Journal of the Korea Industrial Information Systems Research Vol.25 No.2, Apr. 2020 : 115-127
http://dx.doi.org./10.9723/jksiis.2020.25.2.115 ISSN:1229-3741

모바일폰을 위한 지속가능한 폐쇄루프 공급망 모델: 혼합유전알고리즘 접근법+

(Sustainable Closed-loop Supply Chain Model for Mobile Phone: Hybrid Genetic Algorithm Approach)

윤 영 수1)*
(YoungSu Yun)

요 약 본 연구에서는 모바일폰의 생산, 유통 및 사용 후 처리과정을 효율적으로 관리하기 위한 지속가능한 폐쇄루프 공급망 (Sustainable close-loop supply chain: SCLSC) 모델을 제안한다. 제안된 SCLSC모델의 지속가능성 (Sustainability)을 강화하기 위해 경제적 요인인 총이익 최대화, 환경적 요인인 총 CO2 방출량 최소화, 사회적 요인인 사회적 영향력 최대화를 각각 고려하였다. 이들 세 가지의 요인은 제안된 SCLSC모델의 수리화 모델링 과정에서 목적함수로 표현된다. 따라서 제안된 SCLSC모델은 다목적 최적화 (Multi-objective optimization) 문제로 고려될 수 있으며, 이를 해결하기 위해 혼합유전알고리즘 (Hybrid genetic algorithm: HGA) 접근법을 사용하였다. 수치실험에서는 세 가지 상이한 규모의 SCLSC모델을 제시하고, 이를 다양한 수행도 척도들을 사용하여 HGA 접근법의 우수성을 확인하였다.

핵심주제어: 모바일폰, 지속가능한 폐쇄루프 공급망 모델, 다목적 최적화, 혼합유전알고리즘

Abstract In this paper, a sustainable close-loop supply chain (SCLSC) model is proposed for effectively managing the production, distribution and handling process of mobile phone. The proposed SCLSC model aims at maximizing total profit as economic factor, minimizing total CO_2 emission amount as environmental factor, and maximizing social influence as social factor in order to reinforce sustainability in it. Since these three factors are represented as each objective function in modeling, the proposed SCLSC model can be taken into consideration as a multi-objective optimization problem and solved using a hybrid genetic algorithm (HGA) approach. In numerical experiment, three different scales of the SCLSC model are presented and the efficiency of the HGA approach is proved using various measures of performance.

Keywords: Mobile phone, Sustainable closed-loop supply chain model, Multi-objective optimization, Hybrid genetic algorithm

1. 서 론

국내외 기업 간의 극심한 경쟁으로 인해 제품 생산, 유통 및 물류과정에서 발생하는 대규모의 재고문제, 저효율 및 고비용 문제 등은 기업들에게

* Coressponding Author: ysyun@chosun.ac.kr
+ 이 논문은 2019학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.
Manuscript received March 03, 2020 / revised March 14, 2020 / accepted March 23, 2020
1) 조선대학교 경상대학 경영학부 교수

효율적인 공급망관리 (Supply chain management: SCM)의 필요성을 한층 더 강화시키고 있다.

SCM의 개념은 1980년 초 Oliver and Webber (1982)에 의해 처음으로 언급되었으며, 이후로 많은 연구자들에 의해 다양한 적용기법들이 제시 (Christopher, 1992; La Londe et al., 1994; Mentze, 2001)되어 왔다. 2000년에 들어서면서부터는 '폐기전기전자제품의 의무 재활용에 관한 규제 (Waste electrical and electronic equipment: WEEE)'와 유럽연합에서 판매되는 전자제품에 대해 환경 관련 규제인'전기전자제품 유해물질 사용 제한 지침 (Restriction of the use of hazardous substances in electrical and electronic equipment: RoHS)' 등이 시행되면서 SCM의 물류흐름에 환경 관련 요소를 포함하여야 한다는 인식이 확산 되었다. 즉 제품의 생산, 유통의 단계를 거쳐 최종적으로 고객에게 전달되는 전방향물류 (Forward logistics: FL)와 사용 후 제품의 수거, 재활용 (Recycling), 재사용 (Reuse) 혹은 폐기 (Disposal) 과정을 위한 역물류 (Reverse logistics: RL)를 함께 고려하는 폐쇄루프 공급망 (Closed-loop supply chain: CLSC) 모델의 필요성이 대두되었다 (Yun, 2016; Wang et al., 2010; Amin et al., 2012).

또한 2002년에는 유엔 지속가능발전 세계정상회의 (Word summit on sustainable development)에서 지속가능성 (Sustainability)'를 이 시대의 중요한 이슈로 내세우면서 지속 가능한 폐쇄루프 공급망 (Sustainable closed-loop supply chain: SCLSC) 모델에 대한 관심이 더욱 높아지게 되었다. SCLSC 모델은 기존의 CLSC 모델에 경제적, 환경적 및 사회적 요인 (Economic, environmental and social factors)을 함께 고려하는 모델로서 장기적으로 CLSC 모델을 지속 가능하게 관리하는 것을 의미한다 (Mota et al., 2015; Sahebjamnia et al., 2017).

SCLSC 모델에서 특히 중요한 것은 FL 단계를 거쳐 고객에게 전달된 제품이 RL 단계에서 어떻게 처리되는 것이 효율적이냐 하는 것이다. 일반적으로 RL 단계에서의 처리는 크게 재사용, 재활용, 폐기로 구분할 수 있으며, 이 중에서 재사용 및 재활용의 비율이 높을수록 경제적 및 환경적 요인의 강점을 강조할 수 있다. 예를 들어 모바일폰과 같은 전자제품의 경우에는 제품수명주기 (Product life cycle)가 짧고, 고성능, 고사양을 요구하는 고객의 더 높아지 구매욕구로 인해 막대한 양의 폐기 모바일폰이 발생하고 있는 상황이다. Balde et al. (2017)의 연구에 따르면 전 세계 폐기 전자제품 발생량이 44.7백만(Mt)에 도달했으며, 이 중에서 47%는 모바일폰을 포함한 중·소형 전자제품이 차지하고 있다고 발표하였다. 한국의 경우에도 20대 이상 소비자의 85% 이상이 모바일폰을 사용하고 있고, 모바일폰 사용자의 30% 이상이 모바일폰을 신제품으로 변경한지 1년 넘지 않는 것으로 나타났다. 따라서 모바일폰의 높은 사용률과 짧은 수명주기는 폐기 모바일폰 발생량을 증가시키는 것으로 이어지고 있으며, 모바일폰 내에 금, 은, 팔라듐, 구리, 코발트, 리튬과 유가금속뿐만 아니라 다양한 오염물질이 포함되어 있기 때문에 이를 단순히 폐기 처분할 경우에는 환경오염이 발생할 가능성이 매우 높으며, 경제적인 비용 증가 또한 문제점으로 지적되고 있다. 따라서 폐기 처분 대신에 재사용 및 재활용 비율을 높이는 것이 경제적 및 환경적 요인을 강화시킬 수 있을 것이다 (Chuluunsukh, 2020).

