ 은 부분모집단의 수,  $P[q]$ ,  $q=1,2,\dots,N$ 는 부분모집단  $q$ 를 나타낸다.

#### 단계 1 (초기화)

각 부분문제 모집단  $P[q]$  ( $q=1,2,\dots,N$ )를 각 부분문제의 초기해 생성방법에 의해 초기해를 생성, 2차원 격자구조의 초기모집단을 생성한다.

#### 단계 2 (초기 적응도 평가)

각 부분모집단  $P[q]$  ( $q=1,2,\dots,N$ )의 개체들 다른 모집단들에서 같은 위치에 있는 개체들과 짝을 지어 초기적응도를 평가한다. 이 때 가장 좋은 적응도와 해당 개체결합을 각각  $f_{best}$ 와  $Ind_{best}$ 로 둔다.

#### 단계 3 (이웃 설정)

임의 위치  $(r, s)$ 를 선택하여 이웃  $NP_q(r, s)$  ( $q=1,2,\dots,N$ )를 정의한다.

#### 단계 4 (이웃 $NP_q(r, s)$ 의 진화)

단계 4.1  $q=1$ 로 둔다.

단계 4.2 이웃  $NP_q(r, s)$ 에서 적응도를 기준으로 두 부모개체를 선택하여 교차한 후 두 자손개체를 생산한다.

단계 4.3 이웃  $NP_q(r, s)$ 에서 가장 낮은 적응도를 갖는 두 개체를 선택하여 단계 4.2에서 생산된 자손개체와 대체한다.

단계 4.4 돌연변이율에 의해 이웃  $NP_q(r, s)$ 의 개체들을 돌연변이시킨다.

단계 4.5 이웃  $NP_q(r, s)$ 의 개체들의 적응도를 평

가한다. 이때 공생자는 이웃  $NP_p(r, s)$  ( $p=1,2,\dots,N$ ,  $p \neq q$ )에서 임의로 선택한다. 만약  $NP_q(r, s)$ 의 가장 좋은 적응도가  $f_{best}$ 보다 좋으면,  $f_{best}$ 와  $Ind_{best}$ 를 갱신한다.

단계 4.6 이웃진화 종료조건을 만족하지 않으면 단계 4.2로 간다. 그렇지 않고(이웃진화 종료조건을 만족하고)  $q=N$ 이면 단계 5로,  $q < N$ 이면  $q \leftarrow q+1$ 로 두고 단계 4.2로 간다.

#### 단계 5 (종료조건)

알고리즘 종료조건을 만족하면 끝내고 그렇지 않으면 단계 3으로 간다.

단계 1과 2는 각 부분모집단을 초기화하고 초기 적응도를 평가하는 단계이다. 단계 3은 모집단의 임의 위치에서 이웃을 정의하는 단계이며, 정의된 이웃에 대해 단계 4에서 각 부분모집단별로 안정상태 유전알고리즘 형태의 진화를 수행한다. 단계 2와 단계 4.5는 개체의 적응도를 평가하는 단계이다. 적응도 평가는 다른 모집단에 있는 개체들과의 조합에 의해 이루어진다. 이들 개체를 상호 간에 공생자(symbiont)라 부른다. 공생자 선택은 여러 방법으로 수행될 수 있는데 본 연구에서는 다른 모집단의 이웃에서 임의로 선택하는 방법을 사용하였다. 단계 2의 초기모집단의 경우는 다른 모집단의 동일 위치의 개체를 공생자로 선택하여 적응도를 평가하도록 하였다.

단계 2와 단계 4.5에서  $f_{best}$ 와  $Ind_{best}$ 는 엘리티즘(elitism)을 위한 것으로 알고리즘 수행 중에 발견된 우수한 개체결합을 보관하여 이들이 사라지는 것을 방지한다.

각 부분모집단별로 정의된 이웃을 이웃진화 종료조건에 의해 진화시키고(단계 4.6 참조), 새로운 이웃을 임의로 정하여 이 이웃을 진화시킨다. 이 과정을 전체 알고리즘의 종료조건이 만족될 때까지 반복한다. 이들 종료조건은 여러 형태가 있을 수 있으나, 본 연구에서는 생산된 개체 수를 사용한다.

## 4. EHSNP를 위한 유전요소

### 4.1 표현과 초기모집단

진화알고리즘을 주어진 문제에 적용하기 위해서는 우선 문제의 해를 개체로 표현하여야 한다. 개체 표현은 알고리즘의 성능에 영향을 미치므로 문제의 특성과 알고리즘의 구조에 따라 적합한 방법을 사용해야 한다.

#### 4.1.1 허브입지선정 부분문제의 표현

허브의 위치와 수를 결정하는 부분문제 개체는 [그림 5]와 같이 표현한다. 인자의 위치는 설치 가능한 허브 후보의 번호이고 인자 값은 해당 허브 후보의 설치여부를 나타내는 이진 값으로 1이면 허브로 선정됐음을, 0이면 선정되지 않았음을 의미한다. 이 방법은 허브의 위치와 수가 동시에 자연스럽게 표현될 수 있고, 유전연산이 용이하며, 유전연산 후 별도의 보수작업이 필요하지 않다.

1	2	3	4	5	6
0	1	0	0	1	1

[그림 5] 허브입지선정 모집단 개체의 표현

초기모집단의 개체를 구성할 때, 허브의 수와 그 위치는 탐색효율을 높이기 위해 Topcuoglu *et al.* [26]에서 사용한 방법을 수정하여 다음과 같이 3가지 방법으로 생성한다. 허브 후보지의 수를  $m$ 으로 둔다.

