

유전알고리즘을 이용한 지역 집중형 및 분산형 다단계 역물류 네트워크 분석

(Analysis of regionally centralized and decentralized
multistage reverse logistics networks using genetic
algorithm)

윤 영 수¹⁾
(YoungSu Yun)

요 약 본 연구에서는 지역적으로 집중화된 역물류네트워크(Regionally centralized multistage reverse logistics network: cmRL)와 지역적으로 분산화된 역물류네트워크(Regionally decentralized multistage reverse logistics network: dmRL)를 제안하고 있다. cmRL과 dmRL 각각은 고려되는 영역 전체와 지역적으로 분산된 세부영역에서의 RL 네트워크로 구성된다. 이들은 혼합정수 계획법(Mixed integer programming: MIP) 모델로 공식화되며, 유전알고리즘(Genetic algorithm: GA)을 통해 해를 구하게 된다. 사례연구에서는 두 가지 형태의 RL네트워크를 제시하며 다양한 수행도 척도를 사용하여 cmRL과 dmRL의 효율성을 비교분석하였다. 분석결과 cmRL이 dmRL보다 더 우수한 수행도를 나타내었다.

핵심주제어: 집중형 및 분산형 역물류 네트워크, 유전알고리즘

Abstract This paper proposes regionally centralized multistage reverse logistics (cmRL) networks and regionally decentralized multistage reverse logistics (dmRL) networks. cmRL considers whole area of RL network, while dmRL regionally distributed area of RL network. Each type is formulated by the mixed integer programming (MIP) models, which are realized in genetic algorithm (GA) approach. Two types of numerical experiments using RL network are presented and various measures of performance are used for comparing the efficiency of the cmRL and the dmRL. Finally, it is proved that the performance of the cmRL is superior to that of the dmRL.

Key Words: centralized and decentralized multistage reverse logistics networks, genetic algorithm

1. 서 론

일반적으로 공급망경영(supply chain management)에서 고려되는 물류네트워크는 순방향물류 (forward

logistics: FL) 네트워크와 역물류 (reverse logistics: RL) 네트워크로 구성되어 진다. FL 네트워크의 경우 원자재의 공급부터 생산, 배송의 단계를 거쳐 최종적으로 고객에게 제품이 도달되는 구조를 가지고 있다. 이와는 반대로 RL 네트워크는 고객이 제품을 사용한 후 버려지는 시점부터 시작하여 이를 수집한 후 재판

1) 조선대학교 경영학부

매의 가치가 있는 제품은 재생산(reproduction) 혹은 리사이클링(recycling), 재배포송(redistribution)을 거쳐 다시 고객에게 판매되며, 재배포의 가치가 없는 제품들은 폐기(disposal)의 단계를 거치는 구조를 가지고 있다. 이와 같이 RL네트워크가 FL 네트워크보다 더 복잡한 구조를 가지고 있기 때문에 RL네트워크에 대한 연구가 많이 이루어 지지 않았다. 또한 2000년대 초 까지도 기업들이 생산한 제품을 효율적으로 고객에서 배송하는 문제와 관련된 FL 네트워크에 더 많은 신경을 써 왔기 때문에 고객으로부터의 사용 후 제품처리에 대한 RL 네트워크는 상대적으로 FL 네트워크에 비해 관심이 적은 실정이었다. 하지만 2000년대 중반부터 유럽을 중심으로 사용 후 제품처리에 대한 정부차원의 규제강화와 고객들의 관심증가로 인해 RL 네트워크의 효율적 운영이 기업에게 새로운 관심사가 되었다.

이러한 시대적 상황에 따라 2000년대 후반부터 RL 네트워크 구성 및 효율적 운영에 대해 연구자들이 다양한 방법론을 개발하였다 [1-6]. Min et. al. [1]은 고객으로부터 회수되는 사용 후 제품을 초기수집지점(initial collection point)에서 수집하여 중앙회수센터(centralized return center)로 보내며, 중앙회수센터에서는 수집된 제품을 분류한 후 재사용이 가능한 제품은 재포장(repacking)단계를 거쳐 초기수집지점으로 다시 보내고 수리가 필요한 제품은 수리시설로 보내는 RL 네트워크를 설계하였다. 개발된 RL 네트워크는 혼합정수계획법(mixed integer programming: MIP)으로 모형화되어 유전알고리즘(genetic algorithm: GA)을 통해 최적해를 구하였다. 하지만 이들의 연구에서 고려한 MIP 모형은 초기수집지점 개설에 필요한 고정비용, 재고비용, 제품처리비용과 중앙회수센터 개설에 필요한 고정비용, 초기수집지점과 중앙회수센터 사이의 수송비용만을 고려하였으며, 중앙회수센터에서 초기수집지점과 수리시설로 제품을 보내는데 발생하는 수송비용과 중앙회수센터에서의 제품처리비용 등은 고려하지 않은 단점이 있다. Srivastava [2]는 고객으로부터 회수되는 사용 후 제품을 수집센터(collection center) -> 회복센터(recovery center) -> 1차 (혹은 2차) 시장(first or secondly market)으로 보내는 RL 네트워크를 구축하였다. 그의 연구에서는 각 센터 및 시장의 개설위치와 개설 수만을 결정하는 단순한 형태의 수리모형을

제시하였으며, RL 네트워크에서 일반적으로 고려되는 고정비용, 제품처리비용, 수송비용 등은 고려하지 않은 한계점이 있다.

Na and Lee [3]는 고객으로부터 회수되는 사용 후 제품이 중앙회수수집센터(centralized return collection center)에서 수집된 후 재사용이 가능한 제품은 처리 후 분배센터(distribution center)를 거쳐 판매점으로 보내어지며, 그렇지 않은 제품은 폐기처리센터(disposal center)로 보내어져 폐기 처리되는 RL 네트워크를 제안하였다. 제안된 RL 네트워크에서는 중앙회수수집센터, 분배센터, 판매점 및 폐기처리센터 개설에 필요한 고정비용과 제품처리비용을 고려한 수리모형을 제시하였으며, 이를 해결하기 위해 GA를 적용하였다. 하지만 제시된 수리모형에서 중앙회수수집센터 개설을 위한 고정비용은 고려하였지만 수집된 제품 처리를 위해 필요한 제품 처리비용은 고려하지 않은 단점이 있다. Lim and Jung [4]은 고객으로부터 회수되는 사용 후 제품은 수집센터로 보내어지고 수집센터에서는 수집된 제품을 분류한 후 재사용이 필요한 제품은 재제조센터(remanufacturing center)로 보내어지고, 재제조센터에서는 재수리, 재가공을 거쳐 재분배센터를 통해 2차 시장으로 보내어지는 RL 네트워크를 설계하였다. 설계된 RL 네트워크는 MIP모형로 모형화되어 GAMS/CPLEX 프로그램에서 실행되었다. 이들의 연구는 RL 네트워크를 구성하는 다양한 단계, 즉 수집센터 -> 재제조센터 -> 재분배센터 -> 2차시장을 고려하였다는 특징이 있지만 문제의 규모가 커질 경우 해의 탐색시간이 길어진다는 단점이 있다.

Lin et. al. [5]은 중앙 집중화된 영역(centralized area)과 지역적으로 분산된 영역(regionally decentralized area)에서 고객으로부터 회수되는 사용 후 제품을 통합센터(integration center)로 보내고 통합센터에서는 사용 후 제품의 수집, 분류 및 처리를 한 후 2차 시장으로 보내는 RL 네트워크를 설계하였다. 이들의 연구에서는 특정지역에서 발생하는 RL네트워크를 두 가지 경우(특정지역 전체에서 RL네트워크가 발생하는 경우와 특정지역을 여러 개의 분산된 영역으로 구분하여 RL 네트워크가 발생하는 경우)로 구분하여 각각의 경우에 대해 고객 -> 통합센터->2차 시장에 이르는 RL 네트워크를 구축하였다. 구축된 각각의 RL 네트워크를 수리모형으로 표현하고

GA를 이용하여 해결하였다. 이들의 연구에서는 통합센터 및 2차시장 개설에 필요한 고정비용, 제품처리비용, 사용 후 제품을 고객 -> 통합센터 -> 2차시장으로 보내는데 필요한 수송비용을 함께 고려한 수리모형을 설계하였다. 하지만 이들의 연구는 비교적 간단한 2단계 RL 네트워크(1단계: 고객 -> 통합센터, 2단계: 통합센터 -> 2차시장)만을 고려하여 기존의 많은 연구들에서 사용된 다양한 단계를 고려하지 못한 한계점이 있다. 이와 비슷한 연구를 Yun [6]이 수행하였다.

