

폐쇄루프 공급망 모델 최적화를 위한 적응형혼합유전알고리즘 접근법

(Adaptive Hybrid Genetic Algorithm Approach for Optimizing Closed-Loop Supply Chain Model)

윤 영 수^{1)*}, 추룬수크 아누다리²⁾, 진성²⁾
(Yun YoungSu, Chuluunsukh Anudari, and Chen Xing)

요약 본 연구에서는 적응형혼합유전알고리즘(Adaptive Hybrid Genetic Algorithm: AHGA) 접근법을 이용한 폐쇄루프 공급망(Closed-Loop Supply Chain: CLSC) 모델 최적화를 다루고 있다. CLSC 모델 구축을 위해 공급업체(Part Supplier), 제품제조업체(Product Manufacturer)등으로 구성된 전방향물류(Forward Logistics)와 수집업체(Collection Center), 회복센터(Recovery Center)등으로 구성된 역물류(Remove Logistics)를 함께 고려하고 있다. 제안된 CLSC 모델은 수리모형(Mathematical Model)으로 표현되며, AHGA 접근법을 이용해 이행되어 그 최적해를 구하게 된다. 수치실험에서는 기존연구에서 제안된 몇몇 접근법과 AHGA 접근법을 함께 사용하여 그 수행도를 비교분석하였다.

핵심주제어 : 적응형혼합유전알고리즘, 폐쇄루프공급망, 전방향물류, 역물류, 수리모형

Abstract The Optimization of a Closed-Loop Supply Chain (CLSC) Model Using an Adaptive Hybrid Genetic Algorithm (AHGA) Approach is Considered in this Paper. With Forward and Reverse Logistics as an Integrated Logistics Concept, The CLSC Model is Consisted of Various Facilities Such as Part Supplier, Product Manufacturer, Collection Center, Recovery Center, etc. A Mathematical Model and the AHGA Approach are Used for Representing and Implementing the CLSC Model, Respectively. Several Conventional Approaches Including the AHGA Approach are Used for Comparing their Performances in Numerical Experiment.

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

1. 서론

일반적으로 폐쇄루프 공급망(Closed-Loop Supply

Chain: CLSC) 모델은 전방향물류(Forward Logistics: FL)와 역물류(Remove Logistics: RL)를 함께 고려하고 있다. 효율적인 CLSC 모델을 구축하기 위해서는 FL와 RL의 각 단계에서 고려되는 다양한 업체(혹은 센터)를 적절하게 배치하고 이를 효율적으로 운영하는 것이 필수적이다[8, 11, 17-19]. FL 단계에서 고려되는 대표적인 업체로는 부품공급업체(Part Supplier), 제품제조업체(Product Manufacturer), 물

* Coressponding Author: ysyun@chosun.ac.kr

† 본 논문은 2014년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2014S1A5A2A01010951)이다.

Manuscript receivrd Mar, 13, 2017 / accepted Mar, 20, 2017

1) 조선대학교 경상대학 경영학부, 제1저자

2) 조선대학교 대학원 경영학과

류센터(Distribution Center), 소매업체(Retailer), 고객(Customer) 등이 있으며, RL 단계에서 고려되는 대표적인 업체로는 수집센터(Collection Center), 회복센터(Recovery Center), 2차시장 혹은 중고시장(Secondary Market 혹은 Used Market), 폐기처리센터(Waste Disposal Center) 등이 있다. 따라서 CLSC 모델에 대한 기존연구들 대부분은 FL과 RL 단계의 연계성을 강조하며, 특히 RL 단계에서 사용 후 제품(Returned or Used Product)의 효율적 처리 문제를 주로 다루고 있다 [1-4, 6].

CLSC 모델에 대한 대표적인 기존연구들을 살펴보면 다음과 같다. Barros *et al.* [2]는 FL과 RL 단계에서 고려되는 다양한 업체(혹은 센터)의 위치결정을 위한 휴리스틱 모델을 제안하였다. 특히 RL 단계에서 고려되는 재처리센터(Recycling center)는 단계별 접근법을 사용하여 최적 위치를 결정하였다. Wang and Hsu [12]의 연구에서는 FL과 RL 각 단계에서 발생하는 제품 수송비용, 운영비용, 처리비용 등을 최소화하는 수리모형을 제안하였다. 특히 제안된 수리모형에서는 FL 단계 마지막에서 수거된 사용 후 제품(Used Product)을 효율적으로 처리하기 위한 다양한 처리방법, 예를 들어, 재사용가능여부에 따라 사용 후 제품을 분류하고 처리하는 방법을 함께 제시하였다. Amin and Zhang [1]의 연구에서는 FL 단계에서 부품을 이용한 제품생산과 RL 단계에서 수거된 사용 후 제품의 재사용(Reuse) 및 재판매(Resale)를 함께 고려한 CLSC 모델을 구축하였다. 이러한 재사용 및 재판매를 통해 자원의 재활용 측면을 강화시킬 수 있었다. Amin and Zhang [1]의 연구와 비슷한 방법론을 Chen *et al.* [3] 또한 제안하였다, 즉 이 연구에서는 FL 단계에서 수거되는 사용 후 제품을 적절한 처리과정을 통해 재사용 가능제품과 재사용 불가능제품으로 구분하고, 재사용 가능제품은 FL 단계로, 재사용 불가능제품은 RL 단계로 보내 각각 처리되는 방법론을 제안하였다.

위에서 언급된 기존연구들을 살펴보면 다음과 같은 특징을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 첫째, CLSC 모델 구축의 핵심은 다양한 업체들로 구성된 FL과 RL 단계의 연계성이며, 기존 연구들 대부분이 이러한 연계성을 잘 표현하고 있다. 둘째,

CLSC 모델을 효율적으로 운영하기 위해서는 FL과 RL 단계의 연계성도 중요하지만, 특히 RL 단계에서의 사용 후 제품에 대한 재사용, 재판매 및 폐기처분과정을 효율적으로 관리하는 것이다. 즉 이러한 측면을 기존연구들이 적절하게 고려하였다. 셋째, 기존연구들에서 제안된 CLSC 모델의 이행을 위해 다양한 접근법이 사용되었으며, 이를 분류하고 정리한 연구를 Chen *et al.* [3]이 수행하였다. Chen *et al.* [3]의 연구에 따르면 기존 방법론 중에서 유전알고리즘 (Genetic Algorithm: GA) 접근법이 많이 사용되고 있는 것을 알 수 있다.

