

## 순열 표현 기반의 협력적 공진화 알고리즘을 사용한 다단계 공급사슬 네트워크의 설계\*

한 용 호\*\*

Multi-Stage Supply Chain Network Design Using a Cooperative  
Coevolutionary Algorithm Based on a Permutation Representation

Yongho Han\*\*

### ■ Abstract ■

This paper addresses a network design problem in a supply chain system that involves locating both plants and distribution centers, and determining the best strategy for distributing products from the suppliers to the plants, from the plants to the distribution centers and from the distribution centers to the customers. This paper suggests a cooperative coevolutionary algorithm (CCEA) approach to solve the model. First, the problem is decomposed into three subproblems for each of which the chromosome population is created correspondingly. Each chromosome in each population is represented as a permutation denoting the priority. Then an algorithm generating a solution from the combined set of chromosomes from each population is suggested. Also an algorithm evaluating the performance of a solution is suggested. An experimental study is carried out. The results show that our CCEA tends to generate better solutions than the previous CCEA as the problem size gets larger and that the permutation representation for chromosome used here is better than other representation.

Keywords : Cooperative Coevolutionary Algorithm, Genetic Algorithm, Supply Chain, Network Design, Nonlinear Multi-Objective Optimization

논문접수일 : 2011년 11월 02일    논문수정일 : 2012년 05월 21일    논문게재확정일 : 2012년 06월 18일

\* 이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2010-327-B00187).

\*\* 부산외국어대학교 e-비즈니스학과

## 1. 서 론

공급사슬 네트워크 설계 문제는 공급사슬관리의 주요 이슈 가운데 하나이다. 시장 환경이 변화함에 따라 기업은 공급사슬 네트워크의 재설계를 통해 가동할 공장 및 이용할 유통센터 등을 변경함으로써 유연성을 확보할 수 있기 때문이다. 공급사슬 네트워크의 설계에는 각종 시설의 입지(수 및 위치), 시설별 능력의 할당, 시설별 고객의 할당 등에 관한 의사결정이 포함된다. 시설의 입지결정은 공급사슬의 성과에 장기적으로 영향을 미치는 전략적 성격을 지닌다. 시설별 능력의 할당은 시설의 이용률과 수요에 대한 대응성을 절충하여 결정해야 한다. 그리고 시설별 고객의 할당은 시장의 상황이 바뀌면 그에 맞추어 의사결정이 다시 이루어져야 한다. 이러한 공급사슬 네트워크의 설계 문제는 전략적 요인, 기술적 요인, (세금 환율 등) 거시경제적 요인 등 다양한 요인들을 고려해서 결정해야 하나, 일반적으로 수송비용을 가장 중요한 요소로 간주한다.

공급사슬 네트워크 설계 문제란 일반적으로 공급업체, 공장 및 물류센터 등 각종 시설의 능력을 초과함이 없이 모든 고객들의 수요를 만족시키는데 관련된 총 비용을 최소화시킬 수 있도록 운영할 시설(예 : 공장 및 유통센터)들을 결정하고, 또한 각 계층별 인바운드 및 아웃바운드 제품 수송량을 결정함으로써 공급사슬 네트워크의 구조를 정하는 것을 의미한다. 이 문제에 대해 최적해를 구하기 위해서는(총 비용의 구성요소에 해당하는) 사용될 공장 및 유통센터들의 개설 및 운영비용과, 인바운드 및 아웃바운드의 수송비용 사이의 절충을 필요로 한다.

이제까지 공급사슬 네트워크 설계 문제에 대하여 다양한 형태의 모델이 제시되어 왔다. Melo et al.[17]은 이제까지 발표된 100여 개의 모델들을 시설군(공급업체, 공장, 유통센터, 고객 등)의 계층수, 입지 결정이 이루어지는 계층수, 제품 종류(단종, 다종), 모델유형(확정적, 확률적), 계획대상기간(다기간, 단일기간) 등의 특성에 따라 분류한 바 있다.

Geoffrion and Powers[13]는 공급사슬 네트워크 설계 문제의 복잡도는 NP-hard로서 문제의 크기가 커지면 적절한 시간 내에 최적해를 구하기 힘들다고 지적하였다. 이 문제에 대하여 지금까지 다양한 접근방법들이 시도되었다. 전통적으로 라그랑지 완화법과 Benders 분할법의 큰 두 줄기의 접근방법이 사용되었다. 라그랑지 완화법은 Martin and Pelegrin[16], Pirkul and Jayaraman[19] 등에 의해, 그리고 Benders 분할법(decomposition)은 Geoffrion and Graves[12]와 Dogan and Goetschalckx[8] 등에 의해 사용된 바 있다.

그 후 유전 알고리즘(genetic algorithm; 이하 GA로 칭함)이 공급사슬 네트워크 설계 문제에 성공적으로 적용되기 시작하였다. 유전 알고리즘은 Vignaux and Michalewicz[23]와 Michalewicz et al.[18]에 의해 각각 선형 수송 문제(수송비가 수송량에 비례하는 경우)와 비선형 수송 문제(수송비가 수송량에 비례하지 않는 경우)의 해결에 처음으로 적용되었다. 그들의 접근방법에서 행렬 기반의 염색체 표현법(representation)이 사용되었다. 공급지의 수( $m$ )와 수요지의 수( $n$ )가 주어졌을 때 행렬의 차원은  $m \times n$ 이 된다. 이 염색체 표현법은 매우 간단하지만 실행가능해를 얻기 위하여 특별히 고안된 교배(crossover) 연산자와 돌연변이(mutation) 연산자를 필요로 한다. 그 후 Prüfer 수 표현법을 사용하는 spanning tree 기반의 유전 알고리즘이 Gen and Cheng[11]에 의하여 제시되고, 그 후 Syarif et al.[22]에 의해 사용된 바 있다. 그 후 GA의 탐색과정에서 수리(repair) 메커니즘의 사용을 피하기 위하여 우선순위(priority) 기반의 염색체 표현법과 이 염색체에 대한 대한 인코딩 방법이 개발되어 Gen et al.[10], Altiparmak et al.[4] 및 Lin et al.[15] 등에 의해 사용된 바 있다.

최근 들어, 협력적 공진화 알고리즘(cooperative coevolutionary algorithm; 이하 CCEA로 칭함)이 최적화 문제에 성공적으로 적용되고 있다. CCEA는 상호의존적인 여러 부분문제들로 구성되어 복잡도가 높은 최적화 문제의 해를 구하는 데 효과적인

인 것으로 알려져 있다(Potter[20]). De Jong and Potter[5]는 각각 독립적으로 진화하는 부분문제들을 결합함으로써 복잡한 해들을 진화시킬 수 있는 일반적인 프레임워크를 제시한 바 있다. Potter and De Jong[21]은 이 접근방법을 함수의 최적화에 적용한 바 있다. CCEA는 그 외 로봇 학습과 인공지능 경망 트레이닝 등에도 사용되었다.

CCEA에서는 대상 문제를 2개 이상의 하위 부분 문제로 분해하고, 각 부분문제에 대응하여 하나씩의 모집단을 생성한다. 각 모집단은 독립적으로 GA에 의해 다음 세대로 진화해 간다. 매 세대마다 각 모집단으로부터 하나씩의 염색체 표현을 결합함으로써 대상 문제에 대한 하나의 해를 구할 수 있다. 그리고 주어진 해의 적합도(fitness)를 평가할 수 있는 적합도 함수를 정의한다. 이 적합도 함수에 기초하여, 주어진 부분문제에 대응하는 하나의 부분해가 다른 부분문제들에 대응하는 부분해와 얼마나 잘 협력하는 지를 반영하는 어떤 점수(credit)를 주어진 부분해에 할당한다. 부분해에 대한 이 점수는 다음 세대에서 더 나은 해로 진화하는 데 사용된다. CCEA는 문제에 대한 근사해를 생성하는 일종의 휴리스틱 기법으로 분류된다. CCEA는 최근 들어 2단계 수송문제(한용호[1]) 및 역물류 문제(한용호[2])에 성공적으로 적용된 바 있다.