**방법 1:** 모집단 크기의 30%의 개체에 대해  $[1, m/2]$ 에서 임의로 허브 수를 결정하고, 이에 대한 허브의 위치는 허브 화물량목록의 상위 2/3 내에 있는 지점들 중에서 확률바퀴로 선택한다. 여기서 허브 화물량목록은 모든 고객을 가장 가까운 허브에 할당할 때, 허브에서 처리되는 화물량의 목록이다.

**방법 2:** 모집단의 다른 30%의 개체도 허브 수는

$[1, m/2]$ 에서 임의로 결정하고, 이에 대한 허브 위치는 허브비용목록의 상위 2/3 내에 있는 지점들 중에서 확률바퀴로 선택한다. 여기서 허브비용목록은 허브 화물량목록의 화물량을 허브 설치비용으로 나눈 값을 정렬해 놓은 목록이다.

**방법 3:** 나머지 40%의 개체에 대해서는 허브 수는 범위  $[1, m]$ 에서 임의로 결정하고, 허브 위치 또한 임의로 결정한다.

여기서 확률바퀴(roulette wheel)에 의한 선택은 목록에서 각 항목이 갖는 값에 비례하는 선택확률을 부과하여 선택하는 방법이다.

#### 4.1.2 스포크입지선정 부분문제의 표현

스포크입지선정은 고객 위치 중에서 일부가 스포크로 선정되므로, 허브의 입지선정에서의 유사하게 표현한다. 즉 인자의 위치는 고객을, 인자값은 고객이 스포크로 선정되었는지 여부를 나타낸다. 따라서 고객이 스포크로 선정되었으면 해당 인자값은 1, 그렇지 않으면(스포크가 아니면) 0 값을 갖는다.

스포크입지선정 모집단의 초기화 역시 허브입지선정 모집단의 초기화 과정과 유사하게 고객의 화물량과 설치비용을 고려하여 다음 3가지 방법을 사용한다.  $n$ 은 고객의 수이다.

**방법 1)** 모집단의 40% 개체에 대해, 스포크 수는  $[n/3, 2n/3]$ 에서 임의로 결정하고, 결정된 수에 대한 스포크 위치는 고객 화물량목록의 상위 2/3 내에 있는 고객들 중에서 확률바퀴로 선택한다. 여기서 고객 화물량목록은 각 고객의 화물량을 내림차순으로 정렬한 목록이다.

**방법 2)** 모집단의 다른 40% 개체에 대해서, 스포크 수는  $[n/3, 2n/3]$ 에서 임의로 정하고, 이에 대한 스포크 위치는 고객비용목록의 상위 2/3 내에 있는 고객들 중에서 확률바퀴로 선택한다. 여기서 고객비용목록은 각 고객의 화물량을 해당 고객이 스포크로 설

치될 때 설치비용으로 나는 값을 내림차순으로 정렬한 목록이다.

**방법 3)** 모집단의 나머지 20% 개체는 스포크 수와 그 위치를 임의로 선택하여 생성한다.

4.1.3 스포크할당 부분문제의 표현

EHSNP에서 스포크는 고객들 중 일부가 선정되고, 선정된 스포크는 다시 선정된 허브에 할당되어야 한다. 본 연구에서는 허브 위치에 상관없이 어느 허브 입지선정 개체와 결합되더라도 해석이 자연스럽게 이루어질 수 있도록 할당규칙에 의한 표현방법을 새로이 제안한다. [그림 6]은 스포크의 허브할당 표현의 예를 보여준다.

1	2	3	4	5	6	7	8
1	3	1	2	1	1	3	2

[그림 6] 스포크할당 모집단의 개체표현

여기서 인자의 위치는 고객 번호이고 인자값은 해당 고객의 위치가 스포크인 경우, 이 스포크가 어느 허브에 할당될 것인지를 결정하는 규칙번호이다. 할당규칙은 해당 스포크가 할당 가능한 허브 중 어느 허브에 할당될 지를 결정하는 것으로, 본 연구에서는 <표 1>의 3가지 규칙을 사용한다.

<표 1> 스포크의 허브할당을 위한 할당규칙

규칙번호	$\theta_1$	$\theta_2$
1	1	0
2	0.9	0.1
3	0.8	0.2

각 규칙을 갖는 스포크는 해당 규칙의  $\theta_1, \theta_2$ 에 따라 다음과 같은 과정으로 허브에 할당된다.

<할당규칙에 의한 스포크  $i$ 의 허브할당 절차>

- 단계 1. 각 규칙에 해당하는  $\theta_1, \theta_2$ 를 결정한다.
- 단계 2. 스포크  $i$ 와 각 허브  $h$ 와의 거리를 구한다. 구해진 거리에 역수를 취하여, 최대값이 1

이 되도록 정규화한다. 이 값을  $D_{ih}$ 라 놓는다.

$$D_{ih} = \frac{1/d_{ih}}{\max_g \{1/d_{ig}\}}, \quad h, g \in H.$$

단계 3. 각 허브  $h$ 에 이미 할당된 스포크들과의 화물량( $\sum_{j \in S(h)} (W_{ij} + W_{ji})$ )을 구하여, 최대값이 1이 되도록 정규화한다. 이 값을  $T_{ih}$ 라 놓는다.

$$T_{ih} = \frac{\sum_{j \in S(h)} (W_{ij} + W_{ji})}{\max_l \left\{ \sum_{j \in S(l)} (W_{ij} + W_{ji}) \right\}},$$

$h, l \in H$ .

