Journal of the Korea Industrial Information Systems Research Vol. 21 No.4, Aug. 2016 :31-41
http://dx.doi.org./10.9723/jksiis.2016.21.4.031 ISSN:1229-3741

폐쇄루프 공급망 모델을 이용한 혼합형유전알고리즘 접근법

(Hybrid Genetic Algorithm Approach using Closed-Loop Supply Chain Model)

윤 영 수[1], 추룬수크 아누다리[2], 진 성[3]*
(YoungSu Yun, Chuluunsukh Anudari, and Xing Chen)

요 약 본 연구는 폐쇄루프 공급망 모델(Closed-Loop Supply Chain Model)을 이용하여 새로운 형태의 혼합형유전알고리즘(Proposed Hybrid Genetic Algorithm: pro-HGA)접근법의 수행도를 평가하기 위한 논문이다. 제안한 폐쇄루프 공급망 모델은 물류네트워크에서 순방향물류(Forward Logistics)와 역물류(Reverse Logistics)를 함께 고려한 통합형 물류모델이며. 이 모델에서는 회수된 제품의 재사용(Reuse), 재판매(Resale) 및 폐기(Waste Disposal)를 함께 고려하고 있다. 제안된 모델의 이행을 위해 기존연구에서 제안한 유전알고리즘(Genetic Algorithm: GA), 혼합형유전알고리즘(Hybrid Genetic Algorithm: HGA)과 본 연구에서 제안한 pro-HGA를 함께 적용하여 각 접근법들의 우수성을 비교분석하였다. 분석결과 본 연구에서 제안한 pro-HGA가 기존의 GA, HGA보다 더 우수한 결과를 얻었다.

핵심주제어 : 폐쇄루프 공급망 모델, 순방향물류, 역물류, 혼합형 유전알고리즘

Abstract This paper is to evaluate the performance of a proposed hybrid genetic algorithm (pro-HGA) approach using closed-loop supply chain (CLSC) model. The proposed CLSC model is a integrated supply chain network model both with forward logistics and reverse logistics. In the proposed CLSC model, the reuse, resale and waste disposal using the returned products are taken into consideration. For implementing the proposed CLSC model, two conventional approaches and the pro-HGA are used in numerical experiment and their performances are compared with each other using various measures of performance. The experimental results show that the pro-HGA approach is more efficient in locating optimal solution than the other competing approaches.

Key Words : Closed-Loop Supply Chain Model, Forward Logistics, Reverse Logistics, Hybrid Genetic Algorithm

1. 서 론

최근 수년간 공급망 (Supply Chain) 설계에 관한 기업들의 관심을 날로 증가하고 있는 실정이다. 이러한 관심증가는 기존의 기업 경쟁력이라고 알려진 품질, 원가, 마케팅에서의 경쟁력이 이제는 더 이상 경쟁력 강화를 위한 수단으로 사용

* Corresponding Author: chenxing1982@naver.com
† 본 논문은 2015학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.
Manuscript receivrd July 25, 2016 / revised Aug 01 ,2016 / accepted Aug 03, 2016
1) 조선대학교 경상대학 경영학부
2) 조선대학교 대학원 경영학과
3) 조선대학교 대학원 경영학과

되기가 어려운 실정에 기인한다. 즉 기업은 치열한 시장경쟁에서 기존의 경쟁력 뿐만 아니라 새로운 경쟁력 요소를 가져야 지속적인 성장을 유지할 수 있을 것이다. 이러한 새로운 경쟁력의 하나로서 나타난것이 공급망 설계이다.

일반적으로 공급망은 원자재 조달에서 제품생산, 유통 단계를 거쳐 최종적으로 소비자에게 전달되는 순방향물류(Forward Logistics)와 사용 후 제품의 수거, 수리(혹은 재생), 폐기의 단계를 거치는 역물류(Reverse Logistics)고 구분하고 있다. 과거의 공급망 연구에서는 이러한 순방향물류와 역물류를 따로 고려하였으나, 최근에는 이를 함께 고려한 통합형 공급망 모델 (Integrated Supply Chain Model)혹은 폐쇄루프 공급망 모델 (Closed-Loop Supply Chain Model)이 활발히 연구되고 있다[1-7]. 폐쇄루프 공급망 모델에 대한 기존연구들은 다음과 같다.

Kim [7]의 연구에서는 전자상거래에서 발생하는 폐쇄루프 공급망 모델의 개념을 제안하였다. 즉 전자상거래를 통해 최종적으로 고객에게 전달되는 제품이 반품될 경우, 이를 회수물류센터 및 재생산공장을 통해 재사용하거나 혹은 폐기시키는 과정이 필요하며 이를 위한 역물류 네트워크가 필요하다고 제안하였다. Barros *et al.* [2]는 휴리스틱 접근법을 사용하여 역물류에서 고려되는 리사이클링 센터(Recycling center)의 위치를 2단계에 걸쳐 해결하는 방법론을 개발하였다. Wang and Hsu [6]의 경우에는 역물류 단계에서 고객으로부터 회수되는 사용 후 제품에 대해 그 품질 특성을 파악한 후 재사용 가능 자재(Reusable Material)와 재사용 불가능 자재(Unusable Material)로 구분하였다. 재사용 가능 자재는 순방향물류의 제조단계로 보내서 재사용되도록 하였으며, 재사용 불가능 자재는 폐기처리 되도록 하는 폐쇄루프 공급망 모델을 제안하였다. Amin and Zhang [1]은 역물류 단계에서 사용 후 제품을 수거한 후 이를 분류하여 재사용 가능 부품과 수리후 재사용 가능 부품으로 구분하였다. 재사용 가능 부품은 순방향물류로 보내 고객에게 재판매되도록 하였으며, 수리후 재사용 가능 부품은 회복센터(Recovery Center)로 보내 회복 단계를 거치도록 하는 폐쇄루프 공급망 모델을 제안하였다. Chen *et al.* [3]의 연구는 Wang and Hsu [6]의 연구와 비슷하게 역물류에서 수거되는 사용 후 제품을 그 품질 특성에 따라 재사용 가능 제품과 재사용 불가능 제품으로 구분하였다. 재사용 가능 제품은 순방향물류 단계로 보내 재사용되도록 하였고, 재사용 불가능 제품은 폐기처리 되도록 하는 폐쇄루프 공급망 모델을 제안하였다. Chen *et al.* [3]의 연구에서 사용 후 제품을 수거 후 두 가지 종류의 처리과정을 거쳤다면, Hamed et al. [8]의 연구에서는 이를 세 가지 종류의 처리과정을 거치고 있다. 즉 수거된 사용 후 제품은 그 특성에 따라 재사용 가능 제품, 재활용 가능 제품, 재사용 불가능 제품으로 구분하였다. 재사용 가능 제품은 별 다른 처리과정을 거치지 않고 바로 중고시장(Secondary Market)에서 판매되도록 하였고, 재활용 가능제품은 재제조센터 (Remanufacturing Center)로 보내 재활용되도록 하였으며, 재사용 불가능 제품은 폐기센터(Waste Disposal Center) 보내 폐기처리되도록 하였다.