본 연구의 궁극적인 목표는 CCEA가 다양한 형태의 공급사슬 설계 문제에 효과적으로 사용될 수 있음을 보이는 것이다. 이에 따라 본 연구에서는 공급업체, 공장, 유통업체, 고객의 4계층으로 구성된 공급사슬을 대상으로 한다. 3단계의 수송에 따른 총비용(시설의 개설 및 운영비용, 수송비용 등)의 최소화와 동일 유형의 시설(공장 및 유통센터) 간 이용률 편차의 최소화를 동시에 이룰 수 있도록 1) 공장 및 유통센터의 2개 계층에서의 입지를 결정하고, 2) 각 단계별 시설간의 수송량을 결정함으로써 공급사슬 네트워크를 설계하고자 한다.

이 문제는 모형 내 비선형 다목적 함수의 특징으로 인하여 문제의 복잡도가 높으며, 이제까지의 선행연구에서 잘 다루어지지 않은 유형에 속한다.

한용호[3]는 이 문제에 대하여 CCEA를 적용한 해법을 제시한 바 있다. 이 CCEA 해법에서 특정 고객의 수요는 기본적으로 공급업체, 공장 및 유통센터로 구성되는 하나의 사슬을 경유해서 공급된다는 사실을 근거로 하여, 부분문제 내 하나의 염색체의 각 유전인자의 값은 특정 고객 수요를 담당할 공급노드를 의미하는 정수으로써 표현하였다.

각 염색체에 대응하는 해는 그 염색체에 표현된 값에 적절한 인코딩 절차를 거쳐 구해지기 때문에 염색체의 표현방법의 선택은 CCEA의 최적화 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 CCEA 해법 안에서 염색체의 또 다른 표현방법의 적용을 시도해 보고자 한다. 즉, 부분문제 내 하나의 염색체의 각 유전인자의 값으로 정수들의 하나의 순열(permutation)을 배정한다. 이 유전인자의 값은 인코딩시 각 부분문제에서 수송량 배정의 상대적 우선순위로 사용된다.

본 연구에서는 이러한 순열 형태의 염색체 표현방법을 기반으로 하여 본 문제에 대한 우수한 근사해를 효과적으로 생성할 수 있는 CCEA를 설계하고, 이전의 CCEA 기법(한용호[3])과 그 성능을 비교해 보고자 한다. 제 2장에서는 본 문제의 수리 모형을 제시한다. 제 3장에서는 본 문제에 대한 CCEA의 세부 내용을 설계한다. 제 4장에서는 일련의 테스트 문제들에 대하여 본 연구에서 제시하는 CCEA와 비교 대상이 되는 GA를 각각 적용하여 그 결과를 비교, 분석한다. 마지막으로 제 5장에서 결론을 맺는다.

## 2. 수리 모형

본 연구에서는 공급업체, 공장, 유통센터 및 고객으로 구성된 4계층의 공급사슬을 대상으로 한다. 각 공급업체의 공급능력, 각 공장에서의 생산능력, 각 유통센터에서의 저장능력, 그리고 각 수요지에서의 수요량은 사전에 주어진다. 최종고객의 수요를 충족시키기 위하여 공급업체-공장, 공장-유통업체 및 유통업체-고객 간의 3계층에 걸쳐 제품이

수송된다. 실제 운영될 공장 및 유통센터의 수는 각각 사전에 주어진 수를 초과할 수 없다.

이러한 상황 하에서 1) 공장 및 유통센터의 2개 계층에서 사용될 시설을 결정하고, 2) 공급업체-공장, 공장-유통업체 및 유통업체-고객 간의 3계층에 걸쳐 제품 수송량도 결정함으로써, 공급사슬 네트워크를 설계하고자 한다. 이 의사결정은 두 개의 목적을 동시에 추구하는 방향으로 이루어진다. 첫 번째 목적은 관련 총비용을 최소화하는 것이다. 여기서 총비용은 공급업체-공장, 공장-유통업체 및 유통업체-고객 간의 각 계층별 수송비용, 공장 및 유통센터들의 개설 및 운영비용의 합으로 구성된다. 두 번째 목적은 운영되는 각 공장간 이용률의 편차와, 운영되는 각 유통센터 간 이용률의 편차의 가중합을 최소화하는 것이다.

이 문제를 다음과 같은 수리모형으로 정식화할 수 있다.

#### 가정 :

- 1) 각 고객의 수요량은 사전에 알려져 있다.
- 2) 이용가능한 각 유통센터들의 수와 제품의 저장 능력은 사전에 알려져 있다.
- 3) 두 목적함수 값의 가중합을 구하여 이 값을 단일 목적함수의 값으로 사용한다. 따라서 Pareto 최적해는 구하지 않는다.

#### 파라미터 :

- $a_i$  : 공급업체  $i$ 의 공급능력( $i \in I$ )  
 $b_j$  : 공장  $j$ 의 생산능력( $j \in J$ )  
 $c_k$  : 유통센터  $k$ 의 저장능력( $k \in K$ )  
 $d_l$  : 고객  $l$ 의 수요량( $l \in L$ )  
 $s_{ij}$  : 공급업체  $i$ 로부터 공장  $j$ 로의 제품단위당 수송비용  
 $t_{jk}$  : 공장  $j$ 로부터 유통센터  $k$ 로의 제품단위당 수송비용  
 $u_{kl}$  : 유통센터  $k$ 로부터 고객  $l$ 로의 제품단위당 수송비용  
 $f_j$  : 공장  $j$ 의 운영을 위한 고정비  
 $g_k$  : 유통센터  $k$ 의 운영을 위한 고정비

$P$  : 운영할 수 있는 공장 수의 상한

$W$  : 운영할 수 있는 유통센터 수의 상한

$a_1$  : 첫 번째 목적함수의 가중치

$a_2$  : 두 번째 목적함수의 가중치

$r_1$  : 공장 간 이용률 편차 제곱합의 가중치

$r_2$  : 유통센터 간 이용률 편차 제곱합의 가중치

#### 결정변수 :

$v_j$  : 0-1 변수(공장  $j$ 의 운영시 1의 값을, 그렇지 않은 경우 0의 값을 취함)

$w_k$  : 0-1 변수(유통센터  $k$ 의 운영시 1의 값을, 그렇지 않은 경우 0의 값을 취함)

