

초기투자비 제약을 고려한 입지- 경로- 재고문제의 내공생진화 알고리즘 해법

송석현 · 이상헌[†]

국방대학교 운영분석학과

Endosymbiotic Evolutionary Algorithm for the Combined Location Routing and Inventory Problem with Budget Constrained

Seok-Hyun Song · Sang-Heon Lee

Department of Operations Research, Korea National Defense University, Seoul, 122-875

This paper presents a new method that can solve the integrated problem of combined location routing and inventory problem (CLRIP) efficiently. The CLRIP is used to establish facilities from several candidate depots, to find the optimal set of vehicle routes, and to determine the inventory policy in order to minimize the total system cost. We propose a mathematical model for the CLRIP with budget constrained. Because this model is a nonpolynomial (NP) problem, we propose an endosymbiotic evolutionary algorithm (EEA) which is a kind of symbiotic evolutionary algorithm (SEA). The heuristic method is used to obtain the initial solutions for the EEA. The experimental results show that EEA perform very well compared to the existing heuristic methods with considering inventory control decisions.

Keywords: Combined Location Routing and Inventory Problem(CLRIP), Endosymbiotic Evolutionary Algorithm(EEA), Symbiotic Evolutionary Algorithm(SEA)

1. 서론

오늘날의 물류시스템은 생산자로부터 최종소비자에 이르는 제품 및 서비스의 전달 범위가 과거와 비교할 수 없을 정도로 광범위해지고 있다. 이에 따라 기업 경영자 입장에서 변화된 환경에 적합한 물류시스템의 구축 및 효율적인 운영이 중요하게 인식되고 있다. 따라서 물류시스템의 효율성 측면에서 주요 관심사인 비용절감과 서비스 향상을 위한 다양한 연구가 수행되고 있으며, 그중에서 물류시스템의 주요설비 구축에 따른 비용과 제품 수송비용, 재고관리 비용 등 제반비용을 최소화하기 위한 연구가 대부분을 차지하고 있다.

효율적인 물류시스템 설계를 위해서는 제반 비용요소들이 통합적으로 고려되어야 한다. 그런데, 지금까지의 연구는 설비입지, 수송, 재고관리 중 일정부분에만 국한되어 설비입지 문제(Facility Location Problem, 이하 FLP), 차량경로문제(Vehi-

cle Routing Problem, 이하 VRP), 입지-경로 문제(Location Routing Problem, 이하 LRP) 등이 대부분이며, 일부 재고관리를 고려한 입지-경로 문제(Combined Location Routing and Inventory Problem, 이하 CLRIP) 연구가 수행되었으나, 이 또한 입지, 경로선정별 하위문제를 구성하여 단계별로 해를 도출하는 알고리즘을 제안하였다.

기존의 LRP 연구를 살펴보면, 확정적(deterministic) 문제에 대한 exact 해법으로 Drezner(1982)는 numerical optimization 방법을 제안하였고, Laporte and Nobert(1981)는 단일 설비와 차량 수를 제한한 문제에 대해 branch-and-bound 알고리즘을 적용하였으며, Laporte *et al.*(1989)은 창고(depot) 수와 비용제한을 고려한 MDLRP(Multi-depot LRP)를 cutting planes 방법으로 해결하였다. 문제의 범위가 확장된 확정적 문제에 대한 heuristic 해법으로는 Bednar and Strohmeier(1979)가 고객의 수요량을 가중치로 한 clustering 기법과 saving 기법으로 배달경로를 도출하는

[†] 연락저자 : 이상헌 교수, 122-875 서울시 은평구 수색동 205번지 국방대학교 운영분석학과, Tel : 02-300-2374, Fax : 02-309-6233,
E-mail : leesangh@kndu.ac.kr

2010년 3월 5일 접수; 2010년 9월 6일 수정본 접수; 2010년 9월 28일 게재 확정.

해법을 제시하였고, Perl and Daskin(1985)은 입지선정과 경로 선정 단계를 반복(iterative)하는 해법을 제안하였다. 한편, 확률적(stochastic)이고 동적인(dynamic) 문제에 대해 Burness and White(1976)는 차고를 가능한 TSP tour의 중간지점에 위치시키는 반복적 해법을 제시하였고, Liu and Lee(2003)는 고객 수요의 불확실성과 재고관리 비용을 고려한 CLRIP를 clustering 기법으로 초기해를 생성한 후 drop 및 swap을 통해 개선하는 계층적 휴리스틱 기법으로 해결하였다. 이와 같이 CLRIP를 포함한 LRP의 기존연구는 문제를 특정상황으로 한정된 경우를 제외하고 대부분 exact 해법 보다 효율적인 heuristic 해법을 제안하였으며, 주로 입지-할당과 경로선정으로 분리하여 각 하위 문제별로 부분해를 구하고 이를 개선하는 단계적 해법을 적용하였다. 그러나 이런 해법은 해를 개선하는 과정에서 입지-경로-재고의 상관관계를 고려하였더라도 근본적으로는 문제를 분리함으로써 세 가지 요소를 동시에 고려하지 못하는 한계가 내재하고 있다.

따라서 본 연구에서는 문제의 현실성을 높이기 위해 차고 설치에 소요되는 초기투자비 제한을 제약조건으로 반영하며, CLRIP가 특별한 경우를 제외하고 NP-hard인(Liu and Lee, 2003) 특성과 입지-경로-재고 세 가지 요소를 동시에 고려하기 위해 메타휴리스틱 기법(meta heuristic) 중 하나인 내공생진화 알고리즘(endosymbiotic evolutionary algorithm, EEA)을 적용한다. EEA는 여러 하위문제로 구성된 복잡한 조합최적화(combinatorial optimization) 문제에 적합한 해법으로 알려진(Kim *et al.*, 2001) 공생진화알고리즘(symbiotic evolutionary algorithm, SEA)을 보완하기 위해 Bull and Fogarty(1995)가 제안한 기법이다. 기존 SEA의 경우 하위문제별 부분해(partial solution)만으로 구성된 모집단을 독립적으로 진화시킴에 따라 적합도 평가 대상인 완전해(complete solution)의 우수한 형질이 보존되기 어려웠으나 EEA는 부분해 모집단 이외 완전해로 구성된 모집단을 추가로 운영함으로써 이러한 단점을 보완하였다. 또한 EEA의 탐색효율을 높이기 위해 Liu and Lee(2003)가 CLRIP 해법으로 제안한 heuristic 기법을 준용하여 초기모집단을 생성하였다. 입지-할당시 초기투자비 범위 내에서 open-depot 가 선정되도록 단계를 구성하였으며, 입지-할당에만 국한되었던 초기해 개선을 확대하여 분할을 통한 경로개선 단계를 추가하였다.

