

역물류를 고려한 통합물류망에서의 입지 : 경로문제

나호영¹ · 이상현^{2*}

¹육군사관학교 수학과 / ²국방대학교 운영분석학과

A Location-Routing Problem for Logistics Network Integrating Forward and Reverse Flow

Ho-Young Na¹ · Sang-Heon Lee²

¹Department of Mathematics, Korea Military Academy, Seoul, 139-799, Korea

²Department of Operations Research, Korea National Defense University, Seoul, 122-875, Korea

An effective management for reverse flows of products such as reuse, repair and disposal, has become an important issue for every aspect of business. In this paper, we study the Location-Routing Problem (LRP) in the multi-stage closed-loop supply chain network. The closed-loop supply chain in this study integrated both forward and reverse flows. In forward flow, a factory, Distribution Center (DC) and retailer are considered as usual. Additionally in reverse flow, we consider the Central Returns collection Center (CRC) and disposal facility. We propose a mixed integer programming model for the design of closed-loop supply chain integrating both forward and reverse flows. Since the LRP belongs to an NP-hard problem, we suggest a heuristic algorithm based on genetic algorithm. For some test problems, we found the optimal locations and routes by changing the numbers of retailers and facility candidates. Furthermore, we compare the efficiencies between open-loop and closed-loop supply chain networks. The results show that the closed-loop design is better than the open one in respect to the total routing distance and cost. This phenomenon enlarges the cut down effect on cost as an experimental space become larger.

Keyword: closed-loop supply chain, location-routing problem, genetic algorithm

1. 서론

역물류(reverse logistics)는 지난 10년간 환경 및 산업분야에 큰 영향을 미치고 있다. 역물류의 규모와 비용을 정확히 산정하기는 어렵지만 미국 역물류학회에 따르면 미국 내 기업들이 역물류와 관련하여 사용하는 총 비용은 연간 350억 달러로 추정되고, GDP 대비 1%에 이른다고 한다(SCM Review, 2002). 또한 출판, 음료, 기계, 소매, 자동차 등 그 범위가 전반적인 산업 분야로 확산되고 있는 실정이다.

역물류는 그 성격에 따라 반품물류, 회수물류, 폐기물류로 구분할 수 있다. 반품물류는 고객이 교환, 환불, 수리 등의 목적

으로 판매자에게 제품을 돌려보내는 물류활동을 말한다. 회수물류는 고객의 신규제품 구입이나 임대(lease)기간 만료 등에 따라 기존 제품을 회수하여 재가공 또는 재활용하는 물류활동과 제품의 포장재, 파래트와 같은 부수물품의 회수를 위한 물류활동이다. 폐기물류는 생산자가 재활용이 가능한 폐기물의 일정량 이상을 재활용하도록 의무를 부여하는 생산자 책임 재활용제(EPR, Extended Producer Responsibility) 등의 법적 규제에 의해 더 이상 자산가치가 남아있지 않은 제품에 새로운 자산 가치를 창출하거나 폐기처분하기 위한 활동이다.

이중 반품물류는 처리대상의 자산가치가 다른 역물류에 비해 월등히 높고, 규모가 가장 크다. 통계에 따르면 미국 내 반품

*연락처 : 이상현 교수, 122-875 서울시 은평구 수색동 205번지 국방대학교 운영분석학과, Fax : 02-309-6233, E-mail : leesangh@kndu.ac.kr
투고일(2009년 01월 08일), 심사일(1차 : 2009년 03월 25일, 2차 : 2009년 05월 04일), 게재확정일(2009년 05월 04일).

물류의 규모는 일반적인 제조업체의 경우 평균적으로 판매제품의 6%에 이르며, 온라인매장의 경우 8%~30%에 이른다(Kitano, 2002). 극심한 경우 온라인으로 판매되는 월간 잡지는 50%까지 반품을 발생시키기도 한다(SCM Review, 2002). 국내에서도 고객중심의 반품정책이 확산되면서 반품물류의 규모가 점차 증가하고 있는 추세이고, 업종별 반품율은 5%~30%에 이르고 있으며, 전체 물류비 대비 평균 4% 정도로 나타나고 있다(KITA, 2007). 따라서 적절한 반품물류 시스템 구축은 재고유지 비용과 수송비, 폐품 처리비를 절감할 뿐만 아니라 고객의 만족도를 증진시킴으로써 잠재적인 판매 증대에 기여할 수 있다. 또한 기업의 유연한 반품처리 정책과 환경 부문에 대한 관심 증대, 고객중심의 서비스, 부분품의 재활용 등의 이유로 인해 공급사슬망 관리에 대한 관심은 소비자에게 제품을 공급하는 기존의 순방향 물류와 반품처리 및 회수를 위한 역방향 물류를 통합하는 방향으로 확대되고 있어 최적의 폐쇄 공급사슬 네트워크 설계는 그 중요도가 점차 증대되고 있다.

Fleischmann and Bloemhof-Ruwaard(1997)는 역물류가 기존의 순방향 물류망에 통합되어 분배와 회수 기능을 수행하는 폐쇄 공급사슬 네트워크로 설계되어야 함을 제시했다. Moritz *et al.* (2001)은 공급사슬망 전체의 연속적인 측면과 역물류의 흐름을 고려한 네트워크 재설계의 필요성을 제시하면서 통합 물류망에서 반품의 효과를 분석했다. Ko *et al.*(2004)과 Ko and Evans (2007)는 순방향과 역방향 네트워크를 동시에 최적화하는 이론적 연구를 제시하였는데 각각을 혼합정수 비선형 모델을 통합하여 유전자 알고리즘을 기초로 한 발견적 기법을 제안하였다. 그리고 Lu and Bostel(12)는 재(再)제조 설비를 대상으로 순방향과 역방향 물류를 통합하는 문제를 혼합정수 계획모형으로 정의하고 라그랑지안 완화법(Lagrangian relaxation)에 기반을 둔 알고리즘을 제안했다. 폐쇄공급사슬 네트워크 설계에 대한 기존연구는 순방향과 역방향 물류를 동시에 고려했을 때 비용최소화나 효율성 극대화를 목적으로 하였으나 고객과 설비가 직접 연결되어 있는 상황을 가정하고 경로문제를 고려하지 않아 운송비용을 최적화하지 못한 한계가 있다. 따라서 설비의 입지와 차량의 경로를 고려한 폐쇄 공급사슬 네트워크 설계를 통해 운송비용을 최적화하는 노력이 필요한 실정이다.

입지-경로문제(Location-Routing Problem, 이하 LRP)는 입지-할당문제(Location-Allocation Problem, 이하 LAP)와 차량경로문제(Vehicle Routing Problem, 이하 VRP)가 결합된 형태로 설비 유형과 차량 수, 설비 및 차량의 용량, 고객의 수요, 고객 노드 및 입지후보지 위치 등이 주어졌을 때 총 비용을 최소화하는 LAP와 VRP의 해를 동시에 도출하는 문제이다. Laporte and Nobert(1981)는 단일 차고지를 선정하고 제한된 수의 차량을 운용하여 경로를 구성하는 문제를 분지한계법(branch and bound algorithm)을 이용하여 해결하였다. Averbakh and Berman(2002)은 트리 구조로 되어 있는 네트워크에 목적함수에 적합한 단일 설비의 위치를 결정하고 노드의 방문순서를 결정하는 문제로 구성하였다. Perl and Daskin(1985)은 3가지 유형의 문제를 구성하고 해

법을 위한 발견적 기법을 제안했다. Laporte *et al.*(1989)은 차량의 고객 노드에 도착해야 그 수요를 알 수 있는 확률적 LRP 모형을 제시했고 Hansen *et al.*(1994)은 Perl and Daskin(1985)의 3가지 유형 문제를 더욱 효율적으로 해결할 수 있는 발견적 기법을 제시했다. LRP의 특성상 방대한 해공간을 갖는 조합최적화 문제임에 따라 발견적 기법뿐만 아니라 타부서치(Tuzun and Burke, 1999), 시뮬레이티드 어닐링(Wu *et al.*, 2002), 유전 알고리즘(Ye and Li, 2007) 등과 같은 메타휴리스틱 기법을 적용한 다양한 해법도 제시되고 있다.

기존 연구에서는 순방향 물류와 역물류가 통합된 물류망에서 차량경로를 고려하지 않은 설비 입지문제만 다루거나 역방향 물류를 고려하지 않은 LRP를 다루고 있어 설비의 입지와 차량 운행비용, 역물류 비용을 동시에 고려하는 전체 물류비용의 최적화를 하지 못한 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 공장 분배센터, 소매점, 중앙반품수집센터, 폐기시설로 구성된 다계층 폐쇄물류 네트워크에서 다음과 같은 의사결정문제를 해결하기 위한 LRP를 다룬다.