이러한 경향에 따라 2000년대 중·후반부터 SCLSC 모델 구축 및 운영에 대한 많은 연구들이 활발하게 진행되고 있다 (Kim and Jung 2007; Jang et al., 2010; John et al., 2018; Ahmadi et al., 2019). 국내의 경우, Kim and Jung (2007)은 모바일폰을 위한 SCLSC 모델 구축 및 운영에 관한 연구를 수행하였다. 먼저 FL 단계에서 부품공급자 → 모바일폰생산자 → 분배센터 → 이동통신사업자 → 고객으로 모바일폰이 전달되며, RL 단계에서 고객 → 이동통신사업자 → 고객 혹은 폐기 단계의 구조를 가지고 있다. 즉 RL 단계에서 고객으로부터 수거되는 사용 후 모바일폰은 이동통신사업자로 전달되며, 이동통신사업자는 수거된 사용 후 모바일폰을 검사, 수리 등의 과정을 거쳐 재사용 가능한 모바일폰은 다시 고객에게 재판매하며, 재사용이 불가능한 모바일폰은 폐기하게 된다. 하지만 이들의 연구는 RL 단계가 너무 단순하며, 특히 이동통신사업자가 검사 및 수리 등의 과정을 진행하는 것이 현실적으로 한계가 있다는 점을 간과한 것이 문제점으로 지적된다.

국외의 경우, John et al. (2018) 연구에서는 인도의 사례를 중심으로 사용 후 모바일폰에 대한

효율적 처리과정을 위한 SCLSC 모델을 제안하였다. 이들의 연구에서는 고객으로 부터 수거된 사용후 모바일폰을 분해센터 (Disassembly center)로 보내 분해한 다음 재사용 가능한 모바일폰은 2차시장 (Secondary market)을 통해 재판매하고, 재활용 가능한 부품은 재활용센터 (Recycling center)를 통해 재활용되어 재사용하며, 재사용 및 재활용이 불가능한 모바일폰 및 부품은 폐기센터 (Disposal center)로 보내 폐기처분한다. 이러한 과정을 통해 경제적 요인 (재사용 및 재활용을 추가 수익 창출)과 환경적 요인 (재사용 및 재활용 비율 증가로 인한 환경오염 문제 감소)을 동시에 강화시킬 수 있다. 하지만 이들의 연구는 RL 단계에서의 경제적 및 환경적 요인만을 주로 강조한 것이며, FL 단계를 고려하지 않았기 때문에 SCLSC 모델이라고 보기에는 어려운 측면이 있다.

Ahmadi et al. (2019)의 연구에서는 모바일폰의 생산, 유통 및 사용 후 처리를 고려한 SCLSC 모델을 제안하였다. 이를 위해 공급업체 → 제조업체 → 소매점 → 1차 고객으로 연결되는 FL 단계와 1차 고객 → 소매점 혹은 수거센터 → 2차 고객 (중고품 구매 고객) → 폐기센터로 연결되는 RL 단계를 고려하였다. 이들의 연구는 이전의 연구 (Kim and Jung, 2007; John et al., 2018)에 비해 FL과 RL 단계를 체계적으로 연결하고, 각 단계별로 다양한 센터 혹은 업체를 배치하여 효율적인 모바일폰 생산, 유통 및 처리과정을 보여주었다는 측면에서는 장점이 있지만 SCLSC 모델에서 고려하여야 하는 경제적, 환경적 및 사회적 요인을 제대로 반영하고 있지 않았다는 단점이 있다.

이상의 기존 연구들을 살펴보면 대부분이 모바일폰의 생산, 유통 및 처리를 위해 다양한 단계를 고려한 SCLSC 모델을 제시하였지만 SCLSC 모델에서 고려하여야 하는 세 가지 요소 (경제적, 환경적, 사회적 요소)를 제대로 반영하고 있지 못하였다는 한계점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 기존 연구들의 한계점으로 지적된 경제적, 환경적, 사회적 요소을 모두 고려한 SCLSC 모델을 제안하며, 이를 국내의 모바일폰 산업에 적용하여 그 효율성을 확인하고자 한다.

제 2장에서는 국내 모바일폰의 생산, 유통 및 사용 후 처리과정을 효율적으로 운영하기 위한 SCLSC 모델 구축을 제안한다. 제 3장에서는 제안된 SCLSC 모델을 수리적인 방법으로 표현하며, 이를 해결하기 위해 혼합유전알고리즘 (Hybrid genetic algorithm; HGA) 접근법을 제 4장에서 제안한다. 제 5장에서는 세 가지 규모를 가진 SCLSC 모델을 제시하고, 이를 HGA 접근법으로 해결한다. 또한 HGA 접근법의 효율성 검증을 위해 기존의 접근법들과의 수행도 비교분석을 실시한다. 마지막으로 제 6장에서는 본 연구결과의 우수성 및 향후 SCLSC 모델 확장성에 대해 언급한다.

2. 국내 모바일폰을 위한 SCLSC 모델

국내 모바일폰을 위한 SCLSC 모델은 Kim and Jung (2007)의 연구에서 처음으로 제시되었다. 하지만 이들의 연구는 현실적인 상황에서 적용하기에는 다음과 같은 몇몇 한계점을 가지고 있다. 첫째, Kim and Jung (2007)의 연구에서는 이동통신사업자가 모바일폰의 판매 및 수거를 담당하는 역할을 수행하였지만, 현실적인 상황은 이동통신사업자 (예를 들어, SKT, LGT 등)로 부터 모바일폰을 공급받은 직영 또는 일반 대리점을 통해 판매를 하고 있으며, 수거의 경우에도 전문적인 수거업체를 통해 수거과정이 이루어지고 있다. 따라서 이러한 현실적인 상황을 반영하여 이동통신 사업자 다음 단계로 직영 또는 일반 대리점 기능을 수행하는 소매점 (Retailer)과 수거센터 (Collection center)를 함께 고려하는 것이 보다 현실적이다.

둘째, Kim and Jung (2007)의 연구에서는 부품공급업체의 부품공급 → 모바일폰생산업체의 모바일폰 생산 단계를 제시하였다. 하지만 모바일폰은 단순히 부품들의 조립으로 생산되는 것이 아니라 다양한 부품이 결합된 모듈 (Module) 형태로 공급되어 생산되고 있다. 예를 들면 모바일폰은 스피커 및 마이크 모듈, 안테나 모듈, 배터리 모듈, 디스플레이 모듈, 카메라 모듈 등 다양한 모듈로 이루어져 있다. 따라서 이러한 현실적인 상황을 반영하여 FL에서 모바일폰생산업체 단계 이전에 모듈제조업체를 고려할 필요가 있다.

셋째. Kim and Jung (2007)의 연구에서는

SCLSC 모델에서 고려하고 있는 경제적, 환경적 및 사회적 요인 중에서 주로 경제적 요인만을 집중적으로 고려하였다. 즉 환경적 및 사회적 요인에 대한 고려는 미비한 실정이다. 따라서 진정한 의미의 SCLSC 모델의 구축을 위해서 이들 세 가지 요인 (경제적, 환경적 및 사회적 요인)을 함께 고려할 필요가 있다

이상에서 살펴본 것과 같이 국내 모바일폰을 위한 기존연구 (Kim and Jung, 2007)의 한계점을 극복하고 보다 현실적인 측면을 강화한 SCLSC 모델을 Fig. 1과 같이 제안한다. Fig. 1에서 FL 단계의 원자재공급업체 (Raw material supplier: RM)는 원자재 및 부품을 모듈제조업체 (Module manufacturer: MM)로 보내며, 여기서는 공급받은 원자재를 이용하여 모듈을 조립한다. 조립된 모듈은 제조업체 (Product manufacturer: PM)로 보내서 모바일폰 생산에 사용된다. 생산된 모바일폰은 물류센터 (Distribution center: DC)와 이동통신 사업자 (Telecommunication company: TC)를 거쳐 판매처인 소매점(Retailer: RT)으로 보내어지고, 여기서 1차 고객 (First customer: FC)이 모바일폰을 구매한다.