하지만 이러한 특성에도 불구하고 위에서 언급된 기존연구들은 다음과 같은 적용상의 한계점을 가지고 있다. 첫째, 최근 제품 생산에서 많이 적용되고 있는 모듈(Module) 개념을 함께 고려한 CLSC 모델은 기존연구에 없었다. 모듈을 제품 생산에 이용할 경우에는 제품의 생산속도 향상, 제품의 다양성 증대 등과 같은 많은 장점이 있기 때문에 자동차, 냉장고 등과 같은 조립산업에서는 지속적으로 모듈 개념이 사용되고 있는 것이 현실이다. 둘째, CLSC 모델의 핵심은 FL단계에서 생산되어 고객에게 판매된 제품을 RL단계에서 회수하여 재사용(Reuse), 재판매(Resale) 및 폐기처분(Waste Disposal)의 단계를 적절하게 거치도록 하여 자원의 낭비적인 요소를 줄이는 것이다[12]. 하지만 기존 연구들에서는 이러한 세 가지 측면(재사용, 재판매, 폐기처분)을 함께 CLSC 모델에서 고려한 연구는 없었다. 셋째, 기존연구들에서는 CLSC 모델을 운영하기 위해 GA 접근법을 주로 사용하였다[3]. 하지만 기존의 많은 연구들[5-6, 14-16]에서 GA 접근법 자체만으로 전역적최적해 (Global Optimal Solution)를 구하는 것은 한계가 있다고 지적하였다.

따라서 본 연구에서는 기존의 연구들의 분석에서 밝혀진 적용상의 한계점을 극복하기 위한 개선된 형태의 CLSC 모델을 제안한다. 제안된 CLSC 모델에서는 모듈개념을 사용하여 제품을 생산하며, FL과 RL 단계를 연결하여 재사용, 재판매 및 폐기처분을 함께 고려하였다. 또한 제안된 CLSC 모델을 해결하기 위해 GA 접근법의 성능을 개선한 적응형혼합유전알고리즘(Adaptive

Hybrid Genetic Algorithm: AHGA) 접근법을 개발한다. 개발된 AHGA 접근법의 수행도는 기존 연구들에서 제안된 다양한 접근법들의 수행도와 비교 분석을 실시하여 그 우수성을 입증하고자 한다.

2장에서는 제안된 CLSC 모델에 대한 전반적인 구조를 제시하며, 3장에서는 제안된 CLSC 모델을 수리적 모형으로 설계한다. 설계된 수리적 모형을 이행하기 위해 AHGA 접근법을 4장에서 개발한다. 5장은 수치예제로서 다양한 규모의 CLSC 모델을 제시하고, 이를 AHGA 및 기존 접근법들에 적용하여 구해진 해를 비교, 분석한다. 마지막으로 6장에서는 본 연구의 의의 및 미래의 발전방향 등에 대해 논한다.

2. 제안된 CLSC 모델

제안된 CLSC 모델의 구조는 다음과 같다. FL 단계에서는 두 군데의 부품공급업체(Part Suppliers in Area 1 and 2)에서 부품(Part)을 모듈제조업체(Module Manufacturer)로 보낸다. 나머지 두 군데의 부품공급업체(Part Suppliers in Area 3 and 4)에서는 부품(Part)을 제품제조업체(Product Manufacturer)로 바로 보낸다. 이렇게 부품을 구분하여 보내는 이유는 조립업체의 경우 일부 부품은 모듈제조에 사용되지만, 또 다른 일부 부품은 제품제조에도 사용되기 때문이다. 부품을 공급받은 모듈제조업체는 모듈을 생산하여 제품제조업체로 보낸다. 제품제조업체는 이전 단계에서 공급받은 모듈과 부품을 이용하여 제품(Product)을 만든 후 물류센터(Distribution Center)를 거쳐 최종적으로 소매점(Retailer)으로 보낸다.

RL 단계에서는 고객으로 부터 회수되는 사용 후 제품(Returned Product)을 수집센터(Collection Center)에서 수집하고 이를 재사용 가능 제품(Reusable Product)과 재사용 불가능 제품(Unusable Product)으로 분류한다. 재사용 가능 제품은 회복센터(Recovery Center)로 보내 그 품질을 회복한 후 2차시장(Secondary Market)으로 보내 재판매되며, 재사용 불가능 제품은 다시 분해하여 재사용 가능 모듈(Reusable Module)과

재사용 불가능 모듈(Unusable Module)로 구분한다. 재사용 가능 모듈은 FL 단계의 모듈제조업체로 보내서 재사용되도록 하고, 재사용 불가능 모듈은 폐기처리센터(Waste Disposal Center)로 보내 폐기처리 되도록 하였다. 이를 정리하면 Fig. 1과 같다.

3. 수리모형 설계

2장에서 제안된 CLSC 모델은 수리모형을 통해 표현된다. 수리모형을 설계하기 위해서는 CLSC 모델에서 고려되는 다음과 같은 물류의 전반적인 가정이 필요하다.

