

진화알고리즘을 이용한 hub-and-spoke 수송네트워크 설계 A design for hub-and-spoke transportation networks using an evolutionary algorithm

이현수 · 신경석 · 김여근

전남대학교 산업공학과

Abstract

In this paper we address a design problem for hub and spoke transportation networks and then consider a capacitated hub locations problem with direct shipment (CHLPwD). We determine the location of hubs, the allocation of nodes to hubs, and direct shipment paths in the network, with the objective of minimizing the total cost in the network. An evolutionary algorithm is developed here to solve the CHLPwD. To do this, we propose the representation and the genetic operators suitable for the problem and adopt a heuristic method for the allocation of nodes to hubs. To enhance the search capability, problem-specific information is used in our evolutionary algorithm. The proposed algorithm is compared with the heuristic method in terms of solution quality and computation time. The experimental results show that our algorithm can provide better solutions than the heuristic.

1. 서론

Hub-and-spoke(H&S) 네트워크는 대량화와 공동화를 통한 규모의 경제를 잘 반영할 수 있는 물류수송네트워크 구조이다(Elhedhli and Hu, 2005). H&S 네트워크의 구조는 항공수송에서 시작하여, 점차 항공 물류, 우편시스템, 통신시스템, 등에서 널리 사용되고 있다(Ebery *et al.*, 2000).

본 연구에서 다루는 허브위치선정문제(Hub Location Problem : HLP)는 지점(node)들과 이들 지점들의 각 쌍에 흐르는 물동량 및 관련 비용이 주어진 상태에서, 네트워크상의 총 물류비가 최소가 되도록, 허브(hub)의 입지선정과 함께 남아있는 지점(non-hub)들을 어떤 허브에 할당(allocation)할 것인가를 결정하는 문제이다.

이러한 HLP는 각 허브의 용량 제한과 하나의 허브도 거치지 않고 기점에서 종점으로서의 직접수송(direct shipment, 또는 non-stop service라고 함)을 고려하는지, 그리고 허브 수가 고정되었는지 유동적인지에 따라 다양한 종류의 문제로 나누어진다.

물류시스템에서 허브의 최대 처리 용량은 고객의 서비스에 결정적인 요인으로 작용할 수

있다(Aykin, 1994). 이러한 허브의 용량제한이 있는 HLP를 다룬 연구는 Hasan and Vaidyanathan(1998), Ernst and Krishnamoorthy(1999), Ebery *et al.*(2000), 그리고 Melkote and Daskin(2001) 등이 있다. 그러나 이들 연구는 모두 직접수송을 고려하지 않고 있으며 허브의 수 또한 고정된 경우를 다루고 있다. H&S 네트워크 설계에 있어서 직접수송을 고려함으로써 보다 효율적인 물류네트워크를 설계할 수 있다(Lumsden, 1999). 이를 다룬 연구에는 Aykin(1995), Zpfel and Wasner(2002), 그리고 Elhedhli *et al.*(2005)등이 있다. 하지만 이들 연구들에서는 허브의 용량은 무한하다고 가정하고 있으며, 또한 허브의 수가 미리 정해져 있다고 보고 있다. H&S 네트워크의 설계에 있어, 허브의 수를 하나의 결정변수로 두는 것이 합리적이다(Helm and Venkataramanan, 1998). 이에 관한 연구는 Topcuoglu *et al.*(2005)과 Boland *et al.*(2003)등이 있다. Boland *et al.*(2004)은 허브 용량제한을 고려하고 있다. 그러나 이들 두 연구 모두 직접수송은 다루지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 보다 현실적이고 그 적용성을 높이기 위하여 위에서 언급한 허브의 용량제한, 직접수송, 허브의 수를 모두 고려한 HLP를 해결하고자 한다. 본 연구에서 다루는 문제를 일반적으로 언급하는 HLP와 구별하기 위하여, CHLPwD(Capacitated Hub Location Problem with Direct shipment)로 표기한다.

CHLPwD를 해결하기 위한 방법론으로써 진화알고리즘(evolutionary algorithm : EA)을 적용한다. 진화알고리즘은 자연의 진화과정을 모방한 일종의 메타휴리스틱 탐색기법으로 복잡도가 높은 조합최적화 문제에 아주 효율적인 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 1997; Michalewicz, 1999). 따라서 본 연구에서 다루고자 하는 CHLPwD는 복잡도가 높고 일종의 조합최적화 문제이므로 진화알고리즘이 적절한 방법론이라고 기대할 수 있다. 또한, 이를 진화알고리즘으로 해결하기 위해 직접수송을 고려한 개체표현과 유전연산자를 개발한다. 본 연구에서는 진화알고리즘의 CHLPwD에 대한 적용성을 보이며, 해공간의 탐색성능 측면에서 최적해 및 발견적 기법과 비교할 것이다.