RL 단계에서는 먼저 FC의 사용 후 모바일폰 중에서 재사용 혹은 재활용이 가능한 $\alpha 1\%$ 비율의 모바일폰은 수집센터 (Collection center: CoC)를 거쳐 회복센터 (Recovery center: ReC)로 보내고, 재사용 혹은 재활용이 불가능한 $\alpha 2\%$ 비율의 모바일폰은 폐기센터 (Disposal center: DiC)로 보내 폐기 처리한다. ReC에서는 수거된 모바일폰에 대해 분해, 재작업 등의 과정을 거쳐 $\beta 1\%$ 비율의 재사용이 가능한 모바일폰은 2차고객 (Secondary customer: SeC)을 통해 재판매하고, $\beta 2\%$ 비율의 재활용이 가능한 원자재 및 부품 등은 FL 단계의 RM으로 보내서 재활용되게 한다.

Fig. 1의 SCLSC 모델 구축에서 고려된 경제적, 환경적 및 사회적 요인은 다음과 같다. 경제적 요인으로는 SCLSC 모델 운영과정에서 발생하는 총이익 최대화를 고려한다. 총이익은 운영과정에서 발생하는 총수익과 총비용을 함께 사용한다. 환경적 요인으로는 SCLSC 모델의 각 단계를 통해 원자재, 부품 및 제품 수송과정에서 배출되는 CO_2량의 최소화를 고려한다. 사회적 요인으로는 모바일폰을 생산하는 제조업체에서 신기술 도입시 생성되는 신규 일자리 수, 이로 인한 기존 일자리 감소 수 등을 고려한다. 본 연구에서 고려하는 경제적, 환경적 및 사회적 요인의 세부 항목들은 이미 기존연구들에서 다양하게 고려된 항목이며, 그 적용성 및 효용성을 입증받았다 (Paksoy et al., 2011; Devika et al., 2014; Talaei et al., 2016; Arampantzi et al., 2016).

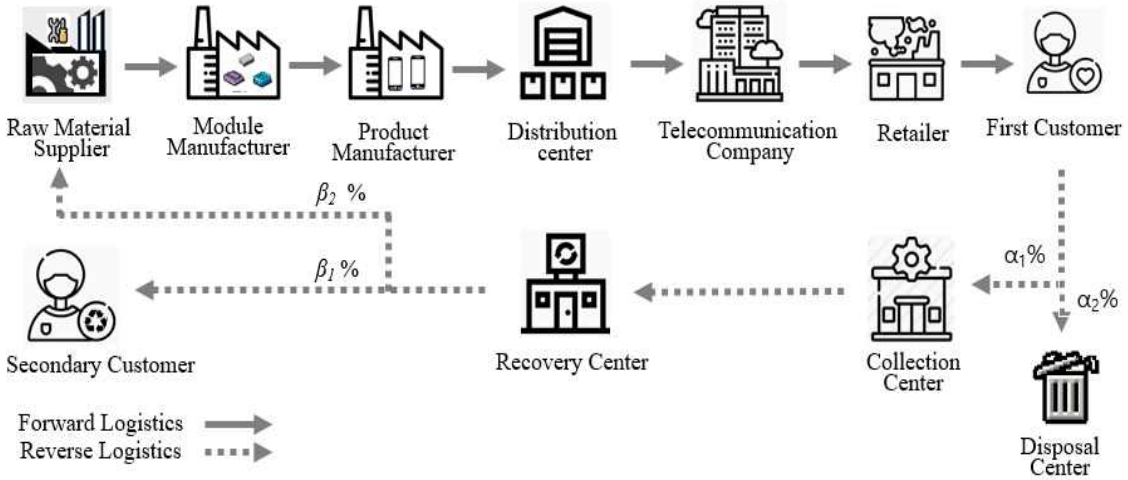

Fig. 1 Conceptual Structure of SCLSC Model for Mobile Phone in Korea

3. 수리모형

Fig. 1에서 제안한 SCLSC 모델의 이행을 위한 수리모형을 제시한다. 먼저 수리모형에서 고려된 가정은 다음과 같다.

- RM, MM, PM, DC, TC, RT, CoC, ReC는 각 단계에서 오직 한 군데만 개설되며, 나머지 FC, DiC, SeC는 전부 개설된다.
- FL 및 RL의 모든 단계 간에 발생하는 단위당 수송비용, RM, MM, PM, DC, TC, RT, CoC, ReC, DiC 에서의 처리비용 및 고정비용은 사전에 알려져 있다.
- FL 및 RL의 각 단계 간 수송과정에서 배출되는 CO_2량, PM에서 신기술을 도입했을 때 생성되는 신규 일자리 수, 기존 일자리 감소 수에 대한 정보는 사전에 알려져 있다.

위에서 제시된 가정들은 SCLSC모델과 같은 네트워크 모델 분석에서 일반적으로 고려하고 있는 가정들이다 (Wang and Hsu, 2010; Yun et al., 2019, 2020). 수리모형에서 사용될 인덱스 (Index), 파라미터 (Parameter) 및 의사결정변수는 다음과 같다.

- 인덱스

r: RM, $r \in R$
m: MM, $m \in M$
p: PM, $p \in P$
d: DC, $d \in D$
t: TC, $t \in T$
c: RT, $c \in C$
a: FC, $a \in A$
i: DiC, $i \in I$
o: CoC, $o \in O$
e: ReC, $e \in E$
b: SeC, $b \in B$

- 파라메터

Fi_r: r 에서의 고정비용
Fi_m: m 에서의 고정비용
Fi_p: p 에서의 고정비용
Fi_d: d 에서의 고정비용
Fi_t: t 에서의 고정비용
Fi_c: c 에서의 고정비용
Fi_o: o 에서의 고정비용
Fi_e: e 에서의 고정비용
Ha_r: r 에서의 단위당 처리비용
Ha_m: m 에서의 단위당 처리비용
Ha_p: p 에서의 단위당 처리비용
Ha_d: d 에서의 단위당 처리비용
Ha_t: t 에서의 단위당 처리비용
Ha_c: c 에서의 단위당 처리비용
Ha_o: o 에서의 단위당 처리비용
Ha_e: e 에서의 단위당 처리비용
Tr_{rm}: r 에서의 m 까지의 단위당 수송비용
Tr_{mp}: m 에서의 p 까지의 단위당 수송비용
Tr_{pd}: p 에서의 d 까지의 단위당 수송비용
Tr_{dt}: d 에서의 t 까지의 단위당 수송비용
Tr_{tc}: t 에서의 c 까지의 단위당 수송비용
Tr_{ca}: c 에서의 a 까지의 단위당 수송비용
Tr_{ai}: a 에서의 i 까지의 단위당 수송비용
Tr_{ao}: a 에서의 o 까지의 단위당 수송비용
Tr_{oe}: o 에서의 e 까지의 단위당 수송비용
Tr_{er}: e 에서의 r 까지의 단위당 수송비용
Tr_{eb}: r 에서의 b 까지의 단위당 수송비용
V_1: 차량의 CO_2 방출량 (단위: km)
Ve_1: 차량 한 대당 실리는 원자재 및 부품의 수
Ve_2: 차량 한 대당 실리는 모듈의 수
Ve_3: 차량 한 대당 실리는 모바일폰의 수
Ve_4: 차량 한 대당 실리는 사용후 모바일폰 개수
N_p: p 에서 신기술 도입으로 인해 생성되는 신규 일자리수
L_p: p 에서 신기술 도입으로 인해 감소되는 기존 일자리수
Nw^p: p 에서 신기술 도입으로 인해 생성되는 신규 일자리수에 대한 가중치
Lw^p: p 에서 신기술 도입으로 인해 감소되는 기존 일자리수에 대한 가중치
S_{ca}: c 에서 a 에게 판매되는 모바일폰의 단위당