단계 4.  $G_{ih} = \theta_1 D_{ih} + \theta_2 T_{ih}$ ,  $h \in H$ 를 구한다.

단계 5.  $h = \arg \max_{h \in H} \{G_{ih}\}$ 를 구하고, 스포크  $i$ 를 허브  $h^*$ 에 할당한다.

여기서  $S(h)$ 은 허브  $h$ 에 이미 할당된 스포크 집합을 의미한다. 규칙 1을 갖는 스포크는 가장 가까운 허브에 할당된다. 이는 가까운 허브에 할당될수록 수송에 따른 비용이 절약될 수 있기 때문이다. 규칙 2, 3은 거리 외에 허브를 통과하는 화물량을 함께 고려하여 할당하는 규칙이다. 만약 거리가 비슷하다면 자신과 많은 화물이 교환되는 스포크들이 할당된 허브에 자신이 할당되는 것이 허브 간 수송 비용을 절감할 수 있으므로 비용면에서 더 유리할 것이다.

이 규칙을 적용할 때, 규칙 2와 3은 규칙 1에 영향을 받는다. 따라서 개체에서 스포크를 허브에 할당할 때,  $\theta_1$ 의 값이 큰 순으로, 즉 규칙 1을 적용받는 스포크들을 먼저 허브에 할당하고, 다음은 규칙 2를 적용받는 스포크를, 끝으로 규칙 3을 적용받는 스포크를 해당 규칙에 의해 할당한다. 초기모집단은 할당규칙 1, 2, 3을 각각 1/2, 1/3, 1/6의 비율로 생성하여 각 개체를 구성한다.

4.1.4 고객할당 부분문제의 표현

고객의 스포크할당 표현 역시 스포크의 허브할당 표현과 유사하게 할당규칙에 의해 표현한다. 즉, 인자의 위치는 고객의 번호를, 인자값은 해당고객이



어느 스포크에서 서비스를 받을지를 결정하기 위한 규칙번호이다. 이 때 고객  $i$ 를 스포크에 할당하기 위한 규칙은 <표 2>과 같이 3가지를 사용한다.

<표 2> 고객  $i$ 의 스포크 할당규칙

규칙	설명
1	고객 $i$ 와 가장 가까운 스포크에 할당
2	현재 스포크에 할당된 고객 중 고객 $i$ 와 가장 가까운 고객이 할당된 스포크에 할당
3	고객 $i$ 와 스포크간 거리, 그리고 이미 할당된 고객과의 거리를 고려한 할당

여기서, 규칙 1을 적용받는 고객은 선정된 스포크 중에서 가장 가까운 스포크에 할당된다. 규칙 2는 차량의 경로를 고려한 할당규칙으로, 이 할당규칙을 갖는 고객은 이미 할당된 고객 중 가장 가까운 고객이 할당된 스포크에 할당된다. 이는 해당 스포크에서 차량경로를 생성할 때 고객간의 거리가 가까울수록 경제적인 차량경로가 생성될 가능성이 크기 때문이다. 규칙 3은 고객  $i$ 와 스포크간 거리, 그리고 고객  $i$ 와 이미 할당된 고객과의 거리를 고려한 할당 규칙이다. 즉, 고객  $i$ 와 스포크  $s$ 와의 거리  $d_{is}^1 (s \in S)$ 와 스포크  $s$ 에 할당된 고객 중에서 고객  $i$ 와 가장 가까운 고객과의 거리  $d_{ij}^2 (s \in S)$ 를 계산하고, 이들의 가중합이 가장 작은 스포크  $s^* (= \operatorname{argmin}_s \{ \omega_1 d_{is}^1 + \omega_2 d_{ij}^2 \})$ 에 할당하는 규칙이다. 여기서  $j_s^*$ 는 스포크  $s$ 에 할당된 고객 중에서  $i$ 와 가장 가까운 고객을 의미하고  $\omega_1 + \omega_2 = 1, \omega_1 \geq 0, \omega_2 \geq 0$ 이다. 고객의 할당 순서는 스포크의 허브할당에서와 같이 할당규칙 번호가 낮은 고객부터 차례로 할당한다.

고객할당을 위한 초기 모집단도 고객 할당규칙 1, 2, 3에 대해 각각 1/2, 1/3, 1/6의 비율로 인자 값을 생성하여 초기화한다.

#### 4.2 적응도 평가

공생 진화알고리즘에서는 하나의 모집단을 갖는

전통적인 진화알고리즘과는 달리 부분문제를 이루는 여러 모집단을 운용하므로, 특정 모집단 개체의 적응도는 상대 모집단의 개체와 결합하여 전체문제를 이룬 후에 평가된다. 따라서 공생 진화알고리즘에서의 적응도는 전통적인 진화알고리즘에서의 적응도 개념 외에 상대 모집단과의 상호적응 능력의 의미를 함께 내포한다.

EHSNP를 위한 각 부분문제의 유전표현은 항상 가능해를 유도하므로 별도의 제약을 고려할 필요가 없다. 따라서 EHSNP의 적응도는 해당 개체가 상대 모집단의 공생자와 결합한 후 해석된 목적함수 값을 사용한다. 즉, 적응도 평가함수로써 식 (1)을 사용하고 이 값은 비용이므로 적을수록 높은 적응도를 갖는 것으로 본다.

