creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000290703

2020년 2월

박사학위 논문

모바일폰을 위한 지속가능한 폐쇄루프 공급망 모델의 설계와 이행

Design and Implementation of Sustainable Closed-Loop Supply Chain Model for Mobile Phone

조선대학교 대학원

경영학과

CHULUUNSUKH ANUDARI

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

모바일폰을 위한 지속가능한 폐쇄루프 공급망 모델의 설계와 이행

Design and Implementation of Sustainable Closed-Loop Supply Chain Model for Mobile Phone

2020년 2월 25일

조선대학교 대학원

경영학과

CHULUUNSUKH ANUDARI

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

모바일폰을 위한 지속가능한 폐쇄루프 공급망 모델의 설계와 이행

Design and Implementation of Sustainable Closed-Loop Supply Chain Model for Mobile Phone

지도교수 윤영수

이 논문을 경영학박사학위 신청 논문으로 제출함

2019년 10월

조선대학교 대학원

경영학과

CHULUUNSUKH ANUDARI

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

CHULUUNSUKH ANUDARI의

박사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교 수 _____ 이청호 _____ (인)

위 원 조선대학교 교 수 _____ 이대용 _____ (인)

위 원 조선대학교 교 수 _____ 민진영 _____ (인)

위 원 조선대학교 교 수 _____ 윤영수 _____ (인)

위 원 동의대학교 교 수 _____ 이정은 _____ (인)

2019년 12월

조선대학교 대학원

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목차

제 1 장 서 론 ……1
1.1 연구의 배경 및 필요성……1
1.2 연구의 목적 및 방법……4

제 2 장 모바일폰을 위한 SCLSC 모델 설계……6
2.1 모바일폰의 효율적 관리 필요성……6
2.2 모바일폰을 위한 기존 SCLSC-O 모델……7
2.3 모바일폰을 위한 제안된 SCLSC-N 모델……10

제 3 장 수리 모형……15

제 4 장 접근법……29
4.1 다목적 최적화 방법론……29
4.2 메타휴리스틱 기법……31
4.2.1 GA……32
4.2.2 쿠쿠서치(Cuckoo Search: CS)……39
4.3 제안된 접근법……40

제 5 장 수치 실험……44
5.1 SCLSC-O 모델과 SCLSC-N 모델 비교 ……46
5.2 SCLSC-N 모델에 대한 민감도 분석…… 53
5.3 SCLSC-N 모델에 대한 수송채널 비교……57
5.4 기존 접근법과 제안된 접근법 비교……62

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 6 장 결론.....74

참고문헌.....76
부록.....82

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 목차

표 5-1. 수치 실험을 위한 SCLSC-O과 SCLSC-N 모델의 다섯 가지 Scale …….....…….44
표 5-2. SCLSC-O 모델과 SCLSC-N 모델 비교 분석을 위한 척도.....45
표 5-3. SCLSC-O와 SCLSC-N 모델의 물류 공급 비율.....46
표 5-4. SCLSC-O과 SCLSC-N 모델의 비교•분석 결과 (Scale 1) 47
표 5-5. SCLSC-O과 SCLSC-N 모델의 비교•분석 결과 (Scale 2).....48
표 5-6. SCLSC-O과 SCLSC-N 모델의 비교•분석 결과 (Scale 3) …….....49
표 5-7. SCLSC-O과 SCLSC-N 모델의 비교•분석 결과 (Scale 4) 50
표 5-8. SCLSC-O과 SCLSC-N 모델의 비교•분석 결과 (Scale 5) 50
표 5-9. Case 1-7에 대한 수거 또는 폐기 비율.....53
표 5-10. Case 1-7 민감도분석 결과.....54
표 5-11. Case 8-14에 대한 재활용 또는 재사용 비율.....55
표 5-12. Case 8-14 민감도분석 결과.....56
표 5-13. SCLSC-N1과 SCLSC-N2 모델에 대한 비교 결과 (Scale 1) 57
표 5-14. SCLSC-N1과 SCLSC-N2 모델에 대한 비교 결과 (Scale 2) 58
표 5-15. SCLSC-N1과 SCLSC-N2 모델에 대한 비교 결과 (Scale 3) 59
표 5-16. SCLSC-N1과 SCLSC-N2 모델에 대한 비교 결과 (Scale 4) …….....60
표 5-17. SCLSC-N1과 SCLSC-N2 모델에 대한 비교 결과 (Scale 5)…….....61
표 5-18. GA, HGA, PHGA의 비교 분석 결과 (Scale 1) ……..……..……..…...62
표 5-19. GA, HGA, PHGA의 비교 분석 결과 (Scale 2)…….....64
표 5-20. GA, HGA, PHGA의 비교 분석 결과 (Scale 3)……..…….....…..…66
표 5-21. GA, HGA, PHGA의 비교 분석 결과 (Scale 4)…….....….....68
표 5-22. GA, HGA, PHGA의 비교 분석 결과 (Scale 5)…….....….....70

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 목차

그림 1-1. SCM 발전 과정 3
그림 2-1. 김기범 외(2007)에서 고려한 국내 모바일폰을 위한 CLSC 모델 7
그림 2-2. 기존 모바일폰을 위한 SCLSC-O 모델 구조 및 물류 8
그림 2-3. Jang et al. (2010)이 제안한 모바일폰을 위한 RL 구조 10
그림 2-4. John et al. (2018)이 제안한 모바일폰을 위한 RL 구조 및 물류 11
그림 2-5. Ahmadi et al. (2019) 제안한 모바일폰을 위한 CLSC 모델 12
그림 2-6. 본 연구에서 제안된 SCLSC-N 모델 구조 및 물류 13
그림 4-1. 그림 4-1. 목적 함수가 두 개인 경우 Pos 30
그림 4-2. 메타휴리스틱 기법 32
그림 4-3. GA 기본적인 진행 과정 (Gen et al., 2008) 33
그림 4-4. 본 연구에서 사용된 실수 표현법 34
그림 4-5. 초기해집단 34
그림 4-6. 교차변이 35
그림 4-7. 돌연변이 36
그림 4-8. 선택 과정 37
그림 4-9. GA 이행 철자 38
그림 4-10. Kanagarag et al. (2013)에서 제안한 HGA 접근법 절차 41
그림 4-11. 본 연구에서 제안한 PHGA 접근법의 전체적인 실행 과정 42
그림 4-12. 본 연구에서 제안한 PHGA 접근법의 이행 철자 43
그림 5-1. Problem 1에 대한 SCLSC-O과 SCLSC-N 모델의 수렴 과정(Scale 5) 51
그림 5-2. Problem 2 에 대한 SCLSC-O과 SCLSC-N 모델의 수렴 과정(Scale 5) 51
그림 5-3. Problem 3 에 대한 SCLSC-O과 SCLSC-N 모델의 수렴 과정(Scale 5) 52
그림 5-4. Case 1-7에 대한 $F_1(x)$ 결과 54
그림 5-5. Case 1-7에 대한 $F_2(x)$ 결과 54
그림 5-6. Case 1-7에 대한 $F_3(x)$ 결과 54
그림 5-7. Case 8-14에 대한 $F_1(x)$ 결과 56
그림 5-8. Case 8-14에 대한 $F_2(x)$ 결과 56
그림 5-9. Case 8-14에 대한 $F_3(x)$ 결과 56
그림 5-10. Problem 1에 대한 GA, HGA, PHGA의 실행 결과 (Scale1) 63
그림 5-11. Problem 2에 대한 GA, HGA, PHGA의 실행 결과 (Scale1) 63
그림 5-12. Problem 3에 대한 GA, HGA, PHGA의 실행 결과 (Scale1) 64

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 5-13. Problem 1에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Scale 2) ……65
그림 5-14. Problem 2에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Scale 2) ……65
그림 5-15. Problem 3에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Scale 2) ……66
그림 5-16. Problem 1에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Sale 3) ……67
그림 5-17. Problem 2에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Scale 3) ……67
그림 5-18. Problem 3에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Scale 3) ……68
그림 5-19. Problem 1에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Scale 4) ……69
그림 5-20. Problem 2에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Scale 4) ……69
그림 5-21. Problem 3에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Scale 4) ……70
그림 5-22.Problem 1에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Scale 5) ……71
그림 5-23. Problem 2에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Scale 5) ……71
그림 5-24. Problem 3에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Scale 5) ……72

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Abstract

Successful management of a business requires appropriate decision making that considers various factors such as information technology advancement, sustainability, and uncertainty. To survive in this fast-changing business environment and secure a competitive advantage, business enterprises must design efficient supply chain models, increase profits through optimal cost management, and provide services that can satisfy customers. Recently, for corporate sustainability, companies need to design supply chains that consider not only economic factors but also environmental and social factors.

In particular, the use of mobile phones, which belong to small IT-based electronic products, is increasing day by day, and as a result, mobile phone producers put various products on the market in a short cycle to satisfy high customer demands, which shortens the lifespan of mobile phones and rapidly generates waste mobile phones. Accordingly, various ways to increase the reuse or recycling rate of waste mobile phones have been introduced. Given these trends, this study aims to design a Sustainable Closed-Loop Supply Chain (S-CLSC) model for mobile phones and propose a solution to optimize it.

First, an analysis of the mobile phone supply chain employed in the existing research revealed a lack of studies that considered the S-CLSC model in the mobile phone supply chain structure. Therefore, bearing a realistic mobile phone supply chain in mind, this study designed the S-CLSC model that considers the raw material and module production stage for mobile phone production and the collection and recycling stage of waste mobile phones. Economic, environmental and social factors were taken into consideration for the sustainability of the designed mobile phone supply chain model; that is, the design considered maximizing total profit (economic factor), minimizing the total amount of CO_2 emitted during the transportation and production process of mobile phones (environmental factor), and maximizing job opportunities, reducing unemployment rate and loss day when adopting new technologies (social factor).

Second, this study proposed a Hybrid Genetic Algorithm (PHGA) approach to perform numerical experiments on the designed S-CLSC model. The proposed PHGA is a combination of Genetic Algorithm and Cuckoo Search.