본 논문의 구성은 제 2장에서 문제정의와 수리모형을 제시하고, 제 3장에서는 CLRIP 해결을 위해 heuristic 기법을 도입한 EEA를 제안하며, 제 4장에서는 기존연구에서 제안한 heuristic 기법과 탐색성능을 비교함으로써 제안한 알고리즘의 효율성을 입증한다. 마지막으로 제 5장에서는 결론 및 향후 연구 과제를 제안한다.

2. CLRIP 수리모형

2.1 문제정의 및 가정 사항

본 연구의 범위는 분배센터(distribution center, DC)와 소매점

(retailer)으로 구성된 물류네트워크에서 입지/수송/재고관리를 포함한 전체 물류비용을 최소화하는 depot 설치 수와 입지를 선정하고, 용량제약이 있는 배달차량의 경로를 결정하는 것이다. 이때, 차량유형은 동일(homogeneous)하고 단일품목을 배달하는 것으로 가정한다. 초기투자비 제한은 depot 설치비용으로 한정하고, 문제의 단순화를 위한 가정 사항은 다음과 같다.

- 1) DC 입지후보지 위치와 설치비용은 알려져 있으며, 용량제약은 없다.
- 2) 소매점의 위치와 수요량은 알려져 있으며, lead time 동안 수요량은 특정 확률분포를 따른다.
- 3) 각 소매점은 단일 DC로부터 제품을 공급받고, 각 배달경로는 차량 한대만 운영된다.
- 4) 각 배달경로에 포함된 소매점의 총 수요량은 기간 동안 차량의 수송가능 용량보다 작아야 한다.
- 5) 모든 차량은 출발한 DC로 복귀해야 한다.
- 6) 주문비용과 단위 제품 당 재고유지 비용, 재고부족 비용, 수송비용은 알려져 있다.

2.2 수리모형

Liu and Lee(2003)가 제안한 수리모형을 준용하여 초기투자비 제약을 추가한 모형을 수립하였다.

<Notation>

M : DC 입지후보지의 집합, $M = \{1, 2, \dots, m\}$

N : 소매점의 집합, $N = \{1, 2, \dots, n\}$

V : 경로의 집합, $V = \{1, 2, \dots, v\}$

s : 차량의 1회 적재용량

\bar{s} : 기간 동안 차량의 수송가능 용량

e_j : DC j 설치비용

E : 초기 투자비 상한

f : 차량 1대당 고정비용

c : 단위 거리 당 운송비

h^+ : 제품 단위당 재고유지비용

h^- : 제품 단위당 재고부족비용

A : 1회 주문 시 주문비용

d_{kgh} : 경로 k 에서 node g 에서 h 로 이동하는 총 이동거리

Q_{kgh} : 경로 k 에서 node g 에서 h 까지 이동경로에 포함된 소매점에 대한 총 배달수량

U_{kgh} : 경로 k 에서 node g 에서 h 까지 이동경로에 포함된 소매점의 lead time 동안 총 수요량

D_{kgh} : 경로 k 에서 node g 에서 h 까지 이동경로에 포함된 소매점의 총 수요량

R_{kgh} : 경로 k 에서 node g 에서 h 까지 이동경로에 포함된 소매점의 재주문 기준 재고량

B_{kgh} : 경로 k 에서 node g 에서 h 까지 이동경로에 포함된 소

매점의 평균 재고부족량

i : index of Retailer

j : index of DC

k : index of Route

g : index of DC or retailer

h : index of DC or retailer

<Decision variable>

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{소매점 } i \text{가 DC } j \text{에 할당된 경우 } i \in N, j \in M \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Z_j = \begin{cases} 1, & \text{입지후보지 } j \text{에 DC 설치시} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$X_{kgh} = \begin{cases} 1, & \text{경로 } k \text{에서 차량이 node } g \text{에서 } h \text{로 이동하는 경우} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Minimize

$$\sum_{j=n+1}^{n+m} e_j \times Z_j + \sum_{k=1}^v \sum_{g=1}^{n+m} \sum_{h=1}^{n+m} [(f+c \times d_{kgh}) \times \frac{D_{kgh}}{Q_{kgh}} + \left(\frac{Q_{kgh}}{2} + R_{kgh} - U_{kgh} \right) \times h^+ + \left(\frac{D_{kgh}}{Q_{kgh}} \times A \right) + \left(h^- \times B_{kgh} \times \frac{D_{kgh}}{Q_{kgh}} \right)] \times X_{kgh} \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{j=n+1}^{n+m} e_j \times Z_j \leq E \quad (2)$$

$$Q_{kgh} \leq s \quad (3)$$

$$D_{kgh} \leq \bar{s} \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^v \sum_{h=1}^{n+m} X_{kih} = 1, \quad \forall i \in N \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^v \sum_{g=1}^{n+m} \sum_{h=1}^{n+m} X_{kgh} \geq 1 \quad (6)$$

$$\sum_{g=1}^{n+m} X_{kgh} - \sum_{g=1}^{n+m} X_{khg} = 0, \quad \forall k \in V, \quad \forall h \in N \cup M \quad (7)$$

$$\sum_{j=n+1}^{n+m} \sum_{i=1}^n X_{kij} \leq 1, \quad \forall k \in V \quad (8)$$

$$\sum_{h=1}^{n+m} X_{kih} + \sum_{h=1}^{n+m} X_{kjh} - Y_{ij} \leq 1, \quad (9)$$

$$\forall i \in N, \quad \forall j \in M, \quad \forall k \in V$$

$$X_{kgh} = 0 \text{ or } 1, \quad \forall g \in N \cup M, \quad (10)$$

$$\forall h \in N \cup M, \quad \forall k \in V$$

$$Z_j = 0 \text{ or } 1, \quad \forall j \in M \quad (11)$$

$$Y_{ij} = 0 \text{ or } 1, \quad \forall i \in N, \quad \forall j \in M \quad (12)$$

목적함수 식 (1)은 DC 설치비용과 제품 수송비용, 재고관리비용의 합을 최소화하는 것이다. 식 (2)는 DC의 설치비용은 초기투자비 제약을 만족해야함을 나타내고, 식 (3)은 각 경로별 차량 1회 운행시 배달수량은 차량 적재용량 보다 작아야함을

의미한다. 식 (4)는 각 경로에 포함된 소매점의 총 수요량은 기간 동안 차량의 수송가능 용량 제약을 만족해야함을 의미하고, 식 (5), (8), (9)는 모든 소매점 하나의 경로에만 포함되어야함을 나타내며, 식 (6)은 각 차량의 출발과 도착을 동일한 DC로 한정한다. 식 (7)은 경로 진행간 차량이 도착한 node에서 출발하면서 배달을 진행해야함을 의미하고, 식 (10)-식 (12)는 결정변수의 정수조건을 나타낸다. 이때 수리모형에서 경로 k 에 포함된 모든 소매점에 대한 1회 배달수량을 의미하는 Q_{kgh} 와 재주문 기준 재고량 R_{kgh} , 평균재고 부족량 B_{kgh} 는 Hadely and Whitin(1963)에 의해 제안된 방법을 적용하여 다음과 같이 산출한다.