$x_{ij}$  : 공급업체  $i$ 로부터 공장  $j$ 로의 제품수송량

$y_{jk}$  : 공장  $j$ 로부터 유통센터  $k$ 로의 제품수송량

$z_{kl}$  : 유통센터  $k$ 로부터 고객  $l$ 로의 제품수송량

$$\begin{aligned} \text{Minimize } Z_1 = & \sum_i \sum_j s_{ij} x_{ij} + \sum_j \sum_k t_{jk} y_{jk} \\ & + \sum_k \sum_l u_{kl} z_{kl} + \sum_j f_j v_j + \sum_k g_k w_k \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{Minimize } Z_2 =$$

$$\begin{aligned} r_1 [ & \sum_j (\sum_k y_{jk} / b_j - \sum_j \sum_k y_{jk} / \sum_j b_j)^2 / |J| ]^{1/2} \\ & + r_2 [ \sum_k (\sum_l z_{kl} / c_k - \sum_k \sum_l z_{kl} / \sum_k c_k)^2 / |K| ]^{1/2} \end{aligned} \quad (2)$$

subject to

$$\sum_j x_{ij} \leq a_i, \forall i \quad (3)$$

$$\sum_k y_{jk} \leq b_j v_j, \forall j \quad (4)$$

$$\sum_j v_j \leq P \quad (5)$$

$$\sum_l z_{kl} \leq c_k w_k, \forall k \quad (6)$$

$$\sum_k w_k \leq W, \quad (7)$$

$$\sum_k z_{kl} \geq d_l, \forall l \quad (8)$$

$$v_j, w_k = \{0, 1\} \forall j, k \quad (9)$$

$$x_{ij}, y_{jk}, z_{kl} \geq 0, \forall i, j, k, l \quad (10)$$

식 (1)은 첫 번째 목적함수로서, 단계별(공급업체와 공장 간, 공장과 유통센터 간, 유통센터와 수요지 간) 수송비용, 공장 운영비용 및 유통센터 운영비용의 합을 나타낸다. 식 (2)는 두 번째 목적함

수로서, 운영되는 각 공장간 이용률의 편차 및 각 유통센터간의 이용률의 편차의 가중합을 나타낸다. 식 (3)은 각 공급업체의 공급능력에 대한 제약을 나타낸다. 식 (4)는 각 공장의 생산능력에 대한 제약을 나타낸다. 식 (5)는 가동될 공장의 수는 사전에 주어진 상한을 초과할 수 없음을 나타낸다. 식 (6)은 각 유통센터의 저장능력에 대한 제약을 나타낸다. 식 (7)은 사용될 유통센터의 수는 사전에 주어진 상한을 초과할 수 없음을 나타낸다. 식 (8)은 각 고객의 수요량은 운영될 유통센터들에 의해 공급되어야 함을 나타낸다. 식 (9)와 식 (10)은 해당 결정변수의 이진 조건 및 비음 조건을 나타낸다. 두 목적함수에 대한 가중치  $q_1, q_2$  를 사용하여 식 (1)과 식 (2)의 두 목적함수를 식 (11)과 같이 하나의 비선형 목적함수로 결합시킬 수 있다. 결합된 목적함수는 비선형 형태를 지닌다.

$$\text{Minimize } Z = q_1 Z_1 + q_2 Z_2 \quad (11)$$

이 수리 모형은 기존에 잘 다루어지지 않은 공급사슬 네트워크 설계 모형으로, 비선형 목적함수로 인해 전통적인 접근방법으로는 적절한 해법을 찾기 어려운 유형에 속한다.

### 3. CCEA의 설계

여기서는 앞 절의 수리 모형에 대해 우수한 근사해를 구하기 위하여 CCEA 알고리즘의 기본적 수행절차에 따라 CCEA 알고리즘의 세부 내용을 설계한다.

#### 3.1 CCEA의 일반적 수행절차

공급사슬 네트워크 설계 문제에 대한 CCEA의 기본적 수행 절차를 <그림 1>과 같이 요약할 수 있다. 본 연구에서는 이 절차에 따라 대상문제의 부분문제로의 분할 및 부분문제별 염색체 모집단의 생성, 염색체로부터 해의 생성 알고리즘, 염색

체의 적합도 평가방법, 그리고 모집단의 세대교체를 위한 유전 연산자를 소개한다.

- 단계 1 : 대상 문제를 3개의 부분문제로 분할하고, 각 부분문제별로 이에 대응하는 염색체 모집단  $P_1, P_2,$  및  $P_3$ 를 생성한다.
- 단계 2 : 모집단  $P_1, P_2$  및  $P_3$ 의 평가 시에 사용할 협력자  $c_1, c_2$  및  $c_3$ 의 초기값을 지정한다.
- 단계 3 : 종료 조건을 만족할 때까지 3.1~3.4를 반복 실행한다.
- 3.1 모집단  $P_3$ 의 각 염색체  $i$ 에 대하여 {
- 1) 염색체  $i$ 와 협력자  $c_1, c_2$ 를 결합하여 하나의 해  $S_3$ 를 생성한다.
  - 2)  $S_3$ 를 기반으로 하여 염색체  $i$ 의 적합도를 평가한다.
  - 3)  $P_3$ 내 염색체  $i$  중에서 가장 높은 적합도를 지닌 염색체를 협력자  $c_3$ 로 둔다. }
- 3.2 모집단  $P_2$ 의 각 염색체  $i$ 에 대하여 {
- 1) 염색체  $i$ 와 협력자  $c_1, c_3$ 를 결합하여 하나의 해  $S_2$ 를 생성한다.
  - 2)  $S_2$ 를 기반으로 하여 염색체  $i$ 의 적합도를 평가한다.
  - 3)  $P_2$ 내 염색체 중에서 가장 높은 적합도를 지닌 염색체를 협력자  $c_2$ 로 둔다. }
- 3.3 모집단  $P_1$ 의 각 염색체  $i$ 에 대하여 {
- 1) 염색체  $i$ 와 협력자  $c_2, c_3$ 를 결합하여 하나의 해  $S_1$ 를 생성한다.
  - 2)  $S_1$ 를 기반으로 하여 염색체  $i$ 의 적합도를 평가한다.
  - 3)  $P_1$ 내 염색체 중에서 가장 높은 적합도를 지닌 염색체를 협력자  $c_1$ 로 둔다. }
- 3.4 모집단  $P_1, P_2$  및  $P_3$ 에 대하여 독립적으로 유전 연산을 적용하여 새로운 세대의 염색체들을 생성한다.
- 단계 4 : 생성된 해 중에서 가장 좋은 해를 대상 문제의 근사해로 얻는다.

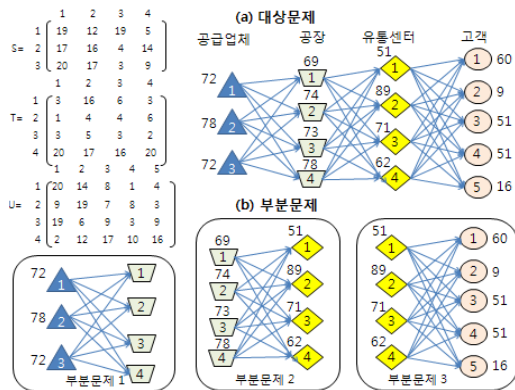
<그림 1> 공급사슬 네트워크 설계 문제에 대한 CCEA의 기본적 수행절차

#### 3.2 부분문제별 염색체 모집단의 생성

##### 3.2.1 대상문제의 분할

먼저 공급사슬 네트워크 설계 문제를 수송단계

에 따라 3개의 부분문제로 분할한다. <그림 2>(a)는 3개의 공급업체, 4개의 공장, 4개의 유통센터 및 5명의 고객으로 구성된 공급사슬에 대응하는 하나의 대상문제를 나타낸다. 운영될 공장 및 유통센터는 각각 최대 3개까지로 제한되어 있다고 가정한다. 이 문제를 <그림 2>(b)와 같이 3개의 부분문제로 분할할 수 있다. 여기서 부분문제 1은 공급업체와 공장 사이의 수송문제를, 부분문제 2는 공장과 유통센터 사이의 수송문제를, 그리고 부분문제 3은 유통센터와 고객 사이의 수송문제로 간주할 수 있다. 인접한 두 부분문제 사이에는 상호의존성이 존재하기 때문에 각 부분문제의 해를 독립적으로 구할 수는 없다. 이러한 부분문제 간 상호의존성은 제 3.3.2절에서 자세히 설명된다.