이상의 기존연구들의 특성을 살펴보면 다음과 같다. 첫째, 거의 대부분의 기존연구들이 순방향물류와 역물류를 함께 고려하여 폐쇄루프 공급망 모델의 특성을 보이고 있다. 둘째, 역물류 단계에서 수거되는 사용 후 제품을 그 특성(예를 들어 품질 수준 등)에 따라 분류하여 처리하고 있으며, 사용 후 제품(혹은 부품 및 원자재)의 일부는 순방향 물류로 보내서 처리하고, 또 다른 일부는 역물류 단계에서 처리하고 있다. 셋째, 이러한 폐쇄루프 공급망 모델을 설계하고 이행하는데 다양한 접근법들이 사용되고 있지만, 많은 연구들에서 유전알고리즘 (Genetic Algorithm: GA)이 주로 사용되고 있는 것을 알 수 있다 [3].

따라서 본 연구에서는 기존의 연구들에서 고려된 폐쇄루프 공급망 모델의 일부를 수정하여 새로운 형태의 폐쇄루프 공급망 모델을 제시하며, 이를 이행하기 위해 새로운 혼합형 유전알고리즘 (Proposed Hybrid Genetic Algorithm: pro-HGA) 접근법을 제시한다.

먼저 본 연구에서 제시하고자 하는 폐쇄루프 공급망 모델은 기존 연구들에서 사용된 폐쇄루프 공급망의 특성을 그대로 가진다. 즉 순방향물류

와 역물류를 결합하며, 사용 후 제품을 수거하여 다양한 처리과정을 거쳐 재사용, 재활용, 폐기의 단계를 거친다. 하지만 기존 연구들에서 고려하지 못한 새로운 개념도 함께 사용한다. 즉 순방향물류 단계에서 모듈(Module)개념을 도입하여 제품을 생산한다. 이미 잘 알려진 대로, 제품 생산시 모듈을 사용할 경우 제품 생산속도가 빠르며, 다양한 제품을 생산할 수 있는 장점이 있다. 따라서 냉장고, TV등 일반 가전제품을 비롯하여 최근에는 휴대전화 생산과정에서도 모듈을 사용하고 있을 정도로 다양한 산업분야에서 모듈 개념을 도입한 생산이 늘어나고 있는 추세이다 [9-10]. 하지만 앞에서 제시한 기존 연구문헌들에서는 이러한 모듈개념을 제품생산과정에 전혀 도입하지 않았다. 또한 이러한 모듈 개념은 역물류 단계에서 사용 후 제품을 처리하는데도 다양한 처리과정의 장점을 제공해 준다. 즉 본 연구에서 제시하는 폐쇄루프 공급망 모델은 역물류단계에서 재사용 가능한 제품, 재활용 가능한 모듈, 재사용 불가능 모듈로 구분하여 처리하고 있다.

두 번째로 본 연구에서 제시하는 pro-HGA 접근법은 Kanagaraj *et al.* [6]가 제안한 HGA 접근법을 개선한 것이다. 즉 Kanagaraj *et al.* [6]의 연구에서는 기존 GA와 CS(Cuckoo Search) 접근법을 함께 사용한 HGA 접근법을 개발하였다. 하지만 개발된 HGA 접근법에서는 기존 GA의 탐색과정에 해의 개선을 위해 CS 접근법을 적용할 때 단지 하나의 해에만 개선여부를 확인하였고, 나머지 해들의 개선여부는 고려하지 않는다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서 제시하는 pro-HGA 접근법은 이러한 단점을 개선한 접근법이다.

2장에서는 본 연구에서 제시한 폐쇄루프 공급망 모델의 구조를 제시한다. 3장에서는 2장에서 제시한 폐쇄루프 공급망 모델을 구체적으로 설계하기 위해 수리모형을 제시한다. 수리모형은 본 연구에서 제시한 pro-HGA 접근법을 통해 이행된다. 이러한 과정은 4장에서 제시한다. 5장에서는 수치예제로서 다양한 크기를 가진 폐쇄루프 공급망 모델이 제시되며, 본 연구에서 제시한 pro-HGA 접근법과 기존연구들에서 제시한 접근법들의 수행도를 비교분석한다. 8장은 결론으로서 본 연구의 의의와 향후 개선방향 등을 제시한다.