Step 1 : $p = 1, (R_{kgh})_p = 0$

Step 2 : 식 (13)을 이용하여 $(B_{kgh})_p$ 산출

$$\left((B_{kgh})_p = \int_{R_{kgh}}^{\infty} (x - (R_{kgh})_p) f_L(x) dx \right) \quad (13)$$

$(f_L(x) : \text{lead time 동안 수요량 p.d.f.})$

Step 3 : 식 (14)를 이용하여 $(Q_{kgh})'_p$ 산출

$$(Q_{kgh})'_p = \sqrt{\frac{2D_{kgh}(c \times d_{kgh} + f + h^- \times (B_{kgh})_p)}{h^+}} \quad (14)$$

Step 4 : 식 (15)를 이용하여 $(R_{kgh})'_p$ 산출

$$F_L((R_{kgh})'_p) = 1 - \left(\frac{h^+ \times (Q_{kgh})'_p}{h^- \times D_{kgh}} \right) \quad (15)$$

$(F_L(x) : f_L(x) \text{의 c.d.f.})$

Step 5 : $(Q_{kgh})'_p \approx (Q_{kgh})'_{p-1}$ or $(R_{kgh})_p \approx (R_{kgh})'_p$ 이면,

$$(Q_{kgh}, R_{kgh}) = ((Q_{kgh})'_p, (R_{kgh})'_p)$$

otherwise, $(R_{kgh})_{p+1} = (R_{kgh})'_p$ and $p = p + 1$,

Step 2부터 반복

3. 내공생진화 알고리즘(EEA)

3.1 알고리즘 개요

본 연구에서 정의한 문제의 근사최적해를 구하기 위해 적용하는 내공생진화 알고리즘(EEA)은 공생진화 알고리즘(SEA)의 한 형태로 SEA는 자연계의 여러 종들이 서로 영향을 주고받으며 진화하는 공진화(coevolution) 과정을 모방한 확률적 탐색기법이다(Koza, 1992). SEA에 대한 연구는 Potter(1997), Moriarty and Miikkulainen(1997), Kim *et al.*(2000)에 의해 여러 변형들이 제안되었으며, 공통적으로 각 부분문제별 모집단을 별도로 구성하여 상호 공생작용을 통해 해를 개선함으로써 기존의 계층적 방법보다 우수한 해를 도출하였다. 그러나 SEA는 각 부분모집단을 독립적으로 진화시킴에 따라 세대 진행간 우수한 개체의 보존을 방해하는 단점이 있다(Potter, 1997). 이러한 단점을 극복하기 위해 Bull and Fogarty(1995)는 자연계의 내공

생진화(endosymbiosis) 과정을 모방한 새로운 SEA를 제안하였다. 이를 내공생진화 알고리즘이라 하고(Kim *et al.*, 2001), EEA는 기존 SEA와 달리 부분모집단간 공생 뿐 아니라 부분해(partial solution) 결합을 통해 형성된 우수한 완전해(complete solution)들로 별도 모집단을 구성하면서 동시에 공생을 허용하여 일정기간 우수한 개체결합을 유지한 상태로 진화할 수 있는 여건을 보장한다.

EEA는 기존 진화 알고리즘과 달리 하위 문제별 별도모집단을 운영하는 특성상 탐색성능 향상을 위해 진화 세대마다 각 부분 모집단내 일부개체를 진화대상으로 선정하는 이웃(neighborhood)진화전략을 적용한다. 이웃진화전략은 일반적인 진화 알고리즘의 탐색 성능이 모집단의 다양성에 의해 결정된다는 데 착안하여 개발되었다(Davidor, 1991). 본 연구에서는 이웃진화를 위해 $n \times n$ 의 이웃구조를 고려한다. 모든 모집단은 2차원 격자구조로 구성하며, 이웃집단은 모집단의 위치 (i, j) 개체와 그 주위 이웃을 형성하는 $n \times n - 1$ 개의 개체로 구성한다.

공생진화 알고리즘에서 각 개체의 적응도는 완전 해를 구성한 상태에서만 평가될 수 있다. 따라서 완전 해를 구성하기 위해 상대 모집단의 개체들이 필요하고, 어떤 개체를 공생파트너로 선택하느냐가 개체의 적응도 평가에 중요한 결정사항이 된다. 공생진화 알고리즘의 공생파트너 선택을 고려한 연구 중 Kim *et al.*(2000)은 다양한 전략의 성능을 비교·분석하여 알고리즘의 소요시간과 구현 용이성을 고려할 때, 임의선택 전략(random)을 선택하는 것이 타당함을 제안하였다. 임의선택 전략은 이웃집단내 모든 개체의 공생파트너를 상대 이웃집단에서 임의로 선택한 한 개체로 선정하는 방법이다.

3.2 알고리즘 수행절차

EEA의 수행절차는 Kim *et al.*(2001)에 의해 제안된 절차에 heuristic 기법을 적용한 초기 부분모집단 생성 단계를 추가하여 LAP와 VRP의 두 부분문제로 나뉘는 CLRIP를 대상으로 구성하였다. 이때, Pop-L과 Pop-R은 각각 LAP와 VRP문제의 부분해로 구성된 부분모집단을 나타내고, Pop-LR은 완전해로 구성된 모집단을 의미한다. 각 모집단에서 선정된 이웃개체들로 구성된 이웃집단은 NL_{ij} , NR_{ij} , NLR_{ij} 로 정의한다. l 와 r 은 각각 Pop-L과 Pop-R의 부분해 개체로서 상호 결합하여 완전해를 형성하는 공생자(symbiont)를 나타내고, $l_u r_u$ 는 Pop-LR의 완전해 개체로 각 부분모집단 개체와 새로운 조합을 통한 경쟁과 동시에 자체 진화하는 내공생자(endosymbiont)를 나타낸다. 적합도 평가함수 $f(x)$ 는 완전해 개체를 대상으로 수리모형에서 정의한 식 (1)을 적용한다.

Step 1 : 초기모집단 생성

Heuristic 기법과 임의생성을 모집단 개체 수만큼 확률적으로 선택하여 Pop-L 및 Pop-R 생성(Pop-LR = \emptyset)

Step 2 : 초기적응도 평가

생성된 두 모집단의 같은 위치 개체들을 짝지어 초기 적응도 평가 후, 가장 좋은 해를 f_{best} 로 설정한다.