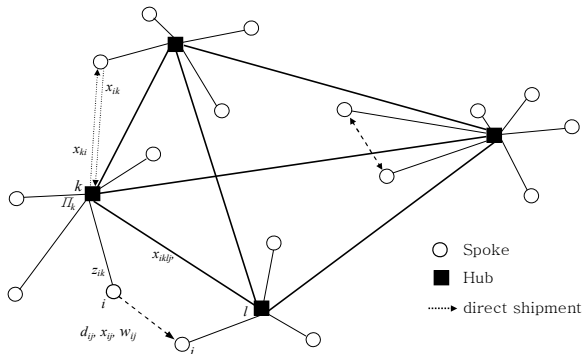
2. 문제정의

허브위치선정문제(HLP)는 일반적으로 허브의 수, 허브의 용량제한, 이동경로, 그리고 한 스포크의 같다.

첫째, CHLPwD에서 허브의 수는 미리 정해진 것이 아니라, 총 물류비용을 최소화하기 위한 하나의 결정변수이다.

둘째, 한 허브에서 처리할 수 있는 물동량에 제한을 둬으로써 한 허브에 할당될 수 있는 스포크의 수는 한정되고, 이는 물동량의 과다한 유입과 유출로 인한 허브의 혼잡 또는 정체를 고려한다.

셋째, CHLPwD는 모든 기점과 종점간에 이동되는 물동량을 각각의 기점과 종점이 연결된 허브를 통해서 뿐만 아니라 직접수송으로도 가능하다. 즉, [그림 1]과 같이 기점 i 의 물동량을 종점 j 로 보내는 경로는, 기점 i 에서 허브 k 와 허브 l 을 경유하여 종점 j 로 보내는 경로($i \rightarrow k \rightarrow l \rightarrow j$)와 기점 i 의 물동량을 종점 j 로 직접 보내는 경로($i \rightarrow j$)가 있다. 어떤 경로를 선택하느냐에 따라 수송비용과 고객 서비스 시간이 변화한다.



[그림 1] hub-and-spoke 네트워크

넷째, 본 연구에서는 스포크의 단일 허브 할당을 가정한다. 즉, 각각의 스포크는 반드시 하나의 허브에만 할당되어야 한다.

본 연구에서는 이러한 특성과 제약을 갖는 H&S 수송네트워크에서 총 물류비용을 최소로 하는 네트워크를 설계한다. 고려하는 비용은 허브를 통한 수송비, 직접수송비, 허브설치 비용이다(식 (1) 참조). 결정변수는 허브의 수와 위치, 비 허브 지점(스포크)을 허브에 할당, 그리고 모든 지점들에 대한 수송경로(허브를 통한 수송 또는 직접수송)이다. [그림 1]에서 z_{ik} , x_{ij} , 그리고 x_{iklj} 는 결정변수로서 z_{ik} 는 지점 i 가 허브 k 에 할당되면 1, x_{ij} 는 지점 i 에서 지점 j 로 직접수송되면 1, 그리고 x_{iklj} 는 지점 i 에서 허브 k 와 l 을 경유하여 지점 j 로 수송되면 1의 값을 갖고 그렇지 않으면 모두 0의 값을 갖는다. 또한, 결정변수에서 $z_{kk}=1$ 이면 지점 k 는 허브를

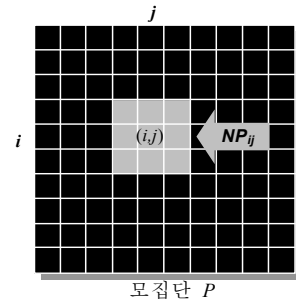
할당가능한 허브 수 등에 따라 여러 형태의 문제로 분류될 수 있다. CHLPwD는 HLP의 특수한 형태이다.

본 연구에서 다루는 CHLPwD의 특징은 다음과 나타내고 자기 자신에 할당되었음을 의미한다. 이에 대한 수리모형은 지면관계상 다루지 않는다.

3. CHLPwD을 위한 이웃진화알고리즘

3.1 이웃진화알고리즘의 구조와 절차

전통적 진화알고리즘에서 전체모집단이 진화하는 구조는 모집단내에 높은 적합도를 갖는 개체들에 의해 다양한 해공간을 탐색하지 못하고 조기 수렴의 가능성이 높다. 이러한 단점을 보완하기 위해 본 연구에서는 이웃진화구조를 사용한다.



[그림 2] 모집단 P의 구조

모집단 P 는 토러스(torus) 형태의 2차원 정방형 격자구조를 갖는다고 본다. 이웃의 크기와 형태는 다양하게 정의될 수 있으나, 본 연구에서는 3×3 형태의 구조를 사용한다. 그리고 모집단의 위치 (i, j) 에 있는 개체와 그 주변의 8개 개체를 포함하는 이웃이다. [그림 2]는 이웃을 나타내고 있다. 이러한 이웃진화 구조는 모집단의 다양성 및 적소 형성에 기여하는 것으로 알려져 있다. 또한, 해의 탐색효율을 높이기 위해 안정상태진화알고리즘(SteadyStateEA)을 채용한다.

제안된 알고리즘의 절차는 다음과 같다.

단계 1: 초기화

2차원 격자구조를 갖는 모집단 P 를 구성하고, 초기해를 생성하여 격자의 각 위치에 둔다.

단계 2: 초기 적합도 평가

모든 개체들의 적합도를 평가한다.

단계 3: 이웃 설정

모집단 P 에서 임의의 위치 (i, j) 를 선택하고, 이웃집단 NP_{ij} 를 정의한다.