2. 제안된 폐쇄루프 공급망 모델

본 연구에서 제안하는 폐쇄루프 공급망 모델은 다음과 같은 물류 흐름을 가지고 있다. 먼저 순방향물류에서는 부품공급업체(Part Supplier)의 부품(Part) 공급을 시작으로 하여 모듈제조업체(Module Manufacturer), 제품제조업체(Product Manufacturer), 물류센터(Distribution Center)를 거쳐 최종적으로 소매점(Retailer)에 도달되는 구조를 가지며, 역물류에서는 고객(Customer)으로부터 회수되는 사용 후 제품을 수집센터(Collection Center)에서 수집하고 이를 재사용 가능한 제품(Recoverable Product), 재사용 가능한 모듈(Recoverable Module), 재사용 불가능한 모듈(Unrecoverable Module)로 구분하였고, 재사용 가능한 모듈은 순방향물류의 모듈제조업체로 보내고, 재사용 가능한 제품은 회복센터(Recovery Center)를 거쳐 중고시장에서 재판매되도록 하였다. 재사용 불가능한 모듈은 폐기센터로 보내 폐기처리 되도록 하였다. Figure 1은 본 연구에서 제안한 폐쇄루프 공급망 모델의 개략적 구조를 보여주고 있다.

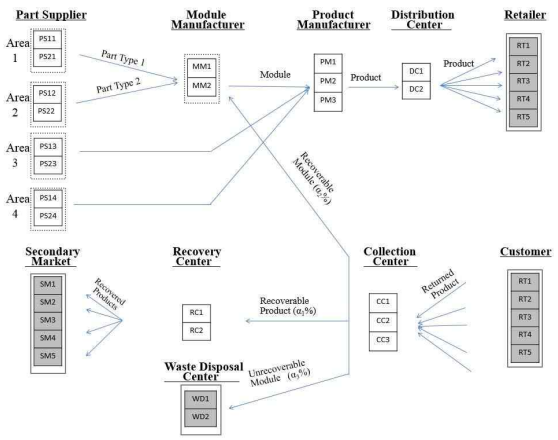

Fig. 1 Conceptual Structure of the Proposed Closed-Loop Supply Chain Model

Figure 1을 살펴보면, 먼저 순방향물류단계에

서는 두 군데 영역(Area 1, 2)의 부품공급업체(Part supplier)에서 각각 부품 타입 1(Part Type 1)과 부품 타입 2(Part Type 2)를 생산하여 다음 단계인 모듈제조업체로 보낸다. 모듈제조업체에서는 부품 타입 1과 부품 타입 2을 이용하여 모듈을 조립한다. 또한 나머지 두 군데 영역(Area 3, 4)의 부품공급업체(Part supplier)에서 각각 부품 타입 3(Part Type 3)과 부품 타입 4(Part Type 4)를 생산하여 제품제조업체로 보낸다. 제품제조업체에서는 이전단계에서 공급된 모듈과 부품타입 3, 부품 타입 4를 이용하여 제품을 만든다. 만들어진 제품은 물류센터를 거쳐 최종적으로 소매점으로 전달된 후 고객에게 판매된다. 역물류 단계에서는 고객으로부터 사용 후 제품을 회수센터를 통해 회수한다. 회수된 제품은 검사단계를 거쳐 재사용 가능한 제품과 재사용 불가능한 제품으로 구분한다. 재사용 가능한 제품의 수는 회수된 제품의 α_1%를 가지며, 회복단계를 거쳐 최종적으로 중고시장에서 재판매된다. 재사용 불가능한 제품은 분해하여 재사용 가능한 모듈, 재사용 불가능한 모듈로 구분한다. 재사용 가능한 모듈은 회수된 제품의 α_2%를 가지며, 순방향물류의 모듈제조업체로 보내어 재사용하게 된다. 재사용 불가능한 모듈은 회수된 제품의 α_3%를 가지며, 폐기처리센터로 보내 폐기 처리되도록하였다.

3. 수리모형 설계

본 장에서는 2장에서 제안된 폐쇄루프 공급망 모델을 수리적으로 표현하기 위한 수리모형을 설계한다. 먼저 제안된 폐쇄루프 공급망 모델의 이행을 위한 가정은 다음과 같다.

첫째, 문제의 단순성을 위해 단일제품의 물류흐름만 고려한다. 둘째, 순방향물류 및 역물류에서 고려되는 모든 설비들의 운영을 위한 고정비용, 각 설비간 제품 (혹은 모듈) 이동을 위한 수송비용, 각 설비에서의 제품처리비용 등은 사전에 알려져 있다. 셋째, 부품공급업체, 모듈제조업체, 제품제조업체, 물류센터, 수집센터, 회복센터는 각 단계에서 오직 한 개만 개설되어야 한다. 넷째, 고객이 사용한 사용 후 제품은 100% 수거된다. 다섯째, 순방향물류 및 역물류 각 단계별로 고려되는 모든 설비들의 처리용량은 이전단계의 설비에서 보내어지는 모든 제품 (혹은 모듈)을 처리할 수 있는 용량을 가지고 있다.

이상과 같은 가정에 고려하여 폐쇄루프 공급망 모델을 설계한다.

Index

a: 부품제조 영역 기호, $a \in A$
u : 부품공급업체 기호; $u \in U$
o: 모듈제조업체 기호; $o \in J$
r: 제품제조업체 기호; $r \in R$
i: 물류센터 기호; $i \in I$
e: 소매점/고객 기호; $e \in E$
l: 수집센터 기호; $l \in L$
v: 회복센터 기호; $v \in V$
s: 중고시장 기호 ; $s \in S$
w: 폐기처리센터 기호; $w \in W$

Parameters

$TSMM_{uao}$: 영역 a에 있는 부품공급업체 u 에서 모듈제조업체 o까지 부품을 보낼 때의 단위당 수송비용
$TSPM_{uar}$: 영역 a에 있는 부품공급업체 u 에서 제품제조업체 r까지 부품을 보낼 때의 단위당 수송비용
$TMPM_{\mathrm{or}}$: 모듈제조업체 o 에서 제품제조업체 r까지 모듈을 보낼 때의 단위당 수송비용
$TPMD_{ri}$: 제품제조업체 r 에서 물류센터 i까지 제품을 보낼 때의 단위당 수송비용
TDR_{ie}: 물류센터 i 에서 소매점/고객 e까지 제품을 보낼 때의 단위당 수송비용
TRC_{el}: 소매점/고객 e에서 수집센터 l까지 사용 후 제품을 보낼 때의 단위당 수송비용
TCM_{lo}: 수집센터 l에서 모듈제조업체 o까지 재사용가능한 모듈을 보낼 때의 단위당 수송비용
$TCRC_{lv}$: 수집센터 l에서 회복센터 v까지 재사용 가능한 제품을 보낼 때의 단위당 수송비용

