집중형센터를 가진 역물류네트워크 평가 : 혼합형 유전알고리즘 접근법

윤영수

조선대학교 경상대학 경영학부
(ysyun@chosun.ac.kr)

본 연구에서는 집중형 센터를 가진 역물류네트워크(Reverse logistics network with centralized centers : RLNCC)를 효율적을 해결하기 위한 혼합형 유전알고리즘(Hybrid genetic algorithm : HGA) 접근법을 제안한다. 제안된 HGA에서는 유전알고리즘(Genetic algorithm : GA)이 주요한 알고리즘으로 사용되며, GA 실행을 위해 0 혹은 1의 값을 가질 수 있는 새로운 비트스트링 표현구조(Bit-string representation scheme), Gen and Chang(1997)이 제안한 확장샘플링공간에서의 우수해 선택전략(Elitist strategy in enlarged sampling space) 2점 교차변이 연산자(Two-point crossover operator), 랜덤 돌연변이 연산자(Random mutation operator)가 사용된다. 또한 HGA에서는 혼합형 개념 적용을 위해 Michalewicz (1994)가 제안한 반복적언덕오르기법(Iterative hill climbing method : IHCM)이 사용된다. IHCM은 지역적 탐색기법(Local search technique) 중의 하나로서 GA탐색과정에 의해 수렴된 탐색공간에 대해 정밀하게 탐색을 실시한다.

RLNCC는 역물류 네트워크에서 수집센터(Collection center), 재제조센터(Remanufacturing center), 재분배센터(Redistribution center), 2차 시장(Secondary market)으로 구성되며, 이들 각 센터 및 2차 시장들 중에서 하나의 센터 및 2차 시장만 개설되는 형태를 가지고 있다. 이러한 형태의 RLNCC는 혼합정수계획법(Mixed integer programming : MIP)모델로 표현되며, MIP 모델은 수송비용, 고정비용, 제품처리비용의 총합을 최소화하는 목적함수를 가지고 있다. 수송비용은 각 센터와 2차 시장 간에 제품수송에서 발생하는 비용을 의미하며, 고정비용은 각 센터 및 2차 시장의 개설여부에 따라 결정된다. 예를 들어 만일 세 개의 수집센터(수집센터 1, 2, 3의 개설비용이 각각 10.5, 12.1, 8.9)가 고려되고, 이 중에서 수집센터 1이 개설되고, 나머지 수집센터 2, 3은 개설되지 않을 경우, 전체고정비용은 10.5가 된다. 제품처리비용은 고객으로부터 회수된 제품을 각 센터 및 2차 시장에서 처리할 경우에 발생하는 비용을 의미한다.

수치실험에서는 본 연구에서 제안된 HGA접근법과 Yun(2013)의 연구에서 제안한 GA접근법이 다양한 수행도 평가 척도에 의해 서로 비교, 분석된다. Yun(2013)이 제안한 GA는 HGA에서 사용되는 IHCM과 같은 지역적탐색기법을 가지지 않는 접근법이다. 이들 두 접근법에서 동일한 조건의 실험을 위해 총세대수 : 10,000, 집단의 크기 : 20, 교차변이 확률 : 0.5, 돌연변이 확률 : 0.1, IHCM을 위한 탐색범위 : 2.0이 사용되며, 탐색의 랜덤성을 제거하기 위해 총 20번의 반복실험이 이루어 졌다.

사례로 제시된 두 가지 형태의 RLNCC에 대해 GA와 HGA가 각각 실행되었으며, 그 실험결과는 본 연구에서 제안된 HGA가 기존의 접근법인 GA보다 더 우수하다는 것이 증명되었다. 다만 본 연구에서는 비교적 규모가 작은 RLNCC만을 고려하였기에 추후 연구에서는 보다 규모가 큰 RLNCC에 대해 비교분석이 이루어 져야 할 것이다.

논문접수일 : 2013년 08월 28일 논문수정일 : 2013년 10월 30일 게재확정일 : 2013년 11월 05일

투고유형 : 국문일반 교신저자 : 윤영수

* 이 논문은 2012년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2012S1A5A2A01014546).

1. 서론

기업이 극심한 시장경쟁 하에서 생존하고 또한 지속적 성장을 위해서는 생산성 향상, 고품질 및 저원가 제품생산 등과 같은 기존의 방식과 더불어 원자재의 조달, 제품생산, 유통을 연계하여 최종적으로 고객에게 제품이 인도되도록 하는 물류네트워크를 효율화할 필요가 있다. 일반적인 물류네트워크는 원자재(raw material) → 제조(manufacturing) → 물류센터(distribution center) → 소매점(retailer) → 고객(customer)의 단계를 따르는 순방향물류네트워크(forward logistics network)를 지칭하지만, 최근 들어 고객의 인식변화, 각국 정부의 환경규제 등으로 인하여 고객으로부터 사용되어진 후 회수되는 제품이 고객 → 수집센터(collection center) → 회복센터(recovery center), 재제조센터(re-manufacturing center), 리사이클링 센터(recycling center) 혹은 폐기(disposal) → 재분배센터(redis-tribution center) → 1차 혹은 2차 시장(first and secondary markets)의 단계를 따르는 역방향물류네트워크(backward logistics network) 혹은 역물류네트워크(reverse logistics network)가 많은 관심을 받고 있다(Min, 1989; Rogers, 1999; Jayaraman et al., 2003; Amini, 2005; Lim and Jung, 2012; Yun, 2013; Yun et al., 2013).

역물류네트워크 개념은 1974년 James(1974)에 의해 처음으로 정립되어진 이후 1990년대 말까지는 별다른 관심을 받지 못하였다. 이러한 이유는 무엇보다도 그 당시까지 역물류네트워크의 필요성(예를 들어, 역물류네트워크로 인한 기업의 이익증대, 경쟁력 향상 등)에 대해 기업의 인식수준이 미비하였기 때문이라고 판단된다. 하지만 2000년대 들어서면서부터 각국 정부는 생산된 제품에 관한 다양한 규제(예를 들어, 고객이 사용한 제품

에 대해 생산자의 강제회수제도, 재활용 가능한 제품의 생산 장려, 폐기제품의 축소 등)와 환경규제를 강화하여 제품을 생산하는 기업과 생산된 제품을 사용하는 고객이 역물류에 대한 인식변화가 생기게 되었다. 특히 역물류 네트워크 구축은 순방향물류 네트워크 구축에 비해 기업측면에서 보면 또 다른 경쟁력 확보측면에서 유리하고, 자사가 생산한 제품을 수거 후 재사용 혹은 폐기처분 함으로서 그 제품의 수명 마지막까지 책임을 진다는 측면을 고객에게 강조할 수 있기 때문에 궁극적으로 자사의 이미지 상승효과를 기대할 수 있다(Yun, 2013).

이러한 역물류네트워크에 대한 기업의 관심증대는 해당 분야를 연구하는 학자들에게 학술적 및 실용적 적용기법의 개발을 요구하게 되었고, 2000년 이후부터 최근까지 몇몇 선두적인 학자들에 의해 역물류네트워크의 효율화를 위한 다양한 접근법들이 개발되어져 왔다(Jayaraman et al., 2003; Min et al., 2006; Srivastava, 2007, 2008; Kim et al., 2007; Na and Lee, 2009; Lee et al., 2009; Lim and Jung, 2012). 역물류네트워크 설계에 관한 대표적인 국내외 연구들을 살펴보면 다음과 같다.

국내의 경우, Kim et al.(2007)은 고객으로부터 사용이 완료된 제품의 수집활동에 투입되는 수거 차량의 적재용량을 고려하여 최단거리로 제품을 수집하기 위한 역물류 네트워크를 설계하였다. 하지만 이들의 연구에서는 역물류네트워크를 구성하는 다른 구성요소인 회복센터, 재분배센터, 2차 시장을 고려하지 않은 적용상의 한계점이 있다. Na and Lee(2009)은 고객으로부터 사용이 완료된 제품이 중앙반품 수집센터(centralized returns collection center)로 수집되어 지고, 중앙반품수집센터에서 수집된 제품은 분류, 재처리 및 가공을 거쳐 재사용이 가능한 제품은 순방향물류네트워크의

분배센터, 소매점으로 보내어 지고, 더 이상의 재사용이 불가능한 제품은 폐기되는 역물류 및 순방향물류 혼합형 네트워크 모델을 설계하였다. 이들의 연구에서 제시한 중앙반품수집센터는 수집, 분류, 가공, 처리의 기능을 함께 가지고 있기 때문에 일반적으로 역물류네트워크를 구성하는 회복센터, 재분배센터, 2차 시장을 고려하지 않은 한계점이 있다. 이와 비슷한 연구를 Jung and Lee(2005)도 수행하였다. 이들은 Na and Lee(2009)의 연구에서 제시한 중앙반품수집센터와 같은 기능을 수행하는 터미널을 두고 여기서 제품의 수집, 검사, 분류를 수행하고 분류된 제품의 유형에 따라 폐기를 하거나 순방향 물류네트워크의 제품생산 혹은 분배센터로 이동하는 네트워크를 설계하였다. Han(2010)은 고객으로부터 회수되는 제품이 회수센터, 해체센터, 처리센터를 거쳐 제조업체에 이르는 역물류 네트워크를 설계하였다. 그는 다양한 제약조건들을 고려하여 각 단계에서 발생하는 수송비용, 해체센터 및 처리센터의 개설비용의 합을 최소화하는 수리모델을 제시하였다. 하지만 그의 연구에서는 회수센터의 개설비용을 고려하지 않았고 각 센터들에서 회수되는 제품을 처리하는 비용을 고려하지 않은 단점이 있다.