As a result of comparing the S-CLSC model for mobile phones designed in this study with the existing mobile phone supply chain model, the S-CLSC model turned out to be superior to the existing model in terms of overall profits. Furthermore, a comparative analysis using Pareto optimal solution revealed the superiority of the proposed

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

PHGA in terms of the ability to search for the optimal solution. However, in terms of computation time, the S-CLSC model presented in this study turned out to be slightly slower.

The S-CLSC model and the mathematical model employed in this study are expected to contribute to designing an efficient supply chain for the sustainable management of mobile phone producers. Future research will consider more diverse aspects (e.g., environmental and social factors) and seek to enhance the practical application of the methodology employed in this study by collecting and using more realistic data.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

국문 초록

성공적인 기업경영을 위해서는 정보기술의 발달, 지속가능성, 불확실성 등과 같은 다양한 요소들을 고려한 효율적인 의사결정이 필요하다. 이러한 빠른 변화의 경영환경에서 기업이 살아남고 경쟁우위를 확보하기 위해서는 효율적인 공급망(Supply Chain) 모델을 설계하고 최적의 비용을 통해 이익을 증가 시키면서 고객이 만족할 수 있는 서비스를 제공해야 한다. 최근 기업의 지속가능성(Sustainability)을 위해 기업들은 경제적인 요인(Economic Factor) 뿐만 아니라 환경적인 요인(Environmental Factor), 사회적인 요인(Social Factor)을 고려한 공급망을 설계할 필요가 있다.

특히 소형 IT 전자 제품에 속하는 모바일폰 사용이 날날이 증가하고, 까다로운 고객 요구를 만족시키기 위해 모바일폰 생산자들이 다양한 제품을 짧은 수명주기로 시장에 출시하고 있으며, 또한 모바일폰의 수명주기가 점점 더 짧아지고, 이로 인해 사용 후 폐기 모바일폰 발생이 급격히 증가하고 있는 실정이다. 결국 사용 후 폐기 모바일폰의 재사용(Reuse) 비율 또는 재활용(Recycling) 비율을 증가시킬 수 있는 다양한 방법들의 모색이 필요하게 되었다. 이와 같은 현상을 고려해 본 연구에서는 모바일폰을 위한 지속가능한 폐쇄루프 공급망 (Sustainable Closed-Loop Supply Chain: S-CLSC) 모델을 설계하고 이를 최적화 할 수 있는 해법을 제시하고자 한다.

먼저, 기존 연구에서 고려된 모바일폰 공급망 모델을 분석하였으며, 이를 통해 기존 모바일폰 공급망 구조에 있어서 S-CLSC 모델을 고려한 연구가 부족한 사실을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 현실적인 모바일폰 공급망을 고려해 모바일폰 생산을 위한 원자재와 모듈 생산 단계 그리고 고객으로부터 사용되어 수명이 다 된 폐기 모바일폰의 수집, 재사용 또는 재활용 단계를 고려한 S-CLSC 모델을 설계하였다. 설계된 S-CLSC 모델의 지속가능성을 위해 경제적, 환경적, 사회적인 요인을 함께 고려하였다. 경제적인 요인으로는 총 이익의 최대화, 환경적인 요인으로는 모바일폰 수송 및 생산과정에서 배출되는 CO_2 총량의 최소화, 사회적인 요인으로는 새로운 기술 도입시의 일자리 기회, 실업률, 손실 일수 등을 고려한 사회적 이익의 최대화를 각각 고려하였다.

두번째, 설계된 S-CLSC 모델의 실행을 위해 혼합형유전알고리즘(Hybrid Genetic Algorithm) 접근법을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 혼합유전알고리듬은 메타휴리스틱(Meta-heuristics) 기법인 유전알고리즘(Genetic Algorithm)과 쿠쿠 탐색법(Cuckoo Search)을 혼합한 방법이다.

본 연구에서 설계한 모바일폰을 위한 S-CLSC 모델을 기존 모바일폰 공급망 모델과 비교한 결과 전제적인 이익 측면에서 봤을 때 본 연구에서 제안된 S-CLSC 모델이 우수한 결과를 제시하였다. 또한 파레토 최적해(Pareto Optimal Solution)를 이용해 본 연구에서 제안된 혼합유전알고리듬과 기존 접근법들과의 수행도 비교분석을 실시하였다. 비교분석 결과, 최적해를 탐색하는 능력 측면에서는 본 연구에서 제안한 혼합유전알고리듬이 좀 더 효율적인 해법임을 확인하였다. 하지만 실행 속도 측면에서 보면 본 연구에서 제안된 혼합유전알고리듬이 기존 접근법들 보다 다소 느린 탐색속도를 보여주었다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

본 연구에서 제안된 S-CLSC 모델과 수리 모형은 모바일폰 생산 기업의 지속가능한 경영에 필요한 효율적인 공급망을 설계하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 연구로는 환경적인 요인 및 사회적인 요인에서 고려될 수 있는 좀 더 다양한 측면들을 고려하고자 하며, 또한 보다 현실적인 데이터를 수집해 본 연구에서 제안한 방법론의 현실적용능력을 높이고자 한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1장 서론

1.1 연구의 배경 및 필요성

날로 치열해져 가는 국내외 기업 간의 극심한 경쟁으로 인해 기업의 제품 생산, 유통 및 물류과정에서 발생하는 대규모의 재고 문제 및 고비용 문제는 기업들에게 공급망관리(Supply Chain Management: SCM)의 중요성을 일깨워 주고 있다.

SCM의 개념은 1980년 초 Oliver and Webber(1982)에 의해 처음으로 언급되었으며, 이후로 많은 연구자들에 의해 다양한 적용기법들이 제시되어 왔다(Christopher, 1992; La Londe et al., 1994; Mentze, 2001). 일반적으로 SCM은 다단계(Multi-stage)로 구성되며, 원자재 공급(Raw Material Supply)에서 시작하여 제품 생산(Product Manufacturing), 물류센터(Distribution Center), 소매점(Retailer)을 거쳐서 최종적으로 고객(Customer)에 제품이 전달될 때까지의 모든 활동을 포함하며, 이러한 물류흐름을 최적화하여 기업의 경쟁력을 높이는 것을 말한다 (박상옥, 2006).

2000년대 들어서면서부터 '폐기 전기전자제품의 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 재정되어 시행되면서부터 SCM의 물류흐름에 대한 환경 관련 규제가 새롭게 생겨나게 되었다. 또한 고객의 생활수준 향상과 제품사용에 대한 인식이 바뀌면서 친환경적인 제품에 대한 관심이 높아지게 되었으며, 이로 인해 전통적인 SCM의 물류흐름인 순방향(Forward Logistics: FL) 물류에 역물류(Reverse Logistics: RL)를 통합한 폐쇄루프공급망(Closed-Loop Supply Chain: CLSC) 운영의 필요성이 대두되었다.

일반적인 CLSC 의 물류 흐름은 다음과 같다. FL 단계에서는 원자재 공급, 제품 생산, 유통 단계를 거쳐 고객에 제품을 전달되고, RL 단계에서는 수집센터(Collection Center)를 통해 고객으로부터 사용된 제품을 수거하며, 리사이클링 센터(Recycling Center) 혹은 회복센터(Recovery Center)에서는 수거된 제품을 재처리해서 재사용 가능한 제품은 2차시장(Secondary Market)에 재판매하고(윤영수, 2016) 재활용 가능한 부품은 원자재 공급업체에 공급하거나 회복 불가능한 제품은 폐기된다(Amin et al., 2012). 이와 같이 FL과 RL을 연계한 CLSC의 효율적 운영을 위해 다양한 분야에서 연구들이 진행되었다 (Fleischmanna et al., 2000; Wang et al., 2010; 한용호, 2013; Chen et al., 2015; Fathollahi-Fard et al., 2018). 이들 연구 대부분은 CLSC 모델 구축에 있어서 기업의 경제적인 측면뿐만 아니라 환경적인 측면을 함께 고려하는 것이 필요하다는 것을 제안하고 있다. 특히 환경적인 측면에 있어서 제품의 재활용 및 재사용을 고려함으로써 친환경적인 이미지의 기업으로 거듭날 수 있기 때문에 기업경쟁력 강화에 도움이 될 수 있다(Min, 1989). 환경적인

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

측면을 고려한 CLSC는 FL의 마지막 단계인 고객으로부터 수거된 사용 후 제품(Returned Product or Used Product)의 활용가능성에 집중하고 있다. 수거된 사용 후 제품은 크게 세 가지 목적(재활용(Recycle), 재사용(Reuse), 폐기(Disposal))으로 분류된다(한용호, 2013).

20002년에는 유엔의 지속가능발전세계정상회의(Word Summit on Sustainable Development: WSSD)에서 지속가능성(Sustainability)을 이 시대의 중요한 이슈로 내세우면서 지속 가능한 폐쇄루프 공급망 (Sustainable Closed-Loop Supply Chain: SCLSC)에 대한 관심이 더욱 높아지게 되었다. 기존의 CLSC에서 공급자들의 환경적, 사회적 책임에 관한 국제적인 표준인 ISO14001과 SA8000와 같은 환경경영시스템 또는 사회적 시스템을 요구하고 있다는 것은 가장 대표적인 SCLSC 활동이다 (이수열, 2015).

SCLSC이란 CLSC에서 경제적 요인(Economic Factor), 환경적 요인(Environmental Factor), 사회적인 요인(Social Factor)을 함께 고려해 장기적으로 CLSC를 지속 가능하게 관리하는 것을 의미한다(Mota et al., 2015; Sahebjamnia et al., 2017; Ozceylan et al., 2017). SCLSC에서는 경제적, 환경적, 사회적 요인이 서로 상호 의존적인 관계를 가지며, 세 요인이 모두 충족되어야 지속가능성을 이룰 수 있다 (정훈희 외, 2009). 이에 따라 최근 들어 SCLSC 모델 구축 및 운영에 대한 많은 연구들이 활발하게 진행되고 있다 (Devika et al., 2014; Santibarez-Aguilar et al., 2014; Mota et al., 2015; Zhalechian et al., 2016; Ozceylan et al., 2017).