TCW_{lw}: 수집센터 l에서 폐기처리센터 w까지 재사용 불가능한 모듈을 보낼 때의 단위당 수송비용

$TRCSM_{vs}$: 회복센터 v에서 중고시장 s까지 재사용 가능한 제품을 보낼 때의 단위당 수송비용

FS_{ua}: 영역 a에 있는 부품공급업체 u의 고정비용

FMM_o: 모듈제조업체 o의 고정비용

FPM_r: 제품제조업체 r의 고정비용

FD_i: 물류센터 의 고정비용

FC_l: 수집센터 l의 고정비용

FRC_v: 회복센터 v의 고정비용

HS_{ua}: 영역 a에 있는 부품공급업체 u의 단위당 처리비용

HMM_o:모듈제조업체 o의 단위당 처리비용

HPM_r:제품제조업체 r의 단위당 처리비용

HD_i: 물류센터 i의 단위당 처리비용

HC_l: 수집센터 l의 단위당 처리비용

HRC_v: 회복센터 v의 단위당 처리비용

Decision variables:

cs_{ua}: 영역 a에 있는 부품공급업체 u의 처리용량

cmm_o: 모듈제조업체 o의 처리용량

cpm_r: 제품제조업체 r의 처리용량

cd_i: 물류센터 i의 처리용량

cr_e: 소매점/고객 e의 처리용량

cc_l:수집센터 l의 처리용량

crc_v: 회복센터 v의 처리용량

csm_s: 중고시장 s 의 처리용량

cw_w: 폐기처리센터 w의 처리용량

$$ocs_{ia} = \begin{cases} 1, \text{영역 } a\text{에 있는 부품공급업체 } i\text{가 개설되면} \\ 0, \text{그렇지 않으면} \end{cases}$$

$$ocmm_o = \begin{cases} 1, \text{모듈제조업체 } o\text{가 개설되면} \\ 0, \text{그렇지 않으면} \end{cases}$$

$$ocpm_r = \begin{cases} 1, \text{제품제조업체 } r\text{이 개설되면} \\ 0, \text{그렇지 않으면} \end{cases}$$

$$ocd_i = \begin{cases} 1, \text{물류센터 } i\text{가 개설되면} \\ 0, \text{그렇지 않으면} \end{cases}$$

$$occ_l = \begin{cases} 1, \text{수집센터 } l\text{이 개설되면} \\ 0, \text{그렇지 않으면} \end{cases}$$

$$ocrc_v = \begin{cases} 1, \text{회복센터 } v\text{가 개설되면} \\ 0, \text{그렇지 않으면} \end{cases}$$

Objective Function:

Minimize total cost = $TF + TH + TT$

$$\begin{aligned} TT = & \sum_a\sum_u\sum_o (TSMM_{uoa} \cdot cs_{ua} \cdot ocs_{ua} \cdot ocmm_0) + \\ & \sum_a\sum_u\sum_r (TSPM_{ura} \cdot cs_{ua} \cdot ocs_{ua} \cdot ocpm_r) + \\ & \sum_o\sum_r (TMPM_{ro} \cdot cmm_o \cdot ocmm_o \cdot ocpm_r) + \\ & \sum_r\sum_i (TPMD_{ir} \cdot cpm_r \cdot ocpm_r \cdot ocd_i) + \\ & \sum_i\sum_e (TDR_{ei} \cdot cd_i \cdot ocd_i) + \\ & \sum_l\sum_e (TRC_{el} \cdot cc_l \cdot oc_l) + \\ & \sum_l\sum_o (TCMM_{ol} \cdot cc_l \cdot oc_l \cdot oc_o) + \\ & \sum_l\sum_v (TCRC_{lv} \cdot cc_l \;\; occ_l \cdot ocrv_v) + \\ & \sum_l\sum_w (TCW_{lw} \cdot cc_l \cdot oc_l) + \\ & \sum_v\sum_s (TRCSM_{vs} \cdot crc_v \cdot ocrc_v) \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} TF = & \sum_a\sum_u (FS_{ua} \cdot ocs_{ua}) + \sum_o (FMM_o \cdot ocmm_o) + \\ & \sum_r (FPM_r \cdot ocpm_r) + \sum_i (FD_i \cdot ocd_i) + \\ & \sum_l (FC_l \cdot occ_l) + \sum_v (FRC_v \cdot ocrc_v) + \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} TH = & \sum_a\sum_u (cs_{au} \cdot cs_{au} \cdot ocs_{au}) + \\ & HMM\sum_o (cmm_o \cdot ocmm_o) + \\ & HPM\sum_r (cpm_r \cdot ocpm_r) + \\ & HD\sum_i (cd_i \cdot ocd_i) + \\ & HC\sum_l (occ_l \cdot occ_l) + \\ & HRC\sum_v (ocrc_v \cdot ocrc_v) + \end{aligned} \tag{3}$$

subject to :

$$\sum_u ocs_{ua} = 1 \qquad \forall a \in A \tag{4}$$

$$\sum_o ocmm_o = 1 \tag{5}$$

$$\sum_r ocpm_r = 1 \tag{6}$$

$$\sum_i ocd_i = 1 \tag{7}$$

$$\sum_l occ_l = 1 \tag{8}$$

$$\sum_{v} ocrc_v = 1 \quad (9)$$

$$\sum_{u}(cs_{ua} \cdot ocs_{ua}) - \sum_{o}(cmm_o \cdot ocmm_o) = 0 \quad \forall a \in A \quad (10)$$

$$\sum_{u}(cs_{ua} \cdot ocs_{ua}) - \sum_{r}(cpm_r \cdot ocpm_r) = 0 \quad \forall a \in A \quad (11)$$