결합개체를 해석하는 절차는 다음과 같다.

- 단계 1 : 스포크입지선정 개체에서 인자값이 1인 고객 위치는 스포크로 선정된다.
- 단계 2 : 고객을 선정된 스포크에 할당한다. 할당 순서는 할당규칙 번호가 낮은 고객부터 선정된 스포크에 할당한다.
- 단계 3 : 허브입지선정 모집단 개체에서 인자값이 1인 허브 후보는 허브로 선정된다.
- 단계 4 : 스포크할당 개체의 할당규칙 번호가 낮은 스포크부터 선정된 허브에 할당한다.
- 단계 5 : 각 스포크에 대해 할당된 고객의 수집 (pickup), 배달(delivery)을 위한 차량경로를 구하고 비용을 계산한다.
- 단계 6 : 전체 네트워크 비용, 즉 허브 및 스포크 설치비용, 수송비용, 차량의 수·배송 비용을 등을 계산한다.

단계 5에서 스포크에 할당된 고객들의 차량경로 생성은 Clarke and Wright[7]의 휴리스틱 방법을 응용한다. 이 방법은 지점간 경로의 절약값(savings)을 구하고, 이 값을 이용하여 제약이 허용하는 한 최대한 절약을 많이 할 수 있는 경로를 만들어 가는 방법으로 간단하면서 제약의 추가와 삭제가 용이하고, 비교적 좋은 결과를 유도하여 다양한 차

량경로문제에 응용되고 있다. 본 연구에서 고려하는 제약은 차량의 용량과 차량서비스시간이다. 따라서 절약이 큰 경로들을 추가하면서 차량의 용량과 서비스시간(이동시간 + 수집/배달 시간)을 확인하면 된다.

### 4.3 유전연산

유전연산은 문제의 특성을 반영할 수 있는 정보를 두 부모로부터 추출하여 자손에게 전달될 수 있어야 하며, 자손개체는 가능한 가능해가 생성되도록 해야 한다. 유전연산은 개체의 표현과 밀접한 관계가 있다. 본 연구에서 사용된 각 부분문제에 대한 표현은 유전연산에서 자연스럽게 가능해를 유지할 수 있다. 유전연산에는 교차와 돌연변이가 있다.

모든 모집단에 있는 개체의 교차는 모두 일점교차를 사용한다. 유전인자간의 임의 교차점을 잡아, 한 부모(P1)에서 교차점의 앞 부분 인자들을 상속하고 다른 부모(P2)에서 교차점의 뒷부분의 인자를 상속하여 자손 O1을 생산한다. 그리고 자손 O2는 부모 P1과 P2의 역할을 바꾸어 생산한다.

돌연변이는 부모로부터 유전된 개체의 형질을 변화시킴으로써 부모와 다른 형질을 갖게 하여 다양한 해공간의 탐색을 가능하게 하고, 또한 국부최적(local optimal)으로 수렴하는 것을 방지하는 역할을 한다. 먼저 허브입지선정과 스포크입지선정 모집단 개체의 돌연변이의 경우 다음 3가지 방법 중 하나를 임의로 선택하여 사용한다.

- 1) 교환 : 기존 허브(스포크)인 지점 중 하나를 비허브(비스포크)로 만들고 비허브(비스포크)인 지점 중 하나를 허브(스포크)로 만든다.
- 2) 생성 : 비허브(비스포크)인 지점 중 하나를 허브(스포크)로 만든다.
- 3) 제거 : 허브(스포크)인 지점 중 하나를 비허브(비스포크)로 만든다.

이 때 돌연변이에 참여하는 개체는 개체돌연변이율에 의해 선택한다. 돌연변이 대상 인자는 임의로

선택된다. 그리고 스포크할당과 고객할당 모집단 개체의 돌연변이 또한 해당 인자(스포크, 고객)의 할당규칙을 임의의 다른 할당규칙으로 변경함으로써 이루어진다.

## 5. 실험과 결과분석

### 5.1 실험설계

실험문제는 hub-and-spoke 입지선정문제에 흔히 사용되는 AP 자료[10]를 기초로 생성하였다. AP data set은 Australia Post의 실제 허브 입지선정문제에 관한 것으로 200개의 지점들로 구성되어 있다. AP 자료는 HLP를 위한 자료이므로 각 지점은 스포크 위치에 해당한다. 본 연구에서는 AP 자료의 지점을 고객의 위치로 간주하고, 허브 후보지는 지점들의 위치범위 내에서 임의로 정하였다. 또한 본 연구에서는 AP 자료를 기초로 고객의 수가 250, 300인 문제를 새롭게 생성하였다. 이 때 고객의 위치는 기존 지점들의 범위 내에서 새로운 고객의 위치를 임의로 정하고, 각 고객간 화물량 또한 기존의 화물량의 범위 내에서 임의로 부여하였다. 각 허브 후보지와 스포크에서의 설치비용은 [허브설치비용의 평균]/[스포크 설치비용의 평균]의 값이 각각 2와 4가 되는 범위를 정하여 임의로 생성, 실험문제를 구성하였다. <표 3>은 본 연구에서 사용된 실험문제를 보여준다. 이 때 각 문제에 대한 허브 간 수송 비용계수( $\beta$ ), 스포크에서 허브로의 수송비용 계수( $\alpha$ ), 그리고 허브에서 스포크로의 수송비용 계수( $\gamma$ )는 각각 0.75, 3.0, 2.0으로 AP 자료에서와 동일하다. 이 외에 차량고정비, 단위거리당 차량운송비, 고객의 서비스시간, 거리당 차량운행시간, 차량의 용량, 차량의 운행한계시간 등은 모든 문제에서 동일하게 주었다. 실험문제의 구체적인 사항은 Shin [24]를 참조할 수 있다.