Jung and Lee(2005)는 고객으로부터 반품되는 제품을 처리하기 위한 두 가지 형태의 역물류 네트워크를 설계하였다. 즉 지역분산 반품처리센터(decentralized returns center : DRC)와 중앙 반품처리센터(centralized returns center : CRC)를 고려하였으며, 전자의 경우 반품을 처리하는 센터를 지역에 분산하여 다수의 반품처리센터를 운영하는 경우이고, 후자의 경우는 반품을 처리하는 센터를 오직 한 군데의 반품처리센터로만 운영하는 경우이다. 각각의 경우에 대해 사례연구를 통해 그 수행도를 비교 분석하였으며, 분석결과 CRC를 운

영하는 경우가 DRC를 운영하는 경우보다 더 우수한 수행도를 나타낸다고 결론지었다. 다만 이들의 연구에서는 고객으로부터 수집된 제품이 반품처리센터를 거쳐 물류센터(혹은 원자재 공급자, 폐기)로 진행되는 단순한 형태의 역물류 네트워크만을 고려하였다는 한계점이 있다. 이와 비슷한 연구는 Yun(2013)에서도 수행되었다. Yun(2013)에서 고려된 역물류 네트워크는 고객으로부터 회수되는 제품이 재생 후 재사용하기 위한 목적으로 구축되며, 그 단계는 수집센터 → 회복센터 → 재분배센터 → 2차 시장으로 연결되는 4단계 구조를 가지고 있다. 이러한 역물류 네트워크를 수집센터, 회복센터, 재분배센터, 2차 시장이 각 단계에서 각각 1개만을 가지는 집중형센터를 가진 역물류 네트워크(reverse logistics network with centralized centers : RLNCC)와 수집센터, 회복센터, 재분배센터, 2차 시장이 각 단계에서 1개 이상을 가질 수 있는 분산형센터를 가진 역물류 네트워크(reverse logistics networks with decentralized centers : RLNDC)로 구분하였으며, RLNCC와 RLNDC는 유전알고리즘(genetic algorithm : GA)을 이용해 그 성능을 비교, 평가하였다. 평가결과 RLNCC가 거의 모든 수행도 평가에서 우수한 결과를 보였다.

국외연구를 살펴보면, Krikke et al.(1999)는 역물류네트워크를 구성하는 회복센터에 재제조센터와 리사이클링센터의 기능을 함께 가지도록 하였다. 즉 회복센터를 거친 제품은 재분배센터를 통해 최종적으로 2차 시장으로 수송되어 고객에게 재판매 되지만, 만일 회복센터를 통해 회복이 불가능한 제품은 폐기되도록 하였다. 이러한 형태의 역물류 네트워크를 수리모델로 표현하여, 각 단계에서 발생하는 비용(재제조센터 및 리사이클링센터의 설립비용 및 제품처리비용, 재분배센터에서 2차 시장으로 수송되는 비용)을 고려하였다. 하지만 재

제조센터와 리사이클링센터를 통해 재분배센터로 수송되는 비용은 고려하지 않은 한계점이 있다. Min et al.(2006)은 초기수집센터(initial collection center)에서 고객으로부터 회수되는 제품을 수집한 후 이를 중앙회수센터(centralized return center)로 보내고 중앙회수센터는 회수된 제품을 분류, 처리한 후 재사용 가능한 제품은 초기수집지점으로 보내 재판매 되도록 하였으며, 수리가 필요한 제품은 제조시설 및 수리시설로 보내는 역물류네트워크 모형을 제시하였다. 이러한 모형을 해결하기 위한 수리모델을 구축하고 GA를 이용해 최적화시켰다. 하지만 이들의 연구에서는 수리가 필요한 제품을 제조시설 및 수리시설로 보낸 후 수리를 마친 제품에 대해 재판매되는 경우와 중앙회수센터 구축시 발생하는 고정비용과 제품처리시 발생하는 변동비용을 고려하지 않은 한계점이 있다.

Srivastava(2008)는 수집센터가 고객으로부터 회수되는 제품을 수집한 후 이를 수리, 재생 등의 과정을 거치는 회복센터로 보내고, 회복센터를 거쳐 재사용 가능한 제품은 1차 혹은 2차 시장에서 판매되며, 재사용이 불가능한 제품은 폐기처분센터에서 폐기하는 역물류네트워크를 설계하였다. 일반적으로 기존의 연구들(Krikke et al., 1999; Min et al., 2006)에서는 재사용 가능여부를 수집센터에서 결정하고 있지만, Srivastava(2008)는 이를 고객이 직접 결정하도록 하였다는 점이 특징이다. 하지만 Srivastava(2008)연구에서는 단지 수집센터와 회복센터의 위치와 개설여부만을 결정하는 수리모델을 제시하였고, 재분배센터와 1차, 2차 시장으로 수송되는 경우는 고려하지 않은 한계점이 있다.

이상에서 언급한 기존연구들을 종합 분석해 보면 크게 두 가지 측면에서 그 한계점을 확인할 수 있다. 첫 번째로, Kim(2007), Na and Lee(2009), Jung and Lee(2005), Srivastava(2008)의 연구는

역물류 네트워크 각 단계에서 일반적으로 고려되어야 하는 수집센터, 회복센터(혹은 재제조센터, 리사이클링센터 등), 재분배센터, 2차 시장(혹은 1차시장) 중에서 극히 일부만을 고려하고 있다. 따라서 진정한 의미의 역물류 네트워크 분석이라고 말하기는 어렵다. 둘째, Krikke et al.(1999), Min et al.(2006), Srivastava(2008), Han(2010)의 연구에서는 역물류 네트워크 각 단계에서 발생하는 다양한 비용들(예를 들어, 각 센터의 개설비용, 제품 처리비용, 단계별 수송비용 등)의 일부만을 고려하였기에 전체 역물류 네트워크를 최적화하는 의미에서 보면 이들 연구들의 결과가 의미를 가지기에는 한계점이 있다.

이상과 같은 기존 연구들의 한계점을 극복하기 위해서 본 연구는 역물류 네트워크를 구성하는 거의 모든 단계와 이들 단계에서 발생하는 다양한 비용을 함께 고려하는 연구를 진행하고자 한다. 또한 Yun(2013)에서 분석된 결과에 의하면 역물류 네트워크의 각 단계에서 하나의 센터(혹은 2차 시장)만을 선택하는 RLNCC가 복수의 선택을 가능하게 하는 RLNDCC보다 우수한 수행도를 나타내었기 때문에 본 연구에서도 RLNCC만을 이용하며, 그 접근법으로서는 혼합 유전알고리즘(hybrid genetic algorithm : HGA)을 사용한다. HGA를 이용한 접근법의 결과를 Yun(2013)에서 제시한 GA 접근법과 비교분석을 실시하여 그 우수성을 입증하고자 한다.

본 연구의 전체적인 흐름은 다음과 같다. 먼저 제 2장에서는 RLNCC에 대한 전반적인 구조와 RLNCC에서 고려되어야 하는 몇 가지 사항들을 살펴본다. 제 3장에서는 RLNCC를 적용하기 위한 수리적 모델을 제시하며, 그 수리적 모델은 제 4장에서 제시하는 HGA 접근법을 이용해 해결된다. 제 5장에서는 수치예제를 이용하여 HGA 접근법과 기존

GA 접근법의 수행도를 비교 분석하게 되며, 마지막 6장에서는 결론으로서 본 연구의 결과 및 향후 발전방향을 제시한다.

2. 집중형센터를 가진 역물류 네트워크 설계

제 1장에서도 언급하였듯이 집중형센터를 가진 역물류 네트워크(RLNCC)는 역물류 각 단계에서 각각 하나의 센터(혹은 2차 시장)만을 개설하는 네트워크를 말한다. RLNCC의 개념적 형태는 <Figure 1>과 같이 표현될 수 있다.

<Figure 1>의 RLNCC실행 구조는 다음과 같다. 먼저 다양한 지역에 분포된 고객으로부터 수집된 제품은 개설가능한 다수의 수집센터 중에서 오직 한 곳의 개설된 수집센터로만 보내어지며, 수집센터에서 분류된 제품은 개설가능한 다수의 재제조센터 중에서 오직 한 곳의 개설된 재제조센터로만 보내어진다. 재제조센터에서는 분류된 제품의 특성에 따라 재조립 혹은 재가공을 수행하게 되며, 작업이 끝난 제품은 개설된 한 곳의 재분배센터를

거쳐 개설된 한 곳의 2차 시장으로 보내어지고 여기서 다수의 고객에게 판매된다.

이상과 같은 역물류 네트워크에서 고려되어야 하는 사항은 다음과 같다.