$$\sum_{o}(cmm_o \cdot ocmm_o) - \sum_{p}(cpm_o \cdot ocpm_o) = 0 \quad (12)$$

$$\sum_{r}(cpm_r \cdot ocpm_r) - \sum_{i}(cd_i \cdot ocd_i) = 0 \quad (13)$$

$$\sum_{i}(cd_i \cdot ocd_i) - \sum_{e} cr_e = 0 \quad (14)$$

$$\sum_{e} cr_e - \sum_{l}(cc_l \cdot occ_l) = 0 \quad (15)$$

$$\sum_{o}(cmm_o \cdot ocmm_o) - \alpha_2 \sum_{l}(cc_l \cdot occ_l) \geq 0 \quad (16)$$

$$\sum_{o}(crc_v \cdot ocrc_v) - \alpha_1 \sum_{l}(cc_l \cdot occ_l) \geq 0 \quad (17)$$

$$\sum_{o} cw_w - \alpha 3 \sum_{l}(cc_l \cdot occ_l) \geq 0 \quad (18)$$

$$\sum_{v}(crc_v \cdot ocrc_v) - \sum_{s}(cs_s \cdot ocs_s) = 0 \quad (19)$$

$$ocs_{ua} = \{1,0\} \quad \forall u \in U, \forall a \in A \quad (20)$$

$$ocmm_o = \{1,0\} \quad \forall o \in O \quad (21)$$

$$ocpm_r = \{1,0\} \quad \forall r \in R \quad (22)$$

$$ocd_i = \{1,0\} \quad \forall i \in I \quad (23)$$

$$occ_l = \{1,0\} \quad \forall l \in L \quad (24)$$

$$ocrc_v = \{1,0\} \quad \forall v \in V \quad (25)$$

$$cs_{ua}, cmm_o, cpm_r, cd_i, cc_l, crc_v, cw_w, cs_s \geq 0$$
$$\forall u \in U, \forall a \in A, \forall o \in O, \forall r \in R, \forall i \in I, \forall l \in L, \forall v \in V, \forall w \in W, \forall s \in S, \quad (26)$$

수식 (1),(2),(3)은 고정비용의 합, 처리비용의 합, 수송비용의 합을 최소화하는 목적함수를 나타내고 있으며, 수식(4)에서 (9)까지는 각 단계별로 설비는 오직 하나만 개설되어야 한다는 제약이다. 수식 (10)에서 (15) 까지는 각 단계에서 수송되는 수송량은 이전단계에서의 수송량과 같다는 제약이다. 수식(16)에서 (19)까지는 수집센터에서 모듈제조업체, 회복센터, 폐기처리센터까지 보내는 수송량은 모듈제조업체, 회복센터, 폐기처리센터의 처리량 보다 작거나 같아야 한다는 제약이다. 수식 (20)에서 (25)까지는 각 설비의 개설여부를 나타내며, 마지막 수식(26)은 비부조건(Non-negativity)을 나타낸다.

4. 제안된 해법

3장에서 제안된 수리모형을 이행하기 위해 본 연구에서는 기존연구에서 고려된 HGA의 성능을 개선한 pro-HGA를 제안한다. pro-HGA는 Kanagaraj *et al.* [6]가 제안한 HGA를 개선하고 있다. 즉 Kanagaraj *et al.* [6]는 기존의 GA의 해의 수렴특성을 개선하기 위해 CS접근법을 GA에 추가한 HGA를 개발하였다. 즉 HGA는 GA 수렴과정 이후 생성된 새로운 집단 중에서 하나의 개체를 임의로 선택하여 이를 개선한 후, 또 다른 하나의 새로운 개체를 임의로 선택하고 이를 서로 비교하여 우수한 개체를 다음세대의 집단에 포함시키는 방법을 적용하고 있다.

하지만 본 연구에서 제안하는 pro-HGA는 이러한 비교과정에서 단지 하나의 개체만을 비교대상으로 이용하는 것이 아니라 기존 집단의 모든 개체를 비교대상으로 하여 해의 추가적인 개선을 시도하는 방법을 적용한다. 본 연구에서 제안된 pro-HGA의 이행과정은 다음과 같다.

Step 1: GA 수행과정

- Step 1.1: 집단의 크기 만큼 초기집단을 랜덤하게 생성한다.
- Step 1.2: 생성된 집단에 대해 GA연산자 (GA Operator)를 다음과 같이 적용한다. 선택(Selection): 확장된 영역에서의 우수해 선택전략(Elitist Selection Strategy in Enlarged Sampling Space), 교차변이(Crossover): 1점 교차변이 연산자(One-point Crossover Operator), 돌연변이(Mutation): 랜덤 돌연변이 연산자(Random Mutation Operator) [11]
- Step 1.3: GA 연산자를 적용한 후 생성된 새로운 집단(*Offspring*)을 만든다.

Step 2: 개선된 CS 수행과정

Step 2.1: *Offspring*의 개체들 중에서 하나를 랜덤하게 선택한다. 선택된 개체에 대해 Levy Flight [6]를 적용하여 새로운 개체(*New_Ind*)를 만든다.

Step 2.2: *Offspring*의 개체들 중에서 하나(*Old_Ind*)를 랜덤하게 선택한다. Step 2.1에서 생성된 *New_Ind*와 *Old_Ind*의 적합도를 비교한다.

Step 2.3: 만일 *New_Ind*의 적합도가 *Old_Ind*의 적합도보다 우수하면, *Offspring*에서 *Old_Ind*를 제거하고 *New_Ind*를 포함시키고, 그렇지 않을 경우에는 다음단계로 진행한다.

Step 2.4: Step 2.1에서 Step 2.3까지의 과정을 집단의 크기(Population Size) 만큼 반복 수행한다.