<표 3>의 실험문제에 대해 제안한 알고리즘들의 성능을 평가하였다. 먼저 각 부분문제의 초기모집단 생성시 정보를 이용하여 생성하는 방법과 임의로 생성

〈표 3〉 실험문제

문제	고객 수	허브 후보 수	허브/스포크 설치비용 비율	문제	고객 수	허브 후보 수	허브/스포크 설치비용 비율
Prob. 1	50	10	2	Prob. 15	200	20	2
Prob. 2	50	10	4	Prob. 16	200	20	4
Prob. 3	50	20	2	Prob. 17	250	10	2
Prob. 4	50	20	4	Prob. 18	250	10	4
Prob. 5	100	10	2	Prob. 19	250	20	2
Prob. 6	100	10	4	Prob. 20	250	20	4
Prob. 7	100	20	2	Prob. 21	250	30	2
Prob. 8	100	20	4	Prob. 22	250	30	4
Prob. 9	150	10	2	Prob. 23	300	10	2
Prob. 10	150	10	4	Prob. 24	300	10	4
Prob. 11	150	20	2	Prob. 25	300	20	2
Prob. 12	150	20	4	Prob. 26	300	20	4
Prob. 13	200	10	2	Prob. 27	300	30	2
Prob. 14	200	10	4	Prob. 28	300	30	4

하는 방법의 성능을 비교분석하고, 이 결과를 바탕으로 제안한 알고리즘의 성능분석을 수행하였다.

알고리즘은 JAVA언어로 구현되었으며, 3.4GHz Pentium CPU를 장착한 IBM-PC에서 수행되었다. 유전 파라미터는 예비실험을 통해 결정하였다. 먼저 모집단의 크기는 100(10×10)의 격자구조로 하였고 이웃은 (3×3)의 9개의 크기를 갖도록 하였다. 돌연변이는 인자단위가 아닌 개체단위로 이루어지고 그율은 0.3으로 두었다. 따라서 한번의 이웃진화는 9개의 이웃에서 평균 2.7개의 개체가 돌연변이 된다. 이웃진화는 0.5의 확률로 2회 또는 3회 반복하였다. 전체 알고리즘의 종료조건은 재생산 개수로 하여 2,500개의 개체가 생산되면 종료되도록 하였다.

## 5.2 실험결과의 분석

### 5.2.1 초기화 방법의 비교

제안한 공생 진화알고리즘을 본 연구에서 다루는 문제에 적용할 때 초기모집단 생성시 문제가 갖는 특정정보의 이용이 알고리즘 성능에 미치는 효과를 분석하였다. 즉, 초기 모집단을 생성할 때 ‘4.1절’에서 기술한 발견적 정보이용 효과를 임의로 생성한 방법과 비교하였다.

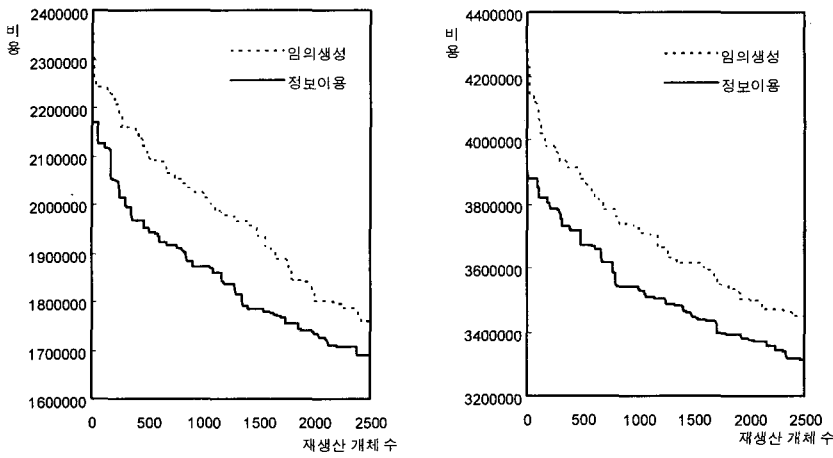
제안한 공생 진화알고리즘에 대해 모든 조건들은

동일하게 놓고 초기 모집단의 생성방법을 달리한 후 15회 반복 실험결과, 모든 문제에서 정보를 이용하여 초기모집단을 생성하는 방법이 임의로 생성한 방법보다 좋은 결과를 보였다. 구체적으로 고객 수가 200미만인 비교적 적은 규모의 문제(Prob.1~Prob.12)에서 평균 1.24%, 고객 수가 200이상인 규모가 큰 문제(Prob.13~Prob.28)의 경우 평균 3.04%의 개선효과를 보였다. 여기서 개선효과는 초기 모집단 생성시 임의로 생성한 방법에 대해 정보를 이용하여 생성한 방법이 얼마나 개선되는지를 알아보기 위한 개선율로 15회 반복실험 결과에 대해 ((임의생성방법의 평균 - 정보이용생성방법의 평균)/임의생성방법의 평균)×100(%)로 계산된 것이다.