단계 4: 이웃의 진화

4.1: NP_{ij} 에서 적합도를 기준으로 두 개체 p_1, p_2 를 확률적으로 선택한다.

- 4.2: p_1, p_2 를 유전연산(교차와 돌연변이)하여 두 자손 o_1, o_2 를 생산하고, 적합도를 평가한다.
- 4.3: o_1, o_2 를 NP_{ij} 중 가장 낮은 적합도를 갖는 w_1, w_2 와 교체한다.
- 4.4: 이웃진화의 종료조건을 만족하면 단계 5로 가고, 그렇지 않으면 단계 4.1로 간다.

단계 5: 종료여부판단

알고리즘의 종료조건을 만족하면 끝내고, 그렇지 않으면 단계 3으로 간다.

제안한 진화알고리즘의 유전요소들에 관하여 구체적으로 보자.

3.2 유전요소

1) 개체표현

진화알고리즘의 성능 향상을 위해서는 문제의 특성에 적합한 개체 표현이 요구된다. 진화알고리즘에서 개체는 자연스럽게 명확하게 잠재해를 나타내야 한다. 또한, 표현방법은 유전연산자와 밀접하게 관련되어 있다. 따라서 개체가 갖는 중요한 정보가 유전연산자에 의해 추출되고 자손에게 잘 전달될 수 있도록 개체를 표현해야 한다.

Helm and Venkataramanan(1998)과 Helm(1998)는 진화알고리즘을 이용한 허브의 수와 입지 선정문제를 다루었다. 이들 연구에서 염색체의 길이는 전체 지점들의 수와 같고, 인자의 위치는 지점의 번호, 그리고 인자의 값은 1과 0으로써 1이면 허브, 0이면 스포크로 나타내었다. 여기서 스포크의 할당은 거리가 가장 가까운 허브에 연결하는 방법을 사용하였다. Topcuoplu et al.(2005)은 앞의 두 연구(Helm and Venkataramanan, 1998; Helm, 1998)가 허브의 입지선정 만을 하나의 염색체로 표현한 데 반하여, 입지 선정을 위한 염색체와 스포크 할당을 위한 염색체로, 즉 두 개의 염색체로 개체를 표현하고 이를 유전 연산하였다. 이 표현의 특징은 유전연산시 허브의 입지선정과 스포크의 허브할당정보를 간편하면서도 효과적으로 자손에게 전달해 줄 수 있다는데 있다.

그러나 Topcuoplu et al.(2005)의 방법은 허브의 선정과 스포크의 허브 할당을 별도로 표현하는데 많은 메모리 공간을 필요로 하고, 두 개의 배열을 처리하는데 많은 계산시간이 소요된다는 것이다. 또한, 이들 세 연구 모두 허브의 용량과 직접수송을 고려하지 않고 있어 본 연구에서 다루는 CHLPwD를 해결하기에 부적절하다.

$$(1) \begin{matrix} \text{허브-스포크부분} \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\) P_1 & \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$(2) \begin{matrix} \text{허브-스포크부분} \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\) P_1 & \begin{bmatrix} 6 & 0 & 2 & 2 & 2 & 0 & 6 & 2 & 2 \end{bmatrix} \\ \text{직접수송부분} \\ (3) P_1 & \begin{bmatrix} 6 & 0 & 2 & 2 & 2 & 0 & 6 & 2 & 2 \\ (1,3) & (3,1) & (3,5) & (4,1) & (5,4) & (7,1) & (7,8) & (8,9) & (9,3) & (9,4) & (9,8) \end{bmatrix} \end{matrix}$$

[그림 3] CHLPwD의 유전표현

따라서 본 연구에서는 CHLPwD를 해결하기 위해 허브의 입지선정, 스포크의 허브할당, 그리고 허브의 용량제한과 직접수송을 같이 고려하여 개체를 나타낸다. 개체는 크게 허브-스포크부분과 직접수송부분으로 구분된다. 먼저, 허브 입지선정과 스포크의 허브할당을 함께 허브-스포크부분으로 표현한다. 이는 컴퓨터 메모리와 계산시간을 줄이기 위해 Topcuoglu et al.(2005)의 표현을 수정하여 사용한다. 개체의 길이와 인자의 위치는 이전 연구들의 것과 같다. 다만, 인자의 값으로 허브와 스포크를 구분한다. 허브로 선정된 지점의 인자값은 0, 허브가 아닌 지점은 허브로 선정된 지점의 위치를 인자값으로 갖는다.

그 절차는 [그림 3]의 (1)에서와 같이 먼저 허브-스포크부분에서 허브인 지점을 선정하여 0으로 나타내고, 허브가 결정되면 허브가 아닌 지점들을 허브에 할당한다. 이때, 재할당 기법을 적용하여 허브에 할당하는데 [그림 3]의 (2)는 이것을 보여준다. 이 때의 재할당 기법의 개념은 다음과 같다.