Step 2.5: *Offspring*의 모든 개체들에 대해 적합도값을 비교하여 적합도 값이 높은 개체 순서로 재배열한다. 적합도 값이 낮은 일부의 개체들을 일정비율 (*Pa*%)로 선택하여 *Offspring*에서 제거한다. 제거된 개체들의 수만큼을 다시 랜덤하게 새로운 개체를 발생하여 *Offspring*에 넣는다.

Step 3: 만일 사전에 설정된 종료조건(Termination Condition)에 도달하면, 현재까지의 최우수해를 확인하고 모든 과정을 종료한다. 그렇지 않으면 Step 1.2로 돌아가서 반복 수행한다.

5. 수치예제

수치예제에서는 Table 1에서 보여지는 것과 같은 다양한 크기의 폐쇄루프 공급망 모델을 사용하여 4장에서 제안된 pro-HGA의 수행도를 평가한다. 다양한 평가를 위해 제안된 pro-HGA 뿐만 아니라 기존의 GA, HGA를 함께 사용한다. 기존 접근법으로 사용되는 GA는 4장의 Step 1의 절차만 적용한 것이며, HGA는 Kanagaraj *et al.* [6]가 제안한 접근법이다.

또한 최적화 프로그램인 Lingo[12]를 이용하여 GA, HGA, pro-HGA의 수행도를 함께 비교한다. 각 접근법들의 수행도 비교를 위해 Table 2와 같은 척도를 사용한다.

Table 2 Measures of Performance

Measure	Description
Best Solution	Best solution among all solutions
Average solution	Averaged value of the solutions after all iterations
Average Iteration	Average iteration number after all iterations
Average Time	Average running time (unit: sec) after all iterations

GA, HGA, pro-HGA는 Windows 환경(CPU: 3.40GHZ(Inter Core i7-3770), RAM: 8GB)에서 Matlab R2015을 사용하여 프로그램 되고 실행되었으며, LINGO는 동일한 환경에서 3장에서 제시한 수리모형을 바로 적용하여 해를 구하였다. GA, HGA, pro-HGA에서 사용되는 모수로는 집단의 크기: 50, 교차변이율: 0.5, 돌연변이율: 0.2, *Pa*: *50%*, 총세대수: 1,000 (Scale 1), 5,000 (Scale 2), 10,000 (Scale 3, 4, 5), 총반복수 30회를 적용하였다. Table 3, 4는 이러한 조건하에서 각 접근법들의 실행결과를 보여주고 있다. 또한 본 연구에서는 순방향물류와 역물류에서 동일 제

Table 1 Various Scales of Proposed Close-loop Supply Chain Model

Scale	Part Supplier				Module Manufacturer	Product Manufacturer	Distribution Center	Retailer	Collection Center	Recovery Center	Secondary Market	Waste Disposal Center
	1	2	3	4								
1	5	5	5	5	4	5	4	10	5	4	10	1
2	10	10	10	10	8	10	8	15	10	8	15	2
3	15	15	15	15	10	15	10	20	15	10	20	3
4	18	18	18	18	12	18	12	25	18	12	25	4
5	22	22	22	22	15	20	15	30	20	15	30	6

품을 1,500개 생산하고 처리하는 것을 가정하고 있다.

Table 3의 결과를 보면 Scale 1의 경우 Best Solution에서 GA, HGA, pro-HGA 모두 동일한 결과를 보여주고 있으며, 이러한 결과는 Lingo의 결과 보다 더 우수한 것을 알 수 있다. 하지만 Average Solution에서는 pro-HGA가 HGA보다 약간 더 우수하며, GA보다는 HGA가 약간 더 우수하다. Average Iteration에서는 GA와 pro-HGA가 거의 비슷한 결과를 나타내고 있으며, 이러한 결과는 HGA보다는 더 우수한 것을 알 수 있다. Average Time에서는 GA, HGA의 탐색속도가 pro-HGA의 탐색속도 보다 더 빠른 것을 알 수 있다.

Scale 2의 경우에는 Best Solution에서 HGA와 pro-HGA가 동일한 결과를 보여주고 있으며, 이러한 결과는 GA의 결과보다는 우수하다. 하지만, Average Solution에서는 pro-HGA가 HGA보다 약간 더 우수한 것을 알 수 있다. Average Time에서는 GA와 HGA의 결과가 거의 비슷하며, pro-HGA가 가장 열등한 결과를 보여주고 있다.

Scale 3에서는 Best Solution, Average Solution에서 pro-HGA가 가장 우수한 결과를 보여주고 있다. 하지만 GA와 HGA의 비교에서는 GA가 HGA보다 Best Solution, Average Solution에서 약간 더 우수한 결과를 보여주고 있는 것을 알 수 있다. Average Time에서는 Scale 2 와 비슷하게 pro-HGA가 가장 느린 탐색속도를 보여주고 있는 것을 알 수 있다.

Table 4의 Scale 4는 Scale 3과 비슷한 결과를 보여주고 있는 것을 알 수 있다. 즉 Best Solution, Average Solution에서 pro-HGA가 가장 우수하며, Average Time에서는 pro-HGA가 가장 열등한 결과를 보여주고 있다. 또한 GA와 HGA의 비교에서는 GA가 HGA보다 Best Solution, Average Solution에서 더 우수한 것을 알 수 있다.

Scale 5에서는 Best Solution에서 pro-HGA가 가장 우수하고, HGA가 GA보다는 약간 더 우수한 결과를 보여주고 있다. Average Solution에서는 pro-HGA가 가장 우수하며, GA가 HGA보다는 약간 더 우수한 결과를 보여주고 있다. Average Time에서는 GA와 HGA가 거의 비슷한 결과를 보여주고 있으며, pro-HGA가 가장 열등한 결과를 보여주고 있는 것을 알 수 있다.

GA, HGA, pro-HGA 사이의 추가적인 비교분석을 위해 각 접근법들의 수렴과정을 Figure 2, 3에 나타내었다.