판매가격

S_{eb}: e 에서 b 에게 판매되는 모바일폰의 단위당 판매가격

S_{er}: e 에서 r 에게 판매되는 원자재 및 부품의 단위당 판매가격

- 의사결정변수

q_{rm}: r 에서 m 로 보내어지는 수송량

q_{mp}: m 에서 p 로 보내어지는 수송량

q_{pd}: p 에서 d 로 보내어지는 수송량

q_{dt}: d 에서 t 로 보내어지는 수송량

q_{tc}: t 에서 c 로 보내어지는 수송량

q_{ca}: c 에서 a 로 보내어지는 수송량

q_{ai}: a 에서 i 로 보내어지는 수송량

q_{ao}: a 에서 o 로 보내어지는 수송량

q_{oe}: o 에서 e 로 보내어지는 수송량

q_{eb}: e 에서 b 로 보내어지는 수송량

q_{er}: e 에서 r 로 보내어지는 수송량

d_{rm}: r 에서 m 까지의 수송거리

d_{mp}: m 에서 p 까지의 수송거리

d_{pd}: p 에서 d 까지의 수송거리

d_{dt}: d 에서 t 까지의 수송거리

d_{tc}: t 에서 c 까지의 수송거리

d_{ca}: c 에서 a 까지의 수송거리

d_{ai}: a 에서 i 까지의 수송거리

d_{ao}: a 에서 o 까지의 수송거리

d_{oe}: o 에서 e 까지의 수송거리

d_{eb}: e 에서 b 까지의 수송거리

d_{er}: e 에서 r 까지의 수송거리

c_r: r 의 용량

c_m: m 의 용량

c_p: p 의 용량

c_d: d 의 용량

c_t: t 의 용량

c_c: c 의 용량

c_a: a 의 용량

c_i: i 의 용량

c_o: o 의 용량

c_e: e 의 용량

c_b: b 의 용량

x_r: 만일 r 이 개설되면 1, 그렇지 않으면 0

x_m: 만일 m 이 개설되면 1, 그렇지 않으면 0

x_p: 만일 p 가 개설되면 1, 그렇지 않으면 0

x_d: 만일 d 가 개설되면 1, 그렇지 않으면 0

x_t: 만일 t 가 개설되면 1, 그렇지 않으면 0

x_c: 만일 c 가 개설되면 1, 그렇지 않으면 0

x_o: 만일 o 가 개설되면 1, 그렇지 않으면 0

x_e: 만일 e 가 개설되면 1, 그렇지 않으면 0

n_p: 만일 p 에서 신기술이 사용되면 1, 그렇지 않으면 0

제안된 SCLSC 모델은 세 가지 요인(경제적, 환경적, 사회적 요인)을 고려하며 이들 각각은 목적함수로 표현된다. 첫 번째 목적함수 $F_1(x)$는 경제적 요인으로 총 이익 (Total Profit: TP) 최대화를 고려하며, TP는 총수익 (Total Revenue: TR)에서 총비용 (Total Cost: TC)를 제외한 것으로 식 (1), (2), (3)과 같이 계산한다.

$$TR = \sum_{C} q_{ca} \cdot x_c \cdot s_{ca} + \sum_{e} q_{eb} \cdot x_e \cdot s_{eb} + \sum_{e} q_{er} \cdot x_e \cdot s_{er} \quad (1)$$

$$TC = [\sum_{r} Fi_r \cdot x_r + \sum_{m} Fi_m \cdot x_m + \sum_{p} Fi_p \cdot x_p + \sum_{d} Fi_d \cdot x_d + \sum_{t} Fi_t \cdot x_t + \sum_{c} Fi_c \cdot x_c + \sum_{o} Fi_o \cdot x_o + \sum_{e} Fi_e \cdot x_e] + [\sum_{r} Ha_r \cdot c_r \cdot x_e + \sum_{m} Ha_m \cdot c_m \cdot x_m + \sum_{p} Ha_p \cdot c_p \cdot x_p + \sum_{d} Ha_d \cdot c_d \cdot x_d + \sum_{t} Ha_t \cdot c_t \cdot x_t + \sum_{c} Ha_c \cdot c_c \cdot x_c + \sum_{o} Ha_o \cdot c_o \cdot x_o + \sum_{e} Ha_e \cdot c_e \cdot x_e] + [\sum_{r}\sum_{m} Tr \cdot c_r \cdot x_r \cdot x_m + \sum_{m}\sum_{p} Tr_{mp} \cdot c_m \cdot x_m \cdot x_p + \sum_{p}\sum_{d} Tr_{pd} \cdot c_p \cdot x_p \cdot x_d + \sum_{d}\sum_{t} Tr_{dt} \cdot c_d \cdot x_d \cdot x_t + \sum_{t}\sum_{c} Tr_{tc} \cdot c_t \cdot x_t \cdot x_c + \sum_{c} Tr_{ca} \cdot c_c \cdot x_c + Tr_{ai} \cdot c_a + \sum_{o} Tr_{ao} \cdot c_a \cdot x_o + \sum_{o}\sum_{e} Tr_{oe} \cdot c_o \cdot x_o \cdot x_e + \sum_{e}\sum_{r} Tr_{er} \cdot c_e \cdot x_e \cdot x_r + \sum_{e} Tr_{eb} \cdot c_e \cdot x_e] \quad (2)$$

$$\max \; F_1(x) = TR - TC \quad (3)$$

식(1)은 RT에서 FC, ReC 에서 RM, ReC에서 SeC로 각각 보내어져 판매되는 원자재, 부품 및 제품 (모바일폰 및 사용후 모바일폰)의 수익을 의미한다. 식(2)는 각 단계 간 발생하는 고정비용, 처리비용, 수송비용을 표시하고 있다.

두 번째 목적함수 $F_2(x)$는 환경적 요인으로 각 단계 간 원자재, 부품 및 제품의 수송과정에서 배출되는 CO_2량의 최소화를 고려하며 식 (4)와 같이 계산된다.

$$\min\ F_2(x) = \sum_r \sum_m d_{rm}.x_r.x_m.(\frac{c_r}{Ve_1}).V_1 + \sum_m \sum_p d_{mp}.x_m.x_p.(\frac{c_m}{Ve_2}).V_1$$
$$\sum_p \sum_d d_{pd}.x_p.x_d.(\frac{c_p}{VE_3}).V_1 + \sum_d \sum_t d_{dt}.x_d.x_t.(\frac{c_d}{VE_3}).V_1 +$$
$$\sum_t \sum_c d_{tc}.x_t.x_c.(\frac{c_t}{VE_3}).V_1 + \sum_c d_{ca}.x_c.(\frac{c_c}{VE_3}).V_1 + d_{ai}.(\frac{\alpha 2\%.c_a}{VE_3}).V_1 +$$
$$\sum_o d_{ao}.x_o(\frac{\alpha 1\%.c_a}{VE_3}).V_1 + \sum_o \sum_e d_{oe}.x_o.x_e.(\frac{c_o}{VE_3}).V_1 +$$
$$\sum_e d_{eb}.x_e.(\frac{\beta 1\%.c_e}{VE_4}).V_1 + \sum_e d_{er}.x_e.x_r.(\frac{\beta 2\%.c_e}{VE_1}).V_1 \quad (4)$$