- (1) 설비(분배센터, 반품수집센터)는 어디에 위치시킬 것이며, 얼마나 많은 수를 설치할 것인가?
- (2) 각 고객을 분배센터에 어떻게 할당할 것인가?
- (3) 순방향 물류와 역방향 물류활동을 통합하기 위한 최적의 차량 경로는 어떻게 구성할 것인가?

이러한 의사결정문제는 순물류와 역물류가 통합된 물류 네트워크 설계를 위한 것으로 설비의 입지와 차량 경로를 동시에 고려하는 것이다. 따라서 이와 같은 의사결정문제의 해결은 실질적인 물류비용에서 가장 큰 비중을 차지하는 두 요소의 최적화를 통한 전체 물류비용을 최적화를 달성할 수 있게 된다.

설비의 입지와 차량 경로를 동시에 고려하는 것은 복잡한 조합최적화(combinatorial optimization)문제임에 따라 본 연구의 문제는 혼합정수계획 모형으로 구성하여 제시한다. 또한 특별한 경우를 제외하고 LRP는 NP-hard 문제(Tuzun and Burke, 1999)임에 따라 본 연구의 근사 최적해를 빠른 시간에 도출하기 위해 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, 이하 GA)을 적용한다. GA는 방대한 해공간을 가진 문제에서 우수한 탐색능력을 보이는 기법으로 LAP와 LRP에 적용한 연구(Jaramillo *et al.*, 2002, Ye and Li, 2007)에서 그 성능이 입증된 바 있다.

본 논문의 구성은 제 2장에서 문제 정의와 수리모형을 제시하고 제 3장에서는 문제 해결을 위해 적용된 GA를 설명한다. 제 4장은 알고리즘과 모형을 실험을 통해 분석하고 제 5장에서는 향후 연구방향을 제시한다.

2. 문제정의 및 수리모형

2.1 문제정의 및 가정 사항

본 연구의 범위는 순방향과 역방향 물류가 통합된 폐쇄공급

사슬망에서 용량제약을 갖는 설비의 입지를 선정하고, 제품 배송과 반품 수거를 동시에 수행하는 차량의 경로를 결정하는 것이다. 물류 네트워크는 <Figure 1>과 같이 공장과 분배센터(Distribution Center, 이하 DC), 소매점, 한 개의 중앙 반품처리센터(Central Returns collection Center, 이하 CRC), 폐기시설로 구성된다.

순방향 네트워크는 공장에서 생산된 제품을 DC를 통해 소매점으로 배송한다. 역방향 네트워크는 소매점에서 최초 수집된 반품을 수거하여 CRC로 통합하고 CRC에서는 반품의 상태를 확인하기 위한 검사(inspection)를 통해 재사용(reuse), 수리(repair), 폐기(disposal)로 분류한다. 이때, 재사용으로 분류된 제품은 CRC에서 간단한 손질 및 재포장 과정을 거쳐 DC로 옮겨지며, 정상제품과 동일하게 취급된다. 수리로 분류된 제품은 공장으로 옮겨져 수리를 한 후 정상제품과 함께 DC로 운송되며, 폐기로 판정된 제품은 폐기시설로 보내진다. 이때, DC는 차량을 보유하고 있으며 DC와 CRC의 용량과 각 차량의 용량 제약 내에서 할당된 소매점으로 제품을 배송하고 반품을 수거하여 처리한다.

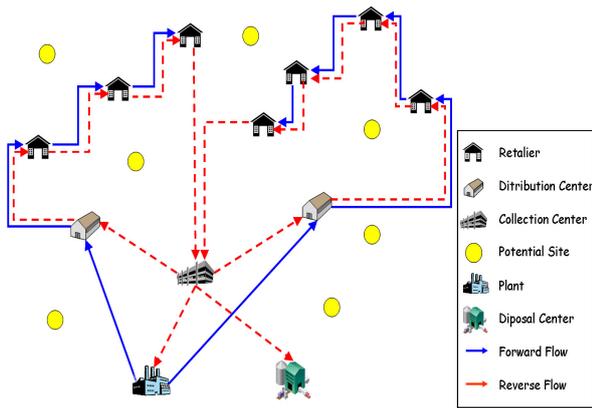


Figure 1. Closed-loop supply network

문제의 단순화를 위한 가정 사항은 다음과 같다.

- (1) 공장과 폐기시설의 위치는 사전에 알려져 있다.
- (2) DC와 CRC를 설치하기 위한 입지후보지의 위치(coordinate)와 설치비용은 알려져 있다.
- (3) 각 DC의 용량은 동일하고 차량의 유형도 동일하다.
- (4) CRC는 1개만 운영할 수 있으며, 용량제한은 없다.
- (5) 모든 수요는 충족되어야 하고 모든 반품은 회수되어야 한다.
- (6) 소매점의 위치와 수는 고정되어 있고 수요와 반품율은 특정 분포를 따른다.
- (7) 각 수요지는 1개 DC에 의해 모든 수요를 충족한다.
- (8) 재사용과 수리로 분류된 제품은 일정한 공정을 거쳐 정상제품과 동일하게 DC로 옮겨진다.
- (9) 각 소매점은 단일 경로에 의해 서비스 받고, 각 경로에 할당된 소매점의 총 수요량은 차량 용량보다 작아야 한다.
- (10) 각 DC의 할당된 소매점의 총 수요량은 DC의 용량제한 보

다 작아야 한다.

- (11) 각 경로는 동일한 DC에서 출발과 도착이 이루어지며, DC로 도착 전 반드시 CRC를 거쳐야 한다.

2.2 수리모형

[Sets]

- N : 고객 n 의 집합, $N = \{1, 2, \dots, n\}$
- F : 입지후보지의 집합, $F = \{1, 2, \dots, f\}$
- V : 차량의 집합, $V = \{1, 2, \dots, v\}$

[Parameters]

- D_n : 고객 n 의 수요량
- R_n : 고객 n 의 반품량
- QD : DC의 용량
- QV : 차량의 적재 용량
- d_{ij} : 지점 i 에서 j 까지의 거리, $i, j \in NU \cup F$
- d_f^{DP} : 입지후보지 f 에서 폐기시설까지의 거리
- d_f^{PL} : 입지후보지 f 에서 공장까지의 거리
- GD : DC 개설을 위한 고정비
- GC : CRC 개설을 위한 고정비
- T_k : 차량 k 의 운용(dispatching)을 위한 고정비
- UC : 단위 거리당 수송비

[Decision Variables]

- $X_{ijv} = \begin{cases} 1, & \text{차량 } v \text{가 지점 } i \text{에서 } j \text{까지 이동시,} \\ & i \in NU \cup F, j \in NU \cup F, i \neq j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$
- $Y_f^{DC} = \begin{cases} 1, & \text{입지후보지 } f \text{에 DC 설치시} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$
- $Y_f^{CRC} = \begin{cases} 1, & \text{입지후보지 } f \text{에 CRC 설치시} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$
- $Z_{nf} = \begin{cases} 1, & \text{DC가 설치된 입지후보지 } f \text{에 고객 } n \text{이 할당시} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$