- 고객으로부터 회수되는 제품이 각 단계를 거쳐 최종적으로 2차 시장에 도달할 때까지 발생하는 각 단계별 수송비용이 고려되어야 한다.
- RLNCC 모델의 특성상 개설 가능한 다수의 수집센터, 재제조센터, 재분배센터 및 2차 시장 중에서 각 단계별로 오직 한곳의 센터와 2차 시장만이 개설되어야 하기 때문에 이들 개설에 필요한 고정비용과 개설위치를 함께 고려하여야 한다.
- 개설되는 각 단계별 센터와 2차 시장에서 회수되는 제품이 처리되어야 하기 때문에 이들 제품의 처리에 필요한 단위당 처리비용을 고려하여야 한다.

결국 RLNCC에서는 수송비용, 고정비용, 처리비용의 총합을 최소화할 수 있는 수리모델 개발이

<Figure 1> RLNCC Type Considered In This Study

필요하다.

3. 수리모델 설계

RLNCC에서 고려되어야 하는 가정은 다음과 같다. 이러한 가정들은 본 연구에서 개발될 수리모델을 적용하기 위한 가정들이다.

- 고객으로부터 회수되는 제품은 단일제품 1개만을 고려한다. 즉 다수의 고객들은 모두 각각 1개의 제품만을 개설되는 한 군데의 수집센터로 보내게 된다. 따라서 모든 고객들의 용량은 각각 1이다.
- 고객으로부터 회수된 제품은 개설된 한 군데의 수집센터로 전체 모이게 되며, 그 수집센터는 자신이 보유한 전체 수량의 제품을 다음 단계인 개설된 한 군데의 재제조센터로 보내게 된다. 재제조센터에 모인 제품은 재분배센터 → 2차 시장까지 같은 방법으로 수송된다.
- 개설 가능한 모든 수집센터, 재제조센터, 재분배센터, 2차 시장의 위치는 좌표로 표시되며, 모든 좌표값은 사전에 알려져 있다.
- 개설 가능한 모든 수집센터, 재제조센터, 재분배센터, 2차 시장의 개설비용은 각각 다르며, 사전에 알려져 있다.
- 동일 단계에서는 어떤 센터 혹은 2차 시장이 개설되더라도 단위당 제품처리비용은 동일하며, 그 비용은 사전에 알려져 있다.
- 개설되는 각 센터 및 2차 시장으로 수송되는 제품의 단위당 수송비는 각 센터와 2차 시장의 위치좌표를 기준으로 그 거리를 계산하여 결정된다. 예를 들어 개설된 수집센터 2와 재제조센터 3의 위치좌표가 각각 (1, 3), (4, 5) 하고 할 때 수집센터 2에서 재제조센터 3까지의 단위당 제

품수송비는 유클리디안 거리(Euclidian distance)를 이용해 다음과 같이 계산된다.

$$\sqrt{|1-4|^2 + |3-5|^2} = 3.61 \quad (1)$$

이상과 같은 가정에 근거하여 RLNCC를 위한 수리 모델을 개발한다. 수리모델 개발의 목적은 RLNCC 각 단계간에 발생하는 수송비용, 개설되는 각 센터와 시장의 고정비용(= 개설비용) 및 처리비용의 총합을 최소로 하는 것이다. 이러한 총합은 목적함수로 표시되며, 목적함수를 최소화하기 위해서 다양한 제약조건들을 함께 표시하여야 한다. 먼저 목적함수와 제약조건들에서 사용되는 인덱스, 파라미터 및 의사결정변수를 설정한다.

Index :

- i : 고객($i \in I$)
- j : 수집센터($j \in J$)
- k : 재제조센터($k \in K$)
- l : 재분배센터($l \in L$)
- m : 2차 시장($m \in M$)

Parameter :

- $Cust_i$: 고객 i 의 용량
- $FixC_j$: 수집센터 j 의 고정비용
- $FixR_k$: 재제조센터 k 의 고정비용
- $FixD_l$: 재분배센터 l 의 고정비용
- $FixS_m$: 2차 시장 m 의 고정비용
- $HanC$: 수집센터의 단위당 제품처리비용
- $HanR$: 재제조센터의 단위당 제품처리비용
- $HanD$: 재분배센터의 단위당 제품처리비용
- $HanS$: 2차 시장의 단위당 제품처리비용(= 제품관리비용)

$TreCC_{ij}$: 고객 i 에서 수집센터 j 로 보내는 단위
당 제품수송비용
 $TreCR_{jk}$: 수집센터 j 에서 재제조센터 k 로 보내
는 단위당 제품수송비용
 $TreRD_{kl}$: 재제조센터 k 에서 재분배센터 l 로 보
내는 단위당 제품수송비용
 $TreDS_{lm}$: 재분배센터 l 에서 2차 시장 m 으로 보
내는 단위당 제품수송비용

Decision Variable :

cc_j : 수집센터 j 의 수집용량
 rm_k : 재제조센터 k 의 처리용량
 rd_l : 재분배센터 l 의 처리용량
 sm_m : 2차 시장 m 의 처리용량
 $y_j^C = \begin{cases} 1, & \text{수집센터가 } j \text{개설될 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않을 경우} \end{cases}$
 $y_k^R = \begin{cases} 1, & \text{재제조센터가 } k \text{가 개설될 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않을 경우} \end{cases}$
 $y_l^D = \begin{cases} 1, & \text{재분배센터가 } l \text{이 개설될 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않을 경우} \end{cases}$
 $y_m^S = \begin{cases} 1, & \text{2차 시장 } m \text{이 개설될 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않을 경우} \end{cases}$

위에서 설정된 파라미터 및 의사결정변수를 이
용하여 RLNCC를 위한 수리모델을 설계하면 다음
과 같다.

$$\begin{aligned} Min.Z = & \sum_i \sum_j TreCC_{ij} \cdot Cust_i \cdot y_j^C + \sum_j FixC_j \cdot y_j^C \\ & + HanC \cdot \sum_j cc_j \cdot y_j^C + \sum_j \sum_k TreCR_{jk} \cdot cc_j \cdot y_k^R \\ & + \sum_k FixR_j \cdot y_k^R + HanR \cdot \sum_k rm_k \cdot y_k^R \\ & + \sum_k \sum_l TreRD_{kl} \cdot rm_k \cdot y_l^D + \sum_l FixD_l \cdot y_l^D \\ & + HanD \cdot \sum_k rd_l \cdot y_l^D + \sum_l \sum_m TreDS_{lm} \cdot rd_l \cdot y_m^S \\ & + \sum_m FixS_m \cdot y_m^S + HanS \cdot \sum_m sm_m \cdot y_m^S \quad (2) \end{aligned}$$

Subject to

$$\sum_j y_j^C = 1 \quad (3)$$

$$\sum_k y_k^R = 1 \quad (4)$$

$$\sum_l y_l^D = 1 \quad (5)$$

$$\sum_m y_m^S = 1 \quad (6)$$

$$\sum_j cc_j - \sum_k rm_k = 0 \quad (7)$$

$$\sum_k rm_k - \sum_l rd_l = 0 \quad (8)$$

$$\sum_l rd_l - \sum_m sm_m = 0 \quad (9)$$

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

$$y_k^R = \{0, 1\} \quad \forall k \in K \quad (11)$$

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

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

$$cc_j, rm_k, rd_l, sm_m \geq 0 \\ \forall j \in J, \forall k \in K, \forall l \in L, \forall m \in M, \quad (14)$$

목적함수를 표시하고 있는 식 (2)는 수집센터,
재제조센터, 재분배센터, 2차 시장에서 발생하는
수송비용, 고정비용, 처리비용의 총합을 최소화 하
고 있다. 식 (3)에서 식 (6)까지는 각 단계에서 개
설되는 수집센터, 재제조센터, 재분배센터, 2차 시
장은 오직 한 군데만 개설가능하다는 제약이다. 식
(7)은 개설되는 수집센터의 전체 수집용량의 합은
다음단계에서 개설되는 재제조센터의 전체 처리
용량의 합과 같아야 한다는 제약이다. 같은 방법으
로 식 (8), 식 (9)는 재제조센터, 재분배센터, 2차
시장의 전체 수집용량의 합을 제약한다. 식 (10)에
서 식 (13)까지는 수집센터, 재제조센터, 재분배센
터, 2차 시장의 개설여부를 결정하는 제약이다. 마
지막 식 (14)는 수집센터, 재제조센터, 재분배센터,
2차 시장의 용량은 모두 비부 정수(non-negativity)
를 가져야 한다.

4. HGA 설계

제 3장에서 설계한 수리모델은 HGA 접근법을 이용해 해결되어진다. HGA는 기존의 GA가 가진 단점을 개선한 접근법이다. 일반적으로 GA는 전역적 탐색(exploration)을 효과적으로 수행한다. 하지만 전역적 탐색을 통해 일단 특정지역에 수렴된 이후 이 특정지역을 정밀하게 탐색(exploitation)할 수 있는 방법은 없다. 결국 이러한 정밀탐색을 할 수 있는 지역적 탐색법(local search method)을 GA 탐색에 함께 사용하는 것이 최적해를 좀 더 효율적으로 탐색 할 수 있다. 지역적 탐색법을 GA 탐색에 함께 사용하는 접근법은 HGA라고 부르며 기존의 많은 연구자들이 다양한 접근법을 개발해왔다(Lee et al., 2002; Li and Jiang, 2000; Yen, et al., 1998). 본 연구에서도 이러한 HGA 접근법을 이용해 RLNCC를 모형화한 수리모델을 해결하고자 한다. 먼저 GA를 설계하고 그 다음에 본 연구에서 사용될 지역적 탐색법을 제시한다.