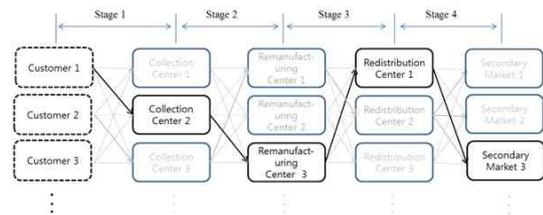
위에서 언급된 RL 네트워크에 관한 기존연구들의 특징 및 한계점을 다음과 같이 정리할 수 있다. 첫째, RL 네트워크 구성상의 차이점을 발견할 수 있다. 즉 RL 네트워크에서 고려될 수 있는 다양한 단계들을 적용한 연구들[1-4]과 비교적 단순한 단계만을 적용한 연구[5-6]로 구분할 수 있다. 예를 들어 Lim and Jung [4]은 연구는 고객 -> 수집센터 -> 재제조센터 -> 재분배센터 -> 2차시장으로 제품을 보내는 RL 네트워크를 설계하였지만, Lin et. al. [5]의 연구에서는 고객 -> 통합센터 -> 2차 시장으로 제품을 보내는 RL 네트워크를 설계하였다. 둘째, 기존연구들[1-3]에서는 RL 네트워크 구성상 발생하는 다양한 비용을 고려하지 못하고 있다. 예를 들어 Srivastava [2]의 경우 RL 네트워크 설계 시 고려되는 회복센터 및 1차 (혹은 2차) 시장 개설에 필요한 고정비용, 제품처리비용, 수송비용을 고려하지 않았다. 이와 같이 다양한 비용을 고려하지 않고 일부의 비용만을 고려할 경우 RL 네트워크의 효율적 운영에 문제가 발생할 수 있다. 셋째, 기존연구들을 특정영역 전체에서 RL 네트워크 구성의 최적화를 추구하는 연구들[1-4]과 특정영역을 여러 개의 분산된 세부영역으로 나누어서 RL 네트워크 구성의 최적화를 추구하는 연구[5-6]로 구분할 수 있다. 특히 후자의 경우 특정영역 전체의 RL 네트워크와 분산된 세부영역별 RL 네트워크를 함께 비교한 연구들로서 전자의 연구들보다 더 의미 있는 연구라고 볼 수 있지만 RL 네트워크에서 고려될 수 있는 다양한 단계들을 고려하지 않은 한계점이 있다.

본 연구에서는 이러한 기존연구들의 특징과 그 적용상의 한계점을 극복하기 위한 방안으로서 RL 네트워크에서 고려될 수 있는 다양한 단계들을 적용하며, 특정영역 전체에서의 RL 네트워크를 구성하는 경우

(regionally centralized multistage reverse logistics networks: cmRL)와 특정영역 전체를 여러 개의 분산된 세부영역으로 나누어서 RL 네트워크를 구성하는 경우(regionally decentralized multistage reverse logistics networks: dmRL)를 함께 고려하여 이들 네트워크의 효율성을 비교 분석하고자 한다. 2장에서는 cmRL과 dmRL의 구조를 상세히 제시하며, 3장에서는 cmRL과 dmRL을 표현하는 수리모형을 개발한다. 개발된 수리모형은 4장에서 GA를 통해 구체화되어지며, 두 가지 형태의 RL네트워크 수치예제를 5장에서 제시하여 cmRL과 dmRL의 효율성을 다양한 수행도 척도를 이용해 비교 분석한다. 마지막 6장에서는 본 연구의 결론으로서 본 연구의 의의와 향후 개선방안을 제시한다.

2. cmRL과 dmRL의 구조

본 연구에서 제시하는 cmRL과 dmRL의 구조는 고객 -> 수집센터 -> 재제조센터 -> 재분배센터 -> 2차시장에 이르는 다단계 RL 네트워크를 사용한다. cmRL의 경우에는 이러한 다단계 RL 네트워크가 특정영역 전체에서의 구성되지만, dmRL의 경우에는 특정영역을 네 개의 분산된 세부영역으로 나누어진 각각의 세부영역에서 다단계 RL 네트워크가 구성된다. cmRL과 dmRL을 구성하는 다단계 RL네트워크의 구조는 <Fig. 1>과 같다.



<Fig. 1> Scheme of cmRL and dmRL

<Fig. 1>에서 보여지는 것과 같이 모든 고객으로부터 수집되는 사용 후 제품은 개설 가능한 수집센터들 중에서 하나의 수집센터로 전부 보내어지며, 수집센터에서는 수집된 모든 제품을 개설 가능한 재제조센터들 중에서 하나의 재제조센터로 전부 보낸다. 재제조센터에서는 적절한 수리를 거쳐 재사용이 가능

한 제품을 만든 후 이를 개설 가능한 재분배센터들 중에서 하나의 재분배센터를 거쳐 최종적으로 개설 가능한 2차시장들 중에서 하나의 2차시장으로 제품을 보낸다. 이상과 같이 다단계를 거쳐 제품을 보내는 RL 네트워크에서는 다음과 같은 측면을 고려하여야 한다.

- 각 단계별로 개설되는 센터 및 2차시장은 그 각각의 개설에 필요한 고정비용(구축비용), 제품의 처리를 위한 제품처리비용, 각 단계별로 제품을 보내는 수송비용이 발생한다. 결국 각 단계에서 발생하는 고정비용, 제품처리비용, 수송비용의 총합을 최소화하는 것이 이러한 형태의 다단계 RL네트워크를 효율적으로 운영하는 방안이다.

3. 수리모형

cmRL과 dmRL 을 위한 수리모형을 설계하기 전에 본 연구에서 고려하는 가정은 다음과 같다.

- 본 연구에서 고려하는 다단계 RL 네트워크는 단일 제품만을 사용한다.
- 고객의 수는 사전에 알려져 있으며, 모든 고객들은 한 개의 사용 후 단일 제품을 각 단계별로 개설되는 하나의 센터 및 2차시장으로 전부 보낸다. 즉 cmRL의 경우에는 고려되는 특정영역 전체에서 위치하는 고객들 전부가 수집센터 -> 재제조센터 -> 재분배센터 -> 2차시장으로 제품을 보내게 되며, dmRL의 경우에는 특정영역을 네 개의 분산된 세부영역으로 나누어 각 세부영역별로 위치하는 고객들이 각 세부영역에 존재하는 수집센터 -> 재제조센터 -> 재분배센터 -> 2차시장으로 제품을 보내게 된다. 결국 dmRL에서 각 세부영역별로 위치하는 고객, 수집센터, 재제조센터, 재분배센터, 2차시장의 수를 전부 합하면 cmRL의 특정 영역 전체에 위치하는 고객, 수집센터, 재제조센터, 재분배센터, 2차시장의 수와 동일하게 된다. 또한 cmRL과 dmRL에서 각 고객별로 단지 하나의 단일 제품만을 보내기 때문에 보내는 제품의 총 수(=고객의 용량)는 고객의 수와 동일하다.
- 모든 고객, 수집센터, 재제조센터, 재분배센터, 2차시장의 위치는 좌표정보로 표시되며, 사전에

알려져 있다.

- 수집센터, 재제조센터, 재분배센터 및 2차 시장의 개설에 필요한 고정비용은 각각 다르며, 사전에 알려져 있다.
- 각 단계별로 고려되는 센터 및 2차 시장의 제품 처리를 위한 단위당 제품처리비용은 서로 다르다. 하지만 같은 단계에서 고려되는 센터 및 2차 시장의 단위당 제품처리비용은 전부 동일하다. 예를 들어 고객 -> 수집센터 단계에서 고려되는 수집센터가 네 군데 위치한다고 할 때, 이들 네 군데의 수집센터 중에서 어떤 수집센터가 실제 개설되더라도 그 단위당 제품처리비용은 전부 동일하다.
- 단위당 제품수송비용은 각 단계별로 개설되는 센터 및 2차 시장의 위치좌표에 의해 계산된다. 예를 들어 수집센터 2와 재제조센터 1이 개설되며, 그 각각의 위치좌표가 (3.5, 4.1), (7.1, 9.0)일 경우 수집센터 2에서 재제조센터 1로 제품을 보낼 때 발생하는 단위당 수송비용은 유클리디안 거리(euclidian distance)에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$\text{단위당 제품처리비용} = 7.1 - 3.5 + (9.0 - 4.1)^2 \quad (1)$$

2장에서 언급된 것과 같이 cmRL과 dmRL을 구성하는 다단계 RL네트워크의 효율적 운영방안은 각 단계에서 발생하는 고정비용, 제품처리비용, 수송비용의 총합을 최소화하는 것이다. 결국 위에서 설명된 가정들과 다양한 제약조건들을 고려한 상황에서 총비용의 합을 최소화하는 것이 본 연구에서 개발될 수리모형의 목적함수가 된다. 수리모형에서 사용될 인수, 파라미터, 변수를 설정하면 다음과 같다.