[수리모형]

$$\begin{aligned} \text{Min } f(x) = & \sum_{f \in F} \{GD \cdot Y_f^{DC} + GC \cdot Y_f^{CRC}\} \\ & + \sum_{f \in F} UC \{d_f^{PL} Y_f^{DC} + (d_f^{PL} + d_f^{DP}) Y_f^{CRC}\} \\ & + \sum_{i \in NU \cup F} \sum_{j \in NU \cup F} \sum_{v \in V} UC \cdot d_{ij} \cdot X_{ijv} \\ & + \sum_{v \in V} T_v \sum_{i \in N_j \in F} X_{ijv} Y_f^{DC} \end{aligned} \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{n \in N} D_n Z_{nf} \leq QD, \quad \forall f \in F \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N} D_j \sum_{i \in NU F} X_{ijv} \leq QV, \quad \forall v \in V \quad (3)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{i \in NU F} X_{ijv} = 1, \quad \forall v \in N \quad (4)$$

$$\sum_{i \in NU F} X_{ipv} - \sum_{j \in NU F} X_{jpv} = 0, \quad \forall v \in V, p \in NU F \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in F} X_{ijv} \leq 1, \quad \forall v \in V \quad (6)$$

$$Z_{nf} \leq Y_f^{DC}, \quad \forall n \in N, f \in F \quad (7)$$

$$\sum_{f \in F} Y_f^{CRC} = 1 \quad (8)$$

$$Y_f^{DC} + Y_f^{CRC} \leq 1 \quad (9)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{j \in N} X_{ijv} - Y_i^{DC} \geq 0, \quad \forall i \in F \quad (10)$$

$$\sum_{j \in N} X_{ijv} - Y_i^{DC} \leq 0, \quad \forall i \in F, v \in V \quad (11)$$

$$\sum_{v \in V} X_{mrv} + Y_m^{DC} + Y_r^{DC} \leq 2, \quad \forall m, r \in F \quad (12)$$

$$X_{ijv} = \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in NU F, v \in V \quad (13)$$

$$Y_f^{DC} = \{0, 1\}, \quad \forall f \in F \quad (14)$$

$$Y_f^{CRC} = \{0, 1\}, \quad \forall f \in F \quad (15)$$

$$Z_{nf} = \{0, 1\}, \quad \forall n \in N, f \in F \quad (16)$$

목적함수 (1)은 DC와 CRC의 설치 및 운영과 관련된 총 고정비와 DC의 제품 배송비, 공장에서 DC까지의 운송비, CRC에서 공장과 폐기시설까지의 운송비, 총 차량 고정비의 합을 최소화하는 것이다. 제약식 (2)는 각 DC에 할당된 고객의 총 수요량은 DC의 용량보다 작아야함을 나타내며 식 (3)은 각 경로의 총 수요량은 차량의 용량제약을 만족해야함을 의미한다. 제약식 (4)와 식 (5)는 각 소매점은 1개 차량에 의해 모든 수요를 충족함을 나타내며, 식 (6)은 동일 경로상의 노드는 같은 차량에 의해 방문되어야 함을 보여준다. 제약식 (7)은 각 차량의 출발점과 도착점은 동일한 DC여야 함을 나타내는 것으로 차량 경로의 연속성을 보장하는 것이다. 제약식 (8)은 CRC는 1개만 설치 가능함을 나타내고, 제약식 (9)는 DC와 CRC가 동일한 입지 후보지에 설치될 수 없음을 나타낸다. 제약식 (10)과 식 (11)은 개설된 DC에서만 서비스를 할 수 있음을 나타내고, 제약식 (12)는 설치된 두 DC가 차량에 의해 연결될 수 없음을 나타낸다. 제약식 (13)부터 식 (16)은 이진 정수 조건이다.

LAP와 VRP는 특정한 경우를 제외하고 NP-hard로 알려져 있으며, 두 문제의 조합 형태인 LRP도 NP-hard임은 자명하다. 예를 들어, 입지후보지 10개와 소매점 50개로 구성된 LRP의 경우를 보면 10개 후보지에 두 종류의 설비를 설치하는 조합과 각 설비에 50개의 소매점을 할당하는 LAP의 조합은 700억개 이상이 발생하며, 이것과 VRP의 조합은 수리적으로 산출이 불가능하다. 이와 같은 NP-hard 문제는 일반적인 방법으로 최적해를 도출하는 것이 어렵기 때문에 본 논문에서는 VRP 분야에서 잘 알려진 발견적 기법과 본 문제에 적합한 발견적 기법, 방대한 해공간에 대해 우수한 탐색능력이 검증된 GA를 혼용하여 근

사 최적해를 비교적 합리적인 시간에 도출한다.

3. 유전 알고리즘

3.1 유전자 표현(genetic representation)

<Figure 2>는 5개의 입지후보지(□)와 15개의 소매점(○)으로 구성된 물류망에서 하나의 실행가능해를 보여준다. 명암으로 표현된 입지후보지(1, 4, 5)는 DC가 설치된 것을 나타내며, 실선으로 표시된 입지후보지(3)는 CRC가 설치된 것을 나타낸다. 모든 경로는 DC에서 출발하여 CRC를 거쳐 동일한 DC로 복귀함을 알 수 있고, 특히 1번에 설치된 DC의 경우 두 개의 경로가 구성(두 대의 차량 운용)됨을 알 수 있다.

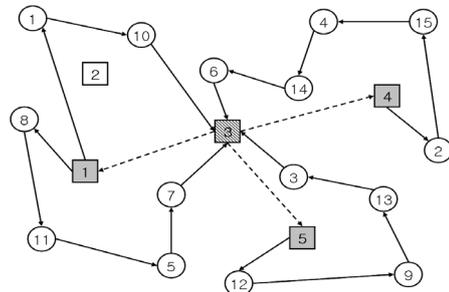


Figure 2. Solution example

본 논문의 LRP에 적합한 유전자 표현을 위해 다차원 배열의 형태로 나타내었다. 첫 번째 행은 0과 1, 2로 구성된 정수문자열(integer-string)로 입지후보지에 설치된 설비의 정보를 담고 있다. 두 번째 행부터는 설치된 DC별로 차량 경로를 나타내기 위해 정수와 문자가 혼합된 형태로 표현된다. <Figure 3>은 <Figure 2>의 해를 염색체로 표현한 것이다. 첫 번째 행은 입지후보지에 설비가 설치된 것을 표현한 것으로 “1”은 DC, “2”는 CRC가 설치된 것을 나타내고, “0”은 어떠한 설비도 설치되지 않음을 나타낸다. 두 번째 행부터 네 번째 행까지는 설치된 DC별로 구성된 차량 경로를 표현한 것이다. 첫 번째 비트는 DC가 설치된 후보지의 번호를 나타내고 두 번째 비트부터 표시된 숫자는 고객의 번호를 나타내는 것으로 열에 의한 순서는 차량의 방문순서를 의미한다. 알파벳 “C”는 CRC 방문을 의미하는데 모든 경로는 마지막으로 방문한 소매점에서 CRC를 거쳐 DC로 복귀하므로 하나의 경로가 종료되었음을 동시에 나타낸다.

1	0	2	1	1				
1	1	10	C	8	11	5	7	C
4	2	15	4	14	6	C		
5	12	9	13	3	C			

Figure 3. Genetic representation

3.2 초기모집단 구성 알고리즘

LRP의 해는 3단계를 거쳐 산출된다. 첫 번째는 입지선정 단계로 입지후보지에 설비(DC, CRC)의 위치와 수를 결정하고 설치된 DC에 소매점을 할당한다(location and allocation). 두 번째는 할당된 소매점을 경로 구성을 위해 그룹화 한다(grouping). 세 번째는 구성된 경로를 개선함으로써 최종 초기해를 생성한다(routing improvement). 이와 같은 절차에 따라 초기 모집단은 다음과 같이 제시된 발견적 기법과 임의생성 방법을 확률적으로 선택하여 적용하고 모집단의 수만큼 반복한다.

● 발견적 기법(heuristic)

- Step 1 : 입지후보지에 DC와 CRC의 위치를 난수를 통해 임의로 결정하고 각 소매점을 최근거리의 개설된 DC에 할당한다.
- Step 2 : 각 DC에 할당된 소매점은 Clarke and Wright(1964)의 Saving 기법을 통해 그룹화 한다. 이때, 각 그룹에 포함된 소매점의 총 수요는 차량의 용량제약 이하로 하여 하나의 경로를 구성하도록 한다.
- Step 3 : 경로 개선 알고리즘을 적용한다.

● 임의생성

- Step 1 : 입지후보지에 DC와 CRC의 위치를 임의로 결정하고 각 소매점을 난수를 통해 개설된 DC에 할당한다.
- Step 2 : 각 DC에 할당된 소매점을 차량의 용량제약 하에서 임의로 초기 경로를 구성한다. 이때, 용량제약을 초과하지 않더라도 난수를 통해 확률적으로 현 경로 구성을 종료하고 새로운 경로를 시작하도록 한다.
- Step 3 : 경로 개선 알고리즘을 적용한다.

● 경로 개선 알고리즘(routing improvement algorithm)

발견적 기법과 임의생성을 통해 초기 경로가 구성되면 모든 염색체에 경로 개선 알고리즘을 적용하고 초기해 구성을 종료한다. 본 연구의 차량경로는 마지막 방문지가 CRC가 되어야 하는 제약으로 인해 그룹화 된 소매점들을 DC로부터 시작하여 인접한 소매점으로 연결하면서 경로를 구성할 경우 경로의 마지막 소매점이 CRC로부터 거리가 멀어질 수 있으므로 문제에 적합한 발견적 기법을 적용해야 한다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 절차를 따르는 발견적 기법을 순방향-역방향 이웃 탐색 기법(Forward-Backward Nearest Neighbor Heuristic, 이하 FBNNH)으로 정의하고 이를 통해 경로를 개선한다.