세 번째 목적함수 $F_3(x)$는 사회적 요인으로 모바일폰을 생산하는 제조업체에서 신기술 도입 (Özceylan et al., 2017)시 생성되는 신규 일자리 수, 이로 인한 기존 일자리 감소 수를 고려한 사회적 영향력 최대화를 이용하며 식 (5)와 같이 계산된다.

$$\max\ F_3(x) = Nu^p.\sum_p (N_p.n_p.x_p) - Lu^p.\sum_p (L_p.n_p.x_p) \quad (5)$$

식(3), (4), (5)의 목적함수를 최적화시키기 위한 제약조건은 다음과 같다.

$$\sum_r \sum_m q_{rm}.x_r.x_m - \sum_m c_m.x_m \le 0 \quad (6)$$
$$\sum_m \sum_p q_{mp}.x_m.x_p - \sum_p c_p.x_p \le 0 \quad (7)$$
$$\sum_p \sum_d q_{pd}.x_p.x_d - \sum_d c_d.x_d \le 0 \quad (8)$$
$$\sum_d \sum_t q_{dt}.x_d.x_t - \sum_t c_t.x_t \le 0 \quad (9)$$
$$\sum_t \sum_c q_{tc}.x_r.x_c - \sum_c c_c.x_c \le 0 \quad (10)$$
$$\sum_c \sum_a q_{ca}.x_c - \sum_a c_a \le 0 \quad (11)$$
$$\sum_a \sum_o q_{ao}.x_o - \sum_o c_o \le 0 \quad (12)$$
$$\sum_a \sum_i q_{ai} - \sum_i c_i \le 0 \quad (13)$$
$$\sum_o \sum_e q_{oe}.x_o.x_e - \sum_e c_e.x_e \le 0 \quad (14)$$
$$\sum_e \sum_b q_{eb}.x_e - \sum_b c_b \le 0 \quad (15)$$
$$\sum_e \sum_r q_{er}.x_e.x_r - \sum_r c_r \le 0 \quad (16)$$
$$\sum_r x_r = 1 \quad (17)$$
$$\sum_m x_m = 1 \quad (18)$$
$$\sum_p x_p = 1 \quad (19)$$
$$\sum_d x_d = 1 \quad (20)$$
$$\sum_t x_t = 1 \quad (21)$$
$$\sum_c x_c = 1 \quad (22)$$
$$\sum_o x_o = 1 \quad (23)$$
$$\sum_e x_e = 1 \quad (24)$$
$$x_r = 0,1, \quad \forall R \quad (25)$$
$$x_m = 0,1, \quad \forall M \quad (26)$$
$$xp = 0,1, \quad \forall P \quad (27)$$
$$x_d = 0,1, \quad \forall D \quad (28)$$
$$x_t = 0,1, \quad \forall T \quad (29)$$
$$x_c = 0,1, \quad \forall C \quad (30)$$
$$x_o = 0,1, \quad \forall O \quad (31)$$
$$x_e = 0,1, \quad \forall E \quad (32)$$
$$c_r, c_m, c_p, c_d, c_t, c_c, c_a, c_i, c_o, c_e, c_b \ge 0, \forall r \in R, \forall m \in M, \forall p \in P, \forall d \in D, \forall t \in T, \forall c \in C, \forall a \in A, \forall i \in I, \forall o \in O, \forall e \in E, \forall b \in B \quad (33)$$

식 (6)에서 (16)까지는 단계 간 처리가능용량을 제약하고 있으며, 식 (17)에서 (24)까지는 각 단계에서 오직 한 군데의 설비만 개설되어야 한다는 제약이다. 식 (25)에서 (32)까지는 각 단계에서의 설비 개설여부를 제약하며, 식 (33)은 비부정수 (Non-negativity)를 가져야 한다는 제약이다.

4. 혼합유전알고리즘 접근법

SCLSC 모델을 포함한 대부분의 복잡한 네트워크 문제들은 Np-complete (Gen and Cheng, 2000; Savaskan et al., 2004)로 알려져 왔다. 이러한 문제의 최적화를 위해 메타휴리스틱 (Meta-heuristics) 접근법을 활용한 연구가 많이 진행되었다 (Min et al. 2006; Yun et al., 2018, Yun and Chuluunsuch, 2018). 하지만 이러한 메타휴리스틱 접근법의 경우에도 단일 접근법만을 사용하여 해를 구하는 것 보다 각 접근법들의 장점을 혼합한 혼합형알고리즘 접근법을 이용하는 것이 해의 품질 측면에서 더 우수하다는 연구결과가 발표되었다 (Gen and Cheng, 2000; Chen et al., 2018; Yun et al., 2018).

따라서 본 연구에서도 혼합형알고리즘 접근법을 이용하여 SCLSC 모델의 최적해를 구한다. 제안된 혼합형알고리즘은 기존의 유전알고리즘

(Genetic algorithm: GA)과 쿠쿠탐색 (Cuckoo search: CS) 접근법을 혼합한 HGA 접근법을 사용한다. HGA 접근법은 GA의 장점인 전역적 탐색 (Global search) 능력과 CS의 장점인 지역적 탐색 (Local search)를 함께 가지고 있으며, 탐색 초기에는 GA를 이용하여 탐색공간 전체에 대한 전역적 탐색을 실시한다. 이러한 과정을 통해 구해진 전역적 해들에 대해 그 해들 주위 지역을 집중적으로 탐색하는 지역적 탐색을 실시하여 더 우수한 해를 찾는 과정을 반복한다. HGA 접근법의 구체적인 이행과정은 Fig. 2와 같다.

---

procedure: proposed HGA approach
begin
$g \leftarrow 0$ // g: generation number
randomly produce parent population $P(g)$ by real-number representation scheme;
extract Pareto optimal solutions $E(P)$ from $P(g)$;
while ($g <$ max generation)
produce offspring population $O(g)$ from $P(g)$ by 2X crossover operator (Gen and Cheng, 1997) and random mutation operator (Gen and Cheng, 1997);
update $E(P)$ using $O(g)$;
for each solution x_i of $O(g)$ **do**
generate a new solution x_n from x_i by Lévy flight scheme (Yang and Deb, 2009);
randomly select another solution x_j in $O(g)$;
if ($F(x_n) > F(x_j)$) **then** CS population $CS(g) \leftarrow x_n$
end for
abandon worst solutions (w_n) with a fraction rate;
randomly regenerate new solutions x_{ns} as many as w_n;
$CS(g) \leftarrow x_{ns}$
update $E(P)$ using $CS(g)$;
reproduce $P(g+1)$ using $O(g)$ and $CS(g)$ by elitist selection scheme (Gen and Cheng, 1997);
$g \leftarrow g+1$;
end while
output $E(P)$;
end;

Fig. 2 Implementation Structure of HGA Approach

5. 수치예제

수치예제에서는 Table 1에서 제시된 세 가지 상이한 규모의 문제들에 대해 3장 수리모형에서 제안된 SCLSC 모델이 이행되며, 이에 필요한 다양한 데이터 (예를 들어, 고정비용, 단위당 수송비용, 단위당 처리비용 등)들은 Microsoft Excel을 이용하여 일정한 발생 범위를 지정한 후 랜덤하게 발생시켜 사용하였다.