- 인수
- i : 객($i \in I$)
- j : 수집센터($j \in J$)
- k : 재제조센터($k \in K$)
- l : 재분배센터($l \in L$)
- m : 2차시장($m \in M$)
- 파라미터
- CUS_i : 고객 i 의 용량

CO : 집센터 *j*의 고정비용
SRM_k : 재제조센터 *k*의 고정비용
SRD_l : 재분배센터 *l*의 고정비용
SSE_m : 2차시장 *m*의 고정비용
TCO : 수집센터의 단위당 제품처리비용
TRM : 재제조센터의 단위당 제품처리비용
TRD : 재분배센터의 단위당 제품처리비용
TSE : 2차시장의 단위당 제품처리비용
CUCO_{ij} : 고객 *i*에서 수집센터 *j*로 보내는
 단위당 제품수송비용
CORM_{jk} : 수집센터 *j*에서 재제조센터 *k*로 보내는
 단위당 제품수송비용
RMRD_{kl} : 재제조센터 *k*에서 재분배센터 *l*로 보내는
 단위당 제품수송비용
RDSE_{lm} : 재분배센터 *l*에서 2차시장 *m*으로 보내는
 단위당 제품수송비용

- 변수

x_j : 수집센터 *j*의 처리용량
x_k^M : 재제조센터 *k*의 처리용량
x_l^D : 재분배센터 *l*의 처리용량
x_m^S : 2차시장 *m*의 처리용량
y_j^C = { 1, 수집센터 *j*가 개설될 경우 }
 { 0, 그렇지 않을 경우 }
y_k^M = { 1, 재제조센터 *k*가 개설될 경우 }
 { 0, 그렇지 않을 경우 }
y_l^D = { 1, 재분배센터 *l*이 개설될 경우 }
 { 0, 그렇지 않을 경우 }
y_m^S = { 1, 2차시장 *m*이 개설될 경우 }
 { 0, 그렇지 않을 경우 }

위에서 설정된 파라미터와 의사결정변수를 이용하여 cmRL과 dmRL의 수리모형을 설계하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \min Z = & \sum_j SCO_j \cdot y_j^C + TCO(\sum_j x_j^C \cdot y_j^C) + \\
 & \sum_i \sum_j CUCO_{ij} \cdot CUS_i \cdot y_j^C + \\
 & \sum_k SRM_k \cdot y_k^M + TRM(\sum_k x_k^M \cdot y_k^M) + \\
 & \sum_j \sum_k CORM_{jk} \cdot x_j^C \cdot y_k^M + \\
 & \sum_l SRD_l \cdot y_l^D + TRD(\sum_l x_l^D \cdot y_l^D) +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_k \sum_l RMRD_{kl} \cdot x_k^M \cdot y_l^D + \\
 & \sum_m SSE_m \cdot y_m^S + TSE(\sum_m x_m^S \cdot y_m^S) + \\
 & \sum_l \sum_m RDSE_{lm} \cdot x_l^D \cdot y_m^S
 \end{aligned} \tag{2}$$

subject to

$$\sum_j x_j^C - \sum_k x_k^M = 0 \tag{3}$$

$$\sum_k x_k^M - \sum_l x_l^D = 0 \tag{4}$$

$$\sum_l x_l^D - \sum_m x_m^S = 0 \tag{5}$$

$$\sum_j y_j^C = 1 \tag{6}$$

$$\sum_k y_k^M = 1 \tag{7}$$

$$\sum_l y_l^D = 1 \tag{8}$$

$$\sum_m y_m^S = 1 \tag{9}$$

$$y_j^C = \{0, 1\}, \quad \forall j \in J \tag{10}$$

$$y_k^M = \{0, 1\}, \quad \forall k \in K \tag{11}$$

$$y_l^D = \{0, 1\}, \quad \forall l \in L \tag{12}$$

$$y_m^S = \{0, 1\}, \quad \forall m \in M \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
 x_j^C, x_k^M, x_l^D, x_m^S \geq 0, \quad \forall j \in J, \forall k \in K, \forall l \in L, \\
 \forall m \in M
 \end{aligned} \tag{14}$$

목적함수 수식(2)는 각 단계에서 개설되는 센터 및 2차시장의 고정비용, 제품처리비용, 수송비용의 총합을 최소화하고 있다. 제약조건 수식 (3)은 개설되는 수집센터의 수집량의 총합은 다음 단계에서 개설되는 재제조센터의 처리용량의 총합과 같아야 한다는 제약이다. 같은 방법으로 수식 (4)와 (5)는 재제조센터, 재분배센터 각각의 처리용량의 합이 다음 단계에서 개설되는 재분배센터, 2차 시장 각각의 처리용량의 합과 같아야 한다는 제약이다. 수집센터, 재제조센터, 재분배센터, 2차시장은 각 단계에서 오직 하나만 개설되어야 하며 이를 수식 (6), (7), (8), (9)에서 제약하고 있다. 또한 수집센터, 재제조센터, 재분배센터, 2차시장이 각 단계에서 개설될 경우 1의 값을 가지며, 그렇지 않을 경우 0의 값을 가지도록 하는 제약들은 수식 (10), (11), (12), (13)이다. 수식 (14)는 비부(non-negativity) 정수이어야 한다는 것을 제약한다.

본 연구에서 제시한 cmRL과 dmRL 수리모형은 혼

합정수계획법(mixed integer programming: MIP) 형태로 표시되며, 이를 해결하기 위해 GA가 사용된다.

4. GA 접근법

본 연구에서 제시한 cmRL과 dmRL와 같은 다단계 RL 네트워크는 NP-Complete로 알려져 있으며, 따라서 기존의 휴리스틱 기법들을 이용할 경우 최적해를 효율적으로 구할 수가 없다 [7]. 하지만 최근에 GA 접근법을 이용한 몇몇 연구들이 다단계 RL 네트워크 형태의 문제들에 대해 효율적으로 최적해를 구하였다 [1, 8-10]. 따라서 본 연구에서도 cmRL과 dmRL을 효율적으로 해결하기 위한 GA접근법을 제안한다. 단계별 적용방안은 다음과 같다.

4.1 유전인자 표현법(representation) 및 초기집단(initial population) 생성

cmRL과 dmRL을 위한 GA접근법을 개발하는데 있어서 가장 중요한 것은 각 단계별로 고려되는 센터 및 2차시장의 개설 여부를 정확히 표현하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 0-1 비트 표현법(0-1 bit string representation) 을 사용한다. 즉 각 단계별로 개설되는 센터 및 2차시장은 1의 값을 가지고 개설이 안 되는 센터 및 2차시장은 0의 값을 가지도록 하는 방법을 사용한다. 또한 각 단계별 센터 및 2차시장의 개설 여부는 다음에서 설명되는 유전 연산자(genetic operator)의 적용과정에서 따라 자동적으로 정해진다. <Fig. 2>는 각 단계별로 3개의 센터 및 2차시장이 고려되었을 경우에 적용할 수 있는 유전인자 표현법의 예를 제시하고 있다.

y_1^C	y_2^C	y_3^C	y_1^M	y_2^M	y_3^M	y_1^D	y_2^D	y_3^D	y_1^S	y_2^S	y_3^S
0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0

<Fig. 2> Representation scheme of cmRL and dmRL

<Fig. 2>를 살펴보면, 고려되는 수집센터 세 개 중에서 수집센터 2가 개설(=1)되고 나머지 수집센터 1과 3은 개설되지 않고 있다($y_1^C = y_3^C = 0$). 같은 의미로 재제조센터 1, 재분배센터 3, 2차시장 2가 개설되

고 ($y_1^M = y_3^D = y_2^S = 1$) 나머지 센터 및 2차시장들은 개설되지 않고 있다. 이상과 같은 0-1 비트 표현법을 사용하면 유전연산자 적용을 위한 초기집단을 쉽게 생성할 수 있다. 만일 집단의 크기가 6이라고 할 때 초기집단은 <Fig. 3>와 같이 생성할 수 있다.

$V_1 =$	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
$V_2 =$	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0
$V_3 =$	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1
$V_4 =$	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
$V_5 =$	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0
$V_6 =$	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1

<Fig. 3> Initial population

4.2 유전연산자(genetic operator)

일반적으로 GA에서 사용되는 유전연산자에는 선택(selection), 교차변이(crossover), 돌연변이(mutation), 적합도 평가(fitness evaluation)가 있으며 그 적용방법을 다음과 같다.

4.2.1 선택(selection)

선택 연산자는 현재의 집단에서 우수한 개체(individual)를 선택하는 과정이며, 선택된 우수한 개체들은 다음세대를 구성하는 집단에 포함되게 된다. 본 연구에서는 Gen and Cheng [7]이 제안한 확장공간에서의 엘리트 전략(elitist strategy in enlarged sampling space)을 사용한다. 이 전략은 이전 집단의 개체 전부와 현재집단의 개체 전부에 대해 적합도 평가를 실시한 후 그 적합도가 우수한 개체들 순서로 집단의 크기만큼 선택하는 것이다.

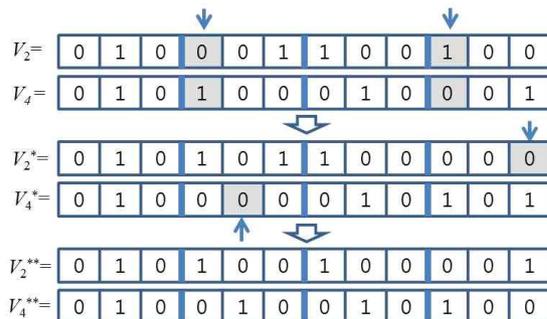
4.2.2 교차변이(crossover)

교차변이 연산자는 현재집단에서 두 개의 개체를 임의로 선정한 후 이들 개체를 구성하는 유전인자들 중에서 일부를 다시 선택하여 서로 교환(=교차)한 후 새로운 개체를 생성하는 과정을 말한다. 본 연구에서는 기존의 2점 교차변이(two point crossover) 연산자 [11]를 개선한 방법을 사용한다. 상세한 적용과정은 <Fig. 4>와 함께 다음에서 설명한다.