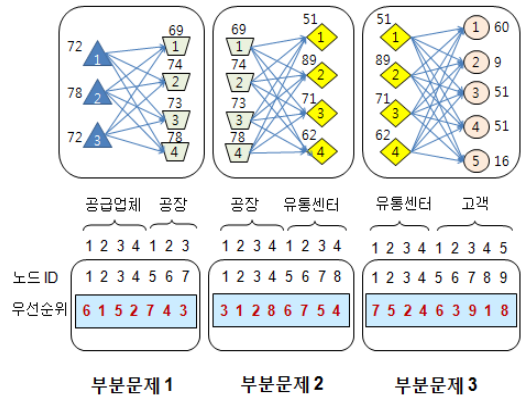
<그림 2> 대상문제의 부분문제로의 분할

3.2.2 모집단의 생성 및 염색체의 표현

이제 각 부분문제에 대응하는 염색체의 모집단을 생성해야 한다. 각 염색체에 표현된 값을 기반으로 적절한 인코딩 절차를 거쳐 이에 대응하는 해를 구하기 때문에, 염색체의 표현방법의 선택은 CCEA의 최적화에 대한 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 Gen et al.[10]에 의하여 제시된 우선순위(priority) 기반의 표현방법을 채택해 사용키로 한다. 하나의 염색체는 여러 개의 유전인자(gene)로 구성된다. 각 유전인자는 염색체 구조 내에서의 상대적 위치와 그 유전인자가 취하는 값이라는 두 가

지 요소를 지닌다. 각 부분문제에 대하여 이 두 가지 요소를 중심으로 설명한다.

<그림 3>에서 부분문제 1의 경우, 먼저 하나의 염색체의 각 유전인자의 위치는 공급업체 또는 공장 중 하나를 의미하는 특정한 노드를 나타낸다. 하나의 염색체는 공급업체의 수( $|I|$ )와 공장의 수( $|J|$ )의 합( $|I|+|J|$ )에 해당하는 갯수의 유전인자로 구성된다. 각 유전인자의 값은 1과  $|I|+|J|$ 사이의 정수들의 순열(permutation) 중 하나로 구성된다. 이렇게 구성된 각 유전인자의 값은 부분문제 1의 공급-수요 트리에서 해당 노드의 배정을 위한 상대적 우선순위를 의미한다.



<그림 3> 부분문제별 염색체 표현 예

부분문제 2의 경우, 부분문제 1의 경우와 마찬가지로 방법으로, 유전인자의 위치는 공장 또는 유통센터 중 하나를 의미하는 특정한 노드를 나타낸다. 하나의 염색체는 공장의 수( $|J|$ )와 유통센터의 수( $|K|$ )의 합( $|J|+|K|$ )에 해당하는 갯수의 유전인자로 구성된다. 각 유전인자의 값은 1과  $|J|+|K|$ 사이의 정수들의 순열(permutation) 중 하나로 구성된다.

부분문제 3의 경우도, 부분문제 1 및 2와 마찬가지로 유전인자의 위치는 유통센터 또는 고객 중 하나를 의미하는 특정한 노드를 나타낸다. 하나의 염색체는 유통센터의 수( $|K|$ )와 유통센터의 수( $|L|$ )의 합( $|K|+|L|$ )에 해당하는 수만큼의 유전인자로 구성된다. 각 유전인자의 값은 1과  $|K|+|L|$ 사이의 정수

들의 순열(permutation) 중 하나로 구성된다.

<그림 3>은 부분문제 1, 2, 3에 대응하는 염색체를 각각 1부터 7, 1부터 8, 그리고 1부터 9까지의 정수로 된 하나의 순열로 표현한 예를 나타낸다. 따라서 각 부분문제에 대응하는 염색체는 각각 7, 8, 9 디지트(digit)로 구성된다. 각 부분문제에 대응하는 염색체는 부분문제의 해를 구할 수 있는 정보를 지니고 있기 때문에, 이 세 부분문제의 염색체가 함께 결합될 때 비로소 이에 대응하는 전체 문제에 대한 하나의 해를 구할 수 있다.

### 3.3 염색체로부터 해의 생성

부분문제 1, 2, 3은 사실상 동일한 유형의 문제이다. 따라서 하나의 부분문제의 염색체로부터 이에 대응하는 부분해를 구할 수 있는 알고리즘을 제안하면, 이 알고리즘을 각 부분문제에서 반복적으로 이용할 수 있다.

#### 3.3.1 부분문제 염색체로부터 해의 생성 알고리즘

임의의 부분문제에 대하여 하나의 염색체가 주어졌을 때, 이에 대응하는 해를 구하는 알고리즘이 필요하다. 본 연구에서는 Gen et al.[10]에 의하여 제시된 <그림 4>의 알고리즘을 채택해 이용하기로 한다. 이 알고리즘에서는 주어진 염색체 정보를 바탕으로 각 공급지와 각 수요지 사이에 수송량의 할당을 의미하는 아크(arc)를 순차적으로 하나씩 추가시켜 나감으로써, 결과적으로 그 염색체에 대응하는 하나의 수송 트리를 완성한다.

**입력물 :**

- $S$  : 공급 노드들의 집합
- $D$  : 수요 노드들의 집합
- $a_i$  : 공급 노드  $i$ 의 공급능력  $\forall i \in S$
- $b_j$  : 수요 노드  $j$ 의 수요량  $\forall j \in D$
- $c_{ij}$  : 공급 노드  $i$ 로부터 수요 노드  $j$ 로의 제품 단위당 운반비용  $\forall i \in S, \forall j \in D$
- $\nu(i+j)$  : 염색체 내 유전인자의 값  $\forall i \in S, \forall j \in D$

**출력물 :**

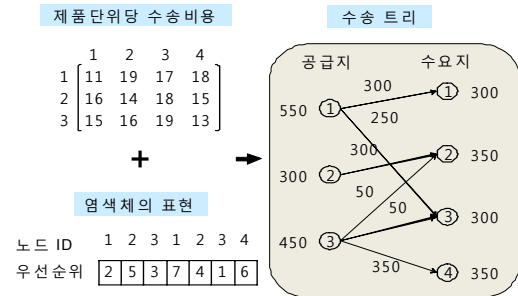
$q_{ij}$  : 공급지  $i$ 로부터 수요지  $j$ 로의 제품 수송량

**절차 :**

- 단계 1 :  $q_{ij} \leftarrow 0, \forall i \in S, \forall j \in D$
- 단계 2 :  $l \leftarrow \arg \max \{ \nu(t), t \in |S| + |D| \}$ ;  
//하나의 노드를 선택한다.
- 단계 3 :  $l \in S$ 이면,  
 $i^* \leftarrow l$ ; //하나의 공급지를 선택한다.  
 $j^* \leftarrow \arg \min \{ c_{ij} | \nu(j) \neq 0, j \in D \}$   
//최저비용 수요지를 선택한다.  
그렇지 않으면,  
 $j^* \leftarrow l$ ; //하나의 수요지를 선택한다.  
 $i^* \leftarrow \arg \min \{ c_{ij} | \nu(j) \neq 0, i \in S \}$   
//최저비용 공급지를 선택한다.
- 단계 4 :  $q_{i^*j^*} \leftarrow \min \{ a_{i^*}, b_{j^*} \}$ ; //할당량을 구한다.  
 $a_{i^*} = a_{i^*} - q_{i^*j^*}, b_{j^*} = b_{j^*} - q_{i^*j^*}$   
//공급지( $i^*$ )와 수요지( $j^*$ )의 이용 가능량을 수정한다.
- 단계 5 :  $a_{i^*} = 0$ 이면,  $\nu(i^*) = 0$   
 $b_{j^*} = 0$ 이면,  $\nu(j^*) = 0$
- 단계 6 :  $\nu(|S| + j) = 0 \forall j \in D$ 이면, 총 수송비용을 계산하고 이 절차를 종료한다.  
그렇지 않으면, 단계 1로 간다.