제안된 HGA 접근법의 수행도 비교를 위해 메타휴리스틱 접근법 중의 하나인 단일형알고리즘 GA (Gen and Cheng., 1997) 접근법과 혼합형알고리즘 HGA1 (Kanagaraj et al., 2013) 접근법을 함께 사용한다. HGA 및 기존의 GA, HGA1 접근법은 Windows 환경 (CPU: 3.40GHZ, Intel Core i7-3770, RAM: 8GB)에서 Matlab R2015을 사용하여 프로그래밍 되었다. 모든 접근법에서 사용되는 모수설정은 다음과 같다. 집단의 크기: 20, 교차변이 비율: 0.5, 돌연변이 비율: 0.3, 총세대수: 1,000이며, 각 접근법들의 수행에서 발생되는 각종 데이터의 랜덤성을 제거하기 위해 총 10회를 반복 수행하였다. 또한 각 접근법의 수행도 비교분석을 위해 Table 2와 같은 네 가지 형태의 수행도 척도를 사용하였다. $|S_j|$는 각 접근법들에서 구한 파레토 최적해 (Pareto optimal solution)가 참조해 집합 (Reference solution set)에 얼마나 포함되는 지를 나타내는 척도이다. 즉 파레토 최적해가 참조해 집합에 더 많이 포함될수록 좋은 접근법이라는 것을 의미한다. $R_{NDS}(S_j)$는 각 접근법들에서 구한 파레토 최적해가 참조해 집합에 포함되는 비율을 나타내는 척도이다. 따라서 이 비율이 높을수록 더 많은 파레토 최적해가 참조해 집합에 포함된다는 것을 의미한다. $|S_j|$와 $R_{NDS}(S_j)$는 서로 밀접한 관계가 있다. 즉 $|S_j|$ 값이

Table 1 Three Different Scales for SCLSC Implementation

Scale	No. of RM	No. of MM	No. of PM	No. of DC	No. of TC	No. of RT	No. of FC	No. of CoC	No. of ReC	No. of SeC	No. of DiC
1	15	15	15	15	1	15	1	15	15	1	1
2	25	25	25	25	2	25	1	25	25	1	1
3	35	35	35	35	3	35	1	35	35	1	1

Table 2 Measures of Performance

Measure	Description
$\|S_j\|$	Number of Pareto optimal solutions in reference solution set (S^*) (Ishibushi et al., 2003)
$R_{NDS}(S_j)$	Rates of Pareto optimal solutions in the S^* (Ishibushi et al., 2003)
$DI_R(S_j)$	Average distance between Pareto optimal solutions and the S^* (Ishibushi et al., 2003)
CPU time (sec.)	Average CPU time required for each run

높을수록 $R_{NDS}(S_j)$값도 높아지게 된다. $DI_R(S_j)$는 각 접근법들에서 구한 파레토 최적해와 참조해 집합 사이의 거리를 나타내는 척도이다. 즉 파레토 최적해가 참조해 집합에 더 가깝게 위치할수록 거리가 짧아지게 되며, 이는 해당 접근법이 우수하다는 것을 의미한다. CPU time (sec.)은 각 접근법들이 10회 반복 수행하는데 걸리는 평균 실행시간을 의미한다. 이러한 평균 실행시간은 짧으면 짧을수록 좋다.

제안된 SCLSC 모델의 수리모형이 다목적함수 형태이기 때문에 이를 다음과 같이 세 가지 형태의 세부문제로 구분하여 분석한다.

. Problem 1: min. F_1 and min. F_2
. Problem 2: min. F_1 and max. F_3
. Problem 3: min. F_2 and max. F_3

이러한 분석 방법은 Gen et al. (2018)이 제안한 것으로 다목적함수 문제 분석에 많이 사용되고 있다. Table 1에서 제시된 세 가지 규모(Scale 1, 2, 3)의 SCLSC 모델에 대한 분석 결과는 Table 3, 4, 5와 같다.

Table 3에서 Problem 1의 $|S_j|$ 척도의 경우, 본 연구에서 제안한 HGA 접근법이 총 4개의 파레토 최적해가 참조해 집합에 포함되었으며, 기존의 GA, HGH1 접근법은 각각 1개씩의 파레토 최적해가 참조해 집합에 포함된 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 $R_{NDS}(S_j)$ 척도에 영향을 미치고 있다. 즉 HGA 접근법이 0.666이며, 이 값은 GA, HGH1 접근법이 0.167 값을 구한 것 보다 더 우수한 것을 알 수 있다. 또한 참조해 집합과 각 접근법에서 구한 파레토 최적해와의 거리를 측정하는 DI_R 척도에서도 본 연구에서 제안한 HGA 접근법이 기존 접근법인 GA, HGA1 보다 더 낮은 값을 가지는 것을 알 수 있다. 결국 이러한 척도들을 이용한 결과에 의하면 Problem 1의 경우 HGA 접근법이 GA, HGA1 접근법보다 더 우수하다는 것을 알 수 있다. 다만 CPU time 척도에서는 비교대상인 모든 접근법 (GA, HGA1, HGA)이 거의 비슷한 수행도를 보여주어서 그 우수성을 확인할 수는 없었다.

Problem 2와 3의 경우에도 Problem 1의 경우와 거의 비슷한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다. 즉 CPU time 척도를 제외하고 $|S_j|$, $R_{NDS}(S_j)$, DI_R 척도에서 HGA 접근법의 수행도가 GA, HGA1 접근법의 수행도보다 더 우수한 것을 확인할 수 있다.

Table 4에서 Problem 1의 $|S_j|$ 척도의 경우, HGA 접근법은 구해진 모든 파레토 최적해가 참조해 집합에 포함되었지만, GA와 HGA1 접근법은 하나도 포함되지 않은 것을 확인할 수 있다.

이로 인해 $R_{NDS}(S_j)$, DI_R 척도에서 HGA 접근법의 수행도가 GA와 HGA1 접근법의 수행도보다 월등히 우수한 것을 확인할 수 있다. 다만 Table 3의 분석결과와 마찬가지로 CPU time 척도에서는 HGA 접근법의 우수성을 입증할 수 없

었다. Problem 2와 3의 경우에도 $|S_j|$ 척도에서 HGA 접근법이 각각 2개, 5개의 파레토 최적해가 참조해 집합에 포함되었지만, GA와 HGA1 접근법의 경우 더 적은 수의 파레토 최적해가 참조해 집합에 포함된 것을 확인할 수 있다. 다만 DI_R 척도의 경우에는 Problem 2에서 GA 접근법의 수행도가 HGA1과 HGA 접근법의 수행도보다 더 우수한 결과를 나타내었으며, CPU time 척도에서는 모든 접근법의 수행도에서 별 다른 차이점을 확인할 수 없었다.

Table 5에서 Problem 1의 $|S_j|$ 척도의 경우, HGA 접근법은 4개의 파레토 최적해가 참조해 집합에 포함되었고, HGA1 접근법은 2개가 참조해 집합에 포함되어 HGA 접근법이 HGA1 접근법보다 더 우수한 것을 알 수 있다. 하지만 DI_R 척도에서는 HGA1 접근법이 HGA 접근법보다 더 우수한 수행도를 보여주고 있다. GA 접근법은 $|S_j|$, $R_{NDS}(S_j)$, DI_R 척도에서 가장 열등한 수행도를 보여주고 있는 것을 알 수 있다. Problem 2와 3의 경우에는 $|S_j|$, $R_{NDS}(S_j)$, DI_R 척도에서 HGA 접근법이 GA, HGA1 접근법보다 월등히 우수한 수행도를 보인 것을 확인 할 수 있다. 다만 CPU time 척도에서는 Table 3, 4과 마찬가지로 비교대상인 모든 접근법 (GA, HGA1, HGA)에서 그 우수성을 확인할 수는 없었다.