- 문제의 단순성과 물류의 효율적 처리를 위해 단일제품의 생산 및 처리만을 고려한다.
- 부품의 공급, 제품의 생산 및 판매, 사용 후 제품의 수거 및 처리과정에 사용되는 다양한 비용들(고정비용, 수송비용, 처리비용)은 사전에 알려져 있다.
- FL 및 RL 각 단계에서 고려되는 업체(혹은 센터)들의 개설여부는 다음의 규정을 따른다. 먼저 부품공급업체, 모듈제조업체, 제품제조업체, 물류센터, 수집센터, 회복센터는 오직 한 군데만 개설된다. 둘째, 소매업체/고객, 2차시장, 폐기처리센터는 고려되는 업체 모두가 개설된다.
- FL 및 RL 각 단계별에서 고려되는 업체(혹은 센터)의 제품(혹은 부품) 처리용량은 이

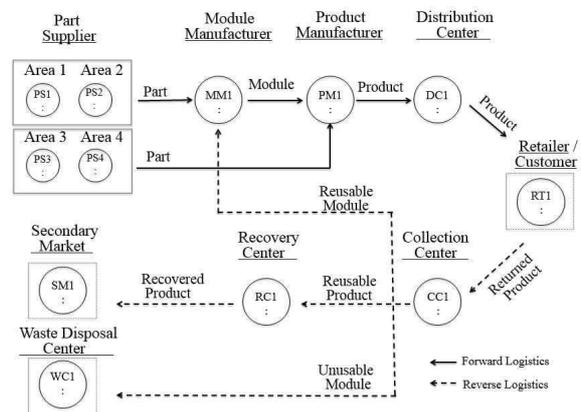


Fig. 1 Material Flows of the Proposed CLSC Model

전단계에서 공급되는 제품(혹은 부품) 전부를 처리할 수 있다.

이상과 같은 가정하에서 CLSC 모델을 위한 수리모형을 설계한다. 먼저 인수(Index), 모수(Parameter), 의사결정변수(Decision Variable)를 정의한다.

- 인수 설정

- a : 부품공급업체의 영역 인수, $a \in A$
- b : 부품공급업체 인수, $b \in B$
- c : 모듈제조업체 인수, $c \in C$
- d : 제품제조업체 인수, $d \in D$
- e : 물류센터 인수, $e \in E$
- f : 소매업체/고객 인수, $f \in F$
- g : 수집센터 인수, $g \in G$
- h : 회복센터 인수, $h \in H$
- i : 2차시장 인수, $i \in I$
- j : 폐기처리센터 인수, $j \in J$

- 모수 설정

- $TCAB_{cab}$: 영역 a 의 부품공급업체 b 에서 모듈제조업체 c 로 보내는 단위당 수송비용
- $TDAB_{dab}$: 영역 a 의 부품공급업체 b 에서 제품제조업체 d 로 보내는 단위당 수송비용
- TCD_{cd} : 모듈제조업체 c 에서 제품제조업체 d 로 보내는 단위당 수송비용
- TDE_{de} : 제품제조업체 d 에서 물류센터 e 로 보내는 단위당 수송비용
- TEF_{ef} : 물류센터 e 에서 소매업체/고객 f 로 보내는 단위당 수송비용
- TFG_{fg} : 소매업체/고객 f 에서 수집센터 g 로 보내는 단위당 수송비용
- TGC_{gc} : 수집센터 g 에서 모듈제조업체 c 로 보내는 단위당 수송비용
- TGH_{gh} : 수집센터 g 에서 회복센터 h 로 보내는 단위당 수송비용
- TGJ_{gj} : 수집센터 g 에서 폐기처리센터 j 로 보내는 단위당 수송비용
- THI_{hi} : 회복센터 h 에서 2차시장 i 로 보내는 단위당 수송비용

FAB_{ab} : 영역 a 에 있는 부품공급업체 b 의 고정비용

FC_c : 모듈제조업체 c 의 고정비용

FD_d : 제품제조업체 d 의 고정비용

FE_e : 물류센터 e 의 고정비용

FG_g : 수집센터 g 의 고정비용

FH_h : 회복센터 h 의 고정비용

HBA : 영역 a 에 있는 부품공급업체 b 의 단위당 처리비용

HC : 모듈제조업체 c 의 단위당 처리비용

HD : 제품제조업체 d 의 단위당 처리비용

HE : 물류센터 e 의 단위당 처리비용

HG : 수집센터 g 의 단위당 처리비용

HH : 회복센터 h 의 단위당 처리비용

- 의사결정 변수 설정

cab_{ab} : 영역 a 의 부품공급업체 b 의 처리용량

cc_c : 모듈제조업체 c 의 처리용량

cd_d : 제품제조업체 d 의 처리용량

ce_e : 물류센터 e 의 처리용량

cf_f : 소매업체/고객 f 의 처리용량

cg_g : 수집센터 g 의 처리용량

ch_h : 회복센터 h 의 처리용량

ci_i : 2차시장 i 의 처리용량

cj_j : 폐기처리센터 j 의 처리용량

oab_{ab} : 만일 영역 a 의 부품공급업체 b 가 개설되면 1, 그렇지 않으면 0

oc_c : 만일 모듈제조업체 c 가 개설되면 1, 그렇지 않으면 0

od_d : 만일 제품제조업체 d 가 개설되면 1, 그렇지 않으면 0

oe_e : 만일 물류센터 e 가 개설되면 1, 그렇지 않으면 0

og_g : 만일 수집센터 g 가 개설되면 1, 그렇지 않으면 0

oh_h : 만일 회복센터 h 가 개설되면 1, 그렇지 않으면 0

제안된 수리모형의 목적함수는 FL 및 RL 각

단계에서 발생하는 업체(혹은 센터)의 총고정비용(Total Fixed Cost: TFC), 제품(혹은 부품)의 총처리비용(Total Handling Cost: THC), 단계간 총수송비용(Total Transportation Cost: TTC)의 합을 최소화하는 것이다. 이를 수식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\text{Min. Total Cost} = \text{TTC} + \text{THC} + \text{TFC} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{TTC} = & \sum_a \sum_b \sum_c (\text{TCAB}_{cab} \cdot cab_{ab} \cdot oab_{ab} \cdot oc_c) + \\ & \sum_a \sum_b \sum_d (\text{TDBA}_{dab} \cdot cab_{ab} \cdot oab_{ab} \cdot od_d) + \\ & \sum_c \sum_d (\text{TCD}_{cd} \cdot cc_c \cdot oc_c \cdot od_d) + \\ & \sum_d \sum_e (\text{TDE}_{de} \cdot cd_d \cdot od_d \cdot oe_e) + \\ & \sum_e \sum_f (\text{TEF}_{ef} \cdot ce_e \cdot oe_e) + \\ & \sum_f \sum_g (\text{TFG}_{fg} \cdot cg_g \cdot og_g) + \\ & \sum_g \sum_c (\text{TGC}_{gc} \cdot cg_g \cdot og_g \cdot oc_c) + \\ & \sum_g \sum_h (\text{TGH}_{gh} \cdot cg_g \cdot og_g \cdot oh_h) + \\ & \sum_g \sum_j (\text{TGJ}_{gj} \cdot cg_g \cdot og_g) + \\ & \sum_h \sum_i (\text{THI}_{hi} \cdot ch_h \cdot oh_h) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{TFC} = & \sum_a \sum_b (\text{FAB}_{ab} \cdot oab_{ab}) + \sum_c (\text{FC}_c \cdot oc_c) + \\ & \sum_d (\text{FD}_d \cdot od_d) + \sum_e (\text{FE}_e \cdot oe_e) + \\ & \sum_g (\text{FG}_g \cdot og_g) + \sum_h (\text{FH}_h \cdot oh_h) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{THC} = & \text{HAB} \sum_a \sum_b (cab_{ab} \cdot oab_{ab}) + \\ & \text{HC} \sum_c (cc_c \cdot oc_c) + \text{HD} \sum_d (cd_d \cdot od_d) + \\ & \text{HE} \sum_e (ce_e \cdot oe_e) + \text{HG} \sum_g (cg_g \cdot og_g) + \\ & \text{HH} \sum_h (ch_h \cdot oh_h) \end{aligned} \quad (4)$$