4.1 GA 설계

4.1.1 표현법(Representation) 설계 및 초기집단(Initial Population) 생성

일반적으로 GA에서 사용하는 표현법에는 비트 표현법(bit-string representation)과 실수표현법(real number representation)이 있다. 전자의 경우 0 혹은 1과 같은 특정 정수값을 사용하여 유전인자(gene)을 표현하는 방법으로서 주로 네트워크 설계에서 네트워크의 연결 유무(예를 들어, 연결되었을 경우 1의 값, 연결이 안되었을 경우 0의 값을 가짐), 설비배치 문제에서 배치유무(예를 들어, 특정위치에서 설비가 운용될 경우 1의 값, 운용되지 않을 경우 0의 값을 가짐)를 결정하는 문제 등에 사용되며. 후자의 경우 정수값을 포함한 다양한 실

수값을 사용하여 유전인자를 표현하는 방법으로 주로 공학설계문제에서 정밀한 설계변수값을 표현할 경우에 많이 사용된다. 본 연구에서는 RLNCC에서 각 단계별 센터와 2차 시장의 개설여부에 따라 발생하는 다양한 비용을 고려하고 있기 때문에 GA의 표현법으로 비트표현법이 적합하다. 즉 각 단계별 센터와 2차 시장이 개설되는 경우 1의 값을 가지며, 그렇지 않을 경우 0의 값을 가지는 형태로 표현법을 적용하면 될 것이다. <Figure 2>는 본 연구에서 사용되어지는 표현법을 나타내고 있다.

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

<Figure 2> Representation Used In This Study

<Figure 2>에서 보면 수집센터 1, 재제조센터 2, 재분배센터 1, 2차 시장 3이 개설($y_1^C = y_2^R = y_1^D = y_3^S$)되고 나머지 모든 센터 및 2차 시장을 개설되지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 표현법을 사용하여 GA의 초기집단을 쉽게 생성할 수 있다. 즉 각 단계별로 하나의 센터 혹은 시장만이 1의 값을 가지도록 하고 나머지는 모두 0의 값을 가지도록 0와 1을 랜덤발생 시키면 다양한 형태의 초기집단을 생성시킬 수 있을 것이다. <Figure 3>은 만일 집단의 크기를 5로 하였을 경우 발생될 수 있는 초기 집단의 형태를 보여주고 있다.

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

<Figure 3> Initial Population(Population Size = 5)

4.1.2 유전 연산자(Genetic Operator) 설계

일반적으로 GA에서 사용되는 유전연산자에는 선택(selection), 교차변이(crossover), 돌연변이(mutation), 적합도 함수(fitness function)가 있다. 각 유전연산자에서 사용되는 기법은 적용하고자 하는 문제의 형태에 따라 다르며, 지금까지 다양한 형태의 기법들이 개발되어져 왔다(Davis, 1991; Michalewicz, 1994; Gen and Cheng, 1997). 특정문제에 적합한 기법의 사용은 GA 수렴과정에서 해의 개선과 궁극적으로 최적해의 탐색에 도움을 준다. 본 연구에서는 RLNCC 문제 해결에 적합한 유전 연산자 별 기법을 사용하며, 이중 일부 기법은 기존연구에서 제시된 것을 사용한다.

• 선택

선택기법은 초기집단 혹은 교차변이와 돌연변이가 끝난 후 생성된 새로운 개체(individual)에 대해 다음세대에 생성될 새로운 집단을 만들 때 적용된다. 본 연구에서는 확장샘플링공간에서의 우수해 우선선택전략(elitist strategy in enlarged sampling space)을 사용한다(Gen and Chang, 1997). 이 기법은 기존집단(초기집단 혹은 교차변이와 돌연변이가 끝난 후 생성된 새로운 개체로 구성된 집단) 전부를 적합도 함수를 이용한 적합도 평가(fitness evaluation)를 통해 그 적합도가 우수한 개체들을 나열한 후 이 중에서 사전에 설정된 집단의 크기 만큼 만의 개체를 선택하여 다음세대로 구성하는 방법이다.

• 교차변이

교차변이란 개체들의 유전인자의 값을 서로 교환하여 새로운 개체를 만드는 방법으로 본 연구에서는 기존연구에서 사용한 두 지점 교차변이(two-

point crossover : 2X)(Michalewicz, 1994)을 기초로 하여 새로운 기법을 개발한다. 2X는 집단에서 임의로 선택된 두 개의 개체에 대해 두 군데의 유전인자 위치를 랜덤하게 선택한 후 선택된 유전인자의 값을 서로 교환하는 기법이다. 하지만 <Figure 3>과 같이 생성된 집단의 개체들에 대해 2X를 그대로 적용할 경우 RLNCC 네트워크 각 단계에서 특정 센터가 개설되지 않거나 혹은 중복하여 개설되는 경우가 발생한다. 이러한 적용상의 한계점 때문에 본 연구에서는 이를 개선한 새로운 기법을 개발하며 그 구체적인 적용절차는 <Figure 4>와 같다.

<Figure 4> Procedure for Crossover

<Figure 4>의 적용절차를 단계별로 설명한다.

- Step 1 : 집단에서 랜덤하게 두 개의 개체 (V_1 , V_3)를 선택한다.
- Step 2 : 선택된 개체에서 랜덤하게 두 개의 유전인자를 선택 (V_1 , V_3 개체에서 화살표로 표시된 부분)한다.
- Step 3 : 두 개의 유전인자 값을 서로 교환 (V_1^* , V_3^* 개체의 유전인자들 중에서 진하게 표시된 유전인자 값들)한다.
- Step 4 : 만일 Step 3를 통해 교환된 유전인자를 가

진 개체들 중에서 RLNCC의 개념을 위반 (즉 각 단계별로 하나의 센터 혹은 시장만 개설되어야 한다는 조건)한 개체가 있을 경우, 이를 수정하는 절차가 추가적으로 필요하다. 예를 들어 V_1^* , V_3^* 개체는 모두 RL NCC의 개념을 위반하고 있다. 즉 V_1^* 개체에서는 모든 재제조센터와 2차 시장이 개설되지 않고 있으며($y_1^R = y_2^R = y_3^R = 0$, $y_1^S = y_2^S = y_3^S = 0$), V_3^* 개체에서는 재제조센터 2와 3, 2차 시장 1과 3이 각각 중복해서 개설되고 있다($y_2^R = y_3^R = 1$, $y_1^S = y_3^S = 1$). 따라서 이들 두 개체에 대해 수정작업이 필요하다. 먼저 V_1^* 개체의 경우 모든 재제조센터가 개설되지 않고 있기 때문에 V_1 에서 V_1^* 로 진행되는 동안 새롭게 0의 값을 가진 재제조센터 2를 제외한 나머지 재제조센터 1과 3중에서 하나를 랜덤하게 선택(V_1^{**} 개체의 재제조센터 1)한 후 선택된 유전인자의 값을 1로 바꿔준다(V_1^{**} 개체의 $y_1^R = 1$). 같은 방법을 2차 시장에도 적용하면 2차 시장 2의 유전인자 값이 1로 바뀌게 된다. V_3^* 개체의 경우 재제조센터 2와 3이 중복해서 개설되고 있기 때문에 V_3 에서 V_3^* 로 진행되는 동안 1의 값을 가진 재제조센터 2를 제외한 재제조센터 3의 유전인자 값을 0로 바꾸어 준다(V_3^{**} 개체의 $y_3^R = 0$). 같은 방법으로 2차 시장에도 적용하면 2차 시장 1의 유전인자 값이 0로 바뀌게 된다.

이상과 같은 방법을 통해 각 단계별로 반드시 하나의 센터 혹은 시장이 개설되게 할 수 있다.

• 돌연변이

돌연변이란 개체의 유전인자 값을 임의로 변경하여 새로운 개체로 만드는 방법을 말하며, 본 연구에서는 기존연구에서 사용한 랜덤 돌연변이(random mutation)(Gen and Cheng, 1997)를 기초로 하여 새로운 기법을 개발한다. 랜덤 돌연변이는 집단에서 임의로 선택된 하나의 개체에 대해 한 군데의 유전인자 위치를 랜덤하게 선택한 후 선택된 유전인자의 값을 변경하는 방법을 말한다. 하지만 <Figure 3>과 같이 생성된 집단의 개체들에 대해 랜덤 돌연변이를 그대로 적용할 경우 RLNCC 네트워크 각 단계에서 특정 센터가 개설되지 않거나 혹은 중복하여 개설되는 경우가 발생한다. 이러한 적용상의 한계점 때문에 본 연구에서는 이를 개선한 새로운 기법을 개발하며 그 구체적인 적용절차는 <Figure 5>와 같다.

<Figure 5> Procedure for Mutation

<Figure 5>의 적용절차를 단계별로 설명한다.