재할당 기법은 기회비용의 개념을 응용한 것으로써 모든 미할당된 지점들 각각에 대하여 각각의 허브에 할당했을 때, 이로 인해 발생하는 각각의 비용을 계산하고(이때 해당 지점을 제외한 모든 다른 지점들은 가장 가까운 허브에 할당되었다고 가정함), 각 지점에 대해서 그 비용이 가장 적게 드는 허브와 두 번째로 비용이 적게 드는 허브와의 비용차이가 큰 것부터 허브의 용량제한을 만족하는 허브에 할당하는 방법이다. 이와 같은 방법을 사용하는 이유는 가능한 한 허브의 용량제한을 만족하면서 전체 네트워크상의 총 물류비용을 최소화하기 위함이다.

마지막으로 허브-스포크부분을 기준으로 모든 지점들 간의 직접수송경로와 허브를 경유한 수송경로에 대한 비용을 계산하여 직접수송경로의 비용이 더 저렴한 지점들의 쌍을 직접수송부분에 사전식으로 정렬해 추가시킴으로써 하나의 해가 완성된다. [그림 3]의 (3)에서 (i, j) 는 지점 i 에서 지점 j 로 직접수송을 의미한다. 이때, 직접수송비용은 허브와 스포크의 위치에 상관없이 항상 동일함으로 데이터로 저장하여 필요한 경우에 호출하여 사용할 수 있도록 한다.

2) 적합도 평가와 선택

적합도를 평가하는 함수는 흔히 최적화 문제의 목적함수를 사용한다. 그러나 본 연구에서 다루는 CHLPwD는 다양한 제약들을 포함하고 있다. 다루는 문제의 복잡성에 의해 유전표현과

유전연산에서 모든 제약을 만족시키는 것이 어려운 경우가 있다. 이는 다수의 제약을 갖는 문제들은 제약들간의 충돌이 생겨, 어떤 제약에서는 적합도가 좋은 스키마타(schemata)가 다른 제약에서는 나쁜 영향을 미치기도 하기 때문이다(Kim *et al.*, 1997). 따라서 본 연구에서는 비 가능해를 효율적으로 다루기 위해 제약을 개체에 표현 가능한 직접제약과 그렇지 않은 간접제약으로 나누었다. 본 연구에서의 직접제약은 스포크는 오직 허브에만 할당 가능하다는 것과 하나의 스포크는 반드시 하나의 허브에만 할당 가능하다는 것으로 하고, 이들 제약은 개체표현과 유전연산에서 만족하도록 하였다. 그리고 간접제약에는 허브의 용량제약이 있는데, 이를 만족할 경우는 목적함수가 곧 적합도가 된다. 하지만 할당된 스포크들의 물동량의 합이 해당 허브의 용량을 초과할 때는 평가함수에 벌금을 부과하는 방법을 사용하였다. 2절에서 언급했듯이, CHLPwD의 목적은 모든 지점간의 수송비용과 허브설치비용의 합을 최소화하는 것이다. 이에 개체의 평가 결과 나타난 수송비용과 허브설치비용의 합을 Q_{sum} 이라 두면, Q_{sum} 은 식 (1)과 같다.

$$Q_{sum} = \sum_{i,j \neq i} (\lambda + w_{ij} \delta d_{ij}) x_{ij} + \sum_{i,k,l} \sum_{j \neq i} w_{ij} (\alpha d_{ik} + \beta d_{kl} + \gamma d_{lj}) x_{iklj} + \sum_k F_k z_{kk} \quad (1)$$

여기서 w_{ij} 와 d_{ij} 는 각각 지점 i 와 j 간의 물동량과 거리를 나타내고, π_k 와 F_k 는 각각 허브의 용량과 지점 k 에서 허브설치비용을 나타낸다. 또한, 파라미터 λ 는 직접수송에 드는 셋업비용(set-up cost)이고, α , β , γ , 그리고 δ 는 차례로 기점에서 허브까지의 수송, 허브간의 수송, 허브에서 중점까지의 수송에 관계된 비용계수들이다.

그리고 본 연구에서는 허브의 용량제약이 있는데, 제약을 어길 시에는 평가함수에 벌금(penalty)을 부과하는 방법을 사용한다. 그러면 개체의 적합도 평가함수, $eval$ 는 다음과 같다.

$$eval = Q_{sum} + C \cdot \sum_{k, k \in H} PW_k^\alpha \quad (2)$$

여기서, $PW_k = \max(HW_k - WB_k, 0)$ 이고, 상수 C , α 는 파라미터이다.

이러한 적합도 평가함수를 기준으로 정의된 이웃 NP_{ij} 에서 유전연산에 참여 할 두 부모(개체)를 확률적으로 선택한다. 선택된 부모는 유전연산을 통하여 두 자손을 생산하고 적합도를 평가한 다음 NP_{ij} 중 가장 낮은 적합도를 갖는 두 개체와 교체시켜준다. 이러한 과정을 반복하게 되는데 이는 3.1절의 알고리즘 절차에서 단계 4에 해당하는 안정상태 진화전략을 따른다.

3) 유전연산자

유전연산자에는 크게 교차(crossover)와 돌연변이 (mutation)가 있다.

(1) 교차연산자

교차는 문제의 특성을 잘 반영할 수 있는 정보를 두 부모로부터 추출하여 자손을 생산할 수 있어야 한다.