먼저 경제적 요인으로는 주로 CLSC 운영에서 발생하는 총 이익을 최대화(Maximizing profit)하는 문제 혹은 총비용을 최소화(Minimizing Cost)하는 문제로 나누어져서 고려되고 있다. Devika et al. (2014)는 SCLSC 모델의 다양한 단계를 고려했으며, 경제적인 요인으로 각 설비들의 고정비용, 처리비용, 운송비용, 수집비용의 합을 최소화하는 수리모형을 제시하였다. Talaei et al.(2016) 연구에서 제시한 SCLSC 모델은 경제적인 이슈로 고정비용, 판매비용, 제조비용, 처리비용 등을 고려하였다.

둘째, 환경적 요인을 고려한 대부분 기존 연구들에서는 SCLSC 각 단계의 수송과정에서 배출되는 CO_2량과 제조 또는 회복 과정에서 배출되는 CO_2량을 고려하였다. 또한 일부의 연구들(Paksoy et al., 2011; Arampantzi et al., 2016) 에서는 CO_2 처리비용을 고려하였다. Paksoy et al.(2012)의 SCLSC 모델에서는 부품 및 제품을 수송하는 과정에서 배출되는 CO_2량을 최소화하는 수리모형을 제시하였으며, Özceylan et al.(2017)의 연구에서는 SCLSC 모델의 효율적 운영을 위해 각각의 네트워크 단계 간 수송과정에서 배출되는 CO_2량과 제조업체 또는 회복 센터에서 제품을 제조 및 처리할 때 배출되는 CO_2량을 각각 고려하였다.

셋째, 사회적 요인으로는 기업에서 신기술 도입에 따른 신규 일자리 기회 증가 또는 기존 일자리의 기회 감소, 해고를 통한 실업률 (Unemployment rate) 등을 주로 고려하였다. Devika et al. (2014)은 제조업체와 폐기 센터에서 신기술을 도입했을 때 생성되는 일자리 수를 최대화하고, 평균 작업손실일수를 최소화하는 SCLSC 모델을 제안하였다. Talaei et al. (2016)의 연구에서는 제조업체에서 생성되는 고정 일자리 수, 변동 가능한 일자리 수, 제조업체, 폐기센터에서 발생되는 작업손실일수를 사회적인 요인으로 고려한 SCLSC 모델을 제안하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

한편 위의 세 가지 요인을 함께 고려한 연구들은 다음과 같다. Santibarez-Aguilar et al.(2014) 연구에서는 순이익과 총 비용을 경제적인 요인으로 고려하고, 수송과정과 제조과정에서 배출되는 CO_2량과 일자리 기회를 환경적인 요인과 사회적인 요인으로 각각 고려한 SCLSC 모델을 제안하였다. Mota et al.(2015) 연구에서 제안한 SCLSC 모델은 고정비용, 수송비용, 폐 제품 회복비용 등을 최소화하는 경제적인 요인, 제품 생산과정에서 배출되는 온실 가스양을 최소화하는 환경적인 요인, 실업률을 최소화하는 사회적인 요인을 함께 고려하였다. Zhalechian et al.(2016) 연구에서 제안한 SCLSC 모델은 경제적인 요인으로 고정비용, 재고비용, 수송비용을 포함한 총 비용을 최소하였으며, 환경적인 요인으로 수송과정에서 배출되는 CO_2량과 폐기물 에너지를 고려해 이를 최소화하였다. 마지막으로 사회적인 요인으로는 실업률과 관련하여 새로 생성되는 일자리 기회 및 경제 성장을 고려해 이를 최대화하였다.

지금까지의 논의에서 보듯이 SCM은 다양한 단계로 그 적용 범위가 확대되어 발전해 온 것을 알 수 있다. 이를 정리하면 그림 1-1과 같다.

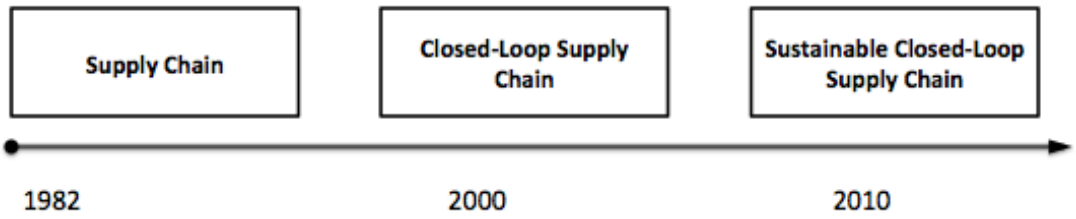

그림1-1. SCM의 발전과정

그림 1-1에서 제시한 것과 같이 SCM의 발전과정은 부품의 공급, 제품생산 및 고객으로의 제품공급 단계인 FL 만을 고려한 SC 모델부터 시작하여, 사용 후 제품의 재활용, 재사용, 폐기 단계를 고려한 RL과 FL의 통합 CLSC 모델, 기업의 지속 가능한 경영을 위한 경제적, 환경적, 사회적인 요인을 함께 고려한 SCLSC 모델의 단계로 발전되어 왔음을 알 수 있다.

SCLSC 모델에 관하여 살펴본 기존 연구들의 한계점을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 대부분 기존 연구들이 경제적, 환경적인 요인만을 주로 고려하였다(Chaanbane et al., 2012; Fihimnia et al., 2013; Talaei et al., 2016).

둘째, 경제적, 환경적, 사회적 요인 모두를 고려한 기존 연구들도 일부 존재하지만 이러한 세 가지 요인을 다목적 최적화(Multi-Objective Optimization) 문제로 해결하지 않고 단일 최적화(Single-Objective Optimization) 문제로 해결하고 있다(Pishvaee et al., 2014; Zhalechain et al., 2016; Ozceylan et al., 2017).

셋째, 대부분의 연구들이 가상의 환경을 가정한 SCLSC 모델을 제안하였으며 (Talaei et al., 2016; Saffari et al., 2015) 실질적인 제품에 대한 사례연구를 고려한 연구가 거의 없다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

SCLSC 모델을 효율적으로 관리하기 위해 수송 방법에 있어서 다양한 수송 채널을 고려할 필요가 있다. 기존의 SCLSC 네트워크 모델에서는 FL 및 RL 각 단계 간 정규배송(Normal Delivery: NDL)만이 존재하였지만 인터넷 및 정보통신 기술의 발전으로 인해 고객은 직접 제조업체와 연결되어 중간단계인 물류센터 혹은 소매점을 거치지 않고 바로 제품을 구매할 수 있는 온라인 판매가 가능해졌다. 최근 들어서 온라인 제품 구매가 급증하고 있는 상황이며, 이러한 온라인 판매는 기존 물류 네트워크의 구조를 변화시키고 있다. 즉 제조업체에서 고객으로 직접선적(Direct Shipment: DSP)하는 방식이 가능해졌으며, 이와 같은 환경 변화에 따라 SCLSC에서 NDL와 DSP을 함께 고려한 새로운 물류네트워크 전략이 필요하다. NDL란 판매 가능한 제품을 중간 수송 단계인 물류 센터, 소매점 등을 거쳐서 고객에 제품을 전달하는 방식이며, DSP란 판매 가능한 제품을 중간 수송 단계인 물류센터, 소매점을 거치지 않고 바로 고객에게 배송하는 방식이다.

Chiang et al. (2003)은 이중 채널(Dual-Channel) 물류네트워크 전략의 연구에서 제품 원가를 낮추기 위해 DSP를 전략적으로 사용하는 것이 물류 네트워크 전략 구축에 효과적이라고 주장하였다. Hua et al. (2009)는 각각 네 개의 시나리오를 이용하여 DSP과 소매점을 경유하는 NDL를 함께 운영할 경우, 가격과 리드타임(Lead Time) 측면에서 어떻게 다른가를 비교분석하였다. 분석 결과 NDL 만을 고려하는 것보다 DSP과 NDL를 함께 고려하는 것이 제품 가격뿐만 아니라 리드타임을 감소시키는데 효과적이라고 분석하였다. Yun et al. (2018)에서는 CLSC 모델에서 제품을 제조업체에서 분배센터를 통해 고객에 전달하는 NDL와 제조업체에서 제품을 바로 고객에 전달되는 DSP를 고려하였고, 또한 RL에서 회복된 제품을 재제조업체(Remanufacturer)를 통해 2차 시장에 전달하는 NDL와 바로 전달하는 DSP를 고려하였다. 수치예제를 통한 실험 결과 CLSC 모델의 최적화를 위해 NDL 뿐만 아니라 DSP를 함께 고려하는 것이 비용 측면에서 더 효과적이라는 것을 입증하였다. Chen et al. (2018)은 한국 타이어 산업에 관한 CLSC모델을 제안하면서 고객에게 타이어를 전달하기 위해 NDL와 DSP를 함께 고려하였으며, NDL만을 고려한 CLSC 모델과 NDL과 DSP를 함께 고려한 CLSC 모델을 비교 분석하여 NDL와 DSP를 함께 고려하는 수송방식이 더 우수하다는 것을 입증하였다.

1.2 연구 목적 및 방법

본 연구의 목적은 1.1절에서 제시한 기존 SCLSC 모델의 한계점을 개선한 SCLSC모델을 설계하고자 하며, 특히 실질적인 제품에 대한 사례연구를 함께 제시하여 그 현장 적용 능력을 높이고자 한다. 이를 위해서 모바일폰(Mobile Phone)의 생산 및 유통 단계를 고려한 FL과 사용 후 처리에 관한 RL을 통합한 SCLSC 모델을 제안한다. 제안된 SCLSC 모델에서는 경제적, 환경적, 사회적 요인들을 함께 고려하며, 이를 다목적 최적화(Multi-Objective Optimization) 문제로 해결하고자 한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

먼저, 국내 모바일폰을 위한 CLSC 모델을 제시한 기존 연구들을 살펴본 후 이들 연구의 특징을 분석한다. 이를 통해 개선된 SCLSC 모델을 도출한다.

둘째, 모바일폰을 위한 기존의 SCLSC 모델(SCLSC-O)과 본 연구에서 제시한 개선된 SCLSC 모델(SCLSC-N)을 네트워크 형태로 구성하며, 이를 각각 다목적 최적화 문제로 표시한다. 즉 세 가지 요인(경제적, 환경적, 사회적 요인)을 함께 고려한 SCLSC-O 및 SCLSC-N 모델을 설계한다.