<그림 4> 부분문제 염색체로부터 해의 생성 알고리즘(Gen et al.[10])

예를 들어, <그림 5>는 3개의 공급지와 4개의 수요지로 구성된 부분문제에서 각 공급지의 공급 능력 및 각 수요지의 수요량, 각 공급지와 각 수요지 간 수송비용, 그리고 우선순위 기반의 염색체 등의 입력물이 주어졌을 때, <그림 4>의 알고리즘의 적용을 통해 생성된 하나의 해 즉, 수송 트리를 나타낸 것이다.



<그림 5> 수송 트리의 생성 예

### 3.3.2 세 부분문제 간의 상호의존성

앞 절에서는 하나의 부분문제의 염색체가 하나 주어졌을 때 이에 대응하는 해를 구하는 알고리즘을 소개하였다. 이제 각 부분문제의 염색체에 대응하는 해를 모두 구하기 위해서는 세 부분문제 간의 상호의존관계를 파악해야 한다. 각 부분문제 간의 상호의존성은 <그림 6>과 같이 표현될 수 있다. 염색체 정보를 기반으로 하여 이에 대응하는 부분해를 생성하는 <그림 4>의 알고리즘을 사용하여, 먼저 부분문제 3에 대한 해  $z_{kl}$ 를 구한다. 그 다음  $c'_k = \sum z_{kl}$ 의 값을 계산하여 그 값을 부분문제 2에 입력물로 제공한다. 그 다음 <그림 4>의 알고리즘을 사용하여 부분문제 2에 대한 해  $y_{jk}$ 를 구한다.

그 다음  $b'_j = \sum y_{jk}$ 의 값을 부분문제 1에 입력물로 제공한다. 마지막으로 부분문제 1에서는 <그림 4>의 알고리즘을 사용하여 부분문제 1에 대한 해  $x_{ij}$ 를 구한다. 이처럼 문제의 성격상 각 부분문제들은 부분문제 3, 2, 1의 순으로 그 해를 구함으로써, 전체 문제에 대한 해를 구할 수 있다. 결과적으로 이러한 접근방법을 통해 수리 모형에서의 제약식 (5)와 식 (7)을 제외한 나머지 제약식들을 모두 충족시킬 수 있다.

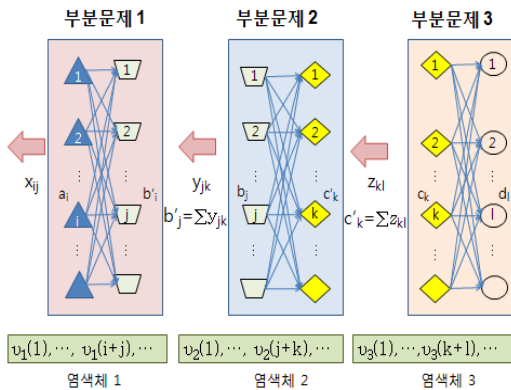
<그림 4>의 알고리즘을 바탕으로 부분문제 3, 2, 1의 순으로 그 해를 구할 때 필요한 입력물 및 산출물을 <표 1>과 같이 요약할 수 있다.

### 3.4 적합도 평가

이제 세 모집단으로부터 나온 하나씩의 염색체를 결합함으로써 생성된 하나의 해의 적합도를 평가할 수 있어야 한다. 먼저 염색체의 적합도를 평가하는 방법을 소개한다. 그리고 이 방법의 구현에 필요한 적합도 함수를 설정한다. 마지막으로 적합도 평가 알고리즘을 제시한다.

#### 3.4.1 염색체에 대한 적합도의 평가 방법

3개의 모집단으로부터 나온 각 염색체를 결합시키면 하나의 해를 구할 수 있다. 세 모집단을 대상으로 하는 CCEA에서 평가 대상 모집단의 특정 염



<그림 6> 세 부분문제 간의 상호의존성

<표 1> 부분문제에 대한 해 생성 알고리즘의 입력물 및 산출물

		부분문제		
		1	2	3
입력물	공급노드 집합	$I$	$J$	$K$
	수요노드 집합	$J$	$K$	$L$
	공급노드의 공급능력	$a_i \quad \forall i \in I$	$b_j \quad \forall j \in J$	$c_k \quad \forall k \in K$
	수요노드의 저장능력/수요량	$b'_j \quad \forall j \in J$	$c'_k \quad \forall k \in K$	$d_l \quad \forall l \in L$
	제품단위당 운반비용	$s_{ij}$	$t_{jk}$	$u_{kl}$
	염색체	$v_1(i+j)$	$v_2(j+k)$	$v_3(k+l)$
	산출물	수송 할당량	$x_{ij}$	$y_{jk}$
	수요노드별 확정 수요량	$b'_j$	$c'_k$	



색체는 나머지 두 모집단으로부터의 염색체와 결합될 때 비로소 그 적합도를 구할 수 있게 된다. 즉, 나머지 두 모집단으로부터 나온 각각의 염색체는 평가대상 염색체에 대한 협력자(collaborator)의 역할을 한다. 세대변천에 따라 세 모집단내 각 염색체를 평가하는 방법을 <그림 7>과 같이 나타낼 수 있다.



<그림 7> 3개 모집단의 염색체 결합에 대한 적합도 평가 방법

<그림 7>에서 (t-1)세대에서 t세대로 세대가 변천된 후, t세대에서 모집단 평가는 P<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>1</sub>의 순으로 이루어진다. 먼저 (t-1)세대에서 모집단 P<sub>2</sub> 및 P<sub>1</sub>의 염색체 평가 시에 각각 가장 좋은 적합도를 보였던 베스트 염색체를 협력자로서 평가대상이 되는 모집단 P<sub>3</sub>의 각 염색체와 결합시킴으로써, t세대에서 모집단 P<sub>3</sub>의 각 염색체의 적합도를 평가한다. 이러한 절차를 모집단 P<sub>3</sub>의 모든 염색체에 적용함으로써, 결과적으로 모집단 P<sub>3</sub> 안에서 가장 좋은 적합도를 지닌 베스트 염색체를 찾아낼 수 있다. 이 베스트 염색체는 다음 (t+1)세대에서 모집단 P<sub>2</sub> 및 P<sub>1</sub>의 평가 시에 협력자로 사용하기 위하여 다음 세대까지 보관된다. 이와 동일한 방법으로, P<sub>1</sub> 및 P<sub>2</sub>의 각 염색체의 적합도도 평가할 수 있다.