- Step 1 : 집단에서 랜덤하게 하나의 개체(V_4)를 선택한다
- Step 2 : 선택된 개체의 유전인자들 중에서 하나를 랜덤하게 선택한다(V_4 개체의 유전인자들 중에서 화살표가 표시된 부분)
- Step 3 : 선택된 개체의 유전인자 값이 1일 경우 0으로 변경하고 0일 경우 1로 변경한다(V_4^* 개체의 진하게 표시된 두번째 유전인자)

Step 4 : 만일 Step 3를 통해 변경된 유전인자 값에 의해 RLNCC의 개념을 위반한 개체가 있을 경우, 이를 수정하는 절차가 추가적으로 필요하다. 예를 들어 V_4^* 개체에서 모든 수집센터가 개설되지 않고 있다($y_1^C = y_2^C = y_3^C = 0$) 따라서 이 중 하나의 수집센터가 반드시 개설되어야 함으로 V_4^* 에서 V_4^* 진행되는 동안 새롭게 0의 값을 가진 수집센터 2를 제외한 나머지 수집센터 1과 3중에서 하나를 랜덤하게 선택(V_4^{**} 개체의 수집센터 3)한 후 선택된 유전인자의 값을 1로 바꿔준다(V_4^{**} 개체의 $y_3^C = 1$).

이상과 같은 방법을 통해 각 단계별로 반드시 하나의 센터 혹은 시장이 개설되게 할 수 있다.

• 적합도 함수

적합도란 유전연산자인 선택, 교차변이, 돌연변이 이후 새롭게 생성된 모든 개체에 대해 사전에 설정된 모든 제약조건을 만족하는 조건하에서의 목적함수를 말한다. 본 연구에서는 식 (2)의 목적함수 값을 구하는 방법으로 적합도 함수를 사용한다.

4.2 지역적 탐색법 설계

제 4장 도입 부분에서도 언급하였듯이 지역적 탐색법을 GA 탐색과정에 적용하는 이유는 GA가 가지지 못한 지역적 탐색능력을 강화하기 위한 것이다. 본 연구에서는 Michalewicz(1994)가 제안한 반복적 언덕오르기 기법(iterative hill climbing technique : IHCM)을 GA 탐색과정에 사용하여 지역적 탐색능력을 강화한다. IHCM은 GA 탐색과정에서 생성된 우수한 개체 주변에 대해 일정한 탐

색범위를 설정한 후 이 탐색범위에 대해 정밀하게 탐색을 실시하는 방법이다. 만일 최소화 문제에 대해 IHCM을 GA 탐색과정에 적용할 경우 그 구체적인 적용절차는 다음과 같다.

Step 1 : GA 탐색과정에서 가장 우수한 개체($\mathbf{v}_c$)를 선정한다.

Step 2 : 선정된 $\mathbf{v}_c$ 주변에 대해 사전에 설정된 주변 탐색범위 이내에서 집단의 크기 만큼의 새로운 개체를 랜덤하게 생성한다.

Step 3 : 새롭게 생성된 개체들의 적합도 함수 평가를 통해 가장 우수한 개체($\mathbf{v}_n$)를 선정한다.

Step 4 : 만일 $f(\mathbf{v}_c) > f(\mathbf{v}_n)$ 라면, $\mathbf{v}_n$ 을 $\mathbf{v}_c$ 로 변경한다.

이상과 같은 IHCM 탐색과정을 통해 현재 세대에서 가장 우수한 개체가 지속적으로 생성될 수 있다.

4.3 HGA 접근법의 전체적 흐름도

본 연구에서 제안하는 HGA 적용절차는 제 4.1절 부터 제 4.2절까지 각 과정별로 상세히 제시하였다.

이를 종합하여 전체적인 적용절차로 제시하면 다음과 같다.

Step 1 : 초기집단 설계

제 4.1절에서 제시한 표현법을 이용해 초기집단을 생성한다.

Step 2 : 유전연산자

Step 2-1 : 선택

확장샘플링공간에서의 우수해 우선선택전략(elitist strategy in enlarged sampling space)을 사용한다(Gen and Chang, 1997).

Step 2-2 : 교차변이

<Figure 4>의 교차변이 적용절차를 사용한다.

Step 2-3 : 돌연변이

<Figure 5>의 돌연변이 적용절차를 사용한다.

Step 2-4 : 적합도 함수

식 (2)의 목적함수 값을 구하는 방법으로 적합도 함수를 사용한다.

Step 3 : 지역적 탐색법 적용

제 4.2절에서 제시한 IHCM 적용절차를 사용한다.

Step 4 : 종료조건(termination condition) 설정

사전에 정해진 종료조건을 만족할 경우 종료하고, 그렇지 않을 경우 Step 2로 간다.

5. 수치실험

수치실험의 목적은 본 연구에서 제안한 HGA의 수행도를 기존 접근법들의 수행도와 비교하여 HGA의 우수성을 입증하고자 하는 것이다. 이를 위해 <Table 1>에서 보여지는 것과 같은 두 개의 접근법을 사용한다.

Yun(2013)의 연구에서 제안한 접근법은 지역적 탐색능력을 가지지 않으며 GA 만으로 탐색을 실시하는 접근법이다. 이러한 기존 GA 접근법과 본

<Table 1> Approaches for Comparison

Approach	Description
GA	Approach used in Yun(2013)
HGA	Approach proposed in this study

연구에서 제안한 HGA 접근법은 <Table 2>에서 보여지는 것과 같은 수행도 척도를 이용해 서로 비교되어 진다.

이상과 같이 두 개의 접근법은 세 가지의 수행도 척도에 의해 비교, 분석되어지며 이를 위해 두 가지 형태의 RLNCC가 사용된다. <Table 3>에 보여지는 RLNCC 1과 RLNCC 2는 서로 다른 크기의 수집센터, 재제조센터, 재분배센터 및 2차 시장을 가지고 있으며, 각 센터 및 2차 시장에서 발생하는 고정비용, 단위당 수송비용, 단위당 제품처리비용에 대한 상세한 정보는 <Appendix 1>에서 <Appendix 4>까지 제시되어 있다.

기존연구인 GA 접근법과 본 연구에서 제안한 HGA 접근법은 Visual Basic Version 6.0을 이용해 프로그래밍되었으며, 실험환경은 IBM compatible PC, CPU 3.06GHz, 1GB RAM, Windows XP이다. 각 접근법에서 사용되는 파라미터에는 총 세대수 1,000, 집단의 크기 20, 교차변이확률 0.5, 돌연변이

<Table 2> Measures of Performance for Comparison

Measure	Description
CPU time	Average search speed(Unit : Sec.)
Optimal solution	Solution for minimizing the total cost which is consisted of transportation cost, fixed cost, and handling cost.
Optimal setting	Opening/closing decision at each center and secondary market when optimal solution is located

<Table 3> Two Types of RLNCC

Type	No. of Customer	No. of Collection center	No. of Remanufacturing center	No. of Redistribution center	No. of Secondary market
RLNCC 1	30	15	6	9	7
RLNCC 2	50	20	8	12	10

확률 0.1로 하였고, HGA에서 사용되는 IHCM의 주변 탐색범위는 2.0으로 하였다. 주변 탐색범위 2.0이라는 의미는 제 4.2절 Step 2에서 언급한 내용으로 Step 1에서 선정된 우수개체인 v_c 를 중심으로 그 주변의 탐색범위를 2.0으로 하여 이 탐색범위 이내에 새로운 개체를 집단의 크기만큼(여기서는 20개)을 랜덤하게 생성시킨다는 의미이다. 이상과 같은 파라미터 설정은 파라미터 튜닝(De Jong, 1975; Grefenstette, 1986))에 의해 구해진 값이다. 또한 GA, HGA 실행시 발생하는 랜덤성을 제거하기 위해 총 20번의 독립적인 반복을 실시하였다. 따라서 <Table 2>의 CPU Time과 Optimal Solution은 GA와 HGA 접근법을 총 20회 반복 실행하여 각각 얻어진 평균값과 최고값을 의미한다. <Table 4>는 RLNCC 1에 대하여 GA 및 HGA 접근법을 각각 적용한 수행도 결과를 보여주고 있다.

<Table 4>를 살펴보면, CPU Time에서 기존연구인 윤영수(2013)에서 제안한 GA가 본 연구에서 제안한 HGA보다 약간 더 빠른 수행도를 보여주고 있다. 이러한 결과는 GA는 지역적탐색법을 가지고 있지 않지만 HGA는 이를 가지고 있기 때문에 HGA가 GA보다 전체적인 탐색시간이 좀 더 길어지기 때문으로 분석된다. 하지만 최적해의 탐색 척도를 보여주고 있는 Optimal Solution에서 보면 HGA가 기존 접근법인 GA보다 더 우수한 수행도를 보여주고 있다. 이는 기존 접근법인 GA는 지역적 탐색능력을 가지는 지역적탐색법을 사용하지 않고 오로지 GA만을 이용한 탐색을 실시하였지만 본 연구의 HGA는 기존 GA에 지역적탐색법을 함께 사용하였기 때문인 것으로 분석된다. 이러한 차이는 2차 시장에서 발생하는 고정비, 변동비, 수송비는 GA와 HGA가 전부 동일하지만 수집센터, 재

<Table 4> Performance Results of Each Approach for RLNCC 1

			GA	HGA
CPU Time			1.02	1.32
Optimal Solution			3535.6	3111.9
Optimal Setting	Collection center	Fixed cost	120.5	121.4
		Handling cost	60.0	60.0
		Transportation cost	907.8	901.9
	Remanufacturing center	Fixed cost	236.2	225.5
		Handling cost	135.0	135.0
		Transportation cost	258.0	90.0
	Redistribution center	Fixed cost	149.1	149.1
		Handling cost	96.0	96.0
		Transportation cost	1185.0	945.0
	Secondary market	Fixed cost	67.0	67.0
		Handling cost	45.0	45.0
		Transportation cost	276.0	276.0
	Opening		Collection center 1	Collection center 9
	Opening		Remanufacturing center 6	Remanufacturing center 3
	Opening		Redistribution center 9	Redistribution center 9
	Opening		Secondary market 7	Secondary market 7

제조센터에서의 고정비와 수송비의 결과가 서로 다르기 때문이다. 즉 수집센터의 경우 GA에서는 수집센터 1이 개설되지만 HGA에서는 수집센터 9개 개설되며, 재제조센터의 경우 GA에서는 재제조센터 6이 개설되지만 HGA에서는 재제조센터 3이 개설되기 때문이며, 이들 개설에 필요한 고정비가 각각 다르며, 개설된 각 센터의 위치좌표가 다르기 때문에 이곳으로 제품을 수송할 때 발생하는 수송비에서도 차이가 나게 된다.