Figure 2에서 보듯이 탐색초기에는 GA, HGA, pro-HGA 모두 급격한 수렴과정을 거치고 있다. 하지만 약 50세대 이후 부터는 GA, HGA는 별다른 수렴현상을 보여주지 못하고 있지만 pro-HGA는 추가적인 수렴과정을 보여주어 결국 pro-HGA가 기존의 접근법인 GA, HGA 보다 더 우수한 수렴과정을거치는 것을 알 수 있다.

Figure 3에서는 GA, HGA, pro-HGA 모두 초기 수렴과정에서는 급격한 수렴현상을 보이고 있다. 하지만 약 50세대 이후에서는 GA가 더 이상의 수렴현상을 보여주지 못하고 있으며, HGA는 약 500세대 이후에 약간의 수렴현상을 보여주고 있지만, GA, HGA 모두 pro-HGA 보다는 더 우수한 수렴현상을 보여주고 있지 못한다.

Table 3 Computation Results for Scales 1, 2, and 3

	Scale 1				Scale 2				Scale 3			
	GA	HGA	pro-HGA	Lingo	GA	HGA	pro-HGA	Lingo	GA	HGA	pro-HGA	Lingo
Best Solution	**162364**	**162364**	**162364**	**162400**	**163865**	**163582**	**163582**	**166530**	**164864**	**164754**	**164331**	**165660**
Average Solution	162859	162745	162566		165349	165377	165063		172054	172492	171762	
Average Iteration	18	31	15		59	35	31		87	43	72	
Average Time	5.3	5.6	6.2		6.1	6.6	9.6		10.2	10.8	13.7	

Table 4 Computation Results for Scales 4 and 5

	Scale 4				Scale 5			
	GA	HGA	pro-HGA	Lingo	GA	HGA	pro-HGA	Lingo
Best Solution	**165790**	**166361**	**165714**	**166085**	**170974**	**170732**	**170237**	**170646**
Average Solution	168500	168239	167708		172153	172493	171819	
Average Iteration	94	31	15		199	58	60	
Average Time	18.7	18.8	42.0		48.0	49.0	82.0	

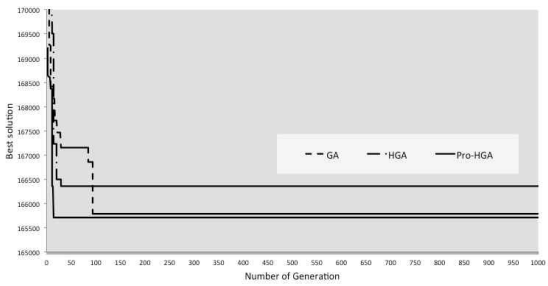

Fig. 2 Convergence Behaviors of GA, HGA and pro-HGA for Scale 4

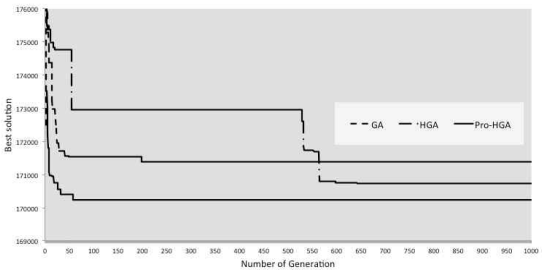

Fig. 3 Convergence Behaviors of GA, HGA and pro-HGA for Scale 5

Figure 4는 Scale 5에서 가장 우수한 결과를 보여주고 있는 pro-HGA의 각 설비들의 개설여부를 보여주고 있다. Figure 4에서 부품공급업체, 모듈제조업체, 제품제조업체, 물류센터, 수집센터, 회복센터 각 단계별로 진하게 표시된 부분들이 해당 단계에서 개설되는 것을 알 수 있다.

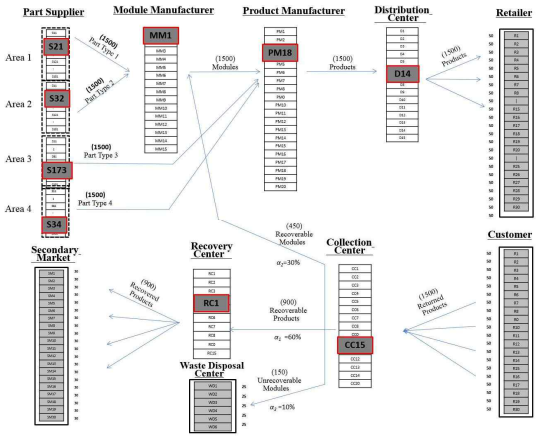

Fig. 4 Opening/Closing Decision of pro-HGA for Scale 5

이상과 같은 수치예제를 통해 다음과 같은 결과를 요약할 수 있다.

첫째, 최적해의 탐색 측면에서 pro-HGA가 GA, HGA보다 더 우수한 결과를 보여주고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 pro-HGA에서 사용된 CS 탐색법이 기존 HGA에서 사용된 CS 탐색법 보다 더 우수한 것을 증명한다.

둘째, 비록 HGA가 GA와 CS를 결합한 혼합형 탐색법이지만 다양한 Scale의 비교결과에서 살펴보면, HGA가 GA보다 항상 우수한 결과를 보여주고 있지 못하였다. 이것은 HGA에서 사용된 CS 탐색법이 탐색공간에서 GA보다 효과적으로 우수해를 찾지 못한 것으로 분석된다. 즉 HGA에서 사용된 CS의 효율성이 떨어진다고 볼 수 있다.

셋째, 실행속도 측면에서 살펴보면, HGA가 pro-HGA보다 더 빠른 속도를 보여주고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 pro-HGA에서 사용된 CS

탐색법이 GA 집단의 크기 만큼을 매번 반복수행하며, 이러한 반복수행 횟수는 HGA에서 사용된 CS의 반복수행 횟수보다 더 많기 때문이다. 결국 이러한 반복회수의 증가는 최적해 탐색에는 더 유리하지만 전체적인 실행속도는 더 느리게 만든다는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 기존의 연구들에서 사용된 폐쇄루프 공급망 모델을 일부 변경하여 개선된 폐쇄루프 공급망 모델을 제안하였다. 제안된 폐쇄루프 공급망 모델은 다음과 같은 특징이 있다.