### 3.4.2 적합도 함수의 설정

적합도 함수는 염색체의 바람직한 정도를 정확

히 측정할 수 있어야 하며, 또한 각 염색체를 평가하는데 반복적으로 사용되기 때문에 계산 면에서 효율적이어야 한다. 본 연구의 대상 문제는 최적화 문제이기 때문에, 수리모형의 목적함수 식 (11)을 다음과 같이 적합도 함수의 형성에 기본적으로 이용할 수 있다.

$$Fitness = q_1 Z_1 + q_2 Z_2$$

### 3.4.3 제약 조건의 처리

제 3.3절에서 소개한 알고리즘을 통해 수리모형의 제약조건들 중 다음의 제약조건 식 (5)와 식 (7)을 제외한 나머지 제약조건들은 모두 충족된다.

$$\sum_j v_j \leq P \tag{5}$$

$$\sum_k w_k \leq W \tag{7}$$

이제 제약조건 식 (5)와 식 (7)이 충족되도록 하기 위하여 Goldberg[14]의 페널티 방법(penalty method)을 본 해법에 포함시킨다. 즉, 하나의 해가 제약조건 식 (5) 또는 식 (7)을 만족하지 못할 경우 적합도 함수가 취하는 값이 목적에 반하도록 하기 위하여 적합도 함수를 다음과 같은 형태로 수정한다.

$$Fitness = q_1 Z_1 + q_2 Z_2 + M \cdot \text{Max}(\sum_j v_j - P, 0) + M \cdot \text{Max}(\sum_k w_k - W, 0)$$

여기서 M은 매우 큰 임의의 수를 나타낸다. 제약조건 식 (5) 또는 식 (7)을 만족하지 못하는 평가대상 염색체는 세대변천 과정에서 자연스럽게 도태된다.

### 3.4.4 염색체에 대한 적합도 평가 알고리즘

이상의 설계과정을 거쳐 세 모집단 P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> 및 P<sub>3</sub>로부터 하나씩의 염색체(즉, 하나의 평가대상 염색체와 두 개의 협력자)가 주어졌을 때, 이에 대응하는 적합도를 평가하는 알고리즘을 <그림 8>과 같이 나타낼 수 있다.

단계 1:  $P_3$  내 하나의 염색체에 대하여 <그림 4>의 알고리즘을 호출하여  $[z_{kl}]$ 를 구한다.

단계 2:  $c'_k = \sum z_{kl}$ 를 구한다.

단계 3:  $w_k \leftarrow 0, \forall k \in K$

단계 4:  $k = 1$  to  $K$ 에 대하여  
 $b'_k = 0$  이면,  $\nu_3(k) \leftarrow 0$ .  
 그렇지 않으면,  $w_k \leftarrow 1$ .

단계 5:  $P_2$ 의 하나의 염색체에 대하여 <그림 4>의 알고리즘을 호출하여  $[y_{jk}]$ 를 구한다.

단계 6:  $b'_j = \sum y_{jk}$ 를 구한다.

단계 7:  $v_j \leftarrow 0, \forall j \in J$

단계 8:  $j = 1$  to  $J$ 에 대하여  
 $b'_j = 0$  이면,  $\nu_2(j) \leftarrow 0$ .  
 그렇지 않으면,  $v_j \leftarrow 1$ .

단계 9:  $P_1$ 의 하나의 염색체에 대하여 <그림 4> 알고리즘을 호출하여  $[x_{ij}]$ 를 구한다.

단계 10: 다음 적합도 함수를 이용하여 적합도를 평가한다.

$$\begin{aligned} \text{Fitness} = & q_1 Z_1 + q_2 Z_2 + M \cdot \text{Max} \left( \sum_j v_j - P, 0 \right) \\ & + M \cdot \text{Max} \left( \sum_k w_k - W, 0 \right) \end{aligned}$$

<그림 8> 염색체에 대한 적합도 평가 알고리즘

### 3.5 모집단의 세대교체를 위한 연산

CCEA에서 세대교체는 각 모집단별로 독립적인 유전 연산에 의하여 수행된다. 유전 연산은 선택(selection), 교배(crossover) 및 돌연변이(mutation)의 세 연산으로 구성된다. 선택 연산에서는 탐색에서 축적된 정보를 이용하고, 교배 및 돌연변이 연산에서는 새로운 해의 영역을 탐색한다.

#### 3.5.1 선택 연산

선택 연산으로는 랜덤, 비례, 토너먼트 및 랭크 기반 선택 등을 들 수 있다(Engelbrecht[9]). 본 연구에서는 세 모집단( $P_1, P_2$  및  $P_3$ )에서 모두 선택 연산으로서 De Jong[6]에 의해 제시된 엘리트리스트(elitist) 전략을 수반한 이진 토너먼트 선택 연산을 사용키로 한다. 이진 토너먼트 선택이란 균등 분포를 사용하여 선택 풀에서 두 개의 염색체를 선택하여, 그 중에서 적합도가 더 높은 염색체를 토너먼트

트의 승자로 지정하여 다음 세대의 염색체로 선택하는 방식이다. 엘리트리스트 전략이란 선택 과정을 통하여 가장 우수한 염색체가 선택되지 않더라도 새로운 세대에서 그 염색체를 보존하는 방식으로, 일반적으로 선택 연산에 대한 보조 수단으로 사용된다.

#### 3.5.2 교배 연산

교배 연산은 선택된 부모들 사이에 유전인자의 일부를 상호 교환하는 것으로, 새로운 해 공간을 탐색하기 위하여 수행된다. 본 연구에서는 세 모집단에서 모두 염색체를 순열(permutation) 형태로 표현한다. 순열 형태의 염색체에 적용할 수 있는 교배 연산으로는 partially mapping crossover(PMX), order crossover(OX), 및 position-based crossover(PX) 등의 연산을 들 수 있다. PMX와 OX 연산은 기존 two-cutpoint 연산의 변형이며, PMX 연산은 uniform 연산의 변형이다. 본 연구에서는 세 모집단에서 모두 order crossover 연산을 적용한다.

#### 3.5.3 돌연변이 연산

돌연변이 연산은 조기 수렴(premature convergence)을 방지하고 새로운 해 공간을 탐색하기 위하여 이루어진다. 돌연변이 연산은 일반적으로 염색체 내 유전인자의 값을 수정함으로써 이루어진다. 돌연변이 연산으로는 insert 연산 및 swap 연산이 주로 사용된다. insert 연산에서는 하나의 디지털(digit)을 무작위로 선택한 후, 그것을 무작위로 선택된 새로운 위치에 삽입한다. swap 연산에서는 두 디지털을 무작위로 선택한 후, 그들의 위치를 상호 교환한다. 본 연구에서는 세 모집단에서 모두 swap 연산을 적용한다.

## 4. 실험

### 4.1 실험 설정

본 연구에서 설계한 CCEA(이하 CCEA-1로 칭함)

의 성능을 파악하기 위하여 CCEA-1에 의해 생성된 해와 기존의 CCEA(한용호[3])(이하 CCEA-2로 칭함)에 의해 생성된 해를 비교해 보기로 한다. 비교의 공정성을 위해 두 알고리즘 CCEA-1와 CCEA-2 모두에 동일한 선택, 교배 및 돌연변이 연산자를 적용한다. 두 알고리즘 모두 마이크로소프트사의 비주얼 스튜디오 2009 환경의 비주얼 C++ 언어를 사용하여 객체지향 방식으로 코딩하였다.