Subject to

$$\sum_b oab_{ab} = 1, \quad \forall a \in A \quad (5)$$

$$\sum_c oc_c = 1 \quad (6)$$

$$\sum_d od_d = 1 \quad (7)$$

$$\sum_e oe_e = 1 \quad (8)$$

$$\sum_g og_g = 1 \quad (9)$$

$$\sum_h oh_h = 1 \quad (10)$$

$$\sum_b (cab_b \cdot oab_b) - \sum_c (cc_c \cdot oc_c) = 0, \quad \forall a \in A \quad (11)$$

$$\sum_b (cab_{ab} \cdot oab_b) - \sum_d (cd_d \cdot od_d) = 0, \quad \forall a \in A \quad (12)$$

$$\sum_c (cc_c \cdot oc_c) - \sum_d (cd_d \cdot od_d) = 0 \quad (13)$$

$$\sum_d (cd_d \cdot od_d) - \sum_e (ce_e \cdot oe_e) = 0 \quad (14)$$

$$\sum_e (ce_e \cdot oe_e) - \sum_f cf_f = 0 \quad (15)$$

$$\sum_f cf_f - \sum_g (cg_g \cdot og_g) = 0 \quad (16)$$

$$\sum_h (ch_h \cdot oh_h) - \sum_i (ci_i \cdot oi_i) = 0 \quad (17)$$

$$\sum_c (cc_c \cdot oc_c) - \alpha_2 \sum_g (cg_g \cdot og_g) \geq 0 \quad (18)$$

$$\sum_h (ch_h \cdot oh_h) - \alpha_1 \sum_g (cg_g \cdot og_g) \geq 0 \quad (19)$$

$$\sum_j cj_j - \alpha_3 \sum_g (cg_g \cdot og_g) \geq 0 \quad (20)$$

$$oab_{ab} = \{1, 0\}, \quad \forall a \in A, \forall b \in B \quad (21)$$

$$oc_c = \{1, 0\}, \quad \forall c \in C \quad (22)$$

$$od_d = \{1, 0\}, \quad \forall d \in D \quad (23)$$

$$oe_e = \{1, 0\}, \quad \forall e \in E \quad (24)$$

$$og_g = \{1, 0\}, \quad \forall g \in G \quad (25)$$

$$oh_h = \{1, 0\}, \quad \forall h \in H \quad (26)$$

$$\begin{aligned} & cab_{ab}, cc_c, cd_d, ce_e, cf_f, cg_g, ch_h, ci_i, cj_j \geq 0, \\ & \forall a \in A, \forall b \in B, \forall c \in C, \forall d \in D, \forall e \in E, \\ & \forall h \in H, \forall g \in G, \forall h \in H, \forall i \in I, \forall j \in J \end{aligned} \quad (27)$$

수식 (1)은 수식 (2), (3), (4)로 구성되어 있으며, 전체 비용의 합을 최소화하는 목적함수를 나타내고 있다. 수식(5)에서 (10)까지는 FL 및 RL 각 단계에서는 오직 하나의 업체(혹은 센터)만이 개설되어야 한다는 제약이다. 수식 (11)에서 (17)까지는 각 단계에서 수송되는 수송량의 총합은 이전단계에서의 보낼 수 있는 수송량의 총합과 같아야 한다는 제약이다. 수식(18)에서 (20)까지는 수집센터에서 모듈제조업체, 회복센터, 폐기처리센터로 각각 보내는 수송량의 총합은 공급받는 각 업체(혹은 센터)의 처리용량 총합보다 같거나

작아야 한다는 제약이다. 수식 (21)에서 (26)까지는 단계별로 고려되는 각 업체가 만일 개설되면 1, 그렇지 않으면 0을 가져야 한다는 제약이다. 수식(27)은 사용되는 모든 의사결정변수는 비부조건(Non-negativity)을 가져야 한다는 제약이다.

4. 제안된 AHGA 접근법

GA 접근법은 최적해 탐색에 있어서 집단(Population)을 이용하여 탐색을 진행하기 때문에 전역적최적해 탐색에는 유리하지만 그 탐색과정에서 특정 지역에 집중적인 탐색을 실시하는 지역적탐색(Local Search) 능력은 부족하다고 알려져 있다 [5-6, 9, 14-16].

이러한 지역적 탐색능력을 보충하기 위해 GA 접근법에 언덕탐색법(Hill Climbing Method), SA(Simulated Annealing), PSO(Particle Swarm Optimization)등과 같은 지역적 탐색능력을 가지고 있는 접근법을 함께 고려한 혼합형유전알고리즘(Hybrid Genetic Algorithm: HGA) 접근법이 개발되었다 [14-16]. 따라서 HGA 접근법은 전역적탐색능력과 지역적탐색능력을 함께 가지고 있기 때문에 GA 접근법 자체만을 적용한 경우보다 더 우수한 결과를 나타내는 것으로 알려져 있다[5-6]. 하지만 HGA 접근법을 적용할 때 사용되는 GA의 모수설정, 예를 들어, 교차변이율(Crossover Rate), 돌연변이율(Mutation Rate), 집단의 크기(Population Size) 등은 사용자가 임의로 설정하거나 많은 시행착오(Trail and Error)를 거쳐 설정하는 것이 일반적이다. 따라서 어떤 사용자가 모수설정을 하느냐에 따라 그 적용결과가 달라지는 문제가 발생한다 [14-16].