Step 3 : 이웃설정

임의의 위치 (i, j) 에 대해 $n \times n$ 규모의 이웃 NL_{ij} , NR_{ij} , NLR_{ij} 를 정의한다. If $NLR_{ij} = \emptyset$ 이면, go to Step 5

Step 4 : NLR_{ij} 과 NL_{ij} , NR_{ij} 간 경쟁

① NLR_{ij} 과 NL_{ij} 의 경쟁

NLR_{ij} 의 개체 $l_u r_u$ 에 대해 $f(l_r u)$ 가 $f(l_u r_u)$ 보다 큰 NL_{ij} 의 개체 l 이 존재하면, NLR_{ij} 에 있는 $l_u r_u$ 를 l_r 로 대체하고, NL_{ij} 의 l 은 l_u 로 대체한다.

② NLR_{ij} 과 NR_{ij} 의 경쟁

NLR_{ij} 의 개체 $l_u r_u$ 에 대해 $f(l_u r)$ 가 $f(l_u r_u)$ 보다 큰 NR_{ij} 의 개체 r 이 존재하면, NLR_{ij} 에 있는 $l_u r_u$ 를 $l_u r$ 로 대체하고, NR_{ij} 의 r 은 r_u 로 대체한다.

Step 5 : NL_{ij} , NR_{ij} 간 공생을 통한 잠재내공생자(potential endosymbiont) 생성

① NL_{ij} 과 NR_{ij} 간 공생파트너를 선택하여 개체들의 적응도를 평가한다.

② 과정 ①에서 가장 적응도가 높은 개체 조합을 잠재내공생자 $l_p r_p$ 로 $f(l_p r_p)$ 가 f_{best} 보다 크면, f_{best} 를 갱신한다.

Step 6 : 기존 내공생자와 잠재내공생자간 경쟁

① If, $NLR_{ij} = \emptyset$ 이면, $l_p r_p$ 를 NLR_{ij} 의 (i, j) 위치에 삽입하고, NL_{ij} 과 NR_{ij} 에서 l_p 와 r_p 를 제거 후, go to Step 7

② Otherwise, $f(l_p r_p)$ 가 NLR_{ij} 내 가장 적응도가 낮은 $f(l_u r_u)$ 보다 크면, $l_p r_p$ 와 $l_u r_u$ 를 대체한다. 대체된 내공생자 $l_u r_u$ 는 l_u 와 r_u 로 분리하여 l_p 와 r_p 의 위치에 삽입하고, 이 두 개체의 적응도는 $f(l_u r_u)$ 로 설정한다.

Step 7 : NL_{ij} , NR_{ij} 진화

Step 8 : 단기진화종료조건(Step 3의 누적 수행횟수)을 만족하면 go to Step 9, otherwise, go to Step 3

Step 9 : Pop-LR 진화

Step 10 : 장기진화종료조건(진화 세대수)을 만족하면 알고리즘 종료, otherwise, go to Step 3

3.3 초기모집단 생성

초기모집단 생성을 위해 heuristic 기법과 임의생성(random generate)의 두 가지 방법을 생성비율에 따라 선택적으로 적용한다. 임의생성은 LAP 및 VRP 유전자표현에 따라 난수를 발생시켜 부분해 형태의 개체를 모집단 개체 수만큼 생성하며, LAP 부분해 생성시에는 초기투자비 제한을 고려해 depot 설치비용이 초기투자비 보다 커지는 인자부터는 기존 open-depot을 제외한 난수발생을 제한한다. 이때, VRP 부분해의 경우 각

인자값이 소매점별 배달순서를 의미하므로 난수 중복발생은 허용하지 않는다.

Heuristic 기법은 기존 Liu and Lee(2003)가 제안한 2단계 해법에 경로개선 및 open-depot 선정시 초기투자비 제한 만족여부를 검토하는 절차를 추가하였다. 기존 기법에서 고려하지 않은 경로개선을 추가하기 위해 system cost 감소여부에 따른 경로분할을 적용하였다. 이때, 경로분할은 각 경로별 open-depot 선정시 산출한 중점에서 가장 원거리에 위치한 소매점부터 별도 경로로 분리하면서 해의 개선여부를 확인하는 방법으로 수행한다. 초기투자비 제한은 초기해 생성과 입지-할당 개선 단계에서 만족여부를 확인하도록 반영하였다. Heuristic 기법에 의해 초기모집단을 생성하는 절차는 다음과 같다.

3.3.1 소매점 clustering

소매점 clustering을 통해 각 경로별 포함되는 소매점과 배달순서를 결정한다. 이때, 경로생성은 차량 용량제약을 고려하여 system cost 증가를 최소화하는 소매점부터 우선 포함시키는 방법을 적용한다.

Step 1 : ① $k = 1, r = 1, MaxSup =$ 기간 동안 차량 수송가능 용량, $F_max =$ 초기투자비, $f = 0, max_swap = 0$ 으로 초기화

② 모든 소매점과 DC를 각각 F와 E 집합으로 분류

Step 2 : 집합 F에서 임의의 소매점 한 개를 선택하여 경로집합 V_k 에 할당하고, 해당 소매점을 F에서 삭제한다.

Step 3 : 경로 V_k 에 포함할 다음 배달순서 소매점 W를 집합 F에서 marginal cost C_s 가 최소인 소매점으로 선정한다. 이때,

$C_s = S(V_k + W) - S(V_k)$ 이며, $S(V_k + W)$ 및 $S(V_k)$ 는 수리모형에서 정의한 식 (16)을 적용하여 산출한다.

$$\left((f + c \times d_{kgh}) \times \frac{D_{kgh}}{Q_{kgh}} + \left(\frac{Q_{kgh}}{2} + R_{kgh} - U_{kgh} \right) \times h^+ + \frac{D_{kgh}}{Q_{kgh}} \times A + h^- \times B_{kgh} \times \frac{D_{kgh}}{Q_{kgh}} \right) \quad (16)$$

Step 4 : 선정된 소매점 W와 기존 V_k 에 포함된 소매점의 수요량 합이 $MaxSup$ 이내이면, 소매점 W를 V_k 의 다음 배달순서 소매점으로 포함하고 집합 F에서 삭제한 후, Step 5로 진행한다. otherwise, $k = k + 1$, 새로운 경로 V_k 에 포함한다.

Step 5 : 집합 F에 추가로 포함할 소매점이 없을 경우 종료, otherwise, Step 3부터 반복한다.