- Step 1 : 그룹화 된 소매점과 DC 및 CRC와의 거리 리스트를 각각 작성하고 오름차순으로 정렬한다.
- Step 2 : DC에 가장 인접한 소매점은 경로의 첫 번째에, CRC에 가장 인접한 소매점은 경로의 마지막에 지정한다.

- Step 3 : 지정된 두 소매점을 시작으로 순방향과 역방향 이웃 탐색을 순차적으로 수행한다.
- Step 4 : 모든 소매점을 경로에 할당한 후 마지막으로 할당된 소매점을 전후 소매점과 위치를 교환하면서 그중 최단거리 경로를 최종경로로 구성한다.
- Step 5 : 경로구성이 종료되면 FBNNH를 적용하기 전의 경로 길이와 비교하여 우수하면 경로를 대체한다.

3.3 유전연산(genetic operator)

● 교차(crossover)

다수의 차고지와 용량제약을 갖는 VRP에서는 실행가능해 생성을 위한 교차연산자가 필요하고 LAP와 VRP 유전자 각각의 유전형질을 상속받을 수 있도록 교차연산을 수행해야 한다. 따라서 선택된 부모염색체에 대하여 확률적으로 LAP 유전자와 VRP 유전자 교차를 수행한다.

• LAP 유전자 교차

경로의 총 길이는 CRC의 위치에 결정적인 영향을 받으므로 LAP 유전자 교차는 선택된 두 염색체의 CRC의 위치를 교환하는 단순교차(simple crossover)를 적용한다.

• VRP 유전자 교차

VRP 유전자 교차는 균등순서교차(uniform order crossover)를 적용하며 수행절차는 다음과 같다.

- Step 1 : 모든 염색체에 $U[0, 1]$ 난수를 발생시켜 교차율보다 작은 염색체를 쌍으로 묶어 두 부모염색체로 선정한다.

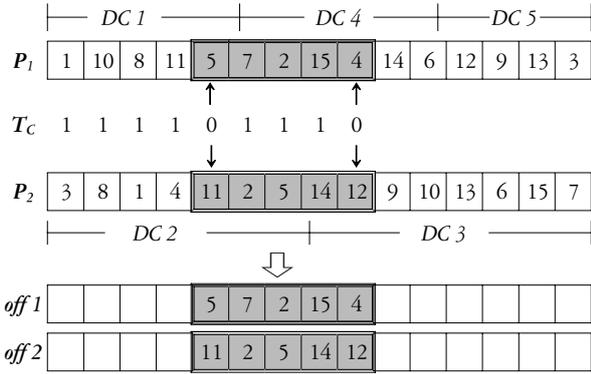
	1	1	10	C	8	11	5	7	C		
P_1	4	2	15	4	14	6	C				
	5	12	9	13	3	C					
P_2	2	3	8	1	4	11	C	2	5	14	C
	3	12	9	10	13	C	6	15	7	C	

- Step 2 : P_1 과 P_2 의 모든 소매점 노드를 할당된 DC와 경로에 상관없이 소매점 순서에 따라 각각 일렬로 배치한다. 이때, 각 DC에 할당되었던 소매점 정보를 유지한다.

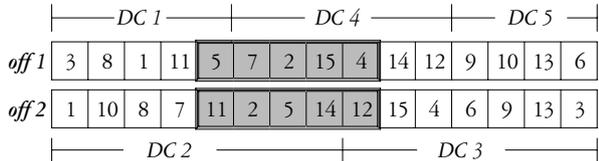
	DC 1	DC 4	DC 5												
P_1	1	10	8	11	5	7	2	15	4	14	6	12	9	13	3
P_2	3	8	1	4	11	2	5	14	12	9	10	13	6	15	7
	DC 2	DC 3													

- Step 3 : P_1 과 P_2 의 고객 노드에 0-1 난수(T_c)를 생성하여 임의의 두 소매점을 선정하고 두 소매점 사이의 모

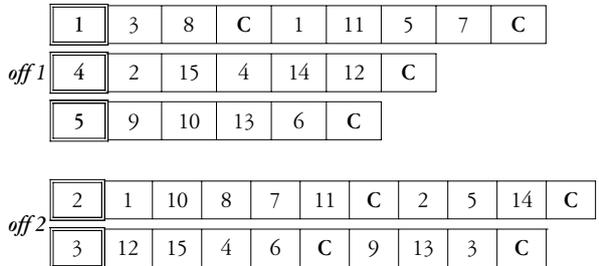
든 소매점 노드를 자식염색체(off1, off2)에 각각 상속한다.



◦ Step 4 : P_1 에서 상속받지 못한 소매점 노드는 P_2 에서 순서대로 상속받아 동일한 두 개의 자식염색체를 생성한다.



◦ Step 5 : P_1 과 P_2 에 설치된 DC에 대해 기존에 할당된 순번에 따라 고객을 재할당하고 소매점 노드의 순서대로 차량의 용량제약 내에서 재그룹화하여 경로를 구성한다.



• 돌연변이(mutation)

이진변수로 표현된 염색체의 경우 각 비트마다 발생한 난수가 정해진 돌연변이율(mutation rate, P_m)보다 작으면 비트의 반전으로 새로운 형질을 생산하지만 VRP와 같이 순열에 의해 유전자가 표현된 염색체는 각 염색체에 발생한 난수가 돌연변이율보다 작으면 해당 염색체에의 순열 자체를 변화시킬 수 있는 돌연변이 연산을 적용한다. 본 연구에서는 LAP 유전자와 VRP 유전자에 별도의 돌연변이 연산을 적용한다.

• LAP 유전자 돌연변이

LAP 유전자 돌연변이는 선택된 염색체에서 DC와 CRC가 설치되지 않은 입지후보지에서 임의로 1개를 선정하여 CRC의

위치를 변경하는 단순 돌연변이(simple mutation)를 적용한다.

• VRP 유전자 돌연변이

순열로 표현된 염색체에 적용할 수 있는 돌연변이는 삽입 돌연변이(insert mutation), 교환 돌연변이(swap mutation), 역위 돌연변이(inversion mutation), 재배열 돌연변이(scramble mutation) 등이 있다. 본 논문에서는 각 돌연변이를 확률적으로 선택하여 적용하며 수행절차는 다음과 같다.

- Step 1 : 모든 염색체에 난수를 발생시켜 돌연변이율보다 작은 염색체를 선정한다.
- Step 2 : 선정된 염색체의 모든 소매점 노드를 할당된 DC와 경로에 상관없이 소매점 순서에 따라 각각 일렬로 배치한다.
- Step 3 : 4가지 돌연변이 연산을 확률적으로 선택하여 적용한다.
- Step 4 : 첫 번째 비트의 소매점과 가장 가까이 설치된 DC에 첫 번째 경로를 할당하고 차량의 용량제약 내에서 순서대로 고객을 할당하여 경로를 구성한다.
- Step 5 : 경로에 할당된 소매점은 삭제하고 모든 소매점이 할당될 때까지 단계 4를 반복한다.

3.4 적합도 평가(Fitness Evaluation)

본 논문의 목적함수가 총 비용을 최소화하는 것이므로 적합도 함수는 식 (17)과 같이 해당 염색체의 총 비용함수 $f(x)$ 의 역수인 $fit(x)$ 로 계산된다.

$$fit(x) = \frac{1}{f(x)} \tag{17}$$

3.5 선택 및 재생산(Selection & Reproduction)

선택연산은 토너먼트 선택(tournament selection) 전략을 적용한다. 토너먼트 선택 전략은 적합도를 기반으로 하는 선택 연산으로 K 개의 토너먼트 집단임의로 구성하고 $U[0, 1]$ 난수를 발생시켜 임계값(critical value, P_c)보다 작으면 토너먼트 집단에서 적합도가 가장 높은 하나의 염색체를 선택하여 다음세대 모집단에 포함되도록 재생산한다. 선택연산은 모집단의 크기만큼 선택될 때까지 반복하여 다음세대 모집단을 형성한다.

3.6 보수 전략(chromosome repair strategy)

유전연산 수행 후 제약사항 (2)를 위반하는 염색체는 다음과 같은 보수전략을 통해 실행가능해가 되도록 한다.