본 연구에서 다루는 CHLPwD에서 허브의 용량과 직접수송은 서로 밀접한 관계를 갖는다. 직접수송은 스포크의 허브할당에 영향을 주고, 반면 스포크가 어느 허브에 할당되는가에 따라 허브를 경유한 수송비용에 대한 직접수송의 상대적인 비용을 달라지게한다. 이는 모든 시·종점간의 수송에 대해 허브를 경유한 수송과 직접수송중 어떤 경로를 이용 할지의 결정에 영향을 준다. 따라서 본 연구에서 다루는 CHLPwD를 효율적으로 해결하기 위해서는 허브의 용량제한과 직접수송이 서로 연관되어 동작할 수 있는 교차연산자를 필요로 한다.

이를 위해 본 연구에서 제안한 교차연산의 절차는 다음과 같다.

단계 1: 범위[1, n]에서 임의의 교차점 r 을 선택한다.

단계 2: $r-1$ 과 r 사이의 곳을 교차점으로 사용하여 허브-스포크부분에 대해 일점교차를 한다.

단계 3: 교차후 허브-스포크부분에서 스포크중 허브 가 아닌 곳에 할당된 인자들에 대해 미할당 인자(*)로 표기한다.

단계 4: 직접수송부분에 대하여 직접수송 지점 들의 쌍 (i, j)에서 $i = r-1$ 인 지점을 포함하는 부분까지를 절단점으로 선택 한다.

단계 5: 직접수송부분에 대하여 직접수송 지점 들의 쌍 (i, j)에서 $i = r-1$ 인 지점을 포함하는 부분까지를 절단점으로 선택 한다.

단계 6: 허브-스포크부분의 미할당인자(*)들을 허브에 할당한다(개체 표현부분에서 언급한 재할당 기법 이용).

단계 7: 새롭게 만들어진 허브-스포크부분을 기준으로 직접수송부분에서 직접수송 비용이 허브를 경유한 수송비용보다 더 큰 직접수송 지점들의 쌍을 제거한다.

단계 8: 단계 3의 미할당 인자(*)들 이었던 것과 관련된 수송에서 허브를 경유한 수송에 비해 직접수송이 비용이 더 저렴한 지점간의 쌍을 직접수송부분에 추가한다.

교차연산에서 허브-스포크부분과 직접수송부분은 모두 일점교차를 사용한다. 먼저 단계 1과 2의 과정을 통해 허브-스포크부분에 대해 일점교차를 사용하여 부모의 허브와 스포크 부분의 정보를

자손에게 상속한다(만약, 허브가 하나도 없는 자손이 생성되면 새롭게 하나의 개체를 만들어 자손으로 대체한다). 이때, 단계 3에서 상속된 자손의 허브-스포크부분에서 허브가 아닌 지점에 할당된 인자들은 비가능해이므로 차후 가능해로 만들어 주기 위해 미할당 인자(*)로 표기한다. 단계 4에서는 직접수송부분에 대해 일점교차를 사용하여 직접수송부분을 자손에게 상속한다. 직접수송부분의 교차점의 위치는 허브-스포크부분에서의 교차점에 따라 결정된다. 허브-스포크부분에서 사용한 교차점의 위치가 r 이었다면 직접수송부분에서의 교차점의 위치는 직접수송부분의 (i, j) 에서 $r-1$ 을 포함하는 부분까지를 교차점으로 사용한다. 이는 허브-스포크부분에서 자손에게 상속한 허브-스포크 정보와 관련된 직접수송정보를 자손에게 상속시켜주기 위함이다. 이를 토대로 단계 5에서는 직접수송부분에 대하여 교차를 수행한다.

단계 6에서는 미할당 스포크들에 대해 허브들 중에서 용량제한을 만족하는 허브에 할당해 준다. 이때, 직접수송부분을 함께 고려한다. 즉, 할당되는 지점의 물동량으로 인해 허브의 용량을 초과하면 허브의 용량제한으로 인해 해당 허브에 할당할 수 없게 되는데 개체의 직접수송부분에서 해당 허브와 관련된 직접수송 쌍들은 허브를 경유하지 않고 해당 물동량을 목적지로 바로 보냄으로써 그 지점이 해당 허브에 할당되는 것을 돕는다. 단계 7에서는 새롭게 만들어진 허브-스포크부분을 기준으로 직접수송부분중 허브의 용량에 영향을 미치지 않으면서 허브를 경유하는 수송비용보다 비용이 더 큰 직접수송 지점들의 쌍을 제거시킨다. 이때, 직접수송부분에 있는 직접수송 지점들의 쌍들과 관련된 직접수송 비용은 초기개체생성 당시 구한 직접수송비용을 사용한다. 따라서 이들 쌍들과 관련된 허브를 경유한 수송비용만을 구하여 비교하면 된다.

마지막으로 단계 8에서는 허브-스포크부분에서 지금은 허브에 할당되어 있지만 미할당 지점이었던 지점(단계 3에서 미할당 인자(*)들)에 대해 그 지점들을 통하여 들어오고 나가는 모든 수송경로들 중 허브를 경유한 수송비용에 비해 직접수송 비용이 더 낮은 지점들의 쌍을 직접수송부분에 추가한다. 전체 네트워크의 모든 경로를 고려하지 않고, 새롭게 재할당된 지점들에 대하여 이 과정을 수행함으로써 새롭게 바뀐 네트워크에 대해 빠른 시간에 보다 효율적으로 직접수송 경로들을 고려할 수 있다. 직접수송부분에 새롭게 추가되는 직접수송 지점간의 쌍은 허브의 용량에 영향을 미치지 않는다.