3.3.2 DC 입지선정 및 할당

생성된 경로별 초기투자비 제한을 고려하여 각 경로의 출발과 도착점이 되는 DC를 선정하는 단계는 다음과 같다. 이때, 경로를 구성하는 소매점들의 수요량을 가중치로 산정한 중점으로부터 거리를 기준으로 DC open을 판단한다.

Step 1 : $V_t (1 \leq t \leq k)$ 의 중심 좌표 (X_t, Y_t) 를 식 (17)을 적용하여 산출한다.

$$\left(X_t = \frac{\sum_{i=1}^{q_cm_t} x_i \times D_i}{\sum_{i=1}^{q_cm_t} D_i}, Y_t = \frac{\sum_{i=1}^{q_cm_t} y_i \times D_i}{\sum_{i=1}^{q_cm_t} D_i} \right) \quad (17)$$

(q_cm_t : 경로 V_t 를 구성하는 소매점의 수

D_i : 경로 V_t 를 구성하는 소매점 i 의 수요량

(x_i, y_i) : 소매점 i 의 좌표)

Step 2 : ① 집합 E에서 경로 V_r 의 중점과 가장 근접한 DC부터 순서 부여 후, 빠른 순서부터 개소 고려

② $f = f + f_j$ (DC j 설치비용), 이때, 이미 해당 DC가 다른 경로에 포함된 경우 $f_j = 0$ 으로 한다.

③ $f \leq F_max$ 이면, 해당 DC를 V_r 의 출발과 도착점으로 선정하고 $r = r + 1$, otherwise, $f = f - f_j$ 로 이미 고려한 DC를 제외하고 Step 2를 반복한다.

Step 3 : $r > k$ 이면, Step 4로 진행하고, otherwise, Step 2를 반복한다.

Step 4 : ① 수리모형의 목적식을 이용하여 총 물류비용 SC 산출

② 초기해 SC 및 경로 V_t 를 일시 최적해로 하여

$$SC' = SC, U_t = V_t (1 \leq t \leq k)$$

3.3.3 경로개선

생성된 초기해는 경로개선과 입지개선을 통해 초기모집단 개체로 포함된다. 경로개선은 초기해를 구성하는 경로 $U_t (1 \leq t \leq k)$ 에 대한 경로분할을 통해 system cost 감소여부를 확인하는 절차로 구성된다.

Step 1 : $t = 1, q = k, SC_t = 0, p = n$ (경로 내 소매점수)

Step 2 : 경로 V_t 에 포함된 소매점을 경로 중점에 근접한 순서로 서열을 부여한다.

Step 3 : ① 가장 마지막 소매점부터 서열 p 까지 소매점을 분리하여 별도 경로를 구성하고, 경로 중점에 근접한 DC부터 포함여부를 검토한다. 이때, 중점은 DC 입지선정 단계와 동일하게 산출한다.

② $f = f + f_j$ (DC j 설치비용), 이때, 이미 해당 DC가 다른 경로에 포함된 경우 $f_j = 0$ 으로 한다.

③ $f \leq F_max$ 이면, 해당 DC를 새롭게 구성된 경로에 포함하여 총 물류비용 SC 를 산출하고, otherwise, $f = f - f_j$, 이미 고려한 DC를 제외하고 step 3-①부터 반복한다.

Step 4 : $SC < SC'$ 이면, $SC' = SC, SC_t = SC'$ 으로 새로운 경로를 $k + 1$ 번째 경로로 포함한 후, $p = p - 1$ (단, $p \geq 1$), $f = f - f_j$, Step 3을 반복하고, otherwise, Step 5로 진행한다.

Step 5 : $SC_t \neq 0$ 이면, $k=k+1$, $t=t+1$ (단, $t \leq q$), $SC_t = 0$ 으로 step 2부터 반복하고, *otherwise*, $t=t+1$ (단, $t \leq q$), Step 2부터 반복한다.

Step 6 : $t=q$ 까지 완료 후, $U_t = V_t$ ($1 \leq t \leq k$)

3.3.4 입지-할당 개선

초기해를 개선하는 최종단계로서 경로별 DC 교환(swapping)을 통해 system cost 개선여부를 확인한다. 이때, DC 교환은 모든 DC 후보지를 대상으로 하며, 초기투자비 제한을 고려한다.

Step 1 : ① V_t ($1 \leq t \leq k$)에 포함된 DC를 1개소씩 폐소하고, 전체 물류비용 SC 를 최소화하는 DC에 해당경로를 할당한다.

② $NOD = NOD - 1$, 이때, NOD 의 초기값은 V_t 에서 개소된 DC의 수로 한다.

Step 2 : $SC < SC'$ 이면, $SC' = SC$, $U_t = V_t$ ($1 \leq t \leq k$), $f = f - f_j$ (폐소 DC j 설치비용)로 Step 3으로 진행하고, *otherwise*, 조건 변동하지 않고 Step 3으로 진행한다.

Step 3 : $NOD = 1$ 이면, Step 4로 진행하고, *otherwise*, Step 1부터 반복한다.

Step 4 : ① $V_t = U_t$ ($1 \leq t \leq k$)

② 개소된 DC와 폐소된 DC 중 임의로 각각 j, l 1개소씩 선정하여 교환한 후, SC 를 산출한다. 이때, $f = f - f_j + f_l$ 이며, $f \leq F_{max}$ 조건을 만족해야 한다.

Step 5 : $SC < SC'$ 이면, $SC' = SC$, $U_t = V_t$ ($1 \leq t \leq k$)로 Step 6으로 진행하고, *otherwise*, $max_swap = max_swap + 1$, Step 6으로 진행한다.

Step 6 : max_swap 이 default value[DC 후보지 수/2(Tuzun and Burke, 1999)] 보다 크면, 현재 SC' 과 U_t ($1 \leq t \leq k$)를 best solution으로 하고, *otherwise*, Step 4부터 반복한다.

3.4 유전자 표현

잠재해의 유전자 표현은 문제의 특성에 의해 결정된다. 본 연구에서 다루는 CLRP의 경우 잠재 해는 입지-할당과 차량경로를 결정하는 형태로 표현된다. <Figure 1>은 3개의 DC 입지 후보지(□)와 4개의 소매점(○)으로 구성된 물류망에서 하나의 실행 가능해(feasible solution)를 보여준다.