- Step 1 : 용량제약을 초과하는 DC에 할당된 소매점을 수요량에 따라 내림차순으로 정렬한다.
- Step 2 : 용량제약을 만족할 때까지 수요량이 많은 소매점

부터 차례로 제거한다.

- Step 3 : 제거된 소매점은 용량계약을 초과하지 않고 가장 인접한 DC에 할당한다.
- Step 4 : 제거된 소매점이 할당될 수 있는 DC가 없으면 입의후보지에 DC를 추가 개설한다.
- Step 5 : saving 기법과 FBNNH로 경로를 개선한다.

3.7 엘리트 보존 전략(elite preserving strategy)

엘리트 보존 전략은 확률적인 선택연산으로 인해 우수해가 보존되지 않고 소멸되는 GA의 단점을 보완한 기법으로 현 세대에서 가장 높은 적합도를 갖는 단일 또는 다수의 우수해를 다음 세대에 우선적으로 보존되도록 하여 우수해가 소멸되지 않도록 하는 기법이다. 하지만 보존되는 해의 수가 증가하면 엘리트 집단에 대한 선택확률이 증가하여 국지 최적해에 조기 수렴하는 문제가 발생할 수 있으므로 이를 방지하기 위해 적정 수의 엘리트 염색체 수를 결정하는 것이 중요하다.

4. 실험 및 결과분석

실험은 세 가지 형태로 진행한다. 첫 번째 실험에서는 GA의 최적 파라미터를 결정한다. 두 번째 실험은 CPLEX의 최적해와 최적 파라미터를 적용한 GA와의 비교를 통해 제안된 GA의 성능을 검증하고 Wu et al.(2002)의 실험예제를 준용한 벤치마크 예제를 대상으로 실험한다. 세 번째 실험에서는 DC에서만 차량을 운행하여 배달과 수거를 동시에 수행하는 것과 DC와 CRC가 별도의 차량을 운행하는 것을 비교하여 통합된 물류망 구성의 효율성을 검증한다.

Wu et al.(2002)의 예제를 준용한 실험 파라미터는 다음과 같다.

- (1) 소매점의 좌표는 $U[0, 100]^2$ 에서 생성한다.
- (2) 각 소매점의 수요는 $U[10, 50]$ 에서 임의 생성한다.
- (3) 소매점의 수($num_Retailer$)는 4가지를 적용한다.
 - $num_Retailer = 50, 75, 100, 150$
- (4) 입지후보지의 수($num_Potential$)는 2가지를 적용한다.
 - $num_Potential = num_Retailer/10, num_Retailer/5$
- (5) DC의 용량($Dcapa$)은 총수요(tot_Demand)와 소매점 수($num_Retailer$)에 의해 결정된다.
 - $Dcapa = tot_Demand / \{num_Retailer * (1/20)\}$
- (6) 차량의 용량($Vcapa$)은 DC 용량의 1/3을 적용한다.

본 논문의 알고리즘은 Visual C++ ver. 6.0으로 구현하였고, 컴퓨터는 Dual-Core CPU 6420 2.13GHz, RAM 2GB를 사용하였다.

4.1 최적 파라미터 실험

본 논문의 문제에 가장 적합한 GA 파라미터를 결정하기 위

해 초기 모집단 구성 비율과 교차율 및 돌연변이율을 결정하는 실험을 한다. 실험을 위한 입력 변수는 $num_Retailer = 100$, $num_Potential = num_Retailer/10$ 을 적용하고 모집단의 크기는 1,000개, 종료조건은 10,000세대 진행으로 한다.

• 초기모집단 구성 비율

GA를 적용한 대다수의 연구는 임의생성 방법을 통해 초기 모집단을 구성하게 되는데 임의생성만으로 초기 모집단을 구성하면 탐색시간을 지나치게 증가시켜 알고리즘의 효율성을 감소시킨다. 발견적 기법을 적용한 초기 모집단 구성은 좋은 초기 모집단을 구성하여 탐색시간을 감소시킨다는 장점이 있지만 발견적 기법으로만 초기 모집단을 구성하면 국지최적해에 빠질 수 있고 다양한 해공간에 대한 탐색을 제한한다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 두 기법을 혼용하여 초기 모집단을 구성하기 위해 초기해의 최적 비율을 찾는 실험을 한다.

교차율 0.8, 돌연변이율 0.2로 고정하고 발견적 기법과 임의생성의 비율을 1:9, 3:7, 5:5, 7:3, 9:1로 변경하여 실험한다. <Figure 4>는 각 세대에서 최적해 목적함수 값의 변화를 나타낸다. 발견적 기법과 임의생성 비율이 9:1인 경우 초기 모집단을 우수한 해로 구성하여 탐색을 진행함으로 초기 세대에는 우수한 해를 탐색하게 된다. 하지만 2,670세대에서 최적해의 목적함수 값이 8,491.8에 수렴하여 종료시까지 해가 개선되지 않음을 확인할 수 있는데, 이는 발견적 기법에 의한 해의 비율이 높아 다양한 해공간에 대한 탐색이 이루어지지 못하고 국지 최적해로 조기에 수렴했기 때문이다. 반대로 1:9의 경우 특정 세대에서 수렴하지 않고 목적함수 값의 개선이 지속적으로 이루어짐을 확인할 수 있지만 적합도가 낮은 해집단을 구성하고 임의해에 대한 탐색이 많아져 효율적이지 못함을 알 수 있다. 3:7의 경우 9,504세대에서 8,404.49에 수렴하여 가장 우수한 해를 탐색했다. 3:7의 비율이 발견적 기법에 의해 생성된 우수한 해와 임의생성으로 인한 다양한 해공간에 대한 탐색이 적절히 조합되어 좋은 모집단을 구성해 나감을 확인할 수 있다.

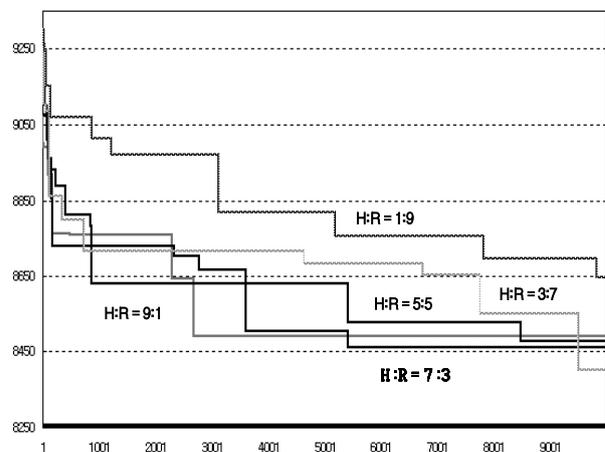


Figure 4. Change of objective function value by initial population

• 교차율/ 돌연변이율

<Table 1>은 초기모집단 구성비율을 3:7로 고정하고 다양한 교차율(P_c)과 돌연변이율(P_m)의 조합에 따라 100회 실험을 진행한 후 구한 목적함수값의 평균을 나타낸다. 실험결과 교차율 0.8, 돌연변이율 0.2일 때 가장 좋은 결과가 나왔다.

Table 1. Objective function value by P_c and P_m

$P_c \backslash P_m$	0.1	0.2	0.5	0.8	1.0
0.1	8529.33	8522.21	8498.65	8513.22	8651.18
0.2	8477.22	8388.22	8372.21	8521.59	8734.22
0.5	8354.63	8392.30	8341.22	8512.31	8662.38
0.8	8346.87	8333.24	8351.93	8472.30	8578.45
1.0	8517.30	8447.82	8488.01	8641.73	8724.33

따라서 본 논문의 GA는 앞선 실험에서 확인한 최적 파라미터의 조합인 초기모집단 구성비율 3 : 7, 교차율(P_c) 0.8, 돌연변이율(P_m) 0.2로 하여 <Table 2>와 같은 GA 파라미터를 적용한다.

Table 2. Genetic Algorithm parameter

Parameters	Value
Number of population	1,000개
Tournament size(K)	5개
Critical value of tournament selection(P_s)	0.8
Crossover rate(P_c)	0.8 (80%)
Mutation rate(P_m)	0.2 (20%)
Initial population rate(heuristic : random)	3 : 7
Elite preserving	세대당 1개

또한 방대한 해공간을 갖는 문제의 특성상 제한된 모집단에서의 유전 연산만으로는 다양한 해공간에 대한 탐색이 어렵기 때문에 새로운 세대의 모집단 형성시 20%의 염색체는 이전 세대의 모집단과 무관한 새로운 해를 임의생성 방법을 통해 구성했다. 또한 엘리트 염색체가 개선되지 않고 5,000세대를 진행했을 때를 GA의 종료조건으로 하여 다양한 해공간을 탐색할 수 있도록 보장한다.