Fig. 3, 4, 5는 Scale 3에 대해 Problem 1, 2, 3에서 각 접근법 (GA, HGA1, HGA)들의 파레토 최적해들이 참조해 집합에 얼마나 근접하여 위치하고 있는 것을 나타내고 있다.

Fig 3의 경우 본 연구에서 제안한 HGA 접근법의 파레토 최적해 4개가 참조해 집합에 포함된 것을 확인할 수 있다. 하지만 비교대상인 기존의 HGA 접근법은 총 2개의 파레토 최적해가 참조해 집합에 포함되었고, GA 접근법의 파레토 최적해는 참조해 집합에 전혀 포함되지 않은 것을 확인할 수 있다.

이러한 결과는 Table 5의 Problem 1에서 제시된 $|S_j|$ 척도에서 구해진 각 접근법들의 결과와

Table 3 Computation Results of Each Approach in Scale 1

	Problem 1			Problem 2			Problem 3		
Measure	GA	HGA1	HGA	GA	HGA1	HGA	GA	HGA1	HGA
$\|S_j\|$	1	1	4	1	1	5	0	1	1
$R_{NDS}(S_j)$	0.167	0.167	0.666	0.143	0.143	0.714	0.000	0.500	0.500
DI_R	19,421	169,867	14,946	321	369	53	58,918	30,275	22,605
CPU time	52.38	53.48	53.74	52.38	53.48	53.74	52.38	53.48	53.74

Table 4 Computation Results of Each Approach in Scale 2

	Problem 1			Problem 2			Problem 3		
Measure	GA	HGA1	HGA	GA	HGA1	HGA	GA	HGA1	HGA
$\|S_j\|$	0	0	3	1	1	2	1	1	5
$R_{NDS}(S_j)$	0.000	0.000	1.000	0.250	0.250	0.500	0.143	0.143	0.714
DI_R	317,361	12,235	0	0	426	53	85,583	6,296	0
CPU time	52.53	53.59	53.79	52.53	53.59	53.79	52.53	53.59	53.79

Table 5 Computation Results of Each Approach in Scale 3

	Problem 1			Problem 2			Problem 3		
Measure	GA	HGA1	HGA	GA	HGA1	HGA	GA	HGA1	HGA
$\|S_j\|$	0	2	4	0	0	3	0	1	3
$R_{NDS}(S_j)$	0.000	0.333	0.667	0.000	0.000	1.000	0.000	0.250	0.750
DI_R	75,310	0	26,964	176,75	322	0	374	22,544	0
CPU time	53.09	53.61	54.22	53.09	53.61	54.22	53.09	53.61	54.22

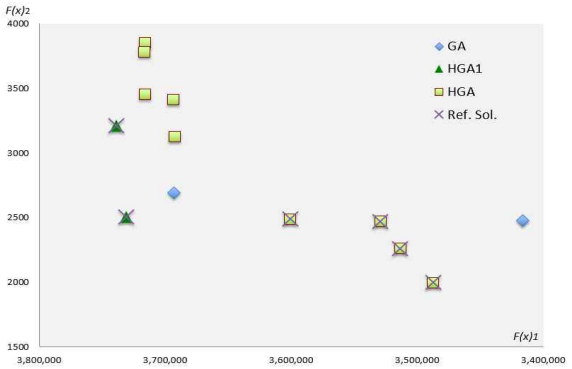

Fig. 3 Pareto Optimal Solutions of Each Approach in Problem 1 of Scale 3

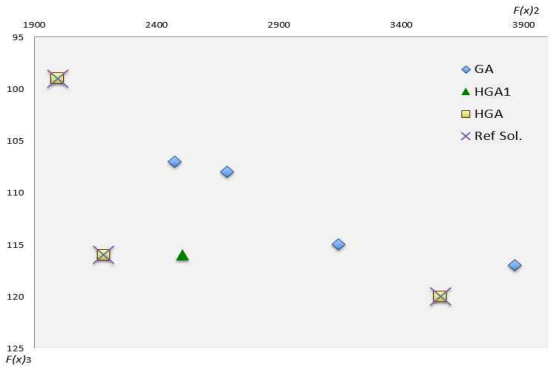

Fig. 4 Pareto Optimal Solutions of Each Approach in Problem 2 of Scale 3

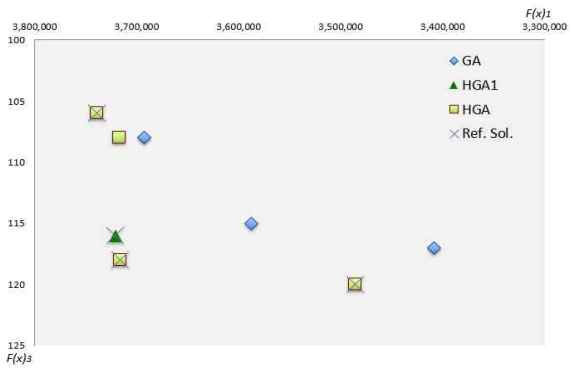

Fig. 5 Pareto Optimal Solutions of Each Approach in Problem 3 of Scale 3

일치한다. Fig. 4와 5에서 HGA 접근법의 파레토 최적해는 각각 3개씩 참조해 집합에 포함되었으며, HGA1 접근법은 각각 0개, 1개가 참조해 집합에 포함되었고, GA 접근법은 참조해 집합에 전혀 포함되지 않은 것을 확인할 수 있다. Fig. 3, 4, 5의 결과분석에 의하면 본 연구에서 제안한 HGA 접근법이 기존의 GA, HGA1 접근법보다 더 우수한 것을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 모바일폰의 생산, 유통 및 사용 후 처리과정을 위한 SCLSC 모델을 제안하였다. 제안된 SCLSC 모델의 지속가능성을 위해 경제적 요인인 총이익 최대화, 환경적 요인인 총 CO_2 방출량 최소화, 사회적 요인인 사회적 영향력 최대화를 각각 고려하였다. 이러한 세 가지 요인은 SCLSC 모델의 이행을 위한 수리모형에서 각각의 목적함수 형태로 표시되었다. 따라서 SCLSC 모델은 다목적 최적화 문제 형태로 고려되며, 이를 해결하기 위해 HGA 접근법을 사용하였다. 수치예제를 통한 다양한 실험결과는 다음과 같이 요약될 수 있다. 세 가지 규모의 SCLSC 모델을 사용한 실험결과 본 연구에서 제안된 HGA 접근법이 $|S_j|$, $R_{NDS}(S_j)$, DI_R 척도에서 비교대상인 기존의 GA, HGA1 접근법들보다 더 우수한 수행도 결과를 나타내었다. 다만 각 접근법들의 파레토 최적해에 도달하는 실행속도를 측정하는 CPU time 척도에서는 비교대상인 모든 접근법이 거의 비슷 한 수행도를 나타내어 그 차이점을 확인할 수 없었다.

이러한 결과분석을 통해 모바일폰의 생산, 유통 및 사용 후 처리과정를 위한 SCLSC모델의 적용가능성을 확인할 수 있었고, 본 연구에서 제안한 HGA 접근법이 SCLSC모델에 대해 우수한 해법인 것을 확인할 수 있었다.