따라서 본 연구에서는 기존에 개발된 HGA 접근법의 문제인 모수설정을 자동화한 AHGA 접근법을 제안한다. 제안된 AHGA 접근법은 전역적 탐색을 위한 GA 접근법, 지역적탐색을 위한 CS(Cuckoo Search)을 함께 사용하고, 모수설정에 사용되는 교차변이율과 돌연변이율을 자동화한 접근법이다. AHGA 접근법의 구체적인 이행과정은 Fig. 2와 같다.

5. 수치예제

5장 수치예제에서는 4장에서 제안한 AHGA 접근법의 수행도를 비교분석한다. 먼저 비교분석에 사용될 다섯 가지 규모의 CLSC 모델은 Table 1에 제시되어 있다. Table 1에서는 FL 및 RL 각 단계에서 다양한 형태의 업체(혹은 센터)들이 고려되는 것을 알 수 있다. 또한 FL 및 RL 각 단계에서 발생하는 수송비용, 고정비용 및 처리비용은 MicroSoft Excel을 이용하여 랜덤하게 발생시킨 데이터를 사용하였다. AHGA접근법의

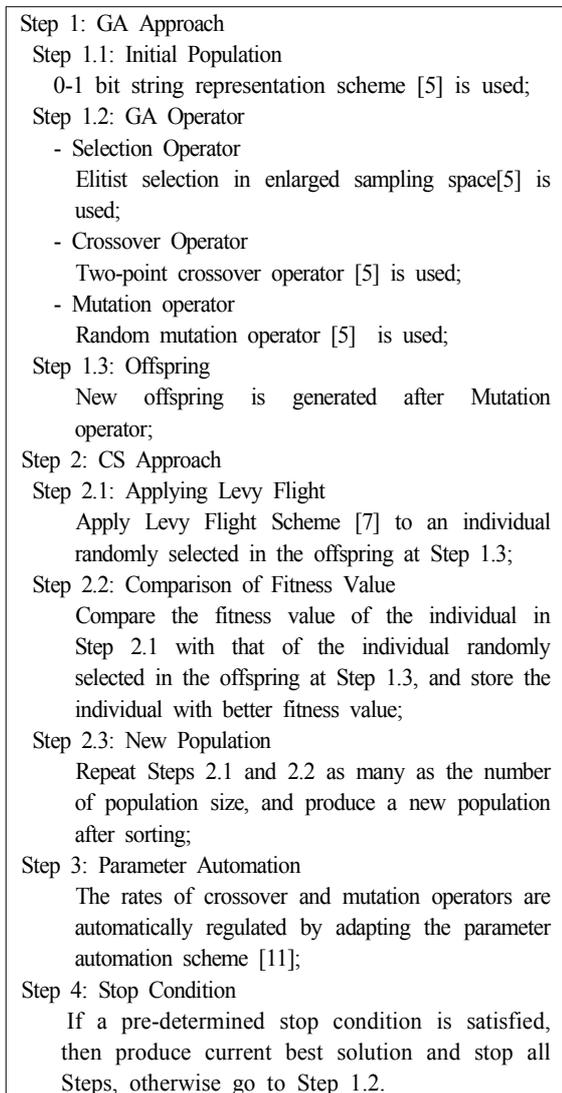


Fig. 2 Detailed Implementation Procedure of AHGA Approach

Table 1 Five Scales of the CLSC 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	3	3	3	3	2	3	2	10	3	2	10	1
2	6	6	6	6	5	6	5	15	6	5	15	2
3	12	12	12	12	8	12	8	20	12	8	20	3
4	17	17	17	17	10	17	10	25	17	10	25	5
5	21	21	21	21	15	20	15	30	20	15	30	6

수행도 비교를 위해 기존의 GA, HGA, LINGO 접근법을 함께 사용한다. 먼저 GA 접근법은 Gen and Cheng[5]이 제안한 방법을 사용하며, Fig. 2에서 제시한 Step 1의 절차와 동일하다. 둘째, HGA 접근법은 Kanagaraj *et al.* [7]가 제안한 방법으로 기존 GA와 CS 접근법을 사용하고 있다. 셋째, 최적화 문제 해결에 많이 사용되어온 LINGO[10]를 사용한다.

LINGO를 제외한 AHGA 및 기존의 GA, HGA 접근법은 Matlab R2015을 사용하여 프로그래밍 되었으며, Windows 환경 (CPU: 3.40GHZ, Intel Core i7-3770, RAM: 8GB)에서 실행된다. 다만 LINGO의 경우는 3장에서 제시한 수리모형에 Table 1과 비용관련 데이터를 직접 적용하여 해를 구하였다. GA, HGA, AHGA 접근법에서 사용되는 모수설정은 다음과 같다. 집단의 크기: 50, 교차변이 비율: 0.5, 돌연변이 비율: 0.2, 총세대수: 1,000이며, 각 접근법들의 수행에서 발생하는 각종 데이터의 랜덤성을 제거하기 위해 총 30회를 반복수행하였다. 또한 각 접근법의 수행도 비교분석을 위해 다섯 가지 형태의 수행도 척도를 사용한다. 먼저 Best Solution은 각 접근법

들이 총 30회의 반복을 수행한 후 구해진 가장 우수한 결과를 말한다. 둘째, Percentage Difference는 LINGO를 통해 구해진 Best Solution과 나머지 GA, HGA, AHGA 접근법들 각각의 Best Solution과의 차이를 %로 나타낸 값이다. 셋째, Average Iteration은 각 접근법들이 총 30회의 반복을 수행한 후 수렴된 총 세대수의 평균값을 말한다. 넷째, Average Solution은 각 접근법들이 총 30회의 반복을 수행한 후 구해진 30번의 결과의 평균값을 말한다. 다섯째, Average Time(Unit: Sec.)은 각 접근법들이 총 30회의 반복을 수행한 후 구해진 30번의 결과의 실행시간의 평균값을 말한다.