4.2 GA의 적용과 결과 분석

본 연구에서는 특정분포의 수요를 갖는 소매점이 일정한 비율로 반품을 발생할 때 각 소매점이 할당된 DC가 제품의 배송과 반품의 수거를 동시에 수행하면서 수집된 반품은 최종적으로 CRC로 옮기는 폐쇄공급사슬망 모델을 제안했다. 각 DC는 고객에게 제품을 배송하기 위해 먼저 공장으로부터 제품을 배송받고 DC의 용량과 단일 차량의 용량제약하에서 차량경로를 구성하여 고객에게 제품을 배송한다. 수거된 모든 반품은 CRC

로 통합하게 되는데 CRC는 반품의 검사를 실시하며 판정결과에 따라 “재사용” 판정 제품은 DC로 “수리” 판정 제품은 공장으로, “폐기” 판정 제품은 폐기센터로 운송하게 된다. 따라서 한 개 모델에서 발생하는 총 차량 이동거리는 공장에서 설치된 DC로의 제품 운송을 위한 차량의 이동거리와 DC에서 소매점으로 제품을 배송하고 CRC를 거쳐 출발한 DC로 복귀하는 각 차량의 이동거리, CRC에서 “수리” 판정 제품을 공장으로 운송하기 위한 이동거리, “폐기” 판정 제품을 폐기센터로 운송하기 위한 이동거리의 합이 된다. 총 소요비용 산출을 위해 고려되는 비용요소는 설비(DC, CRC)와 관련된 고정비, 차량의 운행과 관련되는 고정비 및 변동비가 있다. 차량의 운행시 변동비는 총 거리에 비례하며, 고정비는 차량 1대가 편성시마다 일정하게 발생한다. 실험에 적용된 비용요소는 <Table 3>과 같다.

Table 3. Variable cost and rate

Cost Parameters	Value
Fixed cost of opening facility	240
Transportation cost of unit distance	2
Fixed cost of vehicle dispatching	20
Returned rate(%)	U[5, 10]

• GA 성능검증

최적 파라미터를 적용한 GA의 실험결과와 CPLEX 10.0을 사용한 최적해와의 비교 분석을 통해 본 문제에 대한 GA의 성능을 검증한다. LRP의 특성상 소형 문제를 제외한 대부분의 문제에서는 현실적인 시간에 최적해를 도출할 수 없으므로 CPLEX가 최적해를 제공하는 소형문제에서 목적함수값을 비교한다. <Table 4>는 4가지 소형문제에서 GA를 100회 반복했을 때 나타나는 해의 평균 값과 CPLEX를 이용한 최적해와의 비교를 보여준다. GA의 경우 소매점 수($num_Retailer$) 20, 입지후보지 수($num_Potential$) 10인 문제를 제외하고 최적해를 도출했으며 CPLEX에 비해 매우 짧은 시간에 해를 도출했다. CPLEX는 문제의 규모가 커질수록 최적해를 도출하는 시간이 기하급수적으로 늘어나고 대형문제에서는 컴퓨터 용량 제한으로 인해 수일이 소요되어도 최적해를 구할 수 없다. 따라서 본 논문에서 제시하는 실험예제에서는 GA를 통해 결과를 도출한다.

Table 4. Results comparison between GA and CPLEX

num Retailer	num Potential	GA		CPLEX		GAP (%)
		Total Cost	Time(min)	Total Cost	Time(min)	
12	5	560.32	0.03	560.32	6.63	0
	10	528.14	0.70	528.14	9.54	0
20	5	1600.87	1.45	1600.87	41.25	0
	10	1531.43	2.21	1512.18	246.21	1.2

• 실험예제 적용

동일한 소매점 데이터와 입지후보지 데이터를 적용하며 소

매점의 수를 4가지로 변화시키면서 각각을 2가지의 입지후보지 수와 조합한 8개 벤치마크 예제의 결과를 산출한다. 각 벤치마크 예제에서 DC와 차량의 용량은 <Table 5>와 같고 8개의 벤치마크 예제에 대한 실험결과는 <Table 6>과 같다.

Table 5. Benchmark instance sets

<i>num_Retailer</i>	<i>num_Potential</i>	<i>Dcapa</i>	<i>Vcapa</i>
50	5/10	546	182
75	8/15	576	192
100	10/20	584	195
150	15/30	579	193

• 차량 변동비와 고정비에 따른 민감도 분석

각 벤치마크 예제에 속한 전체 소매점의 총 수요량을 DC의 용량계약으로 나누어 해당 문제에서 개설되어야 하는 최소 DC 수를 산출하면, 소매점 50개에 해당하는 벤치마크 예제는 2.5개, 75개는 3.75개, 100개는 4.9개, 150개는 7.5개로 나타난다.

<Table 4>의 실험결과를 보면 소매점과 입지후보지 수를 변화시킨 각 벤치마크 예제에서 개설된 DC의 수는 소매점의 전체 수요량을 만족시킬 수 있는 최소의 수만큼만 개설되었다 (소매점 50개 : 3개/소매점 75개 : 4개/소매점 100개 : 5개/소매점 150개 : 8개). DC를 추가로 개설하여 운행차량의 수를 줄이거나 경로의 길이를 단축시킴으로써 발생하는 비용의 절감보다 1개 DC를 추가로 개설하는 비용이 더 크기 때문이다.

그러나 차량 고정비(1대 당 추가 운행비용)와 변동비(단위 거리당 운송비용)가 증가하여 DC의 개설비용보다 차량 경로로 인한 비용이 더 크게 될 경우 더 많은 수의 DC가 개설될 수 있다. <Figure 5>와 <Figure 6>은 벤치마크 예제 8에서 고정비와 변동비를 점차 증가시켰을 때 개설된 DC 수의 변화를 나타낸 것이다. DC의 개설비용과 차량 1대당 추가 운행비용을 240과 20으로 고정하고 단위 거리당 운송비용을 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20으로 증가시켰을 때 개설된 DC의 수는 거리비용이 5이상 일 때부터 점차 증가하는 것을 볼 수 있다. DC를 추가 개설하여 차량의 운행거리를 줄이는 것이 더 많은 비용을 절감할 수 있기

때문이다. 반면에 차량의 대당 운행비용을 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50으로 증가시켰을 때는 개설된 DC의 수가 거의 변하지 않음을 알 수 있다.

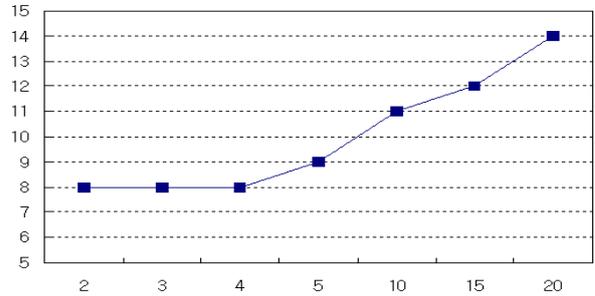


Figure 5. Analysis of the vehicle variable cost

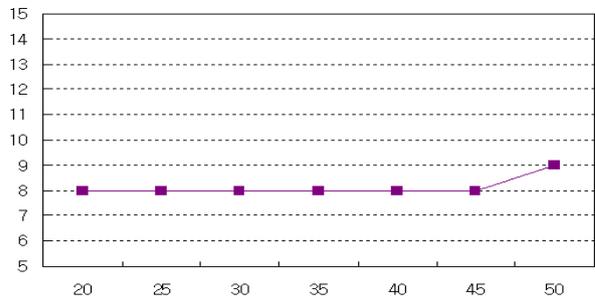


Figure 6. Analysis of the vehicle fixed cost

따라서 본 연구에서 고려한 물류망의 전체 물류비용은 차량의 고정비보다 변동비에 더 민감함을 알 수 있다.