재분배센터에서의 수송비의 차이는 GA와 HGA가 모두 동일하게 재분배센터 9를 개설하지만 이 전단계인 재제조센터에서의 수송경로가 다르기 때문이다. 즉 GA에서는 개설된 재제조센터 6에서 재분배센터 9로 제품을 수송하게 되지만 HGA에서는 개설된 재제조센터 3에서 재분배센터 9로 제품을 수송하기 때문에 이러한 차이가 발생한다. GA와 HGA의 수집센터, 재제조센터, 재분배센터, 2차 시장 모두에서 변동비가 동일한 이유는 제 3장 수리모델의 가정에서도 언급하였듯이 각 단계에서 어떤 센터 혹은 2차 시장이 개설되더라도 단위당 제품처리비용은 동일하기 때문이다.

<Figure 6>과 <Figure 7>은 RLNCC 1에 대해 GA와 HGA에서 수집센터, 재제조센터, 재분배센터,

2차 시장의 개설여부에 따른 네트워크를 보여주고 있다. <Figure 6>과 <Figure 7>에서 모든 고객과 개설된 각 센터 및 2차 시장은 실선으로 서로 연결되어져 있다.

<Figure 6>에서 개설된 수집센터 1에서 재제조센터 6을 거쳐 재분배센터 9까지의 이동거리가 <Figure 7>에서 개설된 수집센터 9에서 재제조센터 3을 거쳐 재분배센터 9까지의 이동거리보다 더 길고, <Figure 6>에서 개설된 재분배센터 9에서 2차 시장 7까지의 거리는 <Figure 7>에서 개설된 재분배센터 9에서 2차 시장 7까지와 동일하다. 전체적으로 연결된 네트워크를 보면, 개설된 각 센터의 위치가 일부 상이하고, HGA가 GA보다 약간 더 짧은 이동거리를 가지고 있으며 이는 전체 수송비용 및 고정비용에 영향을 주게 된다. 이러한 영향은 결국 <Table 4>에 보여지는 Optimal Solution 수행도 결과에 영향을 주어 본 연구에서 제안한 HGA가 GA보다 더 우수한 것으로 판단된다.

<Table 5>는 RLNCC 2에 대하여 GA 및 HGA 접근법을 각각 적용한 수행도 결과를 보여주고 있다.

<Table 5>에서 CPU Time의 수행도 결과는 <Table 4>의 수행도 결과와 마찬가지로 GA가 HGA보다 약간 더 빠른 결과를 보여주고 있다. 하

<Figure 6> Network Representation of GA for RLNCC 1

<Figure 7> Network Representation of HGA for RLNCC 1

<Table 5> Performance Results of Each Approach for RLNCC 2

			GA	HGA
CPU Time			1.67	1.93
Optimal Solution			5810.7	5224.8.0
Collection center	Fixed cost		29.0	29.0
	Handling cost		105.0	105.0
	Transportation cost		1530.1	1530.1
Remanufacturing center	Fixed cost		49.5	50.0
	Handling cost		225.0	225.0
	Transportation cost		975.0	220.0
Redistribution center	Fixed cost		22.2	20.8
	Handling cost		150.0	150.0
	Transportation cost		1685.0	710.0
Secondary market	Fixed cost		34.9	34.9
	Handling cost		125.0	125.0
	Transportation cost		880.0	2025.0
Optimal Setting	Opening	Collection center 10	Collection center 10	
	Opening	Remanufacturing center 7	Remanufacturing center 6	
	Opening	Redistribution center 12	Redistribution center 11	
	Opening	Secondary market 9	Secondary market 9	

지만 Optimal Solution에서는 HGA가 GA보다 더 우수한 결과를 보여주고 있다. 이는 각 센터 및 2차 시장의 개설여부가 GA와 HGA 수행도에서 다르게 나타나기 때문이다. 즉 GA에서는 수집센터 10, 재제조센터 7, 재분배센터 12, 2차 시장 9가 개설되지만 HGA에서는 수집센터 10, 재제조센터 6, 재분배센터 11, 2차 시장 9가 개설되기 때문이다. 이러한 개설여부의 차이는 고객으로부터 회수되는 제품이 수집센터를 거쳐, 재제조센터, 재분배센터, 2차 시장에 이르는 과정에서 발생하는 수송비와 각 센터 및 2차 시장의 개설에 필요한 고정비에서의 차이를 발생시킨다. 또한 이러한 차이는 Optimal Solution에서 각 센터 및 2차 시장에서의 고정비와 수송비가 GA와 HGA에서 서로 상이하다는 것으로 확인할 수 있다. 각 센터 및 2차 시장 개설여부의 차이를 좀 더 확실하게 보여줄 수 있는 것이 <Figure 8>과 <Figure 9>에 제시되어 있다.

<Figure 8>에서 개설된 수집센터 10에서 재제조센터 7을 거쳐 재분배센터 12까지의 이동거리가 <Figure 9>에서 개설된 수집센터 10에서 재제조센터 6을 거쳐 재분배센터 11까지의 이동거리보다 더 길고, <Figure 8>에서 개설된 재분배센터 12에서 2차 시장 9까지의 이동거리가 <Figure 9>에서 개설된 재분배센터 11에서 2차 시장 9까지의 이동거리보다 더 짧다. 전체적으로 보면 <Figure 8>에서 개설된 수집센터 10에서 재제조센터 7와 재분배센터 12를 거쳐 최종적으로 2차 시장 9까지 이동하는 거리가 <Figure 9>에서 개설된 수집센터 10에서 재제조센터 6과 재분배센터 11를 거쳐 최종적으로 2차 시장 9까지 이동하는 거리보다 더 길다는 것을 알 수 있다. 결국 각 센터의 개설 위치에 따라 개설비용 및 이동거리가 차이가 발생하며, 이는 전체비용의 차이를 발생시킨다. 따라서 HGA를 적용한 경우에 발생하는 전체비용이 GA

<Figure 8> Network Representation of GA for RLNCC 2

<Figure 9> Network Representation of HGA for RLNCC 2

를 적용한 경우에 발생하는 전체비용보다 더 유리하다는 것을 <Table 5>를 통해 알 수 있다. <Figure 10>은 RLNCC 2에 대해 1,000세대까지 GA와 HGA의 수렴과정을 보여주고 있다.

<Figure 10> Convergence Processes of GA and HGA for RLNCC 2

<Figure 10>에서 알 수 있듯이 탐색초기에는 GA 및 HGA 모두 다양한 변동과 빠른 수렴현상을 보여주고 있지만 약 300세대 이후에는 HGA가 GA보다 더 빠른 수렴현상을 보여주고 있어 적합도 값이 더 우수한 결과를 나타내고 있다.

지금까지의 다양한 분석에 대해 다음과 같은 결론에 도달 할 수 있다.

첫째, 두 가지 형태의 RLNCC에 대해 다양한 수행도 척도를 적용한 결과 비록 탐색속도 면에서는

GA가 HGA보다 약간 더 빠르지만 가장 중요한 최적해로의 탐색능력은 HGA가 GA보다 더 우수한 결과를 보여주고 있다. 이러한 결과는 HGA에서는 GA탐색이 가지지 못하는 지역적 탐색능력을 가능하게 해 주는 지역적 탐색기법인 IHCM을 사용하였기 때문인 것으로 분석된다.

둘째, HGA를 이용할 경우 각 단계에서 개설되는 센터 및 2차 시장의 위치가 GA를 이용한 경우 각 단계에서 개설되는 센터 및 2차 시장의 위치보다 좀 더 집중화되어 배치되고 있는 현상을 볼 수 있다. 이러한 집중화된 배치는 고객으로부터 회수되는 제품을 개설되는 각 센터 및 2차 시장으로 수송할 경우에 발생하는 수송비를 감소시켜 주며, 결국 전체비용의 감소를 가져올 수 있다. 즉 GA를 이용하는 것 보다 HGA를 이용하여 RLNCC를 설계하는 것이 좀 더 효율적이라고 분석된다.