[그림 7]은 Prob. 13과 Prob. 24에 대해 초기모집단 생성방법에 따른 수렴과정을 보인 것이다. 두 문제 모두 임의로 생성한 방법에 비해 수렴속도와 최종해의 질적 측면에서 보다 효율적임을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 정보를 이용한 방법에 의해 초기 모집단을 생성한다.

### 5.2.2 제안한 알고리즘의 성능 분석

본 연구에서는 EHSNP를 위한 다른 알고리즘에 관한 연구가 존재하지 않으므로 제안한 알고리즘의 성능을 전통적인 진화알고리즘(Traditional Evolu-



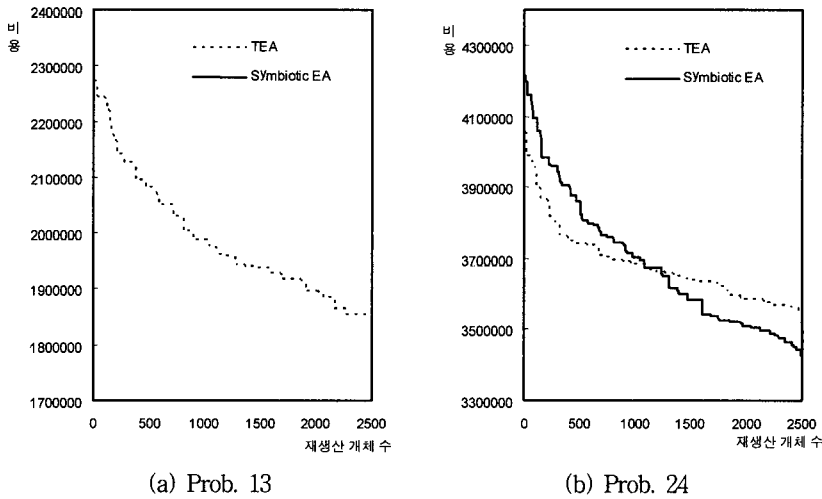
(a) Prob. 13

(b) Prob. 24

[그림 7] 초기화 방법에 따른 수렴속도

<표 4> 제안한 알고리즘의 성능 비교

문제	TEA			Symbiotic EA			Improved Rate (%)
	Best	Mean	Sec.	Best	Mean	Sec.	
Prob. 1	755,744.4	774,722.0	9.6	739,339.3	751,775.9*	29.1	3.0
Prob. 2	792,246.0	816,845.8	5.6	755,693.1	770,555.3*	37.3	5.7
Prob. 3	756,932.1	769,319.9	5.6	739,756.4	749,015.9*	40.1	2.6
Prob. 4	799,607.5	818,732.6	5.8	755,338.3	776,490.5*	31.9	5.2
Prob. 5	1,111,533.7	1,165,959.3	26.0	1,093,873.1	1,110,862.5*	259.2	4.7
Prob. 6	1,206,109.8	1,244,753.6	18.1	1,128,485.5	1,149,453.3*	99.9	7.7
Prob. 7	1,114,684.7	1,145,250.4	28.9	1,066,855.5	1,091,327.4*	228.4	4.7
Prob. 8	1,188,998.5	1,225,089.2	19.1	1,103,201.2	1,138,668.3*	137.5	7.1
Prob. 9	1,479,878.8	1,523,366.8	89.1	1,382,616.0	1,420,546.8*	490.3	6.7
Prob. 10	1,555,441.6	1,610,169.1	50.0	1,427,976.5	1,464,279.6*	365.5	9.1
Prob. 11	1,474,734.4	1,524,004.1	61.5	1,353,269.1	1,399,726.4*	583.4	8.2
Prob. 12	1,530,732.7	1,582,451.9	47.2	1,445,618.4	1,471,932.9*	290.8	7.0
Prob. 13	1,853,177.2	1,918,502.9	57.5	1,759,213.6	1,808,140.9*	232.1	5.8
Prob. 14	1,904,184.6	2,038,259.0	50.6	1,791,218.0	1,837,127.5*	190.0	9.9
Prob. 15	1,832,492.1	1,888,815.1	67.4	1,683,515.3	1,747,345.3*	317.5	7.5
Prob. 16	1,945,676.1	2,021,296.9	47.4	1,794,990.9	1,838,024.5*	213.7	9.1
Prob. 17	2,869,998.2	3,010,187.5	158.2	2,834,631.8	2,906,975.1*	369.7	3.4
Prob. 18	3,174,921.8	3,245,388.8	123.8	3,037,358.9	3,072,447.3*	279.8	5.3
Prob. 19	2,903,683.1	3,001,822.7	150.2	2,809,814.6	2,878,133.8*	722.6	4.1
Prob. 20	3,123,224.8	3,211,979.1	153.2	3,015,836.8	3,057,886.0*	300.2	4.8
Prob. 21	2,934,556.2	2,998,525.6	160.3	2,810,633.7	2,876,182.6*	353.4	4.1
Prob. 22	3,172,825.3	3,244,470.8	109.1	2,981,550.6	3,046,913.1*	263.1	6.1
Prob. 23	3,367,018.8	3,444,931.4	206.9	3,277,345.2	3,366,474.4*	372.6	2.3
Prob. 24	3,555,019.6	3,620,636.1	203.8	3,429,139.3	3,491,380.2*	376.4	3.6
Prob. 25	3,269,251.1	3,326,759.7	368.0	3,185,680.4	3,283,812.9*	410.0	1.3
Prob. 26	3,546,245.3	3,591,956.5	161.1	3,362,705.5	3,459,931.7*	369.2	3.7
Prob. 27	3,288,392.5	3,353,832.1	231.0	3,185,375.0	3,266,391.7*	373.2	2.6
Prob. 28	3,522,478.6	3,596,286.9	201.2	3,381,021.4	3,468,280.4*	363.7	3.6