Step 1: 현재 집단에서 임의로 두 개의 개체를 선정한다. <Fig. 4>에서 V_2 와 V_4 가 선정되었다.

Step 2: 선정된 개체들을 구성하는 유전인자들 중에서 임의로 두 개의 유전인자를 선정한다. <Fig. 4>에서 V_2 와 V_4 의 유전인자들 중에서 화살표로 표시된 부분이 선정된 유전인자들이다.

Step 3: 선정된 유전인자의 값을 서로 교환한다. <Fig. 4>에서 V_2^* 와 V_4^* 가 이러한 과정을 설명하고 있다. 만일 교환된 유전인자들로 인해 각 단계의 센터 및 2차 시장의 개설에 문제가 발생할 경우, 이를 수정하는 절차가 필요하다. 예를 들어 <Fig. 4>의 V_2 와 V_4 에서 선정된 유전인자를 교환한 결과인 V_2^* 와 V_4^* 를 살펴 보면 이러한 수정절차가 필요한 것을 알 수 있다. 즉 V_2^* 의 네 번째와 여섯 번째 유전인자의 값이 모두 1 ($y_3^M=1$)로 표시되어 네 번째와 여섯 번째의 재제조센터가 모두 개설되는 것을 의미한다. 이는 각 단계별 센터 및 2차시장의 개설은 오직 한 군데만 가능하다는 조건을 위반하는 것이다. 따라서 이를 수정해 주어야 한다. 결국 V_2^* 의 네 번째 유전인자를 제외한 나머지 모든 유전인자 값을 0으로 변경시켜 주어야 하며, 이는 여섯 번째 유전인자 값을 1에서 0으로 변경시켜야 한다는 것을 의미한다. 이와는 반대로 V_4^* 에서 재제조센터 개설 여부를 살펴보면 모든 재제조센터가 개설되지 않고 있는 것을 알 수 있다($y_1^M=y_2^M=y_3^M=0$). 따라서 이러한 문제점도 수정절차가 필요한 것을 알 수 있다. 즉 V_4^* 의 재제조센터 전부 중에서 하나를 임의로 선정(V_4^* 에서 화살표로 표시된 부분) 한 후 선정된 유전인자 값을 0에서 1로 변경시켜 준다. 이상과 같은 중복개설 및 전체 미 개설 문제는 V_2^* 와 V_4^* 의



<Fig. 4> Crossover

열 번째에서 열 두 번째까지의 유전인자들에서도 같은 현상이 발생하기 때문에 위에서 설명한 수정 절차를 적용하여야 한다, 결국 최종적으로 완성된 새로운 개체들은 V_2^{**} 와 V_4^{**} 에 보여진다.

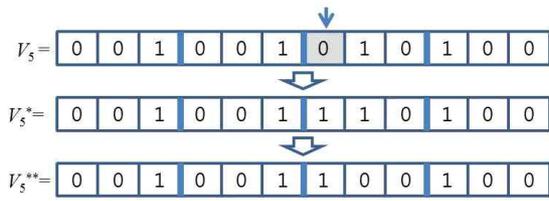
4.2.3 돌연변이(mutation)

돌연변이 연산자는 임의로 하나의 개체를 선정 후 선정된 개체의 유전인자 일부를 변경하는 과정을 말한다. 본 연구에서는 [7]이 제안한 랜덤돌연변이(Random mutation) 연산자를 적용한다. 구체적인 적용방법은 <Fig. 5>와 함께 단계별로 설명한다.

Step 1: 현재 집단에서 임의로 하나의 개체를 선정한다. <Fig. 5>에서 V_5 가 선정되었다.

Step 2: 선정된 개체를 구성하는 유전인자들 중에서 임의로 한 개의 유전인자를 선정한다. <Fig. 5>에서 V_5 의 유전인자들 중에서 화살표로 표시된 부분이 선정된 유전인자이다.

Step 3: 선정된 유전인자의 값을 변경한다. 즉 선정된 유전인자의 값이 1일 경우 0으로 변경하고, 0일 경우 1로 변경한다. <Fig. 5>에서 선정된 유전인자의 값이 0이기 때문에 이를 1로 변경한다. 하지만 이러한 변경과정을 거칠 경우 재분배센터 개설에 문제가 발생한다. 즉 V_5^* 의 일곱 번째와 여덟 번째 유전인자의 값이 모두 1이며, 이는 재분배센터 1과 2가 모두 개설된다는 의미이다. 결국 이러한 중복개설의 문제를 해결하여야 한다. 따라서 V_5^* 에서 선택된 유전인자 값이 변경된 V_5^* 의 일곱 번째 유전인자를 제외하고 나머지 모든 유전인자들은 0의 값을 가지도록 한다. 즉 여덟 번째 유전인자의 값을 1에서 0으로 변경한다. 이와는 반대로 만일 V_5 에서 선정된 유전인자 값이 1일 경우 이를 0으로 변경시켜야 하며, 이를 경우 해당 단계에서 고려되는 센터 혹은 2차시장 전부가 개설되지 않는 경우가 발생할 것이다. 따라서 선정되지 않은 나머지 유전인자들 중에서 임의로 하나의 유전인자를 선정 후 선정된 유전인자 값을 0에서 1로 변경시켜 주는 절차가 필요하다. 결국 최종적으로 완성된 새로운 개체는 V_5^{**} 에 보여진다.



<Fig. 5> Mutation

4.2.4 적합도 평가(fitness test)

적합도 평가는 교차변이, 돌연변이가 과정을 거친 후 새롭게 생성된 개체들로 구성된 집단의 적합도를 평가하는 과정을 말한다. 본 연구에서는 3장 수리모형에서 개발된 제약조건 (3)에서 (14)까지를 모두 만족하는 개체들을 목적함수 수식(2)에 적용하여 그 적합도를 계산한다.

4.2.5 GA 수행 절차 (overall procedure)

본 연구에서 제안한 GA 접근법의 전체적인 수행절차는 다음과 같다.

Step 1: 초기집단 생성

4.1절에서 제안한 유전인자 표현법을 사용하여 초기집단을 생성한다.

Step 2: 유전 연산자 적용

- 선택: Gen and Cheng [7]이 제안한 확장공간에서의 엘리트 선택 전략을 적용한다.

- 교차변이: 4.2.2절에서 제안한 개선된 2점 교차변이 연산자를 사용한다
- 돌연변이: Gen and Cheng [7]이 제안한 랜덤돌연변이 연산자를 사용한다.
- 적합도 평가: 3장 수리모형에서 개발된 제약조건 (3)에서 (14)까지를 모두 만족하는 개체들을 목적함수 수식(2)에 적용하여 그 적합도를 계산한다.

Step 3: 종료조건 설정

미리 정의된 반복조건을 만족하면 종료한다. 그렇지 않을 경우에는 Step 2로 간다.

5. 수치예제

수치예제에서는 두 가지 형태의 다단계 RL네트워크를 이용하여 cmRL과 dmRL의 수행도를 비교 분석한다. <Table 1>과 <Table 2>는 수치예제에서 사용할 두 가지 형태의 다단계 RL 네트워크의 구성을 보여주고 있다.

<Table 1>의 cmRL경우에는 특정영역 전체에서 고려되는 고객, 수집센터, 재제조센터, 재분배센터 및 2차시장의 수가 각각 20, 12, 8, 8, 12이다. dmRL의 경우에는 cmRL에서 고려된 특정영역을 네 개의 분산된 세부영역으로 나누어 각 세부영역별로 고객, 수집센터, 재제조센터, 재분배센터 및 2차시장을 각각 고

<Table 1> Numerical Example 1(T-1) for cmRL and dmRL

		Customer	Collection Center	Remanufacturing Center	Redistribution Center	Secondary Market
cmRL		20	12	8	8	12
dmRL	Region 1	5	3	2	2	3
	Region 2	5	3	2	2	3
	Region 3	5	3	2	2	3
	Region 4	5	3	2	2	3

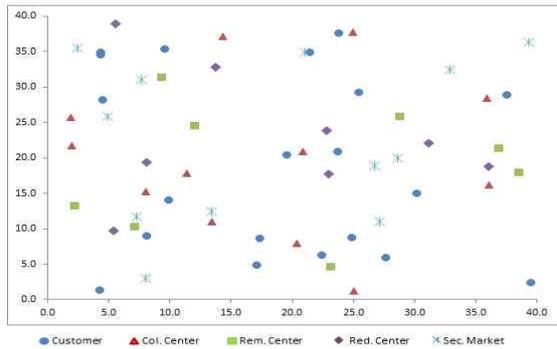
<Table 2> Numerical Example 2(T-2) for cmRL and dmRL