셋째, SCLSC-O와 SCLSC-N 모델을 표현하기 위한 수리모형(Mathematical Model)을 제시한다. 각각의 수리모형은 세 가지 요인(경제적, 환경적, 사회적 요인)을 각각의 목적함수로 표시하며, 목적함수를 최적화 하기 위한 다양한 제약조건(예를 들어, FL, RL 각 단계 간 수송량 제약조건, 각 단계에서 개설되는 설비들의 제약조건, 재사용, 재활용 및 폐기품의 비율 제약조건 등)을 가지게 된다.

넷째, SCLSC-O와 SCLSC-N 모델 이행을 위한 메타휴리스틱(Metaheuristic) 기법을 제안한다. 본 연구에서는 혼합형유전알고리즘(Proposed Hybrid Genetic Algorithm: PHGA) 접근법을 제안하며, PHGA 접근법을 통해 SCLSC-O와 SCLSC-N 모델을 위한 수리모형을 이행한다.

다섯째, 사례 연구에서는 다양한 크기를 SCLSC 모델을 고려하며, 제안된 PHGA 접근법을 이용하여 SCLSC-O와 SCLSC-N 모델의 수행도를 비교 분석한다. 두 모델의 비교분석을 위해 다목적 최적화 문제에 많이 사용되는 파레토 최적해 (Pareto optimal solution)를 이용한다. 또한 본 연구에서 제안된 PHGA 접근법의 우수성을 입증하기 위해 Gen et al. (2009)이 제안한 유전알고리즘(Genetic Algorithm: GA) 접근법과 Kanagaraj et al. (2013)이 제안한 혼합형 유전알고리즘(Hybrid Genetic Algorithm: HGA) 접근법을 함께 비교 분석한다.

여섯째, 본 연구에서 제안된 SCLSC-N 모델에 대해 단일 수송채널 NDL 만을 가지는 SCLSC-N 네트워크와 두 가지 수송채널(NDL과 DSP)을 함께 가지는 SCLSC-N 네트워크로 구분하여 각각의 수행도를 비교 분석한다.

이상의 연구목적과 방법을 통해 다음과 같은 결과를 도출하고자 한다.

- 모바일폰을 위한 기존의 SCLSC-O 모델과 본 연구에서 제안한 SCLSC-N 모델의 수행도를 비교 분석하여 본 연구에서 제안한 SCLSC-N 모델의 우수성을 입증한다.
- 기존 연구에서 제안한 GA, HGA 접근법과 본 연구에서 제안한 PHGA 접근법의 비교분석을 통해 본 연구에서 제안한 PHGA 접근법의 우수성을 입증한다.
- 단일 수송채널(NDL)만을 가지는 SCLSC-N 네트워크와 두 가지 수송채널(NDL과 DSP)을 함께 가지는 SCLSC-N 네트워크의 수행도를 비교 분석하여, 두 가지 수송채널(NDL과 DSP)을 함께 가지는 SCLSC-N 네트워크의 우수성을 입증한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 장 모바일폰을 위한 SCLSC 모델 설계

본 장에서는 모바일폰의 효율적 관리를 위한 SCLSC 모델을 설계한다. 먼저 기존 연구에서 제안한 CLSC (SCLSC-O) 모델을 검토한다. 둘째, SCLSC-O모델을 개선한 CLSC(SCLSC-N) 모델을 설계한다. SCLSC-O 모델은 현재 국내 모바일폰을 위한 공급망 상황을 고려한 모델이다. SCLSC-O 모델은 국내 모바일폰 공급망에 대한 기존 연구(김기범 외, 2007)와 현재 국내 모바일폰 공급망 상황을 고려하여 제안한다. SCLSC-N 모델은 기존의 SCLSC-O 모델에서 고려한 상황에 폐기 모바일폰의 수거, 재사용, 재활용 문제를 추가하여 고려하였으며, 이의 운용 효율성을 개선하기 위한 기존 연구(Jang et al., 2010; John et al., 2018; Ahmadi et al., 2019)를 분석하여 설계한다.

2.1 모바일폰의 효율적 관리 필요성

최근 몇 년 사이에 모바일폰 사용 비율이 급격히 높아지고 있다. 또한 기업들 간의 경쟁 심화로 인해 모바일폰 신제품 출시 시기가 점점 더 짧아지고 있으며, 고성능, 고사양을 요구하는 사용자의 더 높아진 구매 욕구로 인해 막대한 양의 폐기 모바일폰이 발생되고 있는 상황이다. Balde et al. 2017) 따르면 전 세계 폐기 전자제품 발생량이 44.7백만(Mt)에 도달했으며, 이 중에서 47%는 소형 전자제품 및 IT 전자 제품(모바일폰)이 차지하고 있다고 발표하였다. 한국 소비자(20대 이상) 85% 이상이 모바일폰을 사용하고 있고, 모바일폰 사용자의 30% 이상이 모바일폰을 신 제품으로 변경한 지 1년 넘지 않는 것으로 나타났다(한국갤럽 연구소, 2018). 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 잘못 폐기 처리할 경우 환경오염이 발생할 위험이 매우 높은 것이 현실이다.

이와 같이 모바일폰의 생산, 유통, 폐기 과정에서 발생하는 여러 문제점 및 위험요인을 효율적으로 관리할 필요가 있다. 다행히 정부에서는 2005년부터 이러한 폐기 모바일폰의 효율적인 관리를 위해 생산자 책임 재활용제도 (Extended Producer Responsibility: EPR)의 대상 품목으로 모바일폰을 지정하였다(김회석 외, 2007). 그러나 아직까지 폐기 모바일폰의 수거 및 재활용은 체계적으로 이루어지지 않고 있으며, 특히 국내 폐기 모바일폰의 수거 방법 대부분이 이동통신 사업자로부터 이루어지고 있기 때문에, 폐기 모바일폰의 수거 이후의 재활용 혹은 재사용이 제대로 이루어지지 않고 있다(김기범 외, 2007). 결국 폐기 모바일폰 양을 줄이기 위해 가장 중요한 것은 재활용 및 재사용을 고려한 모바일폰의 CLSC 관리가 필요하다(Thavalingam et al., 2016; Xu et al., 2016; John et al., 2018; Ahmadi et al., 2019). 또한 국외 연구에서 모바일폰을 위한 CLSC 모델에 대한 다양한 연구가 활발하게 이루어지고 있지만, OECD 국가 중 모바일폰 사용자 수 1위인 국내 모바일폰을

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

위한 CLSC 모델의 효율적인 관리에 관한 연구가 부족한 상황이며, 국내 모바일폰을 위한 실질적인 CLSC를 고려한 연구는 김기범 외 (2007)의 연구가 유일한 실정이다.

2.2 모바일폰을 위한 기존 SCLSC-O 모델

본 장에서는 김기범 외 (2007) 연구에서 제안한 국내 모바일폰 공급망을 고려해 기존 모바일폰을 위한 SCLSC-O 모델을 제시한다. 김기범 외 (2007)의 연구에서는 국내 모바일폰의 공급망에 대해 이동통신 사업자 중심의 CLSC 모델을 그림 2-1과 같이 제시하였다. 이 연구에서 고려된 국내 모바일폰 공급망은 이동통신 사업자 주도형의 RL을 가지고 있으며, 고객으로부터 수거된 모바일폰의 재사용이 이동통신 사업자 주도로 이루어지고 있는 것을 알 수 있다. 국내 모바일폰 공급망 모델의 구체적인 흐름은 FL에서 부품 공급자로부터 부품을 공급받은 모바일폰 생산자가 모바일폰을 생산한다. 생산된 모바일폰은 분배 센터를 통해 이동통신 사업자에 전달되고 이동통신 사업자(또는 이동통신사)가 운영하는 대리점을 통해 모바일폰을 판매한다. 사용수명이 끝난 모바일폰은 이동통신 사업자 또는 대리점을 통해 일정한 비용을 보상하고 수거한다. 이렇게 수거된 모바일폰을 이동통신 사업자에서 간단한 성능 테스트를 거쳐서 그 성능을 회복하고 다시 고객에게 재판매된다. 성능 회복이 불가능 모바일폰은 폐기 센터에 보내져서 폐기 처리된다.

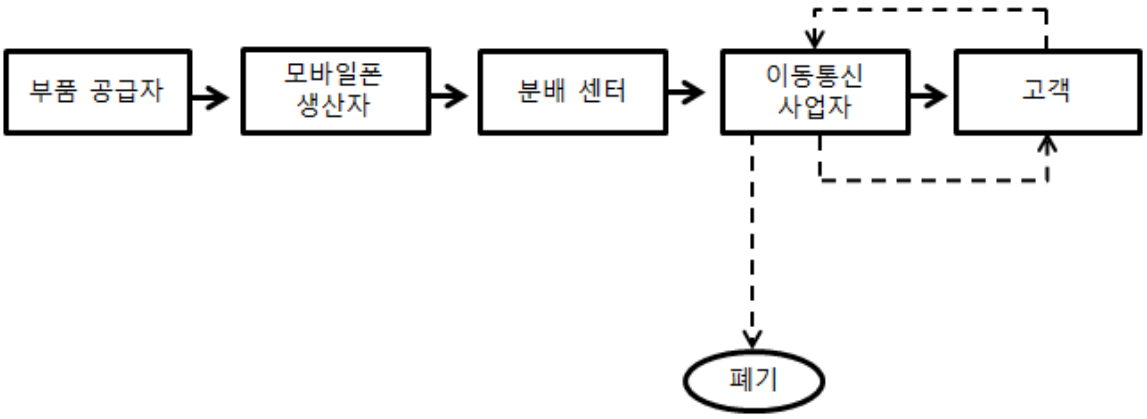

그림 2-1. 김기범 외(2007)에서 고려한 국내 모바일폰을 위한 CLSC 모델

김기범 외 (2007)의 연구에서 고려된 국내 모바일폰을 위한 CLSC 모델은 현재 모바일폰의 생산 단계, 제조업체에서 모바일폰 수송채널, 고객으로부터 사용된 모바일폰의 수거방식이 모바일폰 사용량이 높지 않으며 모바일폰의 CLSC 관련 정보가 부족한 시점에서 연구 되었기 때문에 현재 상황과 맞지 않는 부분이 있으므로, 2007년 이후 모바일폰 공급망 상황을 고려해 그림 2-2와 같은 국내 모바일폰을 위한 SCLSC-O 모델을 제시한다. SCLSC-O 모델 설계를 위해 추가로 다음과 같은 세 가지 현재 상황을 고려했다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

첫째 모바일폰은 단순한 부품들의 조합으로 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 이루어지고 있다(만정웅 2014). 따라서 이러한 현실적인 상황을 반영하여 FL에서 모바일폰 제조 단계 전 모듈 제조업체를 고려했다.