[그림 8] 수렴속도 비교

tionary Algorithm ; TEA)과 비교하였다. TEA는 전체문제를 하나의 결합된 개체로 나타내고, 이들로 구성된 단일 모집단을 운영하는 점 외에 표현방법, 유전연산, 종료조건 등의 다른 조건은 제안한 알고리즘(Symbiotic EA)과 동일하다.

<표 4>는 실험 결과를 보인 것이다. 표에서 'Best', 'Mean', 'Sec.'은 각 실험문제당 15회 반복실험을 수행하여 얻은 결과에 대한 가장 좋은 값, 평균값, 그리고 계산시간(초)을 각각 의미한다. 개선율은 TEA에 비해 제안한 알고리즘의 성능향상 정도를 보인 것으로  $((\text{TEA의 평균} - \text{Symbiotic EA의 평균}) / \text{TEA의 평균}) \times 100(\%)$ 에 의해 계산되었다. '\*'표는 각 문제에서 평균값을 기준으로 좋은 성능을 보인 결과를 표시한 것이다.

<표 4>에서 알 수 있듯이 모든 실험문제에 대해 평균값은 물론 최고 좋은 해의 비교에서도 Symbiotic EA가 TEA보다 좋은 결과를 보였다. 실험 결과는 하나의 전체문제 개체를 통한 단일모집단을 운영하는 경우보다 여러 부분문제의 모집단을 운영하는 병렬적 탐색이 부분문제로 이루어진 통합문제에 보다 효율적임을 의미한다. 이는 기존 공생 진화 알고리즘의 여러 연구 결과[17, 19, 29]와 부합되는 측면이다. [그림 8]은 Prob. 13과 Prob. 24가 두 알고리즘에 대해 진화과정에서의 수렴속도를 비교한

것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 TEA에 비해 Symbiotic EA은 진화 초기에 각 모집단의 개체가 상대모집단 개체들과 상호적응의 과정 후에 매우 빠른 수렴속도를 보임을 알 수 있다.

계산시간은 Symbiotic EA가 TEA보다 다소 많은 계산시간이 소요되었다. 이는 TEA에서 한 모집단의 개체가 해석되는 것과는 달리 Symbiotic EA에서는 각각의 모집단 개체가 상대모집단 개체와 결합하여 해석되어야 하기 때문이다. 몇 개의 문제에서 규모가 작은 문제가 큰 규모의 문제에 비해 더 많은 계산시간이 소요되었는데, 이는 개체 해석 과정에서 차량경로를 결정하기 때문이다. 즉 문제의 규모가 작더라도 스포크에 할당된 고객의 수가 많은 경우 차량경로를 결정하는 데 필요한 계산량이 증가하기 때문이다.

## 6. 요약 및 결론

본 연구에서는 기존의 모형을 확장한 새로운 hub-and-spoke 수송네트워크의 설계문제를 정의하고, 이를 통합적으로 해결하는 공생 진화알고리즘을 개발하였다. 정의한 문제를 분석하여 전체 알고리즘의 구조를 설계하고, 이에 필요한 유전요소들을 개발하였다. 특히 공생 진화알고리즘에서 개

채해석은 부분문제 개체의 상호결합에 의해 이루어지므로 부분문제 개체가 결합되었을 때 자연스럽게 해석될 수 있는 개체표현을 새롭게 개발하고 이에 대한 유전연산자를 제안하였다.

문제의 규모를 달리한 다양한 실험문제에 대해 개발한 알고리즘의 성능을 분석하였다. 먼저 개발한 알고리즘의 성능향상을 위해 발견적 정보이용의 효과를 분석하였다. 이 결과를 토대로 공생 진화알고리즘을 구현하고, 실험문제에 대해 전체해를 표현한 개체들로 구성된 단일모집단을 갖는 기존 진화알고리즘과 성능을 비교분석하였다. 실험결과, 기존의 단일모집단을 운영하는 것보다 여러 부분모집단을 운영하는 제안한 공생 진화알고리즘의 성능이 우수함을 보였다. 이는 부분문제간에 상호적응하고 상호작용하는 능력을 가진 공생 진화알고리즘의 해공간 탐색 능력에 기인한다고 볼 수 있다.