		Customer	Collection Center	Remanufacturing Center	Redistribution Center	Secondary Market
cmRL		40	24	16	16	24
dmRL	Region 1	10	6	4	4	6
	Region 2	10	6	4	4	6
	Region 3	10	6	4	4	6
	Region 4	10	6	4	4	6

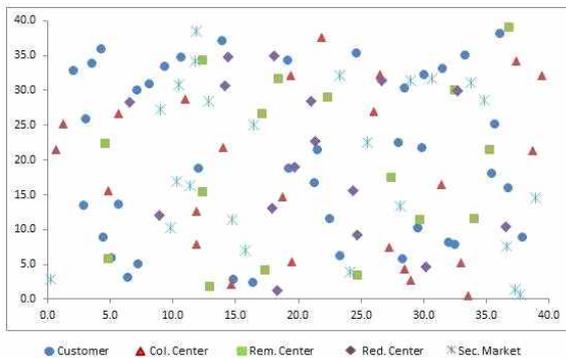
려하기 때문에 cmRL에서 고려되는 각 센터 및 2차 시장의 수는 dmRL에서는 네 부분으로 나누어 진다. <Table 2>는 <Table 1>보다 더 큰 사이즈의 다단계 RL네트워크를 보여주고 있다. <Table 1>과 <Table 2>에서 고려되는 고객, 각 센터 및 2차시장의 개설에 필요한 고정비용, 단위당 제품처리비용, 수송비용 계산을 위한 위치좌표들에 대한 정보는 <Appendix 1>에서 <Appendix 4>까지 나타나 있다. <Appendix 1>과 <Appendix 2>는 T-1에 대한 cmRL과 dmRL의 정보를 보여주고 있는데, cmRL의 경우에는 전체 영역에 대한 정보를 보여주고 있지만 dmRL의 경우에는 전체영역을 네 부분의 세부영역(Region 1: 고객 1에서 5까지, 수집센터 1에서 3까지, 재제조센터 1에서 2까지, 재분배센터 1에서 2까지, 2차시장 1에서 3까지의 정보; Region 2: 고객 6에서 10까지, 수집센터 4에서 6까지, 재제조센터 3에서 4까지, 재분배센터 3에서 4까지, 2차시장 4에서 6까지의 정보; Region 3: 고객 11에서 15까지, 수집센터 7에서 9까지, 재제조센

터 5에서 6까지, 재분배센터 5에서 6까지, 2차시장 7에서 9까지의 정보; Region 4: 고객 16에서 20까지, 수집센터 10에서 12까지, 재제조센터 7에서 8까지, 재분배센터 7에서 8까지, 2차시장 10에서 12까지의 정보)으로 나누어진 정보를 보여주고 있다.

<Appendix 3>과 <Appendix 4>도 <Appendix 1>과 <Appendix 2>와 같은 방식으로 해당 정보를 보여주고 있다. 특히 <Appendix 1>과 <Appendix 3>는 각 센터 및 2차시장의 위치좌표를 보여주고 있는데 이러한 정보를 실제 좌표평면상에 표시하면 <Fig. 6>, <Fig. 7>과 같다. T-1과 T-2의 수치예제를 이용해 제안된 GA접근법을 Visual Basic Ver. 6.0으로 프로그래밍하여 실행하였다. 실행환경은 IBM 호환 PC 3.4Ghz 프로세스 (Intel Core i7-2600 CPU), 4GB RAM, Windows 7이었다. GA접근법에서 사용된 파라미터 설정은 총세대수: 10,000, 집단 크기: 20, 교차변이확률: 0.7, 돌연변이 확률: 0.1 이며, GA 접근법의 랜덤발생 문제를 해소하기 위해 총 20번의 반복실행이 이루어 졌다. 이상과 같은 환경하에서 실행된 cmRL과 dmRL을 위한 GA접근법들은 <Table 3>에서 제시된 수행도 척도를 이용해 비교 분석되었다.



<Fig. 6> Layout for T-1



<Fig. 7> Layout for T-2

<Table 3> Measures of Performance

Measure of Performance	Description
CPU Time	Average CPU Time (unit: Sec.)
Optimal solution	The value of minimizing the sum of handling cost, fixed cost, and transportation cost resulting from each stage
Optimal setting	Opening or closing decisions at each centers, and secondary markets in the optimal solution

<Table 3>에서 CPU time은 cmRL과 dmRL을 적용하기 위해 제안된 각각의 GA 접근법이 총 20회의 반복수행을 한 후 구해진 평균값을 의미하며, Optimal solution과 Optimal setting은 각각의 GA 접근법을 총 20회의 반복수행 후 가장 우수한 결과가 도출되는 경우의 값을 의미한다. <Table 4>는 T-1에 대한 cmRL과 dmRL의 GA 접근법 수행도 결과를 보여주고 있다.

<Table 4> Computation result for T-1

		Optimal setting		Optimal solution		CPU time	
		Opening	Handling Cost	Fixed Cost	Transp. Cost	Total cost	
cmRL		C.C.	11	50.0	135.0	308.6	
		M.C.	6	76.0	138.0	187.0	
		D.C.	7	32.0	126.8	126.5	
		S.M.	6	40.0	111.0	119.0	
		Total Cost		198.0	510.8	741.1	1449.4
dmRL	Region 1	C.C.	2	12.5	125.4	35.5	
		M.C.	1	19.0	127.8	20.1	
		D.C.	2	8.0	136.9	17.7	
		S.M.	2	10.0	111.4	17.3	
	Region 2	C.C.	1	12.5	127.4	46.7	
		M.C.	1	19.0	172.2	25.5	
		D.C.	2	8.0	174.5	21.6	
		S.M.	3	10.0	111.0	13.5	
	Region 3	C.C.	3	12.5	113.6	53.0	
		M.C.	2	19.0	138.0	33.4	
		D.C.	2	8.0	143.2	13.0	
		S.M.	2	10.0	115.8	24.2	
	Region 4	C.C.	2	12.5	135.0	61.8	
		M.C.	1	19.0	109.0	29.5	
		D.C.	1	8.0	126.3	20.6	
		S.M.	1	10.0	116.5	27.5	
	Total Cost		198.0	2084.0	460.9	2742.9	2.5

* C.C.: Collection center, M.C.: Remanufacturing center, D.C.: Redistribution center, S.M.: Secondary market

<Table 4>를 살펴보면 먼저 CPU time의 경우 cmRL이 dmRL보다 약간 빠른 결과를 보이고 있지만 그 차이가 크지 않다고 판단된다. Optimal setting의 결과를 살펴보면, cmRL과 dmRL이 각각 개설되는 센터 및 2차시장이 다르며, dmRL의 경우에도 세부 영역별로 개설되는 센터 및 2차시장이 각각 다르다는 것을 알 수 있다. 이러한 개설의 차이는 Optimal solution에 영향을 주게 된다. 즉 각 센터 및 2차시장의 개설이 서로 상이하기 때문에 이들 센터 및 2차시장의 개설에 필요한 고정비용과 수송비용은 각각 다른 것을 알 수 있다. 하지만 제품처리비용은 cmRL, dmRL 모두 동일한 결과(cmRL과 dmRL의 제품처리비용 = 198.0)를 나타내고 있다. 구체적으로 살펴보면, 먼저 고정비용의 경우 cmRL은 수집센터 11, 재제조센터 6, 재분배센터 7, 2차시장 6의 개설에 총 510.8(= 135.0 + 138.0 + 126.8 + 111.0)의 비용이 발생하였다. dmRL의 경우에는 각 세부영역별로 개설되는 센터 및 2차시장이 다르게 때문에 이들 개설에 필요한 총

비용은 2,084.0 (=125.4 + ... + 116.5)이 된다. 결국 고정비용 측면에서 보면 cmRL이 dmRL보다 약 75.0% 정도(510.8/2084.0) 훨씬 더 유리한 것으로 분석된다. 이러한 결과는 dmRL의 경우 각 세부영역 내 군데 별로 각각의 센터 및 2차시장이 개설되지만 cmRL의 경우에는 전체영역에서 각 센터 및 2차시장이 개설되기 때문이다. 수송비용의 경우 cmRL과 dmRL이 741.1, 460.9로서 dmRL이 cmRL보다 약 37.8% 정도(460.9/741.1) 더 우수한 결과를 보였다. 이러한 결과는 cmRL의 경우에는 전체영역에 위치하는 모든 고객들이 한 군데의 수집센터로만 제품을 보내게 되어 그 수송거리가 길어지게 되지만, dmRL의 경우에는 전체영역을 네 군데의 세부영역으로 나누어서 각 세부영역별로 위치하는 고객들만 해당영역에 위치하는 수집센터로 제품을 보내기 때문에 cmRL의 경우보다 수송거리가 짧아지게 된다. 제품처리비용의 경우에는 cmRL과 dmRL이 모두 동일한 값을 가지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 이미 3장 수리모형