Table 2와 3은 각 접근법들의 수행도 결과를 보여주고 있다. Table 2의 Scale 1에서 수행도 척도인 Best Solution과 Percentage Difference의 경우 LINGO를 포함하여 GA, HGA, AHGA 접근법 모두 동일한 결과를 구했다. 하지만 Average Solution에 있어서는 각 접근법들이 약간의 상이한 결과를 보여주고 있다. 즉 AHGA 접근법이 가장 우수한 결과를 보여주었으며, HGA 접근법이 가장 열등한 결과를 보여주고 있다. Average

Table 2 Computation Results of GA, HGA and AHGA using Scales 1, 2, and 3

	Scale 1				Scale 2				Scale 3			
	GA	HGA	AHGA	LINGO	GA	HGA	AHGA	LINGO	GA	HGA	AHGA	LINGO
Best Solution	164,773	164,773	164,773	164,773	163,865	163,865	163,865	165,616	164,703	164,681	164,480	164,952
Percentage Diff.	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	-1.06%	-1.06%	-1.06%	0.00%	-0.15%	-0.16%	-0.29%	0.00%
Average Solution	165,049	165,224	164,773	-	164,986	164,829	164,489	-	166,450	166,690	166,008	-
Average Iteration	14	8	7	-	27	22	12	-	39	42	64	-
Average Time	3.87	4.16	12.57	0.12	5.30	5.29	15.56	0.12	5.50	5.70	15.88	0.15

Table 3 Computation Results of GA, HGA and AHGA using Scales 4 and 5

	Scale 4				Scale 5			
	GA	HGA	AHGA	LINGO	GA	HGA	AHGA	LINGO
Best Solution	169,245	168,508	168,214	169,153	170,840	170,285	169,854	177,511
Percentage Diff.	0.05%	-0.38%	-0.56%	0.00%	-3.76%	-4.07%	-4.31%	0.00%
Average Solution	171,044	171,019	170,299	-	172,680	172,414	171,768	-
Average Iteration	40	47	18	-	50	61	31	-
Average Time	6.25	5.73	16.63	0.27	6.64	6.49	18.1	0.10

Iteration의 결과에서는 AHGA, HGA, GA 접근법 순서로 우수한 결과를 보여주고 있다. Average Time의 경우에는 본 연구에서 제시한 AHGA 접근법의 수행도가 기존 GA, HGA 접근법의 수행도 보다 약 세 배 정도 더 느린 탐색속도를 보여주고 있는 것을 알 수 있다.

Scale 2에서 Best Solution, Percentage Difference의 경우 GA, HGA, AHGA 접근법의 수행도가 동일하며, 이 수행도는 LINGO의 수행도 보다 더 우수하다. Average Solution과 Average Iteration에서는 AHGA 접근법이 각각 164,489, 12로 GA 접근법의 164,986, 27과 HGA 접근법의 164,829, 22보다 더 우수한 것을 알 수 있다. Average Time의 경우에는 GA와 HGA 접근법이 AHGA 접근법 보다 약 두 배 정도 더 빠른 탐색속도를 나타내고 있다.

Scale 3에서 Best Solution의 경우 LINGO의 수행도가 가장 열등한 결과를 나타내고 있으며, GA, HGA, AHGA 접근법 순서로 우수한 수행도를 나타내고 있다. 그 차이는 LINGO의 수행도를 기준으로 했을 때, GA 접근법의 수행도는 -0.15%, HGA 접근법의 수행도는 -0.16%, AHGA 접근법의 수행도는 -0.29%로 더 우수한 것을 알 수 있다. 이러한 수행도의 차이는 Average Solution의 결과에서도 나타난다. 즉 AHGA 접근법의 수행도는 166,008로 GA 접근법의 수행도 166,450, HGA 접근법의 수행도 166,690 보다 더 우수한 것을 알 수 있다. 하지만 Average Iteration의 경우에는 AHGA 접근법의 수행도는 64로 GA 접근법의 수행도 39와 HGA 접근법의 수행도 42 보다는 열등한 것을 알 수 있다. 또한 Scale 1, 2의 경우에서와 마찬가지로 Average Time에 있어서는 AHGA 접근법의 수행도가 가장 열등한 것을 알 수 있다.

Table 3의 Scale 4에서 수행도 척도인 Best Solution, Percentage Difference의 경우 AHGA 접근법의 수행도가 가장 우수하며, GA 접근법의 수행도가 가장 열등한 것을 알 수 있다. Average Iteration과 Average Solution에서는 AHGA 접근법의 수행도가 가장 우수하고, GA 접근법의 수행도가 가장 열등한 것을 알 수 있다. 하지만 이전에 분석한 Scale 1, 2, 3의 경우

와 마찬가지로 Average Time에 있어서는 AHGA 접근법의 수행도가 가장 열등하다.

Scale 5의 Best Solution, Percentage Difference의 경우 AHGA 접근법의 수행도가 가장 우수하고 LINGO의 수행도가 가장 열등하다. Average Solution의 경우 GA와 HGA 접근법의 수행도가 거의 비슷한 결과를 얻었으며, 이러한 결과는 AHGA 접근법의 수행도 결과보다 더 열등하다. Average Iteration의 경우 AGHGA 접근법의 수행도가 GA, HGA 접근법의 수행도 보다 약 두 배 정도 더 우수한 것을 알 수 있다. 하지만 Average Time의 경우에는 AHGA 접근법의 수행도가 기존 GA, HGA 접근법의 수행도 보다 거의 세 배 정도 더 느린 탐색속도를 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 3과 4는 GA, HGA, AHGA 접근법이 500 세대까지의 탐색과정 동안에 Best Solution에서의 탐색과정의 변화를 보여주고 있다.