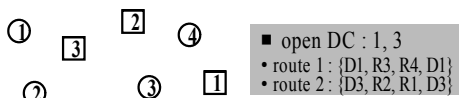


Figure 1. Example for a feasible solution

<Figure 1>의 실행 가능해에서 소매점의 할당을 고려한 DC 입지선정은 <Figure 2>와 같이 표현된다. m 개 DC 후보지와 n

개 소매점으로 구성된 물류네트워크에서 잠재해를 표현한 개체 내 인자의 위치는 1부터 n 까지 소매점을 나타낸다. 인자 값은 1부터 m 까지 DC후보지 중 DC가 설치되는 후보지를 나타내며, 각 소매점의 할당을 동시에 표현한다. 차량경로 선정 부분에는 인자의 위치는 동일하게 1부터 n 까지 소매점을 나타내고, 인자 값은 해당 소매점의 배달순서를 의미한다. 즉, 1부터 n 까지 값으로 표현되는 배달순서는 소매점이 DC에 할당됨에 따라 형성되는 소매점 부분집합에서 상대적인 배달순서를 나타내고 있다. <Figure 3>에서는 DC 3에 할당된 1번과 2번 소매점의 배달경로가 {D3, R2, R1, D3}로 형성되었음을 알 수 있고, DC 1에 할당된 3번과 4번 소매점은 {D1, R3, R4, D1}의 경로를 구성함을 보여준다. 이때, 기간 동안 차량 수송가능 용량제약을 고려하여 각 DC에서 운용하는 차량의 수가 결정된다. 예를 들어 D3으로 부터 제품을 공급받는 R1과 R2의 수요량 합이 가능 용량보다 클 경우 차량 두 대를 운용하여 {D3, R2, D3}, {D3, R1, D3}의 별도 경로를 구성해야 한다.

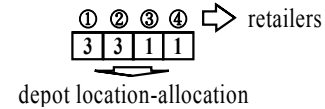


Figure 2. Genetic representation for the LAP

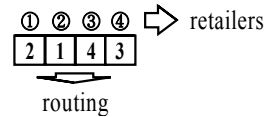


Figure 3. Genetic representation for the VRP

3.5 적합도평가 및 유전연산

공생진화 알고리즘에서 개체의 적합도는 각 부분모집단 개체가 결합하여 완전해 상태로 평가된다. 적합도 평가함수 $f(x)$ 는 수리모형에서 정의된 목적식 (1)을 사용하고 평가값이 비용이므로 비용이 적은 개체가 높은 적합도를 갖도록 $1/f(x)$ 값을 해당 개체의 적합도로 설정한다. 적합도 평가 후, 완전해를 다시 부분해로 분리하여 분리된 개체에 완전해와 동일한 적합도를 부여한다.

선별(selection)은 적합도에 의해 현세대의 모집단으로부터 다음 세대에 생존할 개체를 선택하는 과정으로 본 연구에서는 일정세대 이후부터 완전해의 적합도 차이가 근소하여 확률값이 거의 동일할 경우 적합도가 가장 높은 개체부터 차례로 순위를 부여하고, 등간격 순위에 따라 선별확률을 부여하는 순위선별(rank selection) 방법을 사용한다.

교차(crossover)연산자는 문제에서 정의한 제약조건을 반영하여 재생산된 개체가 가능해 조건을 만족해야 한다. 본 연구에서는 각 모집단별 개체구성 특성을 고려하여 교차연산자를 구성한다. LAP 모집단의 경우 일점교차 및 이점교차에 의한

경우 초기투자비 제한으로 실행불가능해가 발생할 수 있으므로 순서교차를 변형하여 한 부모개체로부터 부분적인 인자를, 다른 부모개체로부터 각 인자의 상대적인 순서를 유지하여 받아들이는 방법을 적용한다. 이때, VRP 모집단은 일반적인 순서교차를 적용하며, 완전해 모집단은 부분해 상태로 분리하여 각 유형별 연산방법을 적용한다. LAP 모집단 교차에 적용하는 변형된 순서교차방법은 다음과 같다.

- Step 1 : n 개 인자로 구성된 두개의 부모 개체에 대해 $[1, n-1]$ 서로 다른 두개의 난수를 발생시켜 교차지점을 선정한다.
- Step 2 : 각 부모개체로부터 두 교차지점의 중간부분 인자를 상속받은 자식개체를 생성한다.
- Step 3 : 두 번째 교차점 이후부터 다른 부모개체 인자에 상대적인 순서를 부여하고, 자식개체 포함여부를 검토한다. 이때, 포함기준은 초기투자비로 이미 상속받은 인자에 의한 DC 설치비용을 누적하여 제한범위를 벗어나는 인자부터 제외시킨다.

돌연변이는 개체의 형질을 변화시켜 기존 부모개체와 다른 형질을 갖게 함으로써 다양한 해공간의 탐색을 가능하게 한다. 본 연구에서는 입지-할당 모집단과 경로선정 모집단 모두 공통적으로 교환방법(swapping)을 사용하여 돌연변이 연산을 수행한다. 돌연변이 연산을 수행할 개체는 각 개체별 $[0, 1]$ 난수를 발생시켜 돌연변이율(P_m) 이하 개체를 선정하고, 완전해 모집단 개체에 대한 돌연변이연산은 교차연산과 동일하게 각 부분해 개체로 분리하여 수행한다.

3.6 엘리트 보존

일반적인 진화알고리즘에서 다음세대 모집단 생성을 위한 진화연산은 확률적 선택에 의해 진행되기 때문에 매 세대마다 생성되는 우수한 개체의 보존 및 진화를 보장할 수 없다. 따라서 이런 진화알고리즘의 단점을 보완하기 위해 현대에서 우수하게 평가된 개체가 다음세대에도 계속해서 진화될 수 있도록 우선적으로 보존하는 엘리트 보존 전략을 적용한다. 본 연구에서는 세대 진행간 선별된 우수한 개체를 이웃집단의 중심(i, j)에 위치시키고, 이를 제외한 $n \times n - 1$ 개 개체만 추가하여 다음세대 이웃집단을 구성하는 전략을 적용한다.

4. 실험 및 결과분석

4.1 실험설계

본 연구의 실험은 3단계로 진행하였다. 1단계는 최적의 유전 파라미터를 결정하기 위해 발견적기법에 의한 초기모집단

개체 생성비용, 유전연산시 교차율 및 돌연변이율, 이웃진화를 위한 이웃집단의 규모를 결정한다. 2단계는 제안한 EEA의 탐색성능 입증에 위해 Liu and Lee(2003)의 예제를 준용하여 DC 수가 5개, 10개인 경우에 각각 소매점 수 $[10, 50]$, $[20, 100]$ 인 물류네트워크를 구성하고, CLRIP 해결을 위해 Liu and Lee(2003)가 제안한 알고리즘(이하 HM)과 실험결과를 비교하였다. 이때, 동일한 실험조건을 설정하기 위해 초기투자비 제한은 고려하지 않는다. 마지막 3단계는 system cost에 영향을 미치는 요인에 대한 민감도분석을 통해 상관관계를 판단한다. 실험을 위해 모집단의 개체 수는 100개(10×10 격자구조)로 구성하였고, 세대 진행간 단기진화종료조건은 EEA 수행 단계에서 부분해 결합을 통해 완전해를 생성하는 Step 3 수행 횟수 20회로 설정하였다. 알고리즘의 장기진화종료조건은 세대 진행수 10,000세대로 하였다. 본 연구에서 제안한 EEA와 비교 알고리즘 HM은 Visual C++ ver. 6.0으로 구현하였으며, 모든 실험은 2.13GHz Dual-Core CPU를 장착한 IBM-PC에서 수행하였다. 모든 실험에 적용하는 실험조건은 다음과 같다.