<Table 5> Computation result for T-2

Optimal setting				Optimal solution		CPU time		
	Opening	Handling Cost	Fixed Cost	Transp. Cost	Total cost			
cmRL	C.C.	17	84.0	128.8	666.2			
	M.C.	8	140.0	139.9	419.0			
	D.C.	15	96.0	114.8	240.4			
	S.M.	15	72.0	147.2	213.6			
	Total Cost		392.0	530.7	1539.2		2461.9	
dmRL	Region 1	C.C.	2	21.0	137.7	74.8		
		M.C.	1	35.0	101.5	72.5		
		D.C.	2	24.0	150.9	35.7		
		S.M.	5	18.0	125.3	29.8		
	Region 2	C.C.	2	21.0	110.3	85.7		
		M.C.	3	35.0	100.4	50.5		
		D.C.	3	24.0	114.8	32.9		
		S.M.	3	18.0	139.8	51.1		
	Region 3	C.C.	2	21.0	137.7	74.8		
		M.C.	1	35.0	101.5	72.5		
		D.C.	2	24.0	150.9	35.7		
		S.M.	5	18.0	125.3	29.8		
	Region 4	C.C.	2	21.0	125.4	77.6		
		M.C.	2	35.0	101.2	73.8		
		D.C.	1	24.0	138.9	29.6		
		S.M.	1	18.0	117.9	26.3		
	Total Cost		392.0	1979.5	853.1	3224.6		4.1

의 가정에서 언급되어진 것과 같이 각 단계별로 고려되는 센터 및 2차 시장의 제품처리를 위한 단위당 제품처리비용은 서로 다르지만 같은 단계에서 고려되는 센터 및 2차 시장의 단위당 제품처리비용은 전부 동일하기 때문이다. 즉 cmRL에서 각 단계별로 개설되는 센터 및 2차시장과 dmRL에서 세부영역별로 개설되는 센터 및 2차시장은 서로 다르지만 각 단계별로 어떤 센터 및 2차시장이 개설되더라도 같은 단계에서는 제품 처리를 위한 단위당 제품처리비용은 전부 동일하기 때문이다. 결국 고정비용, 수송비용, 제품처리비용의 합인 총비용은 cmRL이 dmRL보다 약 47.2%정도(1449.4/2742.9) 더 우수한 결과를 나타내고 있다. cmRL과 dmRL에서 각 단계별로 개설되는 센터 및 2차시장의 구체적인 위치와 제품 수송상황을 표시하면 <Fig. 8>, <Fig. 9> 과 같다.

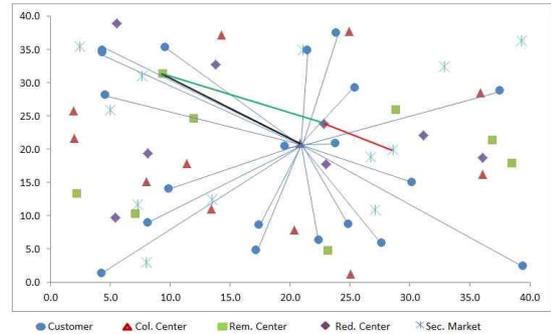
<Fig. 8>은 cmRL에서의 상황을 보여주고 있는데, 전체영역에서 위치하는 모든 고객들은 중앙부분에 위치한 한 군데의 수집센터로 제품을 전부 보내고 있으며, 이 수집센터에서 수집된 모든 제품들이 한

군데의 재제조센터와 재분배센터를 거쳐 최종적으로 한 군데의 2차시장으로 보내어 지는 것을 알 수 있다. <Fig. 9>는 dmRL에서의 상황을 보여주고 있는데, 각 세부영역별로 위치하는 고객들은 해당 세부영역에서 개설되는 수집센터, 재제조센터, 재분배센터, 2차시장으로만 제품을 보내고 있는 것을 알 수 있다. 결국 cmRL과 dmRL에서 각 단계별로 개설되는 센터 및 2차시장의 위치가 서로 상이하기 때문에 <Table 4>에서 보여지는 것과 같이 고정비용 및 수송비용의 차이가 발생하게 된다. <Table 5>는 T-2에 대한 cmRL과 dmRL의 GA 접근법 수행도 결과를 보여주고 있다. <Table 5>의 수행도 결과를 살펴보면, 먼저 CPU Time의 경우 cmRL이 dmRL보다 약간 더 빠른 수행도를 보였다. 이는 <Table 4>에서의 CPU Time 분석에서도 비슷한 결과를 보인 것으로 그 차이가 크지 않다고 판단된다. Optimal setting의 결과를 살펴보면, cmRL과 dmRL 모두 각 단계별로 개설되는 센터 및 2차시장의 상이한 것을 알 수 있으며, 이러한 개설의 차이는 Optimal solution의 결과에 영

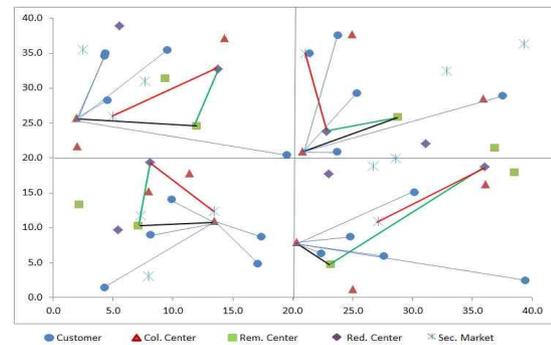
향을 미친다. 즉 제품처리비용을 제외하고 고정비용과 수송비용은 cmRL과 dmRL의 결과가 다르다는 것을 알 수 있다. 먼저 고정비용의 경우 cmRL이 dmRL보다 약 73.2%정도(530.7/1979.5) 더 우수한 결과를 보이고 있다. 이러한 결과는 이미 <Table 4>의 고정비용 결과분석에서도 언급되어진 것과 같이 cmRL은 전체영역에 위치한 모든 고객들이 한 군데의 수집센터, 재제조센터, 재분배센터, 2차시장으로 제품을 전부 보내게 되지만, dmRL은 네 군데의 세부영역별로 위치한 각각의 고객들이 해당영역에 위치한 수집센터, 재제조센터, 재분배센터, 2차시장로 제품을 보내게 되어 결국 전체 고정비용 측면에서 보면 dmRL이 cmRL보다 더 많은 개설비용이 발생하게 된다. 수송비용을 살펴보면, dmRL이 cmRL보다 약 44.6%정도(853.1/1539.2) 더 우수한 결과를 보였다. 이러한 결과는 이미 <Table 4>의 수송비용에서 분석되어진 것과 같이 cmRL은 전체영역에 위치한 모든 고객들이 한 군데의 수집센터로만 제품을 보내게 되어 그 수송거리가 길어지게 되지만, dmRL의 경우에는 각 세부영역별로 위치한 모든 고객들이 해당 영역에 위치한 한 군데의 수집센터로만 제품을 보내게 되어 그 수송거리가 cmRL의 경우보다 더 짧아지기 때문이다. 제품처리비용은 cmRL과 dmRL이 동일한 결과를 보이고 있는데 이는 <Table 4>에서 이미 분석되어진 것과 같이 같은 단계에서 어떤 센터 혹은 2차시장이 개설되더라도 그 제품처리비용은 동일하기 때문이다. 결국 고정비용, 수송비용, 제품처리비용을 합한 전체비용은 cmRL이 dmRL보다 약 23.7%정도(2461.9/3224.6) 더 우수한 결과를 보이고 있는 것을 알 수 있다.

<Fig. 10>, <Fig. 11>은 cmRL과 dmRL에서 개설되는 각 센터 및 2차시장의 위치와 수송상황을 보여주고 있다. <Fig. 10>, <Fig. 11>을 살펴보면, 전체영역에서 위치한 고객들은 cmRL의 경우에는 한 곳의 수집센터로 제품을 전부 보내고 있으며, dmRL의 경우에는 네 개의 세부영역에 위치하는 각각의 수집센터 한 군데로 제품을 전부 보내고 있는 것을 볼 수 있다. 즉 전체영역과 네 개의 세부영역별로 개설되는 각 센터 및 2차시장의 개설위치가 서로 다르기 때문에 <Table 5>에서 보여지는 것과 같이 고정비용 및 수송비용의 차이가 발생하게 된다. 이상과 같이 수치예제 T-1과 T-2를 이용한 cmRL과 dmRL의 비교분

석을 실시하였으며, 그 결과를 종합하면 다음과 같다.