본 연구는 최근 많은 관심을 받고 있는 SCLSC 모델을 모바일폰에 적용하여 분석한 연구이다. 모바일폰의 경우 특히 사용 후 처리 등에 있어서 환경적, 사회적 문제가 많이 대두되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서 제시한 SCLSC 모델은 해당 분야를 연구하는 학자들에게는 하나의 지침서가 될 것으로 판단된다. 또한 본 연구의 수치예제에서 가상의 데이터를 이용하여 SCLSC 모델을 분석하였기에 그 현장 적용능력 측면에서는 분명한 한계점

이 존재한다. 따라서 만일 현장의 데이터를 실제 사용하여 SCLSC 모델을 분석한다면 그 현장 적용 능력은 상당할 것으로 기대한다. 본 연구에서 적용한 HGA 접근법의 경우에도 최근 개발된 다양한 메타휴리스틱 (Meta-heuristics) 접근법들을 함께 사용한다면 더 우수한 효율의 HGA 접근법을 구축할 수 있을 것이다.

References

Ahmadi, S. and Amin, S. H. (2019). An Integrated Chance-constrained Stochastic Model for a Mobile Phone Closed-loop Supply Chain with Supplier Selection, *Journal of Cleaner Production* 226, 988-1003.

Amin, S. H., and Zhang, G. (2012). A Proposed Mathematical Model for Closed-loop Network Configuration based on Product Lift Cycle, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(5), 791-801.

Arampantzi. C., and Minis, I. (2016). A New Model for Designing Sustainable Supply Chain Networks and Its Application to a Global Manufacturer, *Journal of Cleaner Production,* 156, 276-292.

Balde, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., and Stegmann, P. (2017). *Global E-Waste Monitor 2017.*

Chen. X., Yun, Y. S., and Anudari, C. (2018). Optimization of Closed-loop Supply Chain Model using Hybrid Genetic Algorithm Approach for Tire Industry in Korea, *The 12th International Conference on Management Science and Engineering Management (ICMSEM2018),* 1593-1612.

Christopher, M. L. (1992). *Logistics and Supply Chain Management*, London: Pitman Publishing.

Chuluunsukh, A. (2020). Design and Implementation of Sustainable Closed-Loop Supply Chain Model for Mobile Phone, *Ph. D. Dissertation*, Graduate School of Chosun University.

Devika, K., Jafarian. A., and Nourbakhsh, V. (2014). Designing a Sustainable Closed-loop Supply Chain Network based on Triple Bottom Line Approach: A Comparison of Metaheuristics Hybridixation Techniques, *European Journal of Operation Research,* 235, 594-615.

Gen, M., and Cheng, R. (1997). *Genetic Algorithms and Engineering Design*, John-Wiley & Sons, New York.

Gen, M., and Cheng, R. (2000). *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*, John-Wiley & Sons, New York.

Gen, M., Lin, L., Yun, Y. S., and Inoue, H. (2018). Recent Advances in Hybrid Priority-based Genetic Algorithms for Logistics and SCM Network design, *Computers and Industrial Engineering*, 115, 394-412.

Ishibuchi, H., and Murata, T. (1998), A Multi Objective Genetic Algorithm and Its Application to Flowshop Scheduling, *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, 28(3), 392-403.

Jang, Y. C., and Kim, M., (2010), Management of Used & End-of-life Mobile Phone in Korea, *A Review of Resource Conserving Recycle*, 55, 11-19.

John S. T., Sridharam, R., and Ram Kumar, P. N. (2018). Reverse Logistics Network Design: A Case of Mobile Phones and Digital Cameras, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 94, 615-631.

Kanagaraj, G., Phonnambalm, S. G., and Jawahar, N. (2013). A Hybrid Cuckoo Search and Genetic Algorithm for Reliability Redundancy Allocation Problems, *Computers and Industrial Engineering*, 66, 1115-1124.

Kim, K. B., and Jung, B. J. (2007). Eco-friendly Reverse Supply Chain Network Design and Strategic Model for Used Cellular Phones, *Spring Joint Conference on*

Korean Operations Research and Management Science Society and korean Institute of Industrial Engineer.

La Londe, B. J., and Master, J. M. (1994). Emerging Logistics Strategies: Blueprint for the Next Century, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 24(7), 35-37.

Mentze J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., and Min, S. (2001). Defining Supply Chain Management, *Journal of Business Logistics*, 22(2), 1-25.

Min, H., Ko, C. S., and Ko, H. J. (2006). The Spatial and Temporal Consolidation of Returned Products in a Closed-loop Supply Chain Network, *Computers and Industrial Engineering*, 51, 309-320.

Mota, B., Gomes, M. I., Carvalho, A., and Barbosa-Povoa, A. P. (2015). Towards Supply Chain Sustainability: Economic, Environmental and Social Design and Planning, *Journal of Cleaner Production,* 105, 14-27.

Oliver, R. K., and Webber, M. D. (1982). *Supply Chain Management: Logistics Catches up with Strategy, Outlook,* Allen and Hamilton Inc., New York.

Özceylan, E., Demirel, N., Çetinkaya, C., Demirel, E. (2017). A Closed-loop Supply Chain Network Design for Automotive Industry in Turkey, *Computers and Industrial Engineering,* 113, 729 - 745.

Paksoy T. (2010). Optimizing a Supply Chain Network with Emission Trading Factor, *Scientific Research and Essays*, 5(17), 2535-2546.

Sahebjamnia, N., Fathollahi-Fard, A. M., and Keshteli, M. H. (2017). Sustainable Tire Closed-loop Supply Chain Network Design: Hybrid Metaheuristic Algorithms for Large-scale Networks, *Journal of Cleaner Production,* 196, 273-296.

Savaskan, R. C., Bhattacharya, S., and Van Wassenhove, L. V. (2004). Closed-loop Supply Chain Models with Product Remanufacturing, *Management Science*, 50(2), 239-252.

Talaei, M., Moghaddam, B. F., Pishvaee, M. S., Bozorgi-Amiri, A., and Gholamnejad, S. A. (2016). A Robust Fuzzy Optimization Model for Carbon-efficient Closed-loop Supply Chain Network Design Problem: A Numerical Illustration in Electronics Industry, *Journal of Cleaner Production*, 113, 662-673.

Wang, H. F., and Hsu, H. W. (2010). A Closed-loop Logistic Model with a Spanning Tree based Genetic Algorithm, *Computers and Operations Research,* 37(2), 376-389.

Yang X. S., and Deb, S. (2009). Cuckoo Search via Lévy Flights, *World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing,* 210 - 214.

Yun, Y. S., Chuluunsukh, A., and Chen, X. (2016). Hybrid Genetic Algorithm Approach using Closed-Loop Supply Chain Model, *Korea Society of Industrial Information Systems*, 21(4), 31-41.

Yun, Y. S., Chuluunsukh, A., and Chen X. (2018). Hybrid Genetic Algorithm for Optimizing Closed-loop Supply Chain Model with Direct Shipment and Delivery, *New Physics: Sae Mulli*, 68(6), 683-692.

Yun, Y. S., Chuluunsukh, A., and Gen, M. (2020). Sustainable Closed-loop Supply Chain Design Problem: A Hybrid Genetic Algorithm Approach, *Mathematics*, 8(1), 1-18.

윤 영 수 (YoungSu, Yun)

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