(2) 돌연변이 연산자

진화알고리즘에서 돌연변이는 해공간의 다양성을 유지하고 부분최적에 조기수렴하는 것을 방지하는 역할을 한다. 따라서 CHLPwD에서 돌연변이 연산자는 해의 구조를 직접적이고 다양하게 변화시킬 수 있어야 한다. 본 연구에서

사용한 돌연변이는 <표 1>과 같다.

<표 1> 돌연변이 연산자

스포크 교환	두 개의 허브에서 각 허브에 할당된 스포크를 임의로 하나씩 선택하여 허브를 교환하여 할당한다.
스포크 재할당	임의로 하나의 스포크를 선택하여 다른 허브에 할당한다.
허브 교체	한 허브에 할당되어 있는 스포크들 중에서 임의로 하나를 선택하여 허브로 만들고 기존의 허브와 스포크들은 새로운 허브에 할당한다.
허브 생성	허브에 할당되어 있는 스포크중 임의로 하나를 선택하여 허브로 만들고 기존 허브에 할당되어 있던 스포크들은 기존 허브와 새로운 허브에 다시 할당한다. (재할당기법 적용)
허브 제거	허브들중 임의로 하나의 허브를 선택하여 제거하고 그 허브에 할당되어 있던 스포크들은 다른 허브들에 할당한다 (재할당기법을 적용)

개체돌연변이율에 따라 개체의 돌연변이 여부를 결정하고 돌연변이로 결정되면 <표 1>의 5가지 돌연변이 연산자중 임의로 하나를 선택하여 사용한다. 또한, 5가지 돌연변이 연산자들 모두 허브-스포크부분에만 적용된다. 이는 다양한 해공간을 탐색하게 하는데 있어 직접수송부분은 큰 영향을 미치지 않기 때문이다. 여기서 스포크교환과 스포크재할당 돌연변이 연산자는 허브의 위치와 개수에는 변화를 주지 않고 스포크가 할당된 허브의 위치를 바꿔줌으로써 이웃해의 탐색을 도모한다. 반면에 허브교체, 생성, 그리고 제거 돌연변이 연산자는 허브의 위치나 개수를 변화시켜서 새로운 해공간의 탐색을 도모한다.

4) 초기 모집단에서 개체의 허브 수와 위치결정

CHLPwD에서 허브의 수와 위치는 결정변수이다. 본 연구에서는 초기해 생성과정에서 각 지점의 총 물동량(유입량+유출량)과 허브의 용량에 대한 정보를 이용하여 허브의 수와 위치를 결정한다. 이는 보다 효율적으로 해공간을 탐색하기 위함이다. Topcuoglu *et al.*(2005)은 초기 모집단에서 허브의 수와 위치를 결정하는데 있어 각 지점의 총 물동량에 대한 정보를 이용하였다.

본 연구에서는 이를 보완하여 초기 모집단의 개체를 구성한다. 모집단에서 개체의 구성과 개체에서 허브의 수와 위치결정은 세 가지 방법을 사용한다. 첫 번째 방법은 전체 모집단 중에서 30%의 개체들은 $[1, n/4]$ 의 범위 사이에서 임의로 허브의 수를 결정하고, 결정된 허브 수에 대한 허브의 위치는 물동량이 많은 지점일수록 허브로

선택될 가능성을 높게 한다. 이와 유사하게 두 번째 방법은 전체 모집단의 30%에 해당하는 개체들은 허브의 용량을 허브 설치비용으로 나눈 값이 큰 지점일수록 허브로 선정될 가능성을 크게 한다. 이 두 가지 방법은 강한 임의성을 탈피하여 해의 탐색 능력을 강화하기 위함이다.

마지막으로 전체 모집단의 40%에 해당하는 개체들에 대해, 각각의 개체는 $[n/4, n/2]$ 사이에서 허브의 개수를 갖고, 허브의 위치는 전체 지점들 중에서 임의로 선택한다. 그 이유는 앞의 두 방법과는 달리 다양한 해를 생성하여 해의 조기 수렴을 방지하기 위함이다.

4. 실험과 결과

4.1 실험문제 및 실험설계

본 연구에서 다루는 문제를 실험하기 위해 사용된 데이터는 OR-Library(Beasley, 1990)의 AP data set이다. AP data set은 Australia Post의 실제 허브위치선정문제에 관한 것으로 200개의 지점들로 구성되어 있다. 여기서 문제의 크기 n 은 10, 20, 25, 40, 50, 100, 200이며, 이들 각각의 문제에 대한 각 지점의 허브설치비용과 허브용량을 포함하고 있다. 또한, AP data set에 대한 허브설치비용과 허브용량은 각각 두 가지의 경우로 나누어진다. 허브설치비용은 Loose(L)와 Tight(T)로 구성되고, 허브용량 또한 Loose(L)와 Tight(T)의 두 가지로 구성되어 있다. 따라서 n 개의 지점을 갖는 각 문제의 크기에 따라 LL, LT, TL, 그리고 TT의 네 가지로 구성된다.