둘째, 김기범 외 (2007)의 연구에서는 부품 및 제품 수송을 위해 일반적인 NDL 만을 고려하고 있지만 기술 발전으로 인해 오프라인 판매뿐만 아니라 고객이 직접 생산자로부터 온라인 주문이 가능해 짐에 따라 DSP를 통한 구매가 가능해졌다 (Chiang et al., 2003; 윤영수 외 2018). 따라서 모바일폰을 고객에 전달하는 다양한 방법을 위해 NDL과 DSP를 함께 고려했다.

셋째, 김기범 외 (2007)의 연구에서는 이동통신 사업자가 모바일폰의 판매 및 수거를 담당한다고 제시하였지만, 정확하게 설명하면 이동통신 사업자(예를 들어, SKT, LGT 등)로부터 모바일폰을 공급받은 직영 또는 일반 대리점을 통해 판매 및 수거를 하고 있는 것이 현실적인 상황이다. 따라서 이러한 현실적인 상황을 고려하여 이동통신 사업자 다음 단계로 직영 또는 일반 대리점 기능을 수행하는 소매점(Retailer)을 고려했다.

이상의 세가지 현실적인 상황을 고려하여 김기범 외 (2007)의 연구에서 제시한 CLSC 모델을 확장하여 일반적인 모바일폰을 위한 SCLSC-O 모델을 구축하면 그림 2-2와 같다.

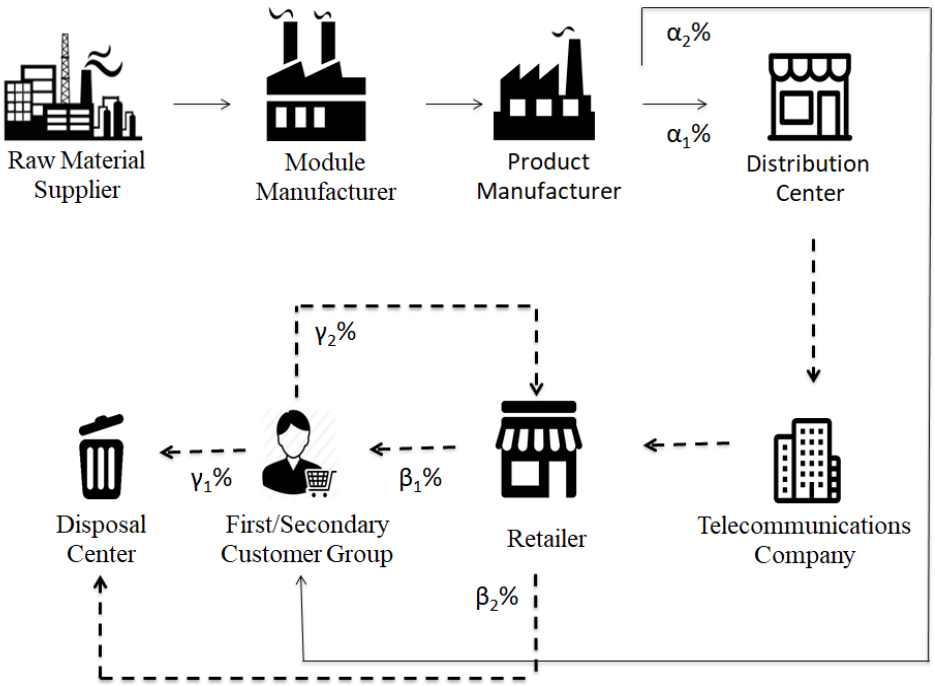

그림 2-2. 기존 모바일폰을 위한 SCLSC-O 모델 구조 및 물류

그림 2-2에서 SCLSC-O 모델의 전체적인 물류 흐름은 다음과 같다. FL 및 RL에서 원자재

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

공급업체(Raw Material Supplier: RM), 모듈 제조업체(Module Manufacturer: MM), 제품 제조업체(Product Manufacturer: PM), 물류센터(Distribution Center: DC), 이동통신 사업자(Telecommunications Company: TC), 대리점(Retailer: RT), 고객(First/Secondary Customer Group: CG), 폐기 센터(Disposal Center: DP)와 같은 8개 단계로 이루어지고 있다. 구체적으로 살펴보면, SCLSC-O 모델의 FL 흐름은 RM에서 모바일폰 원자재를 MM에 공급하는 단계부터 시작하여 MM에서 모바일폰에 필요한 각 모듈들을 생산한다. MM에서 생산된 모듈을 PM에 공급하고 모바일폰을 생산한다. PM에서 생산된 모바일폰의 α1%는 DC, TC, RT를 거쳐서 최종적으로 CG에 보내어지는 전통적인 수송방식인 NDL로 전달하고, α2%(=1- α1%)는 온라인 주문을 통해 DSP 수송방식을 이용해 CG에 직접 수송된다.

SCLSC-O 모델의 RL 흐름은 CG에서 사용수명이 끝난 모바일폰의 γ1%는 DP에 보내 폐기 처리되고, γ2%(=1-γ1%)의 재사용 가능한 모바일폰은 RT에서 수거한다. 수거된 모바일폰은 단순한 테스트 과정을 거쳐 그 성능이 회복된 β1%의 모바일폰은 CG에 재판매되고, 성능 회복이 불가능한 β2%의 모바일폰은 예로 보내어져서 폐기 처리된다.

이와 같이 김기범 외 (2007)의 연구와 현재 모바일폰 공급망 상황을 고려해 SCLSC-O을 제시하였다. 하지만 국내 모바일폰 흐름을 표현한 SCLSC-O 모델은 다음과 같은 몇 가지 문제 점을 가지고 있다. 첫째, CG에서 사용수명이 끝난 모바일폰을 RT를 통해서 수거하고 있다는 점이다. RT의 주목적은 모바일폰 판매 및 판매와 관련된 서비스를 CG에 제공하는 것이다. 즉 RT는 재활용 및 재사용을 위한 전문적인 수집센터 혹은 회복센터가 아니기 때문에 CG으로부터 사용수명이 끝난 모바일폰을 수거하여 단순한 성능 테스트 과정을 거쳐서 CG에 모바일폰을 재판매하고 재판매 불가능할 경우 DP에 보내고 있는 것이 현실이다. 이는 사용수명이 끝난 모바일폰을 효율적으로 활용하지 못하고 있다는 것을 의미한다. 둘째, 기존의 SCLSC-O모델에서는 CG를 1차 고객 그룹(First Customer Group)과 2차 고객 그룹(Second Customer Group)을 동일 단계로 함께 고려하고 있다. 일반적으로 1차 고객 그룹의 의미는 모바일폰 신제품을 구매를 위한 그룹을 의미하며, 2차 고객그룹은 그 성능이 회복된 재사용 모바일폰을 구매하기 위한 그룹이기 때문에 이를 따로 구분하여 관리할 필요가 있다.

이와 같이 기존의 모바일폰을 위한 SCLSC-O 모델 운영 문제점을 개선한 SCLSC-N 모델 개발이 필요한 실정이다.

2.3 모바일폰을 위한 제안된 SCLSC-N 모델

본 장에서는 2.1절에서 제시된 국내 모바일폰을 위한 SCLSC-O 모델에 대해 일부 기능을 추가하고 재사용 및 재활용 기능을 향상시킨 개선된 형태의 SCLSC-N 모델을 제안한다. 이를 위해 먼저 기존 연구들(Jang et al., 2010; John et al., 2018; Ahmadi et al. 2019)에서 제안한 다양한 방법들을 살펴본다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Jang et al. (2010)의 연구에서는 폐기 모바일폰을 위한 RL 단계를 그림 2-3과 같이 제시했다. 이 모델에서 고려된 모바일폰을 위한 RL은 사용수명이 끝난 모바일폰을 수거, 회복, 재활용, 재사용, 폐기하는 단계로 이루어졌다. 구체적인 물류를 살펴보면, 먼저 고객으로부터 사용수명이 끝난 모바일폰을 전문적인 수집 센터를 통해 수거하고, 수거된 모바일폰을 재사용 가능한 모바일폰, 재사용 불가능한 모바일폰 그리고 수출 모바일폰으로 구분하였다. 재사용이 불가능한 모바일폰은 부품으로 분해해서 사용 가능한 부품은 원자재로 재사용하며, 사용 불가능한 부품은 매립된다. 이 연구에서 제안한 모바일폰의 효율적인 처리를 위한 RL은 전문적인 수집 센터 및 사용수명이 끝난 모바일폰을 분리해 원자재로의 사용 필요성을 제시한 것이 특징이다.