- 1) DC와 소매점의 위치좌표 (x, y) 는 $U[0, 200]^2$ 에서 생성한다.
- 2) 각 소매점의 총 수요량은 $U[200, 600]$, lead time 동안 수요량은 $U[0, 10]$ 을 따른다.
- 3) 차량의 시간 동안 수송가능 용량(\bar{s})은 3,000, 1회 수송 용량(s)은 300으로 제한한다.
- 4) 주문비용(A)은 20, 차량 1대당 고정비용(f)은 25, 재고부족비용(h^-)은 제품 단위당 2, 재고유지비용(h^+)은 단위당 0.5로 계산한다.
- 5) 수송비용(c)은 단위 거리당 1로 계산한다.

4.2 유전파라미터 결정

4.2.1 초기모집단 생성비용

Heuristic 기법과 임의생성의 최적혼합비율을 결정하기 위해 heuristic 기법에 의한 생성 비율을 변경하면서 최적해를 탐색하는 성능을 비교한다. 실험결과는 <Table 1>과 같고, 발견적기법에 의한 생성비율을 0.3으로 설정한 결과 가장 최적해로 수렴하였다.

Table 1. Results for comparison of generating rate

Generating rate		Total cost	Time(sec)
Heuristic	Random		
0.1	0.9	35687.97	64.89
0.3	0.7	32068.77	64.81
0.5	0.5	33814.08	64.34
0.7	0.3	34132.22	64.78
0.9	0.1	34496.57	64.69

4.2.2 교차율(P_c) 및 돌연변이율(P_m) 결정

유전연산을 통해 해를 개선하는 과정에서 교차와 돌연변이는 이전 세대와 다른 새로운 잠재해를 생성한다. 그러나 교차와 돌연변이가 모두 확률적 선택에 따라 개체를 변형하는 것이므로 새롭게 생성된 잠재해가 반드시 이전 세대의 개체보다 우수하게 진화한다고 볼 수는 없다. 따라서 해를 가장 효과적으로 개선하는 P_c 와 P_m 을 결정하기 위해 각각의 비율을 변화시키면서 실험을 진행하였다. <Table 2>와 같이 실험결과 교차율이 0.3일 때, 돌연변이율은 0.05일 때 알고리즘의 탐색성능이 가장 우수하게 나타났다.

Table 2. Results for comparison of P_c/P_m

P_c	Total cost	Time(sec)	P_m	Total cost	Time(sec)
0.1	34585.14	63.83	0.01	34217.48	64.14
0.3	32068.77	64.81	0.05	32068.77	64.81
0.5	33814.08	65.02	0.1	34246.83	64.55
0.7	34077.33	65.44	0.2	34438.65	64.59
0.9	34933.22	64.75	0.3	34687.19	64.64

4.2.3 이웃진화 규모 결정

이웃진화전략을 선택함에 따라 이웃집단을 구성하는 형태와 규모가 알고리즘의 성능을 결정하는 중요한 요인이 된다. 따라서 10×10 의 형태로 구성된 부분모집단에서 가장 효율적인 이웃집단의 규모를 결정하기 위해 <Table 3>과 같이 세 가지 경우를 비교하였다. 실험결과 이웃집단의 규모가 3×3 일 때, 탐색성능이 가장 우수했다. 탐색에 소요되는 시간측면에서도 세 가지 경우 중 가장 짧은 시간에 최적해로 수렴하였다. 따라서 본 연구에서는 이웃진화의 장점을 유지하면서 동시에 유전연산을 통한 개선효과를 높일 수 있는 3×3 규모로 이웃집단을 구성하였다.

Table 3. Results for comparison of neighbor-size

Neighborhood($n \times n$)	Total cost	Time(sec)
3×3	32068.77	64.81
5×5	34961.40	181.63
7×7	35270.54	363.86

4.3 알고리즘 성능비교

Liu and Lee(2003)가 제안한 2단계 발견적기법과 비교하였다. 실험예제는 10개 유형으로 구성하였으며, 비용 파라미터 및 각종 제한기준은 앞서 수행한 실험과 동일하게 적용하였다.

각 예제에 대해 두 알고리즘을 5회씩 수행하여 얻은 결과 중 최소값을 구한 실험결과는 <Table 4>와 같다. 실험을 통해 모든 예제에 대해 EEA가 HM보다 total cost를 최소화하는 해로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 탐색시간도 10×20 이하 규모를 제외하고 EEA가 보다 빠르게 해를 탐색하였다. 특히, 10×60

이상 규모에서는 EEA가 60초 내외의 비교적 짧은 시간에 최적해로 수렴하는데 반해, HM의 경우 10×100 문제 해결에 300초 이상이 소요되었다. 따라서 성능비교 실험을 통해 EEA가 HM보다 탐색성능이 우수함을 확인하였다.

Table 4. Results for test problem

Num potential	Num retailer	Total cost			Time(sec)	
		EEA	HM	Improvement rates(%)	EEA	HM
5	10	6213.72	6431.96	3.39	2.88	1.20
	20	10199.09	10606.72	3.84	5.72	5.13
	30	13226.18	13887.90	4.76	9.17	12.20
	40	17252.60	18397.26	6.22	13.52	23.25
	50	20079.70	21477.87	6.50	19.17	37.03
10	20	10165.33	10685.07	4.86	7.33	5.39
	40	16695.48	17725.28	5.81	15.94	27.58
	60	22601.97	23864.43	5.29	28.16	79.47
	80	26161.11	27359.85	4.37	44.50	173.30
	100	32068.77	34077.33	5.89	64.81	301.00