본 연구에서 제안한 EA의 알고리즘 탐색성능은 두 가지 측면에서 비교한다. 절대적인 평가를 위해 수리모형을 통한 최적해와 비교하며 또한, 상대적인 평가를 위해 발견적 기법과 비교한다. 발견적 기법은 Klincewicz(1991)이 제안한 기법을 CHLPwD에 맞게 변형한 것이다. 즉, p -HLP에 적용된 기법을 허브의 용량제한과 직접수송을 함께 고려할 수 있도록 수정하였다.

모든 알고리즘은 JAVA언어로 구현되었으며, 3.2GHz Pentium CPU를 장착한 IBM-PC에서 수행되었다. 유전 파라미터들은 예비실험을 통하여 결정하였다. 첫째, 모집단의 크기는 100(10×10의 격자구조)으로 하였다. 둘째, 식 (11)에서 사용된 상수 C 는 1000, α 는 0.1로 두었다. 셋째, 돌연변이율은 개체돌연변이율은 0.1로 두었으며, 돌연변이로 선택된 개체는 본 연구에서 사용하고 있는 다섯 가지 돌연변이 연산자중 매회 동일한 확률로 한 가지의 돌연변이 연산자를 선택하여 적용하였다. 넷째, 종료조건은 개체평가횟수를 사용하였고, 각 문제마다 종료조건은 해공간의 차이를 반영하기 위하여 달리 주었다. 마지막으로 직접수송에 요구되는 셋업비용 g 는 문제의 크기에 따라 1,000에서 3,000사이의 값을 사용하였다.

4.2 진화알고리즘의 성능비교

제안한 EA의 절대적인 평가를 위해 수리모형을 통한 최적해와 비교 분석하였다. EA의 종료조건은 해의 개선이 더 이상 없는 경우로 하였으며, 최적해는 CPLEX 7.5패키지를 사용하였다. 수리모형은 변수의 수가 증가함에 따라 최적해를 탐색하는 시간이 비선형으로 증가하기 때문에 비교적 작은 문제를 사용하였다.

<표 2> EA와 최적해와의 성능비교 (n=10,)

문제	구분	CPLEX	EA
AP10 (LL)	최적해	206456.5920	206456.5920
	허브	3, 6	3, 6
	스포크	3, 3, 3, 3, 6, 3, 6, 6, 6, 6	3, 3, 3, 3, 6, 3, 6, 6, 6, 6
	직접수송	(0, 1) (0, 2) (2, 0) (2, 4) (7, 5) (7, 9) (9, 7)	(0, 1) (0, 2) (2, 0) (2, 4) (7, 5) (7, 9) (9, 7)
	시간	13.52(초)	0.84(초)
AP10 (LT)	최적해	223190.1200	223190.1200
	허브	4, 5	4, 5
	스포크	4, 5, 4, 5, 4, (6, 9), (7, 6),	4, 5, 4, 5, 4, (6, 9), (7, 6),
	직접수송	시간	150.05(초)
AP10 (TL)	최적해	223461.9570	223461.9570
	허브	3, 4	3, 4
	스포크	4, 3, 4, 3, 4, (6, 9), (7, 6),	4, 3, 4, 3, 4, (6, 9), (7, 6),
	직접수송	시간	106.14(초)
AP10 (TT)	최적해	223461.9570	223461.9570
	허브	3, 4	3, 4
	스포크	4, 3, 4, 3, 4, (6, 9), (7, 6),	4, 3, 4, 3, 4, (6, 9), (7, 6),
	직접수송	시간	98.36(초)

<표 1>은 EA와 최적해의 비교를 위한 실험문제의 구성 및 실험결과를 보인 것이다. 비교적 작은 크기의 문제이지만 각 지점의 허브의 용량과 설치비용에 따른 제약의 강약을 표현 할 수 있도록 실험을 설계하였다. <표 1>에서 최적해 및 EA의 결과값은 모든 제약을 만족한 해들이고, EA의 결과값은 10회 반복 실험하여 얻은 가장 좋은 해를 나타낸 것이다. 실험결과, EA는 모든 문제에서 최적해와 같은 해를 찾았으며 계산시간 측면에서는 현저히 앞서는 것을 다시 한번 확인할 수 있었다. 이와 같이 빠른 시간에 최적해를 탐색할 수 있는 이유는 문제에 적절한 개체표현방법과 유전연산, 그리고 정보를 이용한 초기해 생성기법 및 발견적 기법이 잘 조화를 이루어 진 것으로 판단된다.

<표 2>는 지점의 수가 <표 1>에서 보다 조금 더 큰 문제에 대한 실험 결과이다. LEE data는 AP data와 유사하게 최적해에 대한 EA의 탐색성능을 평가하기 위해 새로이 만든 문제이다. 이 문제에서 역시 EA는 최적해를 탐색함을 알 수 있었다. 이보다 더 큰 문제는 최적해를 찾는데 드는 계산시간상의 이유로 비교하지 못했다.