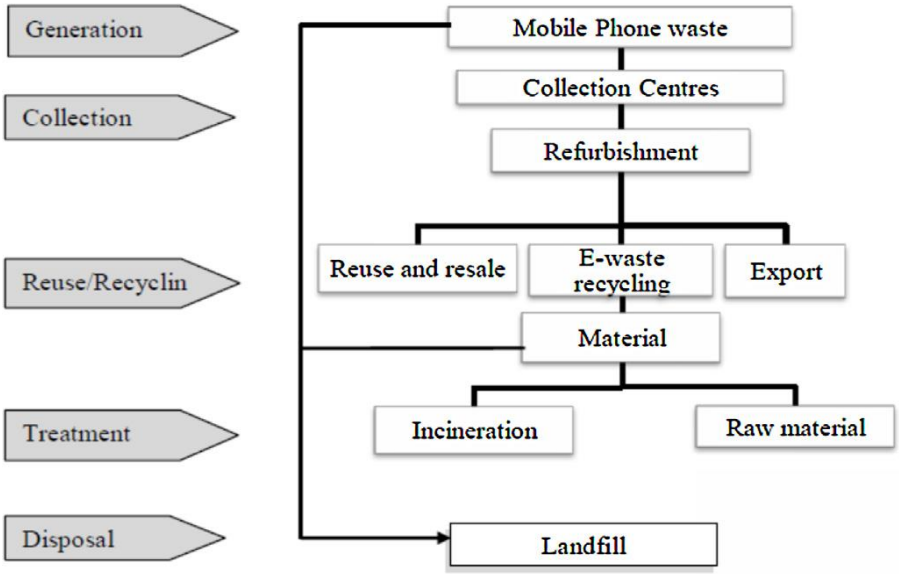

그림 2-3. Jang et al. (2010)이 제안한 모바일폰을 위한 RL 구조

John et al.(2018) 연구에서는 인도의 모바일폰 및 디지털 카메라를 위한 공급망 중에서 RL 모델만을 제안했다. RL 모델은 그림 2-4와 같이 Product return zone에서 사용수명이 끝난 모바일폰을 각각의 수집 센터를 통해 수거한다. 수거된 모바일폰을 분해센터에 전달해 재활용 및 재사용에 대한 테스트 과정을 거쳐 재사용 가능한 모바일폰은 2차 시장에서 재판매 하고, 재사용 불가능 모바일폰은 분해를 해서 재활용이 가능한 부품(ex. 인쇄 회로 기판, 배터리 등)은 재제조 업체에 공급되고, 재활용 불가능 부품은 폐기 센터에서 폐기되며, 회복과정이 필요한 일부 모바일폰은 리사이클링 센터를 통해 회복되어 재사용되고, 회복이 불가능한 모바일폰은 폐기 센터에 보내 폐기되는 물류 흐름을 가지고 있다. 이 연구에서는 고객으로부터 사용되어 사용수명이 끝난 모바일폰을 친환경적으로 처리하기 위해 전문적인 수거 센터를 설계하였으며, 수거된 모바일폰을 회복하여 재활용 및 재사용해야 한다는 필요성을 제시하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

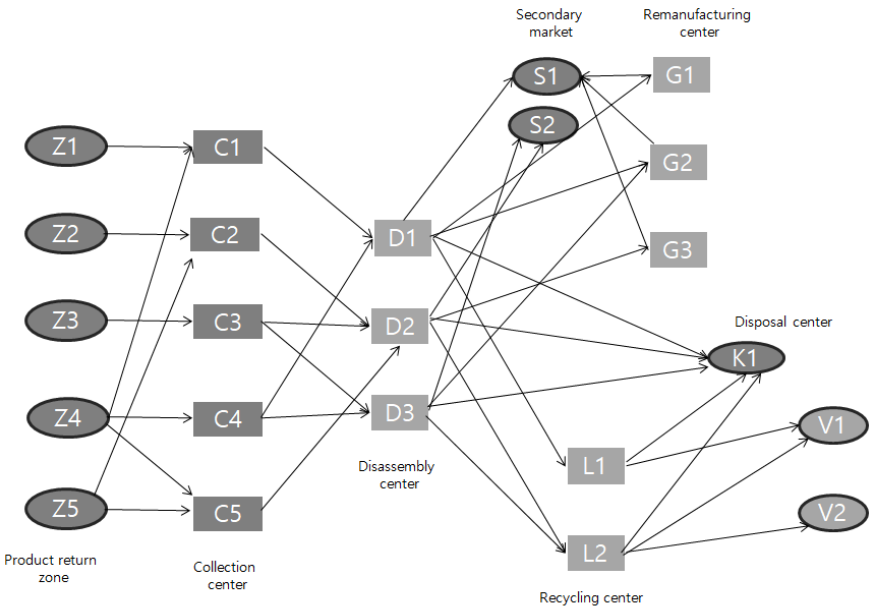

그림 2-4. John et al. (2018)이 제안한 모바일폰을 위한 RL 구조 및 물류

Ahmadi et al.(2019) 연구에서는 모바일폰의 생산, 유통 및 처리를 위한 다양한 단계를 고려한 CLSC 모델을 제안했다. 제안된 CLSC 모델은 공급업체, 제조업체, 소매점, 1차 고객, 2차 고객, 폐기 센터 등 단계를 가지고 있으며 구체적인 물류는 그림 2-5에서 제시했다. 제안된 CLSC 모델은 먼저 공급업체에서 모바일폰 생산을 위한 부품을 제조업체에 공급하는 단계부터 시작한다. 생산된 모바일폰은 소매점을 통해서 고객에 판매되는 FL 단계와 고객으로부터 회수된 폐기 모바일폰을 위한 RL 단계를 가지고 있다. RL에서는 고객이 사용한 모바일폰은 소매점을 통해 수거된다. 소매점은 신제품의 판매 및 고객 서비스뿐만 아니라 폐기 모바일폰을 수거하고 그 성능을 회복하여 2차 시장에 재판매하고 있는 역할을 하고 있다. 소매점에서 성능이 회복되지 않는 모바일폰은 제조업체에 공급되어 이를 제조업체에서 분해하고 재활용 가능한 부품이 신제품 생산에 사용된다. 그리고 제안된 CLSC 모델에서는 1 차 고객과 2차 고객으로부터 수거한 수명이 다된 모바일폰을 폐기 센터에 보내어 바로 폐기되는 네트워크 모델을 제안했다. 이 연구에서 제안한 CLSC 모델은 다양한 단계를 고려하고, 폐기 모바일폰을 효율적으로 관리를 위해 1차 고객과 2차 고객을 따로 구분하였으며, 2차 고객에게는 그 성능이 회복된 모바일폰을 재판매 하고, 모바일폰의 부품 재활용의 중요성을 제시하였지만 전문적인 수거 센터는 고려하지 않는 단점이 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

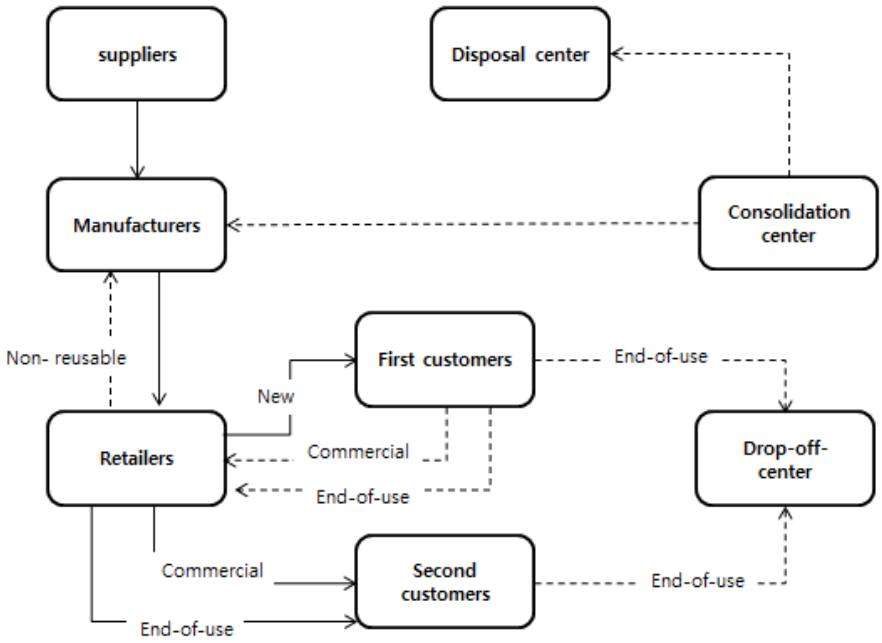

그림 2-5. Ahmadi et al. (2019) 제안한 모바일폰을 위한 CLSC 모델

이상의 기존 연구들 대부분은 모바일폰의 효율적인 수거 및 성능 회복을 위해 수집센터 및 회복센터를 두고 있으며, 이를 통해 모바일폰의 성능을 회복한 후 2차 시장을 통해 재사용하거나, 분해 후 FL의 단계로 부품을 보내서 재활용하는 방법을 제안하고 있다(Jang et al., 2010; John et al., 2018; Ahmadi et al. 2019).

이와 같은 상황을 고려해 SCLSC-O 모델을 개선한 SCLSC-N 모델을 설계한다. 제안된 SCLSC-N 모델의 전체적인 네트워크 구조는 그림 2-6과 같다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