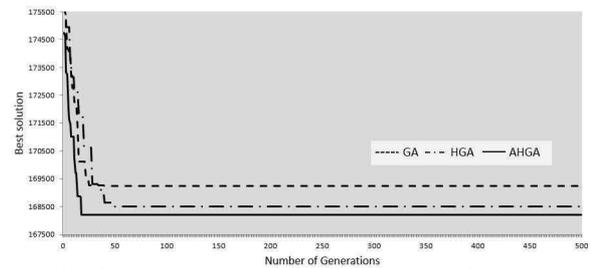


Fig. 3 Convergence Behaviors of GA, HGA and AHGA Approaches in Scale 4

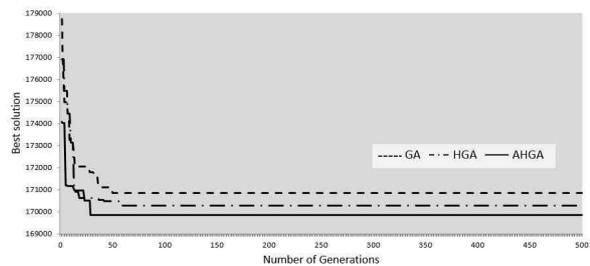


Fig. 4 Convergence Behaviors of GA, HGA and AHGA Approaches in Scale 5

Fig. 3의 경우 Scale 4에 대한 결과로서 GA 접근법은 약 30 세대, HGA 접근법은 약 40 세대, AHGA 접근법은 약 20세대까지 빠르게 급격

한 수렴현상을 보여주고 있지만, 그 이후의 세대부터는 더 이상의 수렴현상을 보여주고 있지 못한 것을 알 수 있다. 하지만 총 500 세대 전체로 보면 AHGA 접근법의 수행도가 GA, HGA 접근법의 수행도 보다 더 우수한 것을 알 수 있다.

Fig. 4의 경우 Scale 5에 대한 결과로서 GA 및 HGA 접근법은 약 50세대, AHGA 접근법은 약 40 세대까지 빠르고 급격한 수렴현상을 보여주고 있지만 그 이후의 세대부터는 더 이상의 수렴현상을 보여주고 있지 못한 것을 알 수 있다. 하지만 Fig. 3의 경우와 마찬가지로 총 500세대 전체로 보면 AHGA 접근법의 수행도가 GA, HGA 접근법의 수행도 보다 더 우수한 것을 알 수 있다.

Table 2, 3, Fig. 3, 4의 결과분석을 통해 다음과 같은 결론을 이끌어 낼 수 있다.

- Average Time을 제외한 나머지 수행도 척도 (Best Solution, Percentage Difference, Average Iteration, Average solution)에서 AHGA 접근법의 수행도가 기존의 GA, HGA 접근법의 수행도 보다 전반적으로 더 우수한 것을 알 수 있다. 이것은 AHGA 접근법에 사용된 탐색구조가 GA, HGA 접근법에 사용된 탐색구조 보다 더 우수하다는 것을 입증한다.
- HGA와 AHGA 접근법은 GA와 기존 지역적탐색법을 함께 혼합한 측면에서 보면 동일한 접근법이지만, HGA 접근법의 경우 사용되는 GA연산자인 교차변이와 돌연변이 연산자의 적용비율을 사용자가 시행착오를 통해 임의로 지정해 주지만, AHGA 접근법의 경우 이러한 비율이 자동적으로 조절되는 점에서 그 차이를 알 수 있다. 이러한 차이는 다양한 수행도 척도를 이용한 실험분석에서 상이한 결과를 나타내고 있다. 즉 Average Time을 제외한 Best Solution, Percentage Difference, Average Iteration, Average Solution에서 AHGA 접근법이 HGA 접근법 보다 더 우수한 결과를 도출하였다. 결국 AHGA 접근법에서 사용된 GA 연산자의 자동화를 위한 탐색구조가 이를 사용하지 않은 HGA 접근법보다 더 우수하다는 것을 입증하고 있다.

- 하지만 Average Time의 경우 GA, HGA 접근법의 탐색속도가 AHGA 접근법의 탐색속도 보다 더 빠른 것을 알 수 있다. 이것은 AHGA 접근법의 경우 GA 접근법과 CS 접근법을 혼합화하였으며, GA 연산자인 교차변이와 돌연변이 연산자의 적용비율을 자동으로 조절하기 위한 탐색구조가 추가적으로 도입되었기 때문에 기존 GA, HGA 접근법 보다 더 느린 탐색속도를 나타내는 것으로 분석된다.

6. 결 론

기존의 많은 연구들에서 고려된 CLSC 모델의 특징은 다음의 몇 가지로 요약할 수 있다. 첫째, FL과 RL을 함께 가지고 있으며 각 단계에서 다양한 업체(혹은 센터)를 고려하고 있다. 둘째, FL 단계에서 생산된 제품을 수거하여 재사용 혹은 재활용을 위한 RL 단계의 기능을 강조하고 있다. 셋째, CLSC 모델을 설계하고 이를 이행하는데 GA 접근법을 주로 사용하고 있다.

하지만 이러한 특성에도 불구하고 기존연구들은 다음과 같은 적용상의 한계점을 가지고 있다. 첫째, 기존 연구들은 최근 제품 생산에서 많이 적용되고 있는 모듈(Module) 개념을 함께 고려한 CLSC 모델을 제시하지 않았다. 둘째, CLSC 모델의 핵심은 회수된 제품을 RL단계에서 재사용, 재판매 및 폐기처분의 단계를 적절하게 거쳐 자원의 낭비를 줄이는 것이다. 하지만 기존 연구들에서는 이러한 세 가지 측면을 함께 CLSC 모델에서 고려한 연구는 없었다. 셋째, CLSC 모델을 운영하기 위해 GA 접근법을 주로 사용하고 있지만 GA 접근법 자체만으로 전역적최적해를 구하는 것은 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 연구들의 분석에서 밝혀진 적용상의 한계점을 극복하기 위한 새로운 형태의 CLSC 모델을 제안하였다. 제안된 CLSC 모델에서는 모듈개념을 사용하여 제품을 생산하며, FL과 RL 단계를 연결하여 재사용, 재판매 및 폐기처분을 함께 고려하였다. 또한 제안된 CLSC 모델을 해결하기 위해 GA 접근법의 성능을 개선한 AHGA 접근법을 개발하였다. 제