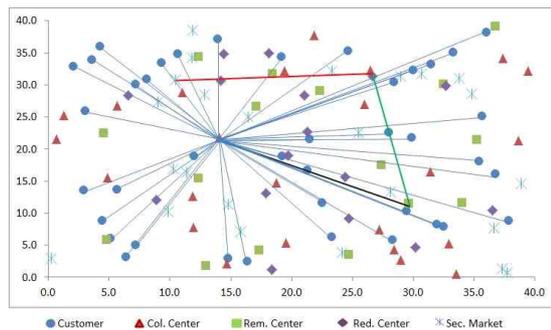


<Fig. 8> Network representation of cmRL for T-1



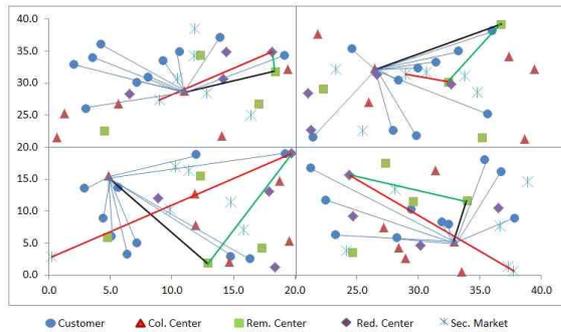
<Fig. 9> Network representation of dmRL for T-1

첫째, 각 센터 및 2차시장의 개설에 필요한 고정비용 측면에서 보면 cmRL이 dmRL보다 월등히 우수한 결과를 보이고 있다. 이러한 결과는 cmRL의 경우에는 전체영역에서 단지 하나의 수집센터, 재제조센터, 2차시장을 개설하지만, dmRL의 경우에는 전체영역을 네 개의 세부영역으로 나누어서 각 세부영역별로 하나의 수집센터, 재제조센터, 2차시장을 개설기 때문



<Fig. 10> Network representation of cmRL for T-2

이다. 결국 dmRL에서 개설되는 각 센터 및 2차시장의 수는 cmRL에서 개설되는 각 센터 및 2차시장의 수보다 네 배 더 많게 된다. 둘째, 수송비용 측면에서 보면 dmRL이 cmRL보다 월등히 우수한 결과를 보이고 있다.



<Fig. 11> Network representation of dmRL for T-2

이러한 결과는 dmRL의 경우에는 각 세부영역별로 존재하는 고객들이 해당영역에 존재하는 수집센터, 재제조센터, 재분배센터, 2차시장으로만 제품을 보내게 되어 그 수송거리가 짧다. 하지만 cmRL의 경우에는 전체영역에서 존재하는 모든 고객들이 오직 한 군데의 수집센터, 재제조센터, 재분배센터, 2차시장으로만 제품을 보내기 때문에 그 수송거리가 dmRL의 경우보다 훨씬 더 길어지게 된다. 셋째, 제품처리비용은 cmRL과 dmRL 모두 동일한 결과를 나타내고 있다. 이러한 결과는 3장 수리모형의 가정에서 언급되어진 것과 같이 동일한 단계에서 고려되는 센터 및 2차시장의 단위당 제품처리비용이 전부 동일하기 때문이다. 결국 이러한 고정비용, 수송비용, 제품처리비용을 함께 고려한 총비용 측면에서 살펴보면 cmRL이 dmRL보다 훨씬 더 효율적이라고 할 수 있다.

6. 결론

본 연구는 공급망경영에서 고려되는 물류네트워크 중에서 다단계 RL 네트워크를 다루고 있다. 다단계 RL 네트워크란 고객으로부터 회수되는 사용 후 제품이 수집센터를 통해 수집된 후, 재제조센터, 재분배센터를 거쳐 최종적으로 2차시장에 도달하기까지의 물

류네트워크를 말한다. 이러한 형태의 다단계 RL 네트워크는 cmRL과 dmRL의 두 가지 형태로 구분하여 제시된다. cmRL의 경우에는 특정영역 전체에서 위치하는 모든 고객들이 오직 한 군데의 수집센터, 재제조센터, 재분배센터, 2차시장으로 제품을 보내는 네트워크 구조를 가지고 있다. dmRL의 경우에는 특정영역 전체를 네 개의 세부영역으로 구분한 후 각 세부영역별로 위치하는 고객들만이 해당영역 내에서 개설되는 한 군데의 수집센터, 재제조센터, 재분배센터, 2차시장으로 제품을 보내는 네트워크 구조를 가지고 있다.

이상과 같이 다단계 RL 네트워크 구조를 가지고 있는 cmRL과 dmRL은 각 단계에서 발생하는 고정비용, 제품처리비용, 수송비용의 총합을 최소화하는 목적함수를 가지는 MIP 형태의 수리모형으로 표현되며, 이를 효율적으로 해결하기 위한 GA 접근법을 개발하였다. 먼저 유전인자 표현법에서는 각 단계별로 고려되는 센터 및 2차시장의 개설여부를 쉽게 표현할 수 있는 0-1비트 표현법을 사용하였으며, 이를 통해 초기집단을 생성하였다. 유전연산자로서는 기존연구[7]에서 개발된 선택방법과 랜덤돌연변이 연산자를 사용하였고, 교차변이 연산자는 기존연구[11]에서 개발된 방법을 수정하여 적용하였다. 또한 적합도 평가는 개발된 MIP 수리모형의 제약조건과 목적함수를 이용하였다. 이러한 절차에 의해 개발된 GA 접근법은 두 가지 형태의 수치예제를 통해 cmRL과 dmRL의 수행도를 평가하였다.

먼저 CPU Time의 수행도 척도를 살펴보면 cmRL이 dmRL보다 약간 더 빠른 결과를 보이고 있지만 그 차이가 크지 않았다. 두 번째로 Optimal setting의 경우에는 cmRL과 dmRL이 각각 개설되는 센터 및 2차시장이 다르며, dmRL의 경우에도 각 세부영역별로 개설되는 센터 및 2차시장이 다르다는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 Optimal solution의 수행도 척도에 영향을 미쳤다. 즉 제품처리비용을 제외하고는 고정비용, 수송비용이 cmRL과 dmRL에서 서로 다른 결과가 도출되었다. 고정비용의 경우에는 cmRL이 dmRL보다 더 우수한 결과를 제시하였고, 수송비용의 경우에는 dmRL이 cmRL보다 더 우수한 결과를 제시하였다. 결국 제품처리비용, 고정비용, 수송비용을 합한 총비용 측면에서 보면 cmRL이 dmRL보다 더 효율적인 방법이라고 증명되었다. 하지만 본 연구는 다

음과 같은 한계점이 있다. 첫째, 본 연구의 수치예제에서 제시한 두 가지 형태의 다단계 RL 네트워크 규모가 비교적 작기 때문에 향후 연구에서는 좀 더 규모가 큰 형태의 다단계 RL 네트워크를 이용하여 cmRL과 dmRL을 비교 분석해 볼 필요가 있을 것이다. 둘째, 본 연구에서는 cmRL과 dmRL의 수행도 평가를 위해 GA접근법을 사용하였다. 하지만 기존의 많은 연구들에서 GA접근법의 한계점(예를 들어, 조기 수렴(premature convergence) 현상, 기존의 휴리스틱 접근법들과의 혼합화(hybridization)의 필요성, 유전연산자들의 자동화(automation) 혹은 적응화(adaptation) 필요성 등)를 극복한 혼합형 GA (hybrid GA) 접근법, 적응형 GA (adaptive GA) 접근법들이 개발되고 있기 때문에 이들 새로운 접근법들과 본 연구에서 제시한 GA 접근법과의 비교분석을 실시할 필요가 있을 것이다.

Reference

- [1] H. Min, H. J. Ko and C. S. Ko, "A Genetic Algorithm Approach to Developing the Multi-echelon Reverse Logistics Network for Product Returns," *Omega*, Vol. 34, pp. 56-69, 2006.
- [2] S. K. Srivastava, "Network Design for Reverse Logistics," *OMEGA*, Vol. 36, pp. 535-548, 2008.
- [3] H. Y. Na and S. H. Lee, "A Location-routing Problem for Logistics Network Integrating Forward and Reverse Flow," *IE Interfaces*, Vol. 22, No. 2, pp. 153-164, 2009.
- [4] Y. G. Lim and B. J. Jung, "A Study of Location - allocation Model in Integrated Logistics Network Considering Reverse Logistics," 2012 Korean Operations and Management Science Society Autumn Conference, pp. 765-772. 2012.
- [5] L. Lin, Y. S. Yun, H. J. Kim and Y. Y. Hwang, "Regionally Distributed and Centralized Reverse Logistics Networks: Genetic Algorithm Approach," 2014 the International Industrial Information Systems Conference, pp. 49-53, 2014
- [6] Y. S. Yun, "Comparison of Reverse Logistics Networks in Centralized and Decentralized Areas: Genetic Algorithm Approach," will be appeared in *Journal of the Korean Society of Supply Chain Management*, 2014.
- [7] M. Gen, and R. Cheng, "Genetic Algorithms and Engineering Design," John Wiley & Son, 1997.
- [8] J. E. Lee, M. Gen and K. G. Rhee, "Network Model and Optimization of Reverse Logistics by Hybrid Genetic Algorithm," *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 56, pp. 951-964, 2009.
- [9] Y. S. Yun, M. Gen and R. K. Hwang, "Adaptive Genetic Algorithm to Multi-stage Reverse Logistics Network Design for Product Resale," *Information: An International Interdisciplinary Journal*, Vol. 15, No. 12, pp. 6117-6138, 2012
- [10] Y. S. Yun, "Evaluating Reverse Logistics Networks using Genetic Algorithm Approach," *Journal of the Korean Society of Supply Chain Management*, Vol. 13, No. 1, pp. 1-14, 2013
- [11] Z. Michalewicz, Z. "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Program," Springer-Verlag, 1994.