• DC 입지에 따른 CRC 입지의 민감도 분석

본 논문에서 구성한 폐쇄 공급사슬 네트워크는 두 종류 설비(DC, CRC)에 의해서 순방향과 역방향 물류를 동시에 수행하게 된다. 따라서 최적의 물류망 구성을 위한 각 설비의 입지는 다른 설비의 입지에 상호 영향을 받아 선정된다. 앞선 실험에서 동일한 소매점 수를 대상으로 입지후보지 수를 두 가지로 변화시켜 벤치마크 예제를 구성함으로써 DC와 CRC 입지의 상

Table 6. Experimental results of benchmark instance

<i>num_Retailer</i>	<i>num_Potential</i>	DC		CRC	<i>Total distance (Dispatching)</i>	<i>Total cost</i>
		<i>num</i>	<i>Site</i>			
50	5	3	2 3 5	1	1958.81(9)	4817.62
	10	3	2 5 7	8	1807.04(8)	4494.08
75	8	4	3 4 6 8	5	2608.61(12)	6417.22
	15	4	3 8 10 11	12	2312.27(11)	5804.54
100	10	6	2 3 5 6 8 10	9	3386.85(17)	8553.70
	20	6	3 5 8 10 14 20	9	3297.87(17)	8375.74
150	15	9	2 3 4 5 6 8 11 12 14	1	4629.11(27)	11958.22
	30	9	3 6 8 9 12 20 25 27 30	21	4501.60(26)	11683.20

호민감도를 확인하였다.

<Table 7>은 설치된 각 DC와 CRC간 거리의 평균을 나타낸 것으로 동일한 소매점 수를 대상으로 하는 두 벤치마크 예제에서 입지후보지 수가 많은 벤치마크 예제의 평균거리가 더 작음을 알 수 있다. 각 차량 경로가 마지막 방문지로 CRC를 거쳐야 하고 CRC는 한 개만 설치 가능하기 때문에 설치된 모든 DC에서 가장 가까운 입지후보지에 CRC를 설치해야만 단위 거리당 운송비용을 줄일 수 있기 때문이다. 또한 순방향 물류와 역물류의 상호 연관성을 무시하고 독립적으로 DC와 CRC 입지를 선정했을 때의 비효율성을 줄이기 위해 폐쇄 공급사슬 네트워크를 구성해야 함을 알 수 있다.

Table 7. Average distance of opened DC and CRC

Retailer		50	75	100	150
Potential Site					
num_Retailer/5		33.83	31.69	22.52	27.73
num_Retailer/10		23.13	24.46	16.20	14.80

• 개방형 물류망과 폐쇄형 물류망 비교

순방향과 역방향 물류의 흐름이 동시에 발생하는 기업의 입장에서는 분리하여 물류망을 구성할 경우 각각의 물류 흐름은 최적화 될 수 있지만 기업의 전체 물류망은 최적화 될 수 없게 된다. 따라서 물류흐름의 방향을 제외하고는 비슷한 구조를 가진 두 물류망을 통합하여 폐쇄공급사슬망을 구성하는 것은 기업의 비용절감을 위해 반드시 필요한 요소가 되었다.

이와 같은 중요성으로 인해 본 연구에서는 순방향과 역물류가 통합된 폐쇄공급사슬망을 구성하였다. 폐쇄공급사슬망의 구성을 통한 기대효과는 순방향 물류와 역방향 물류가 발생할 때 유사기능을 통합함으로써 비용절감을 가져올 수 있다는 것이다. 예를 들어, DC에서 출발한 차량이 소매점 수요만큼의 제품을 배송한 후에 잉여 적재용량을 활용하여 해당 소매점이 보유한 반품을 수거하면 CRC가 반품의 수거를 위해 별도의 차량을 편성할 필요가 없게 된다. 또한 총 운행거리를 최소화하기 위해 DC와 CRC의 입지 선정시 각각의 위치가 상호 영향을 미치게 되어 차후 DC와 CRC의 물류 흐름 발생시 더욱 효율적으로 처리할 수 있게 된다.

본 실험에서는 폐쇄공급사슬망의 효율성을 확인하기 위해 순방향과 역방향 물류를 구분하여 최적화한 개방형 물류망과 통합 구성하여 최적화한 폐쇄형 물류망을 비교한다. <Table 8>은 개방형 물류망과 폐쇄형 물류망의 실험결과를 비교한 것으로 SEP는 개방형 물류망에서의 결과를 의미하고, INT는 폐쇄형 물류망에서의 결과이다. Saving은 분리된 물류망 대비 통합 물류망의 절감율을 나타낸다.

차량의 총 운행거리를 비교했을 때 개방형 물류망에 비해 폐쇄형 물류망이 18%~26%의 절감효과를 나타냈다. 이는 개방형 물류망이 동일한 소매점들 DC와 CRC가 중복해서 방문해야 하기 때문에 발생한 현상으로 CRC가 별도로 차량을 편성하

여 반품을 수거하기 때문에 총 운행거리가 증가하고 총 편성 차량의 수가 더 많음을 알 수 있다. 이와 같은 차량 운행 거리와 편성차량 수의 절감효과는 총 비용 측면에서도 확인 할 수 있다. 폐쇄형 공급망의 경우 2, 4, 5, 6, 8번 벤치마크 예제에서 개방형 물류망보다 더 많은 수의 DC를 개설함으로써 추가 비용을 발생시키지만 운행 거리와 편성차량 수의 절감으로 인해 총 비용을 15%~22%까지 절감함을 알 수 있다. $[0, 100]^2$ 의 공간상 제약으로 운행거리 및 비용의 절감효과가 제한됐지만 확대된 공간에서는 더욱 큰 차이를 보이게 된다.

Table 8. Result comparison of open-loop and closed loop

Benchmark instance	num DC	Total distance (Dispatching)	Cost			
			Total	Vehicle routing		Locating
				Transport	Dispatch	
1	SEP 3	2413.97(10)	5747.94	4827.94	200	720
	INT 3	1958.81(9)	4817.62	3917.62	180	720
	Saving(%)	18.86%	16.19%	18.86%	10.00%	0%
2	SEP 3	2359.14(9)	5618.28	4718.28	180	720
	INT 4	1807.04(8)	4734.08	3614.08	160	960
	Saving(%)	23.40%	15.74%	23.40%	11.11%	-33.33%
3	SEP 4	3267.77(14)	7775.54	6535.54	280	960
	INT 4	2608.61(12)	6417.22	5217.22	240	960
	Saving(%)	20.17%	17.47%	20.17%	14.29%	0%
4	SEP 4	3131.14(14)	7502.28	6262.28	280	960
	INT 4	2312.27(11)	5804.54	4729.64	220	960
	Saving(%)	26.15%	22.63%	26.15%	21.43%	0%
5	SEP 5	4143.24(19)	9866.48	8286.48	380	1200
	INT 6	3386.85(17)	8553.70	6773.7	340	1440
	Saving(%)	18.26%	13.31%	18.26%	10.53%	-20.00%
6	SEP 5	4098.88(19)	9777.76	8197.76	380	1200
	INT 6	3297.87(17)	8375.74	6595.74	340	1440
	Saving(%)	19.54%	14.34%	19.54%	10.53%	-20.00%
7	SEP 8	5911.74(30)	14343.48	11823.48	600	1920
	INT 9	4629.11(27)	11958.22	9258.22	540	2160
	Saving(%)	21.69%	16.63%	21.69%	10.00%	-12.50%
8	SEP 8	5755.14(28)	13990.28	11510.28	560	1920
	INT 9	4501.60(26)	11683.20	9003.20	520	2160
	Saving(%)	21.78%	16.49%	21.78%	7.14%	-12.50%

<Figure 7>과 <Figure 8>은 $[0, 150]^2$, $[0, 200]^2$, $[0, 300]^2$ 으로 실험공간을 확대하여 벤치마크 예제 8을 적용했을 때 개방형 물류망에 비해 폐쇄형 물류망의 거리와 비용 절감 효과를 나타낸 것이다. 실험공간 크기의 증가에 따라 소매점의 좌표가 원거리로 이격되면서 중복 방문으로 인한 운행 거리는 더욱 증가한다. 폐쇄형의 경우 각 DC의 차량이 CRC를 방문해야 하기 때문에 실험공간이 커지면 이로 인한 운행 거리도 증가하게 되지만 총 운행거리를 최소화시키기 위해 CRC의 입지가 DC의 위치에 영향을 받아 최적화된 위치로 선정된다. 반면에

개방형의 경우 폐쇄형보다 더 많은 수의 차량이 편성되어 운행하기 때문에 실험공간 증대시 총 거리의 증가량이 폐쇄형보다 크고, CRC가 DC의 위치와 무관하게 CRC의 운행거리를 최소화하기 위한 위치로 입지하기 때문에 CRC에서 DC로 정상제품의 운반과 차량 복귀를 위한 거리가 증가하게