안된 CLSC 모델은 수리모형으로 설계되었으며, 설계된 수리모형은 AHGA 접근법을 통해 이행되었다. 수치실험에서는 다섯 가지 규모의 CLSC 모델을 제시하였고, 본 연구에서 제안된 AHGA 접근법과 기존 연구들에서 사용된 GA 및 HGA 접근법을 적용하여 그 수행도를 비교 분석하였다. 비교분석결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

첫째, 다양한 수행도 척도를 사용한 비교분석 결과 본 연구에서 제시한 AHGA 접근법의 수행도가 기존 연구들에서 사용한 GA 및 HGA 접근법의 수행도 보다 더 우수하였다. 둘째, HGA와 AHGA 접근법 모두는 혼합형 접근법을 사용하고 있지만 사용되는 GA연산자의 적용비율을 자동화한 AHGA 접근법이 이를 자동화하지 않는 HGA 접근법 보다 더 우수한 수행도를 보여 주었다.

하지만 본 연구는 다음과 같은 두 가지 측면에서 한계점을 가지고 있다. 첫째, 탐색속도 측면에서 AHGA 접근법이 기존의 GA 및 HGA 접근법 보다 더 느리다. 따라서 탐색속도를 좀 더 빠르게 진행하기 위한 노력이 필요하다. 둘째, 본 연구에서는 다섯 가지 규모의 CLSC 모델을 사용하였지만 좀 더 규모가 큰 CLSC 모델을 사용할 필요가 있으며, 만일 가능하다면 현실에서 실제 사용되고 있는 데이터를 활용하여 CLSC 모델을 구축하고 이를 비교분석하는 것이 필요할 것이다.

References

- [1] Amin, S. H. and Zhang, G., "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] Barros, A. I., Dekker, R. and Scholten. V., "A Two-level Network for Recycling Sand: A Case Study," *European Journal of Operational Research*, Vol. 110, pp. 199-214, 1998.
- [3] Chen, T. T., Chan, F. T. S. and Chung, S. H., "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] Fleischmann, M., Krikke, H. R., Dekker, R. and Flapper, S. D. P., "A Characterization of Logistics Networks for Product Recovery," *Omega*, Vol. 28, No. 6, pp. 653-666, 2000.
- [5] Gen, M. and Cheng, R., *Genetic Algorithms and Engineering Design*. John-Wiley & Sons, 1997.
- [6] Gen, M. and Cheng, R., *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*. John-Wiley & Sons, 2000.
- [7] Kanagaraj G., Phonnambalam S. G. and Jawahar N., "A Hybrid Cuckoo Search and Genetic Algorithm for Reliability - Redundancy Allocation Problems," *Journal of Computers and Industrial Engineering*. Vol. 66. pp.1115-1124, 2013.
- [8] Kim, N. K. and Hwang, K. J., "Moderating Effects of Suppliers' Internal Resources on the Relationship Between Collaborative and Arm's-length SCEM Approaches and Suppliers' Environmental Activities," *The Journal of Internet Electronic Commerce Research*, Vol.10, No. 3, pp. 01-26, 2010.
- [9] Kim, J. W., "The Decoding Approaches of Genetic Algorithm for Job Shop Scheduling Problem," *The Journal of Information Systems*, Vol. 25, No. 4, pp. 105-119, 2016.
- [10] LINGO, Lindo Systems (www.lindo.com), 2015.
- [11] Srinivas, M. and Patnaik, L. M., "Adaptive Probabilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithms," *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 24, No. 4, pp. 656-667, 1994
- [12] Wang, H. F. and Hsu, H. W., "A Closed-loop Logistic Model with as Panning-tree Based Genetic Algorithm,"

Journal of Computers & Operations Research, Vol. 37, pp.376-38, 2010.

- [13] Yen, J., Liao, J. C., Lee, B. J. and Randolph, D., "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, pp. 173-191, 1998.
- [14] Yun, Y. S., Chung, H. S. and Moon, C. U., "Hybrid Genetic Algorithm Approach for Precedence-constrained Sequencing Problem," Computers and Industrial Engineering, Vol. 65, pp. 137-147, 2013.
- [15] Yun, Y. S., "Hybrid Genetic Algorithm with Adaptive Local Search Scheme," Computers and Industrial Engineering, Vol. 51, No. 1, pp. 128-141, 2006.
- [16] Yun, Y. S., Gen. M. and Seo, S. L., "Various Hybrid Methods Based on Genetic Algorithm with Fuzzy Logic Controller, Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 14, Nos. 3-4, pp. 401-419, 2003.
- [17] Yun, Y. S., Anudari, C. and Chen, X., "Hybrid Genetic Algorithm Approach Using Closed-loop Supply Chain Model," Journal of the Korea Industrial Information Systems Research, Vol. 21, No. 4, pp. 31-42, 2016.
- [18] Yun, Y. S. and Chen, X., "An Efficient Methodology for Daily Waste Treatment Using Reverse Logistics Network: Focused on D Metropolitan City," Journal of the Korea Industrial Information Systems Research, Vol. 20, No. 2, pp. 91-111, 2015.
- [19] Yun, Y. S., "Analysis of Regionally Centralized and Decentralized Multistage Reverse Logistics Networks Using Genetic Algorithm," Journal of the Korea Industrial Information Systems Research, Vol. 19, No. 4, pp. 87-104, 2014.



윤영수 (Yun YoungSu)

- 정회원
- 대구대학교 산업공학과 학사
- 건국대학교 산업공학과 석사,박사
- Waseda University 정보생산시스템연구과 박사
- 현재: 조선대학교 경영학부 교수
- 관심분야: 물류/SCM, 유전알고리즘, 생산최적화



추룬수크 아누다리 (Chuluunsukh Anudari)

- 비회원
- 전남대학교 경영학과 학사
- 현재: 조선대학교 경영학과 박사과정
- 관심분야: SCM, 생산최적화



진성 (Chen Xing)

- 정회원
- 중국 서북 제2 민족대학교 경영학과 학사
- 전남대학교 무역학과 석사
- 현재: 조선대학교 경영학과 박사과정
- 관심분야: SCM, 생산최적화