<Appendix 1> Site coordinate information for T-1

No.	Customer		Col. Center		Rem. Center		Red. Center		Sec. Market	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
1	4.3	1.4	8.0	15.2	7.1	10.3	5.4	9.7	7.3	11.7
2	17.4	8.7	13.4	11.0	2.2	13.3	8.1	19.4	13.4	12.4
3	17.1	4.9	11.4	17.8	23.2	4.7	23.0	17.7	8.0	3.0
4	9.9	14.1	20.3	7.9	38.5	17.9	36.0	18.7	26.7	18.9
5	8.1	9.0	36.1	16.2	9.4	31.4	5.6	38.9	27.1	11.0
6	27.6	5.9	25.0	1.2	12.0	24.6	13.7	32.8	28.6	19.9
7	30.2	15.0	2.0	21.7	28.8	25.9	22.8	23.8	2.5	35.5
8	39.4	2.4	14.3	37.2	36.9	21.4	31.1	22.1	5.0	25.9
9	22.4	6.3	1.9	25.8					7.7	31.0
10	24.8	8.7	24.9	37.7					21.0	34.9
11	4.6	28.2	20.8	20.9					39.3	36.4
12	19.6	20.4	35.9	28.5					32.9	32.5
13	9.6	35.4								
14	4.4	35.0								
15	4.3	34.6								
16	21.4	34.9								
17	25.4	29.2								
18	23.7	20.9								
19	37.5	28.9								
20	23.8	37.6								

<Appendix 2> Fixed costs and unit handling costs for T-1

		Fixed Cost	Unit handling cost		Fixed Cost	Unit handling cost	
Collection Center	1	158.0	2.5	Redistribution center	1	163.3	1.6
Collection Center	2	125.4	"	Redistribution center	2	136.9	"
Collection Center	3	184.6	"	Redistribution center	3	187.7	"
Collection Center	4	127.4	"	Redistribution center	4	174.5	"
Collection Center	5	130.6	"	Redistribution center	5	175.9	"
Collection Center	6	187.2	"	Redistribution center	6	143.2	"
Collection Center	7	129.7	"	Redistribution center	7	126.3	"
Collection Center	8	144.7	"	Redistribution center	8	177.9	"
Collection Center	9	113.6	"	Secondary market	1	138.3	2
Collection Center	10	188.2	"	Secondary market	2	111.4	"
Collection Center	11	135.0	"	Secondary market	3	168.8	"
Collection Center	12	159.6	"	Secondary market	4	186.4	"
Remanufacturing center	1	127.8	3.8	Secondary market	5	188.3	"
Remanufacturing center	2	123.5	"	Secondary market	6	111.0	"
Remanufacturing center	3	172.2	"	Secondary market	7	149.8	"
Remanufacturing center	4	198.5	"	Secondary market	8	115.8	"
Remanufacturing center	5	162.6	"	Secondary market	9	165.9	"
Remanufacturing center	6	138.0	"	Secondary market	10	116.5	"
Remanufacturing center	7	109.0	"	Secondary market	11	168.1	"
Remanufacturing center	8	153.4	"	Secondary market	12	184.5	"

<Appendix 3> Site Coordinate Information for T-2

No.	Customer		Col. Center		Rem. Center		Red. Center		Sec. Market	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
1	16.4	2.5	19.5	5.4	13.0	1.8	18.4	1.2	15.8	7.1
2	14.8	2.9	4.8	15.5	17.4	4.2	19.7	19.0	14.8	11.4
3	6.4	3.2	11.9	12.7	12.4	15.4	17.9	13.1	10.3	16.9
4	19.2	18.9	11.9	7.8	4.8	5.8	8.9	12.1	9.9	10.2
5	5.6	13.7	14.7	2.1	27.4	17.4	36.5	10.5	0.2	2.9
6	2.9	13.5	18.7	14.7	24.7	3.5	30.2	4.7	11.4	16.4
7	5.1	6.1	28.4	4.3	34	11.6	24.4	15.7	38.9	14.6
8	4.4	8.9	32.9	5.2	29.6	11.4	24.7	9.2	36.6	7.7
9	7.2	5.0	33.5	0.5	18.4	31.7	14.4	34.8	37.3	1.4
10	12.0	18.8	28.9	2.7	4.6	22.4	18.1	34.9	28.1	13.4
11	36.7	16.1	31.4	16.4	12.4	34.3	14.2	30.6	37.7	0.7
12	37.8	8.9	27.2	7.4	17.1	26.6	6.5	28.3	24.1	3.9
13	35.4	18.1	5.6	26.7	22.3	29.1	32.7	29.9	12.8	28.5
14	28.3	5.8	11.0	28.8	36.7	39.1	21.3	22.7	11.8	38.6
15	31.9	8.3	19.4	32.2	32.5	30.1	26.6	31.4	10.5	30.8
16	32.5	8.0	1.3	25.3	35.3	21.5	21.1	28.4	16.4	25.0
17	29.5	10.3	14.0	21.8					9.0	27.3
18	23.3	6.3	0.6	21.5					11.8	34.3
19	21.3	16.7	37.3	34.2					28.9	31.4
20	22.5	11.6	26.5	32.3					30.7	31.8
21	10.6	34.8	39.4	32.1					34.8	28.6
22	7.2	30.1	26.0	27.0					25.5	22.5
23	19.1	34.3	38.6	21.3					33.8	31.1
24	8.1	30.9	21.8	37.7					23.3	32.1
25	3.6	34.0								
26	4.2	36.0								
27	3.0	26.0								
28	9.3	33.4								
29	2.1	32.9								
30	13.9	37.1								
31	29.9	21.8								
32	28.4	30.4								
33	35.6	25.2								
34	24.6	35.3								
35	30.0	32.3								
36	28.0	22.5								
37	31.5	33.2								
38	21.5	21.5								
39	36.0	38.2								
40	33.3	35.0								

<Appendix 4> Fixed costs and unit handling costs for T-2

	Fixed cost	Unit handling cost		Fixed cost	Unit handling cost
Collection center 1	193.1	2.1	Redistribution center 1	117.3	2.4
Collection center 2	142.0	"	Redistribution center 2	163.3	"
Collection center 3	155.0	"	Redistribution center 3	126.7	"
Collection center 4	181.1	"	Redistribution center 4	161.6	"
Collection center 5	100.6	"	Redistribution center 5	158.7	"
Collection center 6	199.6	"	Redistribution center 6	151.7	"
Collection center 7	147.8	"	Redistribution center 7	114.8	"
Collection center 8	110.3	"	Redistribution center 8	155.1	"
Collection center 9	177.9	"	Redistribution center 9	162.0	"
Collection center 10	181.7	"	Redistribution center 10	150.9	"
Collection center 11	189.6	"	Redistribution center 11	174.4	"
Collection center 12	167.3	"	Redistribution center 12	183.1	"
Collection center 13	168.7	"	Redistribution center 13	138.9	"
Collection center 14	137.7	"	Redistribution center 14	195.2	"
Collection center 15	192.2	"	Redistribution center 15	141.7	"
Collection center 16	177.7	"	Redistribution center 16	135.9	"
Collection center 17	128.8	"	Secondary market 1	114.1	1.8
Collection center 18	149.3	"	Secondary market 2	101.4	"
Collection center 19	187.9	"	Secondary market 3	176.4	"
Collection center 20	125.4	"	Secondary market 4	163.4	"
Collection center 21	107.9	"	Secondary market 5	169.8	"
Collection center 22	128.0	"	Secondary market 6	196.1	"
Collection center 23	143.8	"	Secondary market 7	195.1	"
Collection center 24	126.9	"	Secondary market 8	186.2	"
Remanufacturing center 1	176.9	3.5	Secondary market 9	139.8	"
Remanufacturing center 2	100.4	"	Secondary market 10	171.5	"
Remanufacturing center 3	190.7	"	Secondary market 11	155.5	"
Remanufacturing center 4	133.3	"	Secondary market 12	159.5	"
Remanufacturing center 5	174.6	"	Secondary market 13	188.5	"
Remanufacturing center 6	138.2	"	Secondary market 14	196.6	"
Remanufacturing center 7	100.4	"	Secondary market 15	186.9	"
Remanufacturing center 8	122.8	"	Secondary market 16	147.2	"
Remanufacturing center 9	101.5	"	Secondary market 17	125.3	"
Remanufacturing center 10	179.8	"	Secondary market 18	144.8	"
Remanufacturing center 11	144.5	"	Secondary market 19	117.9	"
Remanufacturing center 12	139.9	"	Secondary market 20	161.3	"
Remanufacturing center 13	152.7	"	Secondary market 21	197.0	"
Remanufacturing center 14	101.2	"	Secondary market 22	144.7	"
Remanufacturing center 15	170.4	"	Secondary market 23	179.7	"
Remanufacturing center 16	111.1	"	Secondary market 24	155.2	"



윤 영 수 (YoungSu Yun)

- 정회원
- 대구대학교 산업공학과 학사
- 건국대학교 산업공학과 석사, 박사
- Waseda Univ. 정보생산시스템연구과 박사
- 현재: 조선대학교 경영학부 부교수
- 관심분야: 유전알고리즘, SCM, 생산최적화

논문접수일: 2014년 05월 15일
1차수정완료일: 2014년 07월 03일
게재확정일: 2014년 07월 18일