<표 2>와 같이 모두 7개의 테스트 문제를 만들었다. 공급업체의 수는 각각 3에서부터 40까지, 공장 및 유통센터의 수는 모두 4에서 70까지, 그리고 고객의 수는 5에서 100까지 변경시켰다. 테스트 문제 내 모든 데이터는 엑셀을 이용하여 무작위로 생성되었다. 각 계층별 공급지와 수요지 사이의 수송비용은 모두 1과 20사이의 균등 분포(uniform distribution)로부터, 그리고 각 수요지의 수요량은 5와 60사이의 균등 분포로부터 생성하였다. 각 계층별 공급능력 및 저장능력은 모형의 제약조건을 감안하여 적절한 평균값을 지니는 균등 분포로부터 생성하였다. 그리고 다음의 파라미터 값을 사용하였다.  $r_1 = 0.6$ ,  $r_2 = 0.4$ .

<표 2> 테스트 문제

문제	공급 업체 수	공장 수	유통 센터 수	고객 수	공장 상한	유통센터 상한
1	3	4	4	5	3	3
2	4	5	5	10	4	4
3	4	5	5	15	4	4
4	8	10	10	20	7	7
5	10	20	20	40	14	14
6	15	25	25	50	20	20
7	40	70	70	100	40	40

7개의 테스트 문제 각각에 대하여 난수 생성에 사용되는 시드(seed) 값을 변경시켜가면서 CCEA-1와 CCEA-2를 각각 7회씩 반복 실행시킨다. 결과적으로 CCEA-1과 CCEA-2의 알고리즘을 각각 49회씩 실행시킨다.

#### 4.2 다목적함수들의 처리

다목적함수를 다루는 일반적인 방법은 각 목적함수의 상대적 중요성을 나타내는 가중치들의 값을 구할 수 있는지 여부에 따라 달라진다. 먼저, 각 목적함수의 상대적 중요성을 반영하는 가중치를 적절히 선택할 수 있는 경우 이 가중치를 각 목적함수와 선형결합함으로써 여러 목적함수들을 하나의 목적함수로 전환시키는 방법을 사용할 수 있다. 이 방법은 표준적인 CCEA 접근 방법을 바로 적용할 수 있다는 장점을 지니고 있다.

반면, 그러한 가중치들을 구하기 힘들거나 불가능할 경우 문제는 복잡해진다. 이 경우 미지의 가중치를 어렵짐작으로 추정하기 보다는 절충해(trade-off solution)의 집합을 구하는 것이 더 좋은 방법인된다. 이러한 유형의 문제는 파레토 최적(Pareto optimality)이라는 이름으로 많이 연구되어 왔다. 파레토 최적에서 관심의 대상이 되는 절충해는 비열등해(non-dominated solution)이다. 비열등해란 하나 이상의 목적함수들에 대하여 주어진 최적해를 개선시키고자 할 경우 하나 이상의 다른 목적함수들의 값이 최적방향에서 오히려 멀어지는 성질을 지닌 해를 의미한다. GA 또는 CCEA의 경우 파레토 최적에서는 매 세대마다 파레토 프런티어(frontier)를 보다 좋은 방향으로 진행시키고 또한 끌고루 확산되기를 추구한다. 파레토 최적에서 비열등해는 NSGA(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)-II(Deb et al.[7])을 적용하여 구할 수 있다. 파레토 최적은 다양한 해들을 얻을 수 있다는 장점이 있는 반면, 진화시 하나의 목적함수를 최적화시킬 때보다 기술적 구현의 난이도가 높아지는 단점을 지니고 있다. 파레토 최적을 구한 후 다른 외부요소들을 기반으로 하여 그 집합으로부터 특정한 해들을 선택할 수 있다.

본 문제의 경우 첫 번째 목적함수는 수송비용의 최소화를 추구하며, 두 번째 목적함수는 각 시설 이용률의 편차의 최소화를 추구한다. 현실적인 관

점에서 첫 번째 목적함수는 두 번째 목적함수에 비해 상대적으로 훨씬 더 중요하게 간주된다. 따라서 본 연구에서는 구현의 복잡성이 있는 파레토 최적을 추구하기보다는 두 목적함수의 가중치를 선형 결합하는 방법을 사용키로 한다. 두 목적함수의 가중치를 설정하기 위하여 각 문제에 대하여 예비적으로 각 문제별로 CCEA-1을 실행시켜 두 가지 목적함수 값을 알아낸다. 첫 번째 가중치를 1로 둘 때 두 번째 목적함수의 값과 그 가중치를 곱한 값이 첫 번째 목적함수의 값에 비해 적절히 작은 값이 되도록 두 번째 목적함수의 가중치를 설정한다. 예비실험 결과 두 번째 가중치의 값으로 문제 1~문제 5에 대해서는 1,000을, 그리고 문제 6~문제 7에 대해서는 10,000을 설정하였다.

### 4.3 실험 결과

두 알고리즘 CCEA-1과 CCEA-2을 실행시킨 결과를 <표 3>에 요약하였다. 각 문제별로 CCEA-1과 CCEA-2를 각각 7회 반복 실행한 결과를 바탕으로 각각 결합목적함수 값의 최소치, 평균치 및 최대치를 나타내었다. 그리고 각 결합목적함수의 구성요소인 목적함수 1과 목적함수 2의 값도 나타내었다.

먼저 문제 크기가 상대적으로 작은 문제 1, 2, 3의 경우 결합목적함수 값의 최소치, 평균치 및 최대치 면에서 모두 두 알고리즘 CCEA-1과 CCEA-2는 서로 비슷한 값을 생성하였다. 반면 문제 4에서 문제 7까지 문제의 크기가 커짐에 따라 CCEA

<표 3> 2가지 CCEA 방법에 의해 생성된 해의 비교

문제	모집단 크기	생성 세대수	목적함수 구분	최소치		평균치		최대치	
				방법 1	방법 2	방법 1	방법 2	방법 1	방법 2
1	30	300	결합목적함수	3,558	3,558	3,558	3,580	3,558	3,686
			목적함수 1	3,091	3,091	3,091	3,112	3,091	3,211
			목적함수 2	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
2	40	400	결합목적함수	4,397	4,323	4,437	4,730	4,482	4,805
			목적함수 1	4,004	3,917	4,034	4,186	4,060	4,454
			목적함수 2	0.39	0.41	0.40	0.38	0.43	0.35
3	70	500	결합목적함수	9,457	9,435	9,524	9,448	9,617	9,468
			목적함수 1	9,212	9,188	9,277	9,201	9,369	9,222
			목적함수 2	0.24	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
4	100	700	결합목적함수	4,986	5,593	5,101	6,046	4,698	6,995
			목적함수 1	4,436	5,086	4,565	5,463	0.55	6,359
			목적함수 2	0.55	0.51	0.54	0.58	5,249	0.64
5	150	800	결합목적함수	6,857	8,602	7,084	9,391	7,264	10,046
			목적함수 1	6,269	7,982	6,495	8,781	6,721	9,439
			목적함수 2	0.59	0.62	0.59	0.61	0.54	0.61
6	200	1,000	결합목적함수	14,624	17,709	14,962	18,994	15,325	19,940
			목적함수 1	11,216	14,243	11,962	15,489	11,751	16,468
			목적함수 2	0.34	0.35	0.36	0.35	0.36	0.35
7	400	2,000	결합목적함수	19,395	34,965	19,849	38,309	19,978	38,396
			목적함수 1	17,751	28,043	17,964	29,812	18,615	31,316
			목적함수 2	0.16	0.69	0.19	0.71	0.14	0.71