6. 결론

본 연구에서는 집중형센터를 가진 역물류 네트워크(reverse logistics network with centralized centers : RLNCC)를 제안하였다. RLNCC는 역물류 네트워크 각 단계에서 하나의 수집센터, 재제조

센터, 재분배센터, 2차 시장만을 가지고 있는 경우를 말한다. 즉 고객으로부터 회수되는 제품이 개설 가능한 모든 수집센터, 재제조센터, 재분배센터 및 2차 시장 중에서 오직 한 군데의 수집센터, 재제조센터, 재분배센터 및 2차 시장으로만 수송되는 네트워크이다. 이러한 상황에서 다양한 수송경로가 고려되겠지만 본 연구에서는 제품수송에 필요한 수송비용, 개설되는 각 센터 및 2차 시장의 고정비용 및 제품 처리비용의 총합을 고려하여 이 총합이 가장 최소화되는 하나의 경로를 찾는 것이 목표이다. 먼저 RLNCC를 수리적 모형으로 표시하였으며, 이를 해결하기 위하여 본 연구에서는 HGA 접근법을 개발하였다.

HGA 접근법은 기존의 GA 접근법이 가지지 못한 지역적 탐색능력을 가지고 있으며, 이를 위해 반복적 언덕오르기 기법(iterative hill climbing technique : IHCM)을 적용하였다. HGA 접근법을 위해 GA의 표현법, 초기집단 생성, 선택, 교차변이, 돌연변이, 적합도 함수를 개발하였다. 수치실험에서는 본 연구에서 제안한 HGA 접근법의 우수성을 확인하기 위해 기존의 윤영수(2013)가 개발한 GA 접근법을 함께 비교 분석하였다. 비교를 위해 두 가지 형태의 RLNCC를 제시하고 CPU Time, Optimal solution, Optimal setting의 세 가지 수행도 척도를 사용하였다. 각 접근법에 대한 수행도 결과와 개설되는 각 센터 및 2차 시장의 네트워크 표현, 수렴 과정을 통해 본 연구에서 제안한 HGA 접근법이 기존 GA 접근법보다 더 우수한 결과를 보여주고 있는 것으로 분석되었다. 다만 본 연구의 수치실험에서 제시한 두 가지 형태의 RLNCC가 비교적 규모가 작기 때문에 향후 좀 더 규모가 큰 RLNCC에 대해 본 연구에서 제안한 HGA의 수행도를 평가해 볼 필요가 있을 것이다.

참고문헌

- Amini, M. M., D. Retzlaff-Roberts and C. C. Bienstock, "Designing a reverse logistics operation for short cycle time repair services," *International Journal of Production Economics*, Vol.96, No.3(2005), 367~380.
- Davis, L., *Handbook of Genetic Algorithms*, Van Nostrand Reinhold, 1991.
- De Jong, K. A., *Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems*, PhD Thesis, University of Michigan(University Microfilms No.76-9381), 1975.
- Gen, M. and R. Cheng, *Genetic Algorithms and Engineering Design*, John Wiley and Son, 1997.
- Grefenstette, J. J., "Optimization of control parameters for genetic algorithms," *IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics*, Vol.16, No.1(1986), 122~128.
- Han, Y. H. A., "Cooperative co-evolutionary algorithm for optimizing a reverse logistics network model," *Korean Management Science Review*, Vol.27, No.3(2010), 15~31.
- James, D. E., *Distribution Channel Considerations, In Managing Product Recalls*, The Conference Board, NY, 1974.
- Jayaraman, V., R. A. Patterson and E. Rolland, "The design of reverse distribution networks : models and solution procedures," *European Journal of Operational Research*, Vol.150 (2003), 128~149.
- Jung, Y. H. and H. C. Lee, "A study on returned product of reverse logistics network in e-retail industries," *Journal of the Korean Society of Supply Chain Management*, Vol.5, No.2 (2005), 29~42.
- Kim, J. D., H. S. Choi and D. H. Lee, "A case study

- on the stochastic vehicle routing in a refuse collection system," *Journal of the Korean Society of Supply Chain Management*, Vol.7, No.2(2007), 57~65.
- Krikke, H. R., E. J. Kooi and P. C. Schuur, "Network design in reverse logistics : a quantitative model," *Working Paper*, Erasmus Universiteit Rotterdam, 1999.
- Lee, C. Y., S. Y. Yun and M. Gen, "Reliability optimization design for complex systems by Hybrid GA with fuzzy logic control and local search," *IEICE Transaction on Fundamentals of Electronics Communications and Computer Sciences*, E85-A(4), (2002), 880~891.
- Lee, J. E., M. Gen and K. G. Rhee, "Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm," *Computers and Industrial Engineering*, Vol.56(2009), 951~964.
- Li, B. and W. Jiang, "A novel stochastic optimization algorithm," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B : Cybernetics*, Vol.30, No.1(2000), 193~198.
- Lim, Y. G. and B. J. Jung, "A study of location-allocation model in integrated logistics network considering reverse logistics," *2012 KORMS(Korean Operations and Management Science Society) Autumn Conference*, (2012), 765~772.
- Michalewicz, Z., *Genetic Algorithms+Data Structures = Evolution Program*, Second Extended Edition, Springer-Verlag, 1994.
- Min, H., "A bicriterion reverse distribution model for product recall," *OMEGA*, Vol.17, No.5 (1989), 483~490.
- Min, H., 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(2006), 56~69.
- Na, H. Y. and S. H. Lee, "A Location-Routing Problem for Logistics Network Integrating Forward and Reverse Flow," *IE Interfaces*, Vol.22, No.2(2009), 153~164.
- Rogers, D. S. and R. S. Tibben-Lembke, *Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices*, RLEC Press, Pittsburgh, 1999.
- Srivastava, S. K., "Green supply-chain management : a state-of-the-art literature review," *International Journal of Management Reviews*, Vol.9, No.1(2007), 53~80.
- Srivastava, S. K., "Network design for reverse logistics," *OMEGA*, Vol.36(2008), 535~548.
- Yen, J., J. C. Liao, B. J. Lee and D. Randolph, "A hybrid approach to modeling metabolic systems using a genetic algorithm and simplex method," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B : Cybernetics*, Vol.28, No.2(1998), 173~191.
- Yun, Y. S., "Evaluating reverse logistics networks using genetic algorithm approach," *Journal of the Korean Society of Supply Chain Management*, Vol.13, No.1(2013), 1~14.
- Yun, Y. S., R. K. Hwang, M. Gen and J. B. Jo, "Evaluating reverse logistics networks with centralized/decentralized centers : an genetic algorithm approach," *The 9th International Conference on Intelligent Manufacturing and Logistics Systems*, Shanghai, China, (2013), 516~524.

<Appendix 1> Fixed Cost and Unit Handling Cost for RLNCC 1

	Fixed Cost	Unit Handling Cost
Collection center 1	120.5	2.0
Collection center 2	115.2	“
Collection center 3	110.2	“
Collection center 4	130.4	“
Collection center 5	124.5	“
Collection center 6	140.5	“
Collection center 7	125.8	“
Collection center 8	132.2	“
Collection center 9	121.4	“
Collection center 10	110.7	“
Collection center 11	125.7	“
Collection center 12	131.5	“
Collection center 13	126.6	“
Collection center 14	122.4	“
Collection center 15	124.1	“
Remanufacturing center 1	223.1	4.5
Remanufacturing center 2	235.5	“
Remanufacturing center 3	225.5	“
Remanufacturing center 4	220.8	“
Remanufacturing center 5	230.4	“
Remanufacturing center 6	236.2	“
Redistribution Center 1	152.3	3.2
Redistribution Center 2	155.5	“
Redistribution Center 3	146.7	“
Redistribution Center 4	152.6	“
Redistribution Center 5	145.2	“
Redistribution Center 6	166.7	“
Redistribution Center 7	158.5	“
Redistribution Center 8	163.2	“
Redistribution Center 9	149.1	“
Secondary Market 1	88.9	1.5
Secondary Market 2	80.9	“
Secondary Market 3	90.5	“
Secondary Market 4	75.5	“
Secondary Market 5	85.0	“
Secondary Market 6	60.4	“
Secondary Market 7	67.0	“

<Appendix 2> Site Coordinate information for RLNCC 1

No.	Customer		Collection Center		Remanufacturing Center		Redistribution Center		Secondary Market	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
1	40.8	18.1	44.4	34.2	53.4	20.5	76.8	57.9	65.0	79.3
2	60.4	65.8	8.5	27.4	28.5	27.2	2.1	19.5	35.5	29.1
3	69.4	72.5	17.3	5.3	33.4	33.9	63.6	16.8	25.5	7.7
4	11.5	6.1	25.0	64.5	75.0	71.6	67.0	79.8	57.2	69.8
5	57.9	39.2	76.1	56.9	43.6	77.8	36.7	79.0	6.0	60.6
6	75.7	39.2	73.2	32.7	48.8	26.8	46.5	63.8	72.2	2.9
7	34.7	62.3	54.6	41.4			78.3	26.6	47.1	68.1
8	21.5	49.1	7.9	12.4			23.7	46.6		
9	55.4	66.7	32.8	36.8			38.4	64.9		
10	75.5	16.5	61.4	24.8						
11	49.2	7.4	39.4	53.2						
12	41.3	43.4	7.5	13.3						
13	23.4	2.4	19.8	57.0						
14	65.1	55.5	30.2	16.3						
15	8.7	55.5	30.2	36.1						
16	38.7	50.2								
17	12.3	77.0								
18	15.7	42.1								
19	22.5	4.1								
20	40.4	57.0								
21	54.7	4.5								
22	58.5	6.8								
23	68.6	66.1								
24	33.4	71.8								
25	7.3	32.9								
26	36.6	40.9								
27	53.6	52.3								
28	21.7	33.0								
29	28.5	0.1								
30	32.5	46.8								