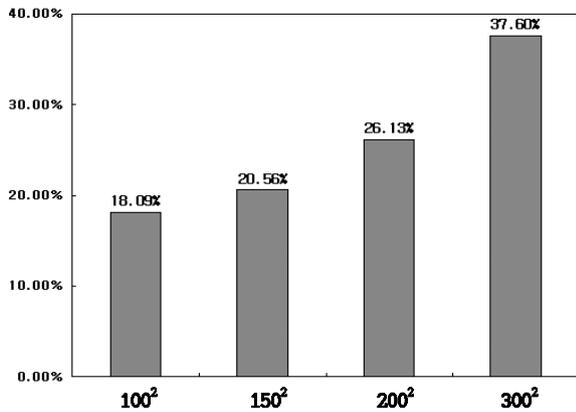


Figure 7. Reduction rate of distance in expansion experiment

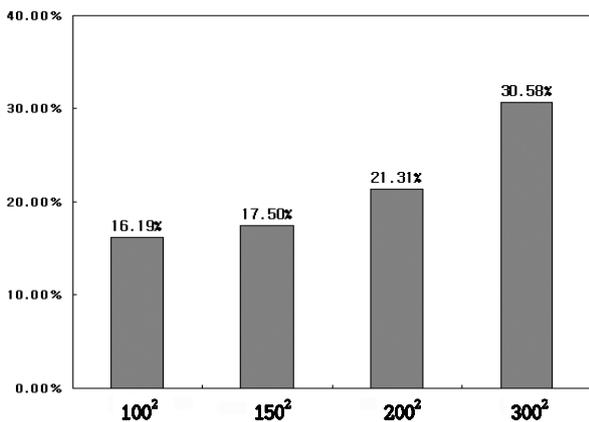


Figure 8. Reduction rate of total cost in expansion experiment

되어 총 거리에 영향을 미친다. 이 실험을 통해 실험공간을 현실공간으로 확대하였을 때의 거리 및 비용의 절감율은 더욱 증가하게 될 것이며, 유가 인상으로 인한 단위 거리당 운행비용 증가시 절감효과는 더욱 클 것으로 판단할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 제품의 배송을 담당하는 순방향의 3단계 물류망과 반품의 수집과 처리를 담당하는 역방향의 3단계 물류망을 통합하는 폐쇄공급사슬망을 구성하기 위한 LRP를 연구하였다. 이를 위해 구성된 물류망에서 두 종류의 설비 수에 의한 비용과 설비에 할당된 소매점으로 차량경로 구성시 발생하는 비용의 최소화를 목적함수로 하는 수리모형을 혼합정수계획

법으로 구성하였다. LRP의 특성상 해공간이 방대하여 일반적인 방법으로 최적해를 산출하기 어려우므로 발견적 기법을 도입한 GA를 통해 근사 최적해를 도출하였다. 또한 본 연구의 VRP가 일반적인 문제와 달리 반드시 특정 노드를 경유하여 출발 지점으로 복귀하는 특수한 VRP임이 따라 문제에 적합한 발견적 기법(FBNNH)을 도입하여 해의 개선이 최대한 이루어지도록 했다. 또한 GA의 성능을 검증하기 위해 초기 모집단 구성 비율과 교차율, 돌연변이율 등의 GA 파라미터를 결정하는 실험과 소형문제에서 CPLEX를 통해 산출된 최적해와의 비교 실험을 함으로써 GA 적용의 효율성을 극대화 했다. 소매점 수와 입지후보지 수를 변화시키면서 생성한 벤치마크 예제를 GA를 통해 실험함으로써 최적 입지와 경로를 도출하였다.

폐쇄공급사슬망 구성으로 인한 효율성을 검증하기 위해 개방형 물류망과 폐쇄형 물류망 각각을 최적화한 실험의 결과 개방형에 비해 폐쇄형 물류망이 배송과 수거를 통합하여 수행함으로써 총 운행거리가 감소하고 이에 따라 총 비용도 감소함을 확인 할 수 있었다. 실험공간을 확대하면서 입지후보지와 소매점 간 거리를 증대시켰을 때 절감효과가 더욱 크게 되어 현실공간 상에서 개방형을 별도로 최적화하는 것보다 폐쇄공급사슬 네트워크로 통합하여 구성하는 것의 효율성을 고찰했다.

향후 연구과제로는 본 연구에서 다루지 않은 다기간(multi-period) 모형 구축을 통해 반품의 재사용시 총 비용의 감소에 대한 분석과 재고 문제와의 연계에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다. 또한 다양한 제품의 종류와 비용요소를 적용한 연구를 통해 더욱 현실성이 높은 모델이 요구된다. 마지막으로 방대한 해공간을 갖는 LRP를 더욱 효율적으로 해결할 수 있는 발견적 기법을 개발하고 다양한 메타 휴리스틱의 성능 비교를 통해 가장 적합한 알고리즘을 찾는 연구가 필요하다.

참고문헌

Korea International Trade Association (2007), The Report of Business Distribution Cost.

Averbakh, I. and Berman, O. (2002), Minimax p-Travelling Salesmen Location Problem on a Tree, *Annals of Operations Research*, 110, 55-62.

Clarke, G., Wright, J. (1964), Scheduling of Vehicle from a Central Depot to a Number of Delivery Points, *Operations Research*, 12(4), 568-581.

Fleischmann, M. and Bloemhof-Ruwaard, J. M. (2000), *A Characterization of Logistics Networks for Product Recovery*, *Omega*, 28, 653-666.

Fleischmann, M. and Bloemhof-Ruwaard, J. M. (1997), Quantitative Models for Reverse Logistics : a Review, *European Journal of Operational Research*, 103, 1-17.

Hansen, P. H. and Hegedahl, B. and Hjortkjaer, S. and Obel, B. (1994), A heuristic Solution to the Warehouse Location-Routing Problem, *European Journal of Operational Research*, 76, 111-127.

Ko, H. J. and Evans, G. W. (2007), A Genetic Algorithm-based Heuristic for the dynamic Integrated Forward/Reverse Logistics Network for 3PLs, *Computers and Operations Research*, 34, 346-366.

Ko, H. J. and Ko, C. S. and Chung, K. H. (2004), A Genetic Algorithm Approach for Logistics Network Integration Forward and Reverse Logistics, *IE Interfaces*,

- 17, 141-151.
- Jaramillo, H. J. and Bhadury, J. and Batta, R. (2002), On the Use of Genetic Algorithms to Solve Location Problems, *Computer and Operations Research*, 29, 761-779.
- Laporte, G. and 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 Nobert, Y. (1981), An Exact Algorithm for Minimizing Routing and Operating Costs in Depot Location, *European Journal of Operational Research*, 6, 224-226.
- Lu, Z. and Bostel, N. (2007), A Facility Location Model for Logistics Systems Including Reverse Flows : the Case of Remanufacturing Activities, *Computers & Operations Research*, 34, 299-323.
- Min, H. and Ko, H. J and Ko, C. S. (2006), The Spatial and Temporal Consolidation of Returned Products in a Closed-loop Supply Chain Network, *Computers and Industrial Engineering*, 51, 309-320.
- Moritz, F. and Beullens, P., and Bloemhof-Ruwaard, J. M. (2001), The Impact of Product Recovery on Logistics Network Design, *Production and Operations Management*, 10(2), 156-172.
- Perl, J. and Daskin, M. S. (1985), A Warehouse Location- Routing Problem, *Transportation Research*, 19, 381-396.
- Supply Chain Management Review (2002), May/June.
- Tuzun, D. and Burke, L. I. (1999), A Two-Phase Tabu Search Approach to th Location Routing Problem, *European Journal of Operational Research*, 116, 87-99.
- Wu, T. H. and Low, C., and Bai, J. W. (2002), Heuristic Solution to Multi-depot Location-Routing Problem, *Computers & Operations Research*, 29, 1393-1415.
- Ye, W. and Li, Q. (2007), Solving the Stochastic Location- Routing Problem with Genetic Algorithm, *14th International Conference on Management Science and Engineering*, 429-434.



나호영

육군사관학교 컴퓨터학과 학사
국방대학교 Operations Research 석사
현재: 육군사관학교 수학과 전임강사
관심분야: SCM, 메타 휴리스틱, 최적화 기법



이상현

육군사관학교 전기공학과 학사
US Naval Postgraduate School OR 석사
Georgia Institute of Technology 산업공학 박사
현재: 국방대학교 운영분석학과 교수
관심분야: 네트워크, 메타 휴리스틱, 로지스틱스, SCM