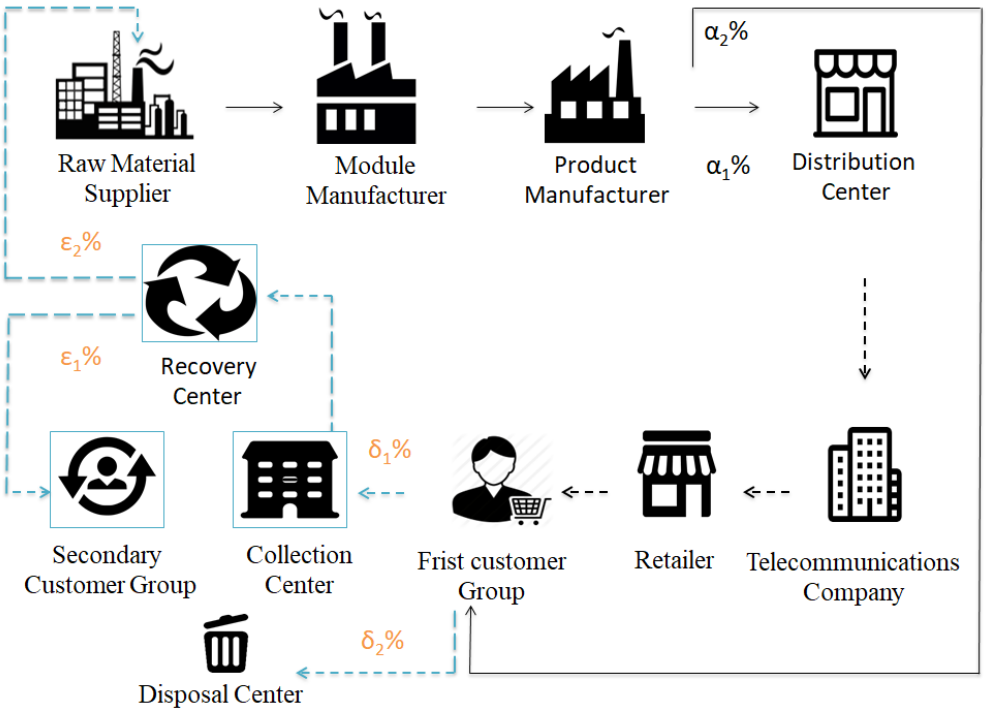

그림 2-6. 본 연구에서 제안된 SCLSC-N 모델 구조 및 물류

그림 2-6에서 보여지는 SCSCL-N 모델의 FL은 SCLSC-O 모델의 FL과 같은 단계(RM, MM, PM, DC, TC, RT)에 1차 고객(First Customer Group: FG)의 단계를 추가하여 고려했다. SCSCL-N 모델의 FL단계는 RM과 MM을 통해 모바일폰 생산에 필요한 모듈을 공급 받는다. 생산된 제품을 두 가지 수송채널을 이용해 FG에 전달한다. 먼저 NDL을 이용해 α1% 비율의 모바일폰을 DC, TC, RT를 통해 FG에 수송하며, α2%(=1- α1%) 비율의 모바일폰은 FG로부터 온라인을 통해 주문을 받은 다음 DSP를 이용해 FG에 바로 수송한다. SCLSC-N의 RL 단계는 SCLSC-O를 개선하여 FG부터 사용수명이 끝난 모바일폰을 수거하기 위한 수집 센터(Collection Center: CC)를 추가했다. 실질적으로 현재 사용수명이 끝난 모바일폰의 수거율은 이동통신 제품 의무율에 미치지 못하고 있는 상황이다. 재활용 및 재사용을 위해 사용수명이 끝난 모바일폰을 수거하는 문제가 중요하다. 따라서 수거율을 증가시키기 위해 다양한 수거 방법 및 CC에 대한 충분한 정보가 필요한 실정이다(정수정 외 2013). 현재 국내에서는 한국 전자 제품 자원순환 공제조합(KERC)을 통한 온라인 수거, 각 지자체에서 설치된 수거함, 학교, 이동통신대리점, 유통업체 등을 통해 사용 후 모바일폰을 수거하고 있다. 이러한 다양한 수거 방식을 대표해 본 연구에서는 모바일폰을 전문적으로 수거하기 위한 CC를 고려했다.

사용수명이 끝난 δ1% 비율의 모바일폰은 FG에서 CC를 통해 수거하고, δ2%(=1- δ1%) 비율의 폐기 모바일폰은 바로 쓰레기 형태로 버려지거나 집에서 보관되어 있기 때문에 이를 DP에서 처리된다고 가정하였다. CC를 통해서 수거된 모바일폰을 회복 전문업체인 회복센터(Recovery Center:

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

RC)에서 성능이 회복된다. 모바일폰의 필수 원료인 금, 은, 구리, 백금, 팔라듐과 같은 유가금속들에 대한 가치가 환산되어 그에 따른 자원 회수 필요성이 증대되면서 도시광산으로 불리는 산업이 활성화 되어 재활용 및 재사용량을 증가시키기 위해 전문적인 기술 및 방법이 필요하다 (국내 폐 전기·전자제품 재활용 현황 및 기술동향, 2019). 따라서 모바일폰을 위한 SCLSC-N 모델에서는 수거된 모바일폰의 성능 회복을 위해 RC를 고려하였다. RC 역할은 전문적인 기술을 사용해 사용수명이 끝난 모바일폰의 성능을 회복해서 재사용 가능한 ε1% 비율의 모바일폰을 2차 시장(Secondary Customer Group: SG)에 재판매하고, 재사용이 불가능하지만 이를 분해하여 재활용 가능한 ε2%(=1- ε2%) 비율의 원자재를 RM에 공급한다.

기존연구에서 제시된 SCLSC-O 모델과 본 연구에서 설계한 SCLCS-N 모델의 차별점은 다음과 같다.

- SCLSC-O 모델에서는 사용수명이 끝난 모바일폰이 이동통신 사업자를 통해 수거되고 있다. 하지만 SCLSC-N 모델에서는 이동통신 사업자가 아니라 수거를 전문적으로 수행하는 CC 단계를 고려했다.
- 고객으로부터 수거된 모바일폰의 성능을 회복하기 위해 SCLSC-O 모델에서는 이동통신사업자에서 간단한 테스트 과정을 거쳐 성능을 회복하여 재사용하고 있지만, SCLSC-N 모델에서는 수거 모바일폰의 재사용 및 재활용을 하기 위한 전문기술을 갖춘 RC 단계를 고려하였다.
- 성능이 회복된 모바일폰을 SCLSC-O 모델에서는 CG에게 재판매하여 재사용이 이루어지고, 회복이 불가능한 모바일폰은 DP로 보내서 폐기하는 단계를 가지고 있다. 하지만 SCLSC-N 모델은 성능이 회복된 모바일폰을 SG에게 재판매하여 재사용이 되며, 성능 회복이 불가능한 모바일폰은 분해해서 부품으로 재활용하고 있다.

이상과 같은 두 모델(SCLSC-O, SCLSC-N)의 차별점은 본 연구의 사례연구를 통해 그 우수성을 입증하고자 한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 수리 모형

본 장에서 기존 모바일폰을 위한 SCLSC-O 모델과 본 연구에서 제안한 SCLSC-N 모델을 이행하기 위해 수리 모형을 제시하였다. 수리 모형에서 고려된 가정은 다음과 같다.

- SCLSC-O 모델의 FL과 RL에서 고려되는 RM, MM, PM, DC, TC, RT는 각 단계에서 한 군데만 개설된다. 같은 의미로 SCLSC-N 모델의 경우에도 고려되는 RM, MM, PM, DC, TC, RT, CC, RC는 각 단계에서 오직 한 군데만 개설된다.
- SCLSC-O 모델의 CG와 DP는 고정되어 있으며, 고려되는 모든 단계에서 개설된다. 같은 의미로 SCLSC-N 모델의 경우에도 FG, SG, DP는 고정되어 있으며, 고려되는 모든 단계 개설된다.
- SCLSC-O 모델의 RM, MM, PM, DC, TC, RT, CG, DP 간 수송과정에서 발생하는 단위당 수송비용과 SCLSC-N 모델의 RM, MM, PM, DC, TC, RT, FG, CC, RC, FG, DP 간 수송과정에서 발생하는 단위당 수송비용은 사전에 알려져 있다.
- SCLSC-O 모델의 RM, MM, PM, DC, TC, RT, CG, DP에서 모바일폰 및 모바일폰 부품의 처리비용과 SCLSC-N 모델의 PM, MM, PM, DC, TC, RT, FG, CC, RC, FG, DP에서 모바일폰 및 모바일폰 부품의 R리비용은 사전에 알려져 있다.
- SCLSC-O 모델의 RM, MM, PM, DC, TC, RT의 개설과 운영을 위한 고정비용과 SCLSC-N 모델의 RM, MM, PM, DC, TC, RT, CC, RC의 개설과 운영을 위한 고정비용은 사전에 알려져 있다.
- SCLSC-O 모델과 SCLSC-N 모델의 각 단계에서 고려되는 모바일폰 및 부품의 처리 능력은 이전 단계에서 공급되는 모바일폰 및 부품 전부를 처리할 수 있다.
- SCLSC-O 모델과 SCLSC-N 모델에서 모바일폰을 각 단계 간 수송하는 과정에서 배출되는 CO2량은 사전에 알려져 있다.
- SCLSC-O 모델의 PM에서 모바일폰을 생산하는 과정에서 배출되는 CO2량은 사전에 알려져 있다. 같은 의미로 SCLSC-N 모델의 PM과 RC에서 모바일폰을 생산 및 처리하는 과정에서 배출되는 CO2량은 사전에 알려져 있다.
- SCLSC-O 모델의 PM에서 신기술을 도입했을 때 생기는 일자리 기회, 실업수, 손실 일수는 사전에 알려져 있다. 같은 의미로 SCLSC-N 모델의 MM, PM 과 RC에서 신기술을 도입했을 때 생기는 일자리 기회, 실업수, 손실 일수는 사전에 알려져 있다.

이와 같은 가정들을 고려해 수리모형을 설계하였다. 다음은 인수(Index set), 모수(Parameters), 의사결정 변수(Decision variable)를 정의한 것이다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

- **Index Set**

r: index of raw material supplier, $r \in R$

m: index of module manufacturer, $m \in M$

p: index of product manufacturer, $p \in P$

d: index of distribution center, $d \in D$

b: index of telecommunication company, $b \in B$

t: index of retailer, $t \in T$

u: index of first customer group, $u \in U$

f: index of customer group, $f \in F$

w: index of disposal center, $w \in W$

c: index of collection center, $c \in C$

v: index of recovery center, $v \in V$

s: index of secondary customer group, $s \in S$

o: index of module $o \in O$

j: index of job opportunities, $j \in J$

e: index of unemployment rate, $e \in E$

l: index of lost days caused by work's damages, $l \in L$

y: index of technology $y \in Y$

- **Parameters**

f_r: fixed cost at raw material supplier r

f_m: fixed cost at module manufacturer m

f_p: fixed cost at product manufacturer p

f_d: fixed cost at distribution center d

f_b: fixed cost at telecommunication company b

f_t: fixed cost at retailer t

f_w: fixed cost at disposal center w

f_c: fixed cost at collection center c

f_v: fixed cost at recovery center v

h_r: unit handling cost at raw material supplier r

h_m: unit handling cost at module manufacturer m

h_p: unit production cost at product manufacturer p

h_d: unit handling cost at distribution center d

h_r: unit handling cost at telecommunication company r

h_t: unit handling cost at retailer t

h_w: unit handling cost at disposal center w

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

h_c: unit handling cost at collection center c

h_v: unit handling cost at recovery center v

tc_{rm}: unit transportation cost from raw material supplier r to module manufacturer m

tc_{mp}: unit transportation cost from module manufacturer m to product manufacturer p

tc_{pd}: unit transportation cost from product manufacturer p to distribution center d

tc_{pu}: unit transportation cost from product manufacturer p to first customer group u

tc_{pf}: unit transportation cost from product manufacturer p to customer group f

tc_{db}: unit transportation cost from distribution center d to telecommunication company b

tc_{bt}: unit transportation cost from telecommunication company b to retailer t

tc_{tu}: unit transportation cost from retailer t to first customer group u

tc_{tf}: unit transportation cost from retailer t to customer group f

tc_{tw}: unit transportation cost from retailer t to disposal center w

tc_{uw}: unit transportation cost from first customer u to disposal center w

tc_{fw}: unit transportation cost from customer f to disposal center w

tc_{uc}: unit transportation cost from first customer u to collection center c

tc_{ft}: unit transportation cost from customer f to retailer t

tc_{cv}: unit transportation cost from collection center c to recovery center v

tc_{vr}: unit transportation cost from recovery center v to raw material supplier r

tc_{vs}: unit transportation cost from recovery center v to secondary customer group s