<Appendix 3> > Fixed Cost and Unit Handling Cost for RLNCC 1

	Fixed Cost	Unit Handling Cost		Fixed Cost	Unit Handling Cost
Collection center 1	25.7	2.1	Remanufacturing center 1	44.9	4.5
Collection center 2	39.8	"	Remanufacturing center 2	59.9	"
Collection center 3	21.4	"	Remanufacturing center 3	50.1	"
Collection center 4	21.9	"	Remanufacturing center 4	52.9	"
Collection center 5	24.6	"	Remanufacturing center 5	42.2	"
Collection center 6	34.8	"	Remanufacturing center 6	50.0	"
Collection center 7	30.2	"	Remanufacturing center 7	49.5	"
Collection center 8	32.2	"	Remanufacturing center 8	43.8	"
Collection center 9	38.3	"			
Collection center 10	29.0	"			
Collection center 11	27.0	"			
Collection center 12	36.3	"			
Collection center 13	31.3	"			
Collection center 14	20.9	"			
Collection center 15	29.2	"			"
Collection center 16	35.8	"			
Collection center 17	31.2	"			
Collection center 18	34.9	"			
Collection center 19	22.8	"			
Collection center 20	28.3	"			
	Fixed Cost	Unit Handling Cost		Fixed Cost	Unit Handling Cost
Redistribution Center 1	27.9	3.0	Secondary Market 1	35.1	2.5
Redistribution Center 2	20.9	"	Secondary Market 2	26.1	"
Redistribution Center 3	37.6	"	Secondary Market 3	31.3	"
Redistribution Center 4	23.6	"	Secondary Market 4	39.0	"
Redistribution Center 5	30.9	"	Secondary Market 5	37.6	"
Redistribution Center 6	28.5	"	Secondary Market 6	26.1	"
Redistribution Center 7	29.9	"	Secondary Market 7	23.4	"
Redistribution Center 8	31.9	"	Secondary Market 8	23.4	"
Redistribution Center 9	26.1	"	Secondary Market 9	34.9	"
Redistribution Center 10	38.1	"	Secondary Market 10	29.1	"
Redistribution Center 11	20.8	"			
Redistribution Center 12	22.2	"			

<Appendix 4> Site Coordinate information for RLNCC 2

No.	Customer		Collection Center		Remanufacturing Center		Redistribution Center		Secondary Market	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
1	12.6	53.9	6.2	33.4	47.8	77.2	69.1	51.7	33.7	52.3
2	51.5	36.5	78.0	1.6	74.4	74.3	73.2	3.4	80.0	15.9
3	54.9	33.2	29.6	9.8	68.8	36.2	48.3	2.0	41.7	11.7
4	54.3	72.1	36.2	59.4	33.7	78.3	54.6	70.8	29.5	35.7
5	4.6	55.3	21.2	1.3	75.8	47.7	16.0	35.5	66.8	73.2
6	30.3	60.5	20.4	74.7	52.0	39.5	77.1	5.5	11.0	51.5
7	14.5	15.7	3.6	19.5	36.3	51.1	15.6	8.9	10.0	20.6
8	51.2	46.0	44.7	13.7	1.1	40.5	47.5	73.6	27.2	70.8
9	64.1	58.1	42.7	17.6			20.1	43.3	16.6	55.5
10	57.8	67.2	48.9	36.3			61.8	23.0	10.2	31.0
11	28.8	43.9	18.5	70.6			45.3	27.0		
12	66.5	42.1	39.0	75.9			9.6	71.7		
13	14.8	16.7	7.6	18.1						
14	18.1	27.4	64.5	4.4						
15	32.5	45.4	18.8	27.1						
16	63.0	17.2	76.0	75.8						
17	19.9	77.3	61.5	58.7						
18	71.5	51.1	23.6	48.3						
19	34.6	64.1	51.7	78.1						
20	67.3	67.1	29.0	18.8						
21	69.7	55.6								
22	14.1	0.2								
23	77.9	57.8								
24	32.9	32.8								
25	17.9	0.6								
26	55.1	3.4								
27	15.0	54.0								
28	57.5	52.6								
29	33.6	29.8								
30	78.5	49.7								
31	22.5	73.2								
32	35.1	66.8								
33	48.8	21.8								
34	46.8	44.3								
35	69.0	6.1								
36	55.2	52.6								
37	7.8	17.4								
38	22.4	71.1								
39	53.6	14.5								
40	66.3	75.2								
41	58.8	65.1								
42	66.7	16.6								
43	68.5	64.1								
44	67.3	43.3								
45	79.2	10.5								
46	13.1	36.6								
47	78.0	29.9								
48	8.8	58.4								
49	10.6	28.9								
50	77.0	48.3								

Abstract

Evaluating Reverse Logistics Networks with Centralized Centers : Hybrid Genetic Algorithm Approach

YoungSu Yun*

In this paper, we propose a hybrid genetic algorithm (HGA) approach to effectively solve the reverse logistics network with centralized centers (RLNCC). For the proposed HGA approach, genetic algorithm (GA) is used as a main algorithm. For implementing GA, a new bit-string representation scheme using 0 and 1 values is suggested, which can easily make initial population of GA. As genetic operators, the elitist strategy in enlarged sampling space developed by Gen and Chang (1997), a new two-point crossover operator, and a new random mutation operator are used for selection, crossover and mutation, respectively. For hybrid concept of GA, an iterative hill climbing method (IHCM) developed by Michalewicz (1994) is inserted into HGA search loop. The IHCM is one of local search techniques and precisely explores the space converged by GA search.

The RLNCC is composed of collection centers, remanufacturing centers, redistribution centers, and secondary markets in reverse logistics networks. Of the centers and secondary markets, only one collection center, remanufacturing center, redistribution center, and secondary market should be opened in reverse logistics networks. Some assumptions are considered for effectively implementing the RLNCC

The RLNCC is represented by a mixed integer programming (MIP) model using indexes, parameters and decision variables. The objective function of the MIP model is to minimize the total cost which is consisted of transportation cost, fixed cost, and handling cost. The transportation cost is obtained by transporting the returned products between each centers and secondary markets. The fixed cost is calculated by opening or closing decision at each center and secondary markets. That is, if there are three collection centers (the opening costs of collection center 1, 2, and 3 are 10.5, 12.1, 8.9, respectively), and the collection center 1 is opened and the remainders are all closed, then the fixed cost is 10.5. The handling cost means the cost of treating the products returned from customers at each center and secondary markets which are opened at each RLNCC stage. The RLNCC is solved by the proposed HGA approach.

* Corresponding Author: YoungSu Yun

Division of Business Administration, Chosun University

375 Seosuk-dong, Dong-gu, Gwangju 501-759, South Korea

Tel: +82-62-230-6243, Fax: +82-62-226-9664, E-mail: ysyun@chosun.ac.kr

In numerical experiment, the proposed HGA and a conventional competing approach is compared with each other using various measures of performance. For the conventional competing approach, the GA approach by Yun (2013) is used. The GA approach has not any local search technique such as the IHCM proposed the HGA approach. As measures of performance, CPU time, optimal solution, and optimal setting are used. Two types of the RLNCC with different numbers of customers, collection centers, remanufacturing centers, redistribution centers and secondary markets are presented for comparing the performances of the HGA and GA approaches. The MIP models using the two types of the RLNCC are programmed by Visual Basic Version 6.0, and the computer implementing environment is the IBM compatible PC with 3.06Ghz CPU speed and 1GB RAM on Windows XP.

The parameters used in the HGA and GA approaches are that the total number of generations is 10,000, population size 20, crossover rate 0.5, mutation rate 0.1, and the search range for the IHCM is 2.0. Total 20 iterations are made for eliminating the randomness of the searches of the HGA and GA approaches.

With performance comparisons, network representations by opening/closing decision, and convergence processes using two types of the RLNCCs, the experimental result shows that the HGA has significantly better performance in terms of the optimal solution than the GA, though the GA is slightly quicker than the HGA in terms of the CPU time. Finally, it has been proved that the proposed HGA approach is more efficient than conventional GA approach in two types of the RLNCC since the former has a GA search process as well as a local search process for additional search scheme, while the latter has a GA search process alone. For a future study, much more large-sized RLNCCs will be tested for robustness of our approach.

Key Words : Hybrid Genetic Algorithm, Reverse Logistics Network, Centralized Center, Collection Center, Remanufacturing Center, Redistribution Center, and Secondary Market

저 자 소 개

윤영수

대구대학교 산업공학과 학사, 건국대학교 산업공학과 석사·박사, 일본 와세다대학교 정보생산 시스템대학원 박사, 현재 조선대학교 경영학부 부교수로 재직 중이다. 주요연구 관심분야는 유전알고리즘을 이용한 생산시스템 최적화, 공급망관리 (Supply Chain Management)의 최적화 등이다.