-1의 목적함수는 최소치, 평균치 및 최대치의 모든 면에서 CCEA-2보다 더 작은 값을 생성하였으며, 문제가 커짐에 따라 그 값들의 차이는 더욱 커졌다. 따라서 문제의 크기가 작은 경우 CCEA-1은 CCEA-2와 비슷한 정도의 성능을 보이나, 문제의 크기가 점차 커짐에 따라 CCEA-1은 CCEA-2에 비해 상대적으로 더 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 즉 알고리즘의 실행 후 세대변천을 거치는 어느 한 시점에서 평가해 볼 때 CCEA-1은 CCEA-2에 비해 최적해에 더 근접해 있음을 의미한다. 결론적으로 CCEA 접근방법에서 본 연구의 CCEA-1에서 사용한 순열(permutation) 형태의 염색체 표현방식은 CCEA-2에서 사용한 정수 형태의 염색체 표현 방식(한용호[3])보다 더 나음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

이제까지 공급사슬 네트워크 설계 문제를 해결하기 위하여 다양한 모델과 그에 대응한 다양한 해법들이 제시되어 왔다. 본 연구에서는 공급업체, 공장, 유통센터 및 고객 간의 3단계 공급사슬 네트워크 설계 문제에 대하여 협력적 공진화 알고리즘(CCEA)을 우수한 근사해를 생성할 수 있는 새로운 접근방법으로서 제시하였다. 이 알고리즘의 구체적인 설계를 위해 먼저 대상문제를 수송 단계에 따라 세 개의 부분문제로 분할하고 각 부분문제에 대하여 염색체들의 모집단을 구성하였다. 여기서 특히 염색체의 각 유전인자는 우선순위를 의미하는 순열(permutation) 형태로 표현하였다. 그리고 각 모집단의 염색체로부터 그에 대응하는 부분문제의 해를 생성하는 알고리즘을 생성하였다. 그 다음 각 모집단으로부터 나온 하나씩의 염색체를 조합하여 그 염색체 조합에 대응하는 해를 구하는 알고리즘과 적합도 평가 알고리즘을 제시하였다. 각 모집단별로 세대교체를 위해 엘리트리스트(elitist) 전략을 수반한 이진 토너먼트 선택 연산, order 교배 연산 및 swap 돌연변이 연산을 적용하였다.

이와 같이 본 연구에서 설계된 CCEA의 성능을

파악하기 위하여 이전의 CCEA와 함께 여러 테스트 문제들에 대하여 반복 실행시켰다. 그 결과, 본 연구의 CCEA는 문제의 크기가 커짐에 따라 이전의 CCEA에 비해 더 우수한 해를 생성함을 확인할 수 있었다. 따라서 CCEA 적용시 본 연구에서 사용한 우선순위를 나타내는 순열 기반의 염색체 표현방식이 정수 형태의 염색체 표현 방식에 비해 상대적으로 더 좋음을 알 수 있었다.

본 연구에서 CCEA는 3단계 공급사슬 네트워크를 대상으로 하였지만 그 원리는 4단계 이상의 네트워크 설계 문제에도 그대로 적용이 가능하다. 그리고 CCEA는 그 알고리즘 고유의 특성상 본 연구의 특정 모형에만 적용 가능한 것이 아니라, 본 연구에서 다루지 않은 다양한 형태의 다른 모형에도 손쉽게 적용될 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] 한용호, "2단계 수송문제에 대한 협력적 공진화 알고리즘 기반의 혁신적 해법", 『산업혁신 연구』, 제25권, 제4호(2009), pp.227-251.
- [2] 한용호, "역물류 네트워크 모델의 최적화를 위한 협력적 공진화 알고리즘", 『경영과학』, 제27권, 제3호(2010), pp.15-31.
- [3] 한용호, "협력적 공진화 알고리즘에 기반한 다단계 공급사슬 네트워크의 설계", 『한국 SCM 학회지』, 제11권, 제2호(2011), pp.87-96.
- [4] Altiparmak, F., M. Gen, L. Lin, and T. Paksoy, "A Genetic Algorithm Approach for Multi-objective Optimization of Supply Chain Networks," *Computers and Industrial Engineering*, Vol.51(2006), pp.196-215.
- [5] De Jong, K.A. and M.A. Potter, "Evolving Complex Structures via Cooperative Coevolution," In *Proceedings of the Fourth Annual Conference of Evolutionary Programming*, Cambridge, MA, MIT Press, (1995), pp.307-317.

- [6] De Jong, K.A., *Evolutionary Computation : A Unified Approach*, MIT Press, 2006.
- [7] Deb, K., A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, *A Fast and Elitist Multi-Objective Genetic Algorithm-NSGA-II*, KanGAL Report # 2000001, 2000.
- [8] Dogan, K. and M. Goetschalckx, "A Primal Decomposition Method for the Integrated Design of Multi-Period Production-Distribution Systems," *IIE Transactions*, Vol.31 (1999), pp.1027-1036.
- [9] Engelbrecht, A.P., *Computational Intelligence*, Second Edition, Wiley, 2007.
- [10] Gen, M., F. Altiparmak, and L. Lin, "A Genetic Algorithm for Two-Stage Transportation Problem Using Priority-Based Encoding," *OR Spectrum*, Vol.28(2006), pp.337-354.
- [11] Gen, M. and R. Cheng, *Genetic Algorithm And Engineering Design*, New York, Wiley, 1997.
- [12] Geoffrion, A.M. and G.W. Graves, "Multi-commodity Distribution System Design by Benders Decomposition," *Management Science*, Vol.20(1974), pp.822-844.
- [13] Geoffrion, A.M. and R.F. Powers, "Twenty Years of Strategic Distribution System Design : an Evolutionary Perspective," *Interfaces*, Vol.25(1995), pp.105-128.
- [14] Goldberg, D.E., *Genetic Algorithm : in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley, 1989.
- [15] Lin, L., M. Gen, and X. Wang, "Integrated Multistage Logistics Network Design by Using Hybrid Evolutionary Algorithm," *Computers and Industrial Engineering*, Vol.56 (2009), pp.854-873.
- [16] Martin, A. and B. Pelegrin, "Applying Lagrangian Relaxation to the Resolution of Two-Stage Location Problems," *Annals of Operations Research*, Vol.86(1999), pp.179-198.
- [17] Melo, M.T., S. Nickel, and F. Saldanha-da-Gama, "Facility Location and Supply Chain Management-A Review," *European Journal of Operational Research*, Vol.196(2009), pp. 401-412.
- [18] Michalewicz, Z., G.A. Vignaux, and M. Hobbs, "A Nonstandard Genetic Algorithm for the Nonlinear Transportation Problem," *OR SA Journal on Computing*, Vol.3, No.4(1991), pp.307-316.
- [19] Pirkul, and Jayaraman, A Multi-commodity Multi-plant Capacitated Facility Location Problem : Formulation and Efficient Heuristic Solution, *Computers and Operations Research*, Vol.25(1998), pp.869-878.
- [20] Potter, M.A., "The Design and Analysis of a Computational Model of Cooperative Coevolution," Ph. D. Dissertation, George Mason University, 1997.
- [21] Potter, M.A. and K.A. De Jong, "A Cooperative Coevolutionary Approach to Function Optimization," In *Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature*, Berlin, Springer, (1994), pp.249-257.
- [22] Syarif, A., Y.S. Yun, and M. Gen, "Study on Multi-Stage Logistic Chain Network : A Spanning Tree Based Genetic Algorithm Approach," *Computers and Industrial Engineering*, Vol.43(2002), pp.299-314.
- [23] Vignaux, G.A. and Z. Michalewicz, "A Genetic Algorithm for the Linear Transportation Problem," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol.21, No.2 (1991), pp.445-452.