(TT)		8, 58, 119,
허브	8, 90, 108, 125, 179, 190, 197	125, 139, 150, 169, 190

<표 2.2>에서 알 수 있듯이 문제의 크기(20LL, 40LL, 100LL, 200LL)에 대해서는 직접수송이 그다지 큰 영향을 주지 못하지만, 각 지점이 갖는 허브 용량이 상대적으로 작을 경우(20TT, 40TT, 100TT, 200TT)에는 직접수송을 고려함으로써 보다 효율적인 네트워크를 설계할 수 있음을 알 수 있다.

이는 단순히 시점과 종점 사이의 허브를 통한 수송과 직접수송에 대한 경로의 결정으로 인한 것이 아니며, 스포크의 허브 할당은 허브의 용량에 따라 할당여부가 결정되는데 직접수송은 여기에 영향을 미치게 되고, 이는 또한 시스템 전체의 네트워크 구조에 변화를 주게 된다. 이처럼 직접수송은 단순한 경로 결정이 아닌 허브의 용량제한과 밀접한 관계를 가지고 있어 시스템 전체의 효율성에 영향을 주는 것으로 해석할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 허브의 용량제한과 직접수송이 있는 hub-and-spoke 수송네트워크에서 총 물류비용을 최소화할 목적으로 하는 허브위치선정문제를 해결하기 위하여, 이를 수리모형화 하고 진화알고리즘을 적용하였다. 이를 위해 CHLPwD에 적합한 개체표현과 교차연산자 그리고 재할당 기법을 개발하였으며, 초기 모집단의 개체생성시 문제의 크기와 복잡도에 따라 적절한 정보를 이용하였다. 그리고 AP data set에 대해 알고리즘의 성능 및 직접수송이 네트워크 설계에 미치는 영향에 미치는 효과에 대하여 실험하였다.

실험 결과, 크기가 작은 문제에 대해서는 최적해를 찾는 CPLEX 소프트웨어를 이용하여 얻은 해와 동일한 해를 탐색함을 보였고, 큰 문제에 대해서는 발견적 기법을 통하여 얻은 해와 비교했을 때 상대적으로 진화알고리즘으로 구한 해가 우수함을 보였다. 마지막으로 용량제한이 있는 네트워크 설계에 직접수송을 고려함으로써 보다 효과적으로 네트워크를 구성할 수 있음을 보였다. 이는 허브의 용량제한과 직접수송이 상호관련성을 갖고 있기 때문인 것으로 보인다.

추후 연구과제로는 현재 다루고 있는 CHLPwD를 보다 확장하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 2004년도 한국학술진흥재단 지역대학우수과학자 지원사업(D00715; R05-2004-000-10909-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

Aykin, T., (1994), Lagrangian relaxation based approaches to capacitated hub-and-spoke network design problem, *European Journal of Operational Research*, **79**, 501-523.

Aykin, T., (1995), The hub location and routing problem, *European Journal of Operational Research*, **83**, 200-219.

Beasley J. E.,(1990), OR-library: distributing test problem by electronic mail, *Journal of the Operational Research*, **41**, 1069-1072.

Boland, N., Krishnamoorthy, M., Ernst, A.T. and Ebery, J., (2004), Preprocessing and cutting for multiple allocation hub location problems, *European Journal of Operational Research*, **155**, 638-653.

Ebery, J., Krishnamoorthy, M., Ernst, A. and Boland, N., (2000), The capacitated multiple allocation hub location problem: formulations and algorithms, *European Journal of Operational Research*, **120**, 614-631.

Elhedhli, S. and Hu, F.X., (2005), Hub-and-spoke network design with congestion, *Computer and Operations Research*, **32**, 1615-1632.

Ernst, A.T. and Krishnamoorthy, M., (1999), Solution algorithms for the capacitated single allocation hub location problem, *Annals of Operations Research*, **86**, 141-159.

Hasan, P. and Vaidyanathan, J., (1998), A multi-commodity, multi-plant, capacitated facility location problem: formulation and efficient heuristic solution, *Computer Operations Research*, **25**, 869-878.

Helm, S.A. and Venkataramanan, M.A., (1998), Solution approaches to hub location problems, *Annals of Operations Research*, **78**, 31-50.

Helm, S.A., (1998), A hybrid heuristic for the uncapacitated hub location problem, *European Journal of Operational Research*, **106**, 489-499.

Kim, Y. K., Yun, B. S. and Lee, S. B., *Metaheuristics*, Yeongji Moonhwasa, Seoul, Korea. (1997).

Klincewicz, J.G., (1991), Heuristics for the p-hub location problem, *European Journal of Operational Research*, **53**, 25-37.

Lumsden, K., Dallari, F. and Ruggeri, R., (1999), Improving the efficiency of the hub and spoke system for the SKF European distribution network, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, **29**, 50-64.

Melkote, S. and Daskin, M.S., (2001), Capacitated facility location/network design problems, *European Journal of Operational Research*, **129**, 481-495.

- Michalewicz, Z., *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, the forth edition, Springer-Verlag (1999).
- Topcuoglu, H., Corut, F., Ermis, M. and Yilmaz, G., (2005). Solving the uncapacitated hub location problem using genetic algorithms, *Computer and Operations Research*, **32**, 967-984.
- Zpfel, G. and Wasner, M., (2002). Planning and optimization of hub-and-spoke transportation network of cooperative third-party logistics providers, *International Journal of Production Economics*, **78**, 207-220.