4.4 민감도 분석

4.4.1 DC 후보지수 변화 민감도 분석

<Table 4>의 실험결과를 살펴보면, 소매점 수가 동일할 때, DC 후보지수 증가에 따라 total cost가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이때, 비용감소 요인을 살펴보면, 단순히 소매점과 근거리에 위치한 DC 후보지가 추가되었기 때문만은 아님을 확인할 수 있다. 비용이 감소된 결과를 보면, 기존보다 많은 DC가 개설되었고, 그 결과 전체 경로수가 증가하였다. 즉, 기존 동일한 경로를 구성했던 소매점 집합이 분리되어 별도 경로를 구성하면서 각 경로별 수송비와 재고관리비가 감소되었기 때문이다. 물론, DC 추가 설치에 따른 설치비용 부담이 발생하지만, 추가된 DC 후보지의 위치를 고려할 때, 설치비용 보다 이후 발생하는 수송비와 재고관리비의 절감효과가 크다면 DC를 추가함으로써 보다 효율적인 물류네트워크를 구축할 수 있음을 보여준다. DC 후보지수 변화에 따른 최적해 변화 민감도 분석을 위해 DC 후보지수를 [5, 30]범위에서 변화시켜 실험한 결과는 <Table 5>와 같다. 모든 경우에 DC 후보지가 증가함에 따라 DC가 추가 설치되고, 추가된 DC로부터 물품을 공급받을 소매점이 할당되어 새로운 경로가 형성되면서 total cost가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이런 현상은 DC 설치비가 해당 DC에서 발생하는 수송비와 재고관리비의 합보다 커지는 임계점까지는 지속될 것으로 판단된다.

4.4.2 차량 수송용량 변화 민감도 분석

배달차량의 1회 수송용량 제한이 수송비와 재고관리비에 미치는 영향을 분석하기 위해 수송용량을 [300, 500]범위에서 50씩 증가시키고, 용량이 큰 차량일수록 운영비가 증가하는

Table 5. Analysis for the number of potential DC

Num potential	Num retailer	Open DC		Total cost	Time(sec)
		Num	Sites		
5	100	4	1, 2, 4, 5	34025.89	40.15
10		9	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	32068.77	64.81
15		12	1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15	31859.05	72.94
20		15	2, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20	31678.15	85.67
25		19	1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 13, 15, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25	31154.84	91.63
30		23	1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 27, 28, 29, 30	30456.65	97.89

것을 고려해 차량 1대당 고정비(f)를 [30, 50]범위에서 5씩, 단위거리당 수송비(c)를 [1.0, 1.8]범위에서 0.2씩 증가시켜 total cost 변화를 분석하였다. 차량용량 이외 실험조건은 이전과 동일하게 하였다. <Table 6>과 같이 실험결과 차량 수송용량이 클수록 total cost가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 해당 차량이 속한 경로 소매점들의 수요를 충족시키기 위해 배달하는 횟수가 줄고, 1회 배달하는 용량이 증가함에 따라 재고관리 비용도 감소하기 때문이다. 따라서 배달차량을 선택할 때, 수송용량에 따른 제반비용과 더불어 용량 증가로 인해 얻을 수 있는 비용감소 효과를 고려해야 한다.

Table 6. Analysis for the vehicle capacity

Vehicle capacity	f	c	Total cost
300	30	1.0	33065.01
350	35	1.2	32048.95
400	40	1.4	31897.05
450	45	1.6	30746.09
500	50	1.8	30525.74

5. 결론 및 향후 연구방안

본 논문에서는 다수의 DC와 소매점의 구성된 물류네트워크에서 DC 설치에 따른 초기투자비 제한과 재고관리 비용을 고려하여 전체 물류비를 최소화하는 설비입지와 수송경로를 결정하기 위한 CLRIP를 연구하였다. 이를 위해 DC 설치비용과 물품수송비용, 재고관리 비용 최소화를 목적함수로 하는 수리모형을 혼합정수계획법으로 구성하였으며, 혼합정수모형에 의한 조합최적화 문제가 NP-hard임을 고려하여 발견적 기법을 도입한 내공생진화 알고리즘을 통해 최적해를 도출하였다. EEA의 효율성을 입증하기 위해 기존 알려진 휴리스틱기법과 비교하여 EEA가 보다 효율적임을 증명하였다.

향후 연구는 본 연구에서 다루지 않은 다품목(multi-product), 다용량(heterogeneous) 제약을 추가로 고려한 연구가 필요하다. 또한 비용파라미터를 세분화하여 모델의 현실성을 높여야 한다. 마지막으로 방대한 해공간을 갖는 CLRIP에 대한 효율적인 발견적기법을 개발하고 다양한 메타휴리스틱 기법과 성능비교를

통해 보다 효율적인 알고리즘을 개발하는 연구가 필요하다.

참고문헌

- Bednar, L. and Strohmeier, E. (1979), Lager standortoptimierung und Fuhrparkeinsatzplanung in der Konsumguter-Industrie, *Zeitschrift fur Operations Research*, **23**, 89-104.
- Bull, L. and Fogarty, T. C. (1995), Artificial symbiogenesis, *Artificial Life*, **2**, 269-292.
- Burness, R. C. and White, J. A. (1976), The traveling salesman location problem, *Transportation Science*, **10**, 348-360.
- Davidor, Y. (1991), A naturally occurring niche and species phenomenon : the model and first results, Proceedings 4th International Conference on Genetic Algorithms, San, 257-263.
- Drezner, Z. and Wesolowsky, G. O. (1982), A trajectory approach for the round-trip location problem, *Transportation Science*, **16**, 56-66.
- Hadely, G. and Whitin, T. (1963), Analysis of inventory systems, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Kim, J. Y., Kim, Y., and Kim, Y. K. (2001), An endosymbiotic evolutionary algorithm for optimization, *Applied Intelligence*, **15**, 117-130.
- Kim, J. Y., Kim, Y. K., and Sin, T. H. (2000), Analysis of Partnering Strategies in Symbiotic Evolutionary Algorithms, *The Korean Operations Research and Management Science Society*, **25**(4), 67-80.
- Koza, J. R. (1992), Genetic Programming, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Laporte, G., Louveaux, F., and Mercure, H. (1989), Models and Exact Solutions for a Class of Stochastic Location-Routing Problems, *European Journal of Operational Research*, **39**, 71-78.
- Laporte, G. and Nohbert, Y. (1981), An Exact Algorithm for Minimizing Routing and Operating Costs in Depot Location, *European Journal of Operational Research*, **6**, 224-226.
- Liu, S. C. and Lee, S. B. (2003), A two-phase heuristic method for the multi-depot location routing problem taking inventory control decisions into consideration, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **22**, 941-950.
- Moriarty, D. E. and Miikkulainen, R. (1997), Forming neural networks through efficient and adaptive coevolution, *Evolutionary Computation*, **5**, 373-399.
- Perl, J. and Daskin, M. S. (1985), A warehouse location-routing problem, *Transportation Research*, **19**, 381-396.
- Potter, M. A. (1997), The Design and Analysis of a Computational Model of Cooperative Coevolution, Ph.D. dissertation, George Mason University.
- Tuzun, D. and Burke, L. I. (1999), A Two-Phase Tabu Search Approach to the Location Routing Problem, *European Journal of Operational Research*, **116**, 87-99.