본 연구에서 제안한 알고리즘은 확장된 hub-and-spoke 수송네트워크의 설계문제에서 뿐만 아니라 기존하는 hub-and-spoke 수송네트워크의 효율성을 분석할 때도 활용될 수 있을 것이다. 더 나아가 알고리즘의 구조는 여러 유형의 통합문제에 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

## 참 고 문 헌

- [1] Aykin, T., "Lagrangian Relaxation based Approaches to Capacitated Hub-and-spoke Network Design Problem," *European Journal of Operational Research*, Vol.79(1994), pp.501-523.
- [2] Aykin, T., "The Hub Location and Routing Problem," *European Journal of Operational Research*, Vol.83(1995), pp.200-219.
- [3] Bianchessi N. and G. Righini, "Heuristic Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-up and Delivery," *Computers & Operations Research*, in press.
- [4] Boland, N., M. Krishnamoorthy, A.T. Ernst, and J. Ebery, "Preprocessing and Cutting for Multiple Allocation Hub Location Problems," *European Journal of Operational Research*, Vol.155(2004), pp.638-653.
- [5] Campbell, F.F., "Integer Programming Formulations of Discrete Hub Location Problems," *European Journal of Operational Research*, Vol.72(1994), pp.387-405.
- [6] Clark, G. and J. Wright, "Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points," *Operations Research*, Vol.12(1964), pp.568-581.
- [7] Dilek, T. and I.B. Laura, "A Two-phase Tabu Search Approach to the Location Routing Problem," *European Journal of Operational Research*, Vol.116(1999), pp.87-99.
- [8] Ebery, J., M. Krishnamoorthy, A. Ernst, and N. Boland, "The Capacitated Multiple Allocation Hub Location Problem : Formulations and Algorithms," *European Journal of Operational Research*, Vol.120(2000), pp. 614-631.
- [9] Elhedhli, S. and F.X. Hu, "Hub-and-spoke Network Design with Congestion," *Computer and Operations Research*, Vol.32(2005), pp.1615-1632.
- [10] Ernst, A.T. and M. Krishnamoorthy, "Efficient Algorithms for the Uncapacitated Single Allocation p-hub Median Problem," *Location Science*, Vol.4(1996), pp.139-154.
- [11] Hansen, P.H., B. Hegedahl, S. Hjortkjaer, and B. Obel, "A Heuristic Solution to the Warehouse Location-routing Problem," *European Journal of Operational Research*, Vol. 76(1994), pp.111-127.
- [12] Helm, S.A., "A Hybrid Heuristic for the Uncapacitated Hub Location Problem," *Euro-*

- pean Journal of Operational Research*, Vol.106(1998), pp.489-499.
- [13] Helm, S.A. and M.A. Venkataramanan, "Solution Approaches to Hub Location Problems," *Annals of Operations Research*, Vol.78(1998), pp.31-50.
- [14] Jacobsen, S.K. and O.B.G. Madsen, "A Comparative Study of Heuristics for a Two-level Routing-location Problem", *European Journal of Operational Research*, Vol.5(1980), pp.378-387.
- [15] Kim, Y.K., J.Y. Kim, and Y. Kim, "A Coevolutionary Algorithm for Balancing and Sequencing in mixed model assembly lines", *Applied Intelligence*, Vol.13(2000), pp.247-258.
- [16] Kim, Y.K., K. Park, and J. Ko, "A Symbiotic Evolutionary Algorithm for the Integration of Process Planning and Job Shop Scheduling," *Computers & Operations Research*, Vol.30(2003), pp.1151-1171.
- [17] Laporte, G., Y. Nobert, and S. Taillefer, "Solving a Family of Multi-depot Vehicle Routing and Location-routing Problems," *Transportation Science*, Vol.22(1988), pp. 161-172.
- [18] Lumsden, K., F. Dallari, and R. Ruggeri, "Improving the Efficiency of the Hub and Spoke System for the SKF European Distribution Network," *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol.29(1999), pp.50-64.
- [19] Melkote, S. and M.S. Daskin, "Capacitated Facility Location/Network Design Problems," *European Journal of Operational Research*, Vol.129(2001), pp.481-495.
- [20] Moriarty, D.E. and R. Miiikkulainen, "Forming Neural Networks through Efficient and Adaptive Coevolution," *Evolutionary Computation*, Vol.5(1997), pp.373-399.
- [21] Perl, J. and M.S. Daskin, "A Warehouse Location Problem," *Transportation Research Quarterly B*, Vol.19(1985), pp.381-396.
- [22] Potter, M.A., "The Design and Analysis of a Computational Model of Cooperative Coevolution," Ph.D. dissertation, George Mason University, (1997).
- [23] Skorin-Kapov, D., J. Skorin-Kapov, and M. O'Kelly, "Tight Linear Programming Relaxations of Uncapacitated p-hub Median Problems," *European Journal of Operational Research*, Vol.94(1996), pp.582-593.
- [24] Shin, K.S., "A Set of Data for Extended Hub-and-spoke Transportation Networks Design using an Symbiotic Evolutionary Algorithm," available at <http://syslab.chonnam.ac.kr/links/EH SNPdata.zip>, (2006).
- [25] Srivastava, R. and W.C. Benton, "The Location-routing Problem : Consideration in Physical Distribution System Design," *Computers and Operations Research*, Vol.6 (1990), pp.427-435.
- [26] Topcuoglu, H., F. Corut, M. Ermis, and G. Yilmaz, "Solving the Uncapacitated Hub Location Problem using Genetic Algorithms," *Computer and Operations Research*, Vol.32(2005), pp.967-984.
- [27] Wu, T.-H., C. Low, and J.-W. Bai, "Heuristic Solutions to Multi-depot Location-routing Problems," *Computers & Operations Research*, Vol.29(2002), pp.1393-1415.
- [28] Zäpfel, G. and M. Wasner, "An Integrated Multi-depot Hub-location Vehicle Routing Model for Network Planning of Parcel Service," *International Journal of Production Economics*, Vol.90(2004), pp.403-419.