첫째, 순방향물류 단계에서 네 군데 영역의 부품공급업체로부터 부품 타입 1, 2, 3, 4를 생산한다. 이 중에서 부품 타입 1, 2 는 모듈제조업체로 보내서 모듈을 만든 후, 만들어진 모듈을 제품제조업체로 보낸다. 부품 타입 3, 4는 제품제조업체로 바로 보낸다. 따라서 제품제조업체는 이전 단계들에서 보내어진 모듈과 부품 타입 3, 4를 조립하여 최종적으로 제품을 만든다. 이러한 제품 생산방식은 이전연구들에서 다루어지지 않은 부분이다.

둘째, 역물류 단계에서 사용 후 제품은 검사 및 분해 후 재사용 가능한 제품, 재사용 가능한 모듈, 재사용 불가능한 모듈로 구분한다. 재사용 가능한 제품은 회복센터를 거쳐 최종적으로 중고시장을 통해 재판매되며, 재사용 가능한 모듈은 순방향물류 단계의 모듈제조업체로 보내고, 재사용 불가능한 모듈은 폐기처리센터로 보내 폐기되도록 하였다. 이와 같이 사용 후 제품의 다양한 처리과정은 기존연구들 보다 한층 더 심도있게 분석한 것이다.

이러한 개선된 폐쇄루프 공급망 모델은 수리모형을 통해 모형화 되었으며, 이의 해를 구하기 위해 기존 접근법인 GA, HGA와 본 연구에서 제안한 pro-HGA를 적용하였다. pro-HGA는 기존의 HGA의 수행과정을 일부 개선한 것으로 GA수렴 이후 생성된 새로운 개체들 모두에 대해 다시 한번 해의 개선을 시도하는 방법을 적용한 것이다.

각 접근법들의 수행도 비교를 위해 다양한 규모의 폐쇄루프 공급망 모델을 수치예제에서 제시하였고 이를 비교분석하였다. 비교분석결과는 본 연구에서 제안한 pro-HGA가 가장 우수한 수행도를 보여주는 것을 알 수 있었다. 다만 pro-HGA의 수행척도 중에서 Average time은 다른 접근법들 보다 더 느린 수행도를 보여주었기 때문에 이를 개선하기 위한 추가적인 노력이 필요할 것으로 분석된다.

Acknowledgement

본 연구는 2016년 6월 서울대학교에서 개최된 한국산업정보학회 춘계학술대회에서 발표된 논문(저자: 추룬수크 아누다리, 진성, 윤영수, 논문명: 폐쇄루프 공급망 모델을 이용한 다양한 접근법의 수행도 비교)의 수정 및 확장판이다.

References

[1] S. H. Amin and G. Zhang, “An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi-objective approach,” Journal of Expert Systems with Applications, Vol. 39, pp. 6782-6791, 2012.

[2] A. I. R. Barros, R. Dekker and V. Scholten, “A two-level network for recycling sand: a case study,” European Journal of Operational Research, Vol. 110, pp.199-214, 1998.

[3] T. T. Chen, F. T. S. Chan and S. H. Chung, “An integrated closed-loop supply chain model with location allocation problem and product recycling decisions,” International Journal of Production Research, Vol. 53, No. 10, pp. 3120 - 3140, 2015.

[4] M. Fleischmann, H. R. Krikke, R. Dekker and S. D. P. Flapper, “A characterization of logistics networks for product recovery,” Omega, Vol. 28, No. 6, pp. 653-666, 2000.

[5] H. C. Young and C. K. Suh, “Causality analysis between SCM integration and firm performance,” Journal of Information Systems, Vol. 24, No. 1, pp.27-44, 2015.
[6] G. Kanagaraj, S. G. Phonnambalam and N. Jawahar, “A hybrid cuckoo search and genetic algorithm for reliability-redundancy allocation problems,” Computers and Industrial Engineering, Vol. 66, pp. 1115-1124, 2013.
[6] H. F. Wang and H. W. Hsu, “A closed-loop logistic model with as panning-tree based genetic algorithm,” Computers and Operations Research, Vol. 37, pp. 376-38, 2010.
[7] Kim, T. W., “ Reverse logistics in e-business,” The Journal of Internet Electronic Commerce Research, Vol. 6, No. 2, pp. 295-313, 2006.
[8] S. Hamed, S. E. Mirmehdi and A. S. Mohsen, “Designing and planning a multi-echelon multi-period multi-product closed-loop supply chain utilizing genetic algorithm,” International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 68, pp. 917-931, 2014.
[9] W. H. Chung, G. Okudan and R. A. Wysk, “Modular design to optimize product life cycle metrics in a closed-loop supply chain,” Proceedings of the 2011 Industrial Engineering Research Conference, 2011.
[10] K. Fujita. H. Amaya and R. Akai, “Mathematical model for simultaneous design of module commonalization and supply chain configuration toward global product family,” Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 24, pp. 991-1004, 2013.
[11] M. Gen and R. Cheng, Genetic algorithms and engineering design, John Wiley & Son, New York, 1997.
[12] Lingo, Lindo Systems (www.lindo.com), 2016.

윤 영 수 (YoungSu Yun)
• 정회원
• 대구대학교 산업공학과 학사
• 건국대학교 산업공학과 석사, 박사
• Waseda University 정보생산 시스템연구과 박사
• 현재: 조선대학교 경영학부 교수
• 관심분야: 유전알고리즘, SCM, 생산최적화

추룬수크 아누다리
(Chuluunsukh Anudari)
• 비회원
• 전남대학교 경영학과 학사
• 현재: 조선대학교 경영학과 석사 과정
• 관심분야: SCM, 생산최적화

진 성 (Xing Chen)
• 정회원
• 중국 서북 제2 민족대학교 경영학과 학사
• 전남대학교 무역학과 석사
• 현재: 조선대학교 경영학과 박사과정
• 관심분야: SCM, 생산최적화