ϑ_1: CO_2 amount emitted from a vehicle per kilometer

ϑ_m: CO_2 amount emitted from production process of module manufacturer m

ϑ_p: CO_2 amount emitted from production process of product manufacturer p

ϑ_v: CO_2 amount emitted from recovering process in recovery center v

VE_1: capacity of raw material that can be shipped in one vehicle

VE_2: capacity of module that can be ship in one vehicle

VE_3: capacity of mobile phone that can be ship in one vehicle

VE_4 capacity of used mobile phone that can be ship in one vehicle

j_{yp}: number of created job opportunities, if a product manufacturer p using technology y

l_{yp}: number of lost days caused by work's damages during the use of technology y at product manufacturer p

e_{yp}: number of unemployment at product manufacturer p using technology y

j_{yv}: number of created job opportunities if a recovery center v using technology y

l_{yv}: number lost days caused by work's damages during the use of technology y at recovery center v

e_{yv}: number of unemployment rate at recovery center v using technology y

w_j^p: weight given to the element of created job opportunities j at product manufacturer p

w_e^p: weight given to the elements of unemployment rate e at product manufacturer p

w_l^p: weight given to the elements of lost days caused by work's damages l at product manufacturer p

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

w_j^v: weight given to the elements of created job opportunities *j* at recovery center *v*

w_e^v: weight given to the elements of unemployment rate *e* at recovery center *v*

w_l^v: weight given to the elements of lost days caused by work's damages *l* at recovery center v

SP_{pu}: unit selling price of mobile phone from product manufacturer *p* to first customer group *u*

SP_{pf}: unit selling price of mobile phone from product manufacturer *p* to customer group *f*

SP_{tu} unit selling price of mobile phone from retailer *t* to first customer group *u*

SP_{tf} unit selling price of mobile phone from retailer *t* to customer group *f*

SP_{vr}: unit selling price of part from recovery center *v* to raw material supplier *r*

SP_{vs} unit selling price of used mobile phone from recovery center *v* to secondary customer group *s*

α_1: ratio of mobile phone from product manufacturer to first customer group or customer group

α_2: ratio of mobile phone from product manufacturer to customer group

β_1: ratio of mobile phone from retailer to first customer group

β_2: ratio of mobile phone from retailer to disposal center

γ_1: ratio of mobile phone from customer group to disposal center

γ_2: ratio of mobile phone from first customer group to retailer

δ_1: ratio of mobile phone from first customer group to collection center

δ_2: ratio of mobile phone from first customer group to disposal center

ε_1: ratio of mobile phone from recovery center to secondary customer group

ε_2: ratio of mobile phone from recovery center to raw material supplier

- **Decision variable**

Q_{rm}: quantity transported from raw material supplier *r* to module manufacturer *m*

Q_{mp}: quantity transported from module manufacturer *m* to product manufacturer *p*

Q_{pd}: quantity transported from product manufacturer *p* to distribution center *d*

Q_{pu}: quantity transported from product manufacturer *p* to first customer group *u*

Q_{pf}: quantity transported from product manufacturer *p* to customer group *f*

Q_{db}: quantity transported from distribution center *d* to telecommunication company *b*

Q_{bt}: quantity transported from telecommunication company *b* to retailer *t*

Q_{tu}: quantity transported from retailer *t* to first customer group *u*

Q_{tf}: quantity transported from retailer *t* to customer group *f*

Q_{tw}: quantity transported from retailer *t* to disposal center *w*

Q_{uw}: quantity transported from first customer group *u* to disposal center *w*

Q_{fw}: quantity transported from customer group *f* to disposal center *w*

Q_{uc}: quantity transported from first customer group *u* to collection center *c*

Q_{ft}: quantity transported from customer group *f* to retailer *t*

Q_{cv}: quantity transported from collection center *c* to recovery center *v*

Q_{vr}: quantity transported from recovery center *v* to raw material supplier *r*

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Q_{vs}: quantity transported from recovery center *v* to secondary customer group *s*

d_{rm} distance between raw material supplier *r* to module manufacturer *m*

d_{mp} distance between module manufacturer *m* to product manufacturer *p*

d_{pd} distance between product manufacturer *p* to distribution center d

d_{pu} distance between product manufacturer *p* to first customer group *u*

d_{pf} distance between product manufacturer *p* to customer group *f*

d_{db} distance between distribution center *d* to telecommunication company *b*

d_{bt} distance between telecommunication company *b* to retailer *t*

d_{tu} distance between retailer *t* to first customer group *u*

d_{tf} distance between retailer *t* to customer group *f*

d_{uw} distance between first customer group *u* to disposal center *w*

d_{fw} distance between customer group f to disposal center *w*

d_{uc} distance between first customer group *u* to collection center *c*

d_{ut} distance between customer group *u* to retailer *t*

d_{cv} distance between collection center *c* to recovery center *v*

d_{vr} distance between recovery center *v* to raw material supplier *r*

d_{vs} distance between recovery center *v* to secondary customer group *s*

C_r: capacity of raw material supplier *r*

C_m: capacity of module manufacturer *m*

C_p: capacity of product manufacturer *p*

C_d: capacity of distribution center *d*

C_b: capacity of telecommunication company *b*

C_t: capacity of retailer *t*

C_u: capacity of first customer group *u*

C_f: capacity of first customer group *f*

C_c: capacity of collection center *c*

C_v: capacity of recovery center *v*

C_w: capacity of disposal center *w*

C_s: capacity of secondary customer group *s*

vr_r: takes the value of 1 if raw material supplier *r* is opened and 0 otherwise

vm_m: takes the value of 1 if module manufacturer *m* is opened and 0 otherwise

vp_p: takes the value of 1 if product manufacturer *p* is opened and 0 otherwise

vd_d: takes the value of 1 if distribution center *d* is opened and 0 otherwise

vb_b: takes the value of 1 if telecommunication company *b* is opened and 0 otherwise

vt_t: takes the value of 1 if retailer *t* is opened and 0 otherwise

vc_c: takes the value of 1 if collection center *c* is opened and 0 otherwise

vv_v: takes the value of 1 if recovery center *v* is opened and 0 otherwise

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

v_{yr} : takes the value of 1 if technology *y* is used at raw material supplier *r* and 0 otherwise

v_{yv} : takes the value of 1 if technology *y* is used at recycling center *v* and 0 otherwise

위에서 설명한 파라메터와 의사결정변수를 사용하여 SCLSC-O 모델과 SCLSC-N 모델의 수리모형을 설계하였다. 수리모형의 첫 번째 목적 함수 $F_1(x)$는 경제적인 요인을 고려하여 총 이익(Total Profit: TP)을 최대화하는 것이다. TP는 제품(부품)의 총판매이익(Total Revenue: TR)에서 SCLSC-O의 단계간 발생하는 총 수송비용(Total Transportation Cost: TTC), 총 처리비용(Total Handling Cost: THC), 총 고정비용(Total Fixed cost: TFC)의 합을 뺀 것으로 계산되었다. 두 번째 목적함수 $F_2(x)$는 환경적인 요인을 고려하며 각 단계 간의 수송과정에서 배출되는 총 CO_2량(Emitted CO_2 in Transportation Process: ETP) 또는 PM에서 모바일폰을 생산할 때 배출되는 총 CO2량, RC에서 모바일폰을 회복하는 과정에서 배출되는 총 CO_2량 (Emitted CO_2 in Handling Process: EHP)의 합을 최소화하는 것을 목적으로 하고 있다. 세 번째 목적함수 $F_3(x)$는 사회적인 요인을 최대화하는 것이며, PM과 RC에서 신기술을 도입할 경우 생성되는 신규 일자리(Job Opportunities: JO)에서 신기술을 인해 줄어드는 일자리 또는 실업률 (Unemployment Rate: UE)과 손실 일수(Lost day: LD)의 합을 뺀 것으로 계산되었다.

먼저 SCLSC-O 모델을 위한 수리모형을 설계한다. SCLSC-O 모델은 다양한 제약조건 하에서 세 가지 목적함수를 최적화시키는 것이다.

첫 번째 목적함수 $F_1(x)$는 SCLSC-O의 총 이익*(TR_SCLSC-O)*에서 총 고정비용*(TFC_SCLSC-O)*, 총 처리비용*(TFC_SCLSC-O)*, 총 수송비용*(TFC_SCLSC-O)*의 합을 뺀 값으로 계산되며, 이를 표현하면 수식(1)과 같다.

$$Maximize\ F_1(x) = TR_SCLSC\text{-}O - (TFC_SCLSC\text{-}O + THC_SCLSC\text{-}O + TTC_SCLSC\text{-}O) \quad (1)$$

수식(1)에서 *TR_SCLSC-O*는 PM에서 CG에 직접 수송되는 모바일폰의 총수량(Q_{pf})과 각 단계를 거쳐서 RT에서 CG에 수송되는 모바일폰의 총수량(Q_{tf})과 각각의 판매가격으로 SP_{pd}, SP_{tf}으로 구성되며, 이를 표현하면 수식(2)와 같다.

$$TR_SCLSC\text{-}O = Q_{pf} * SP_{pf} + Q_{tf} * SP_{tf} \quad (2)$$

SCLSC-O 모델의 총 고정비용*(TFC_SCLSC-O)*은 각 단계 RM, MM, PM, DC, MC, RT에 대한 고정비용과 개설여부로 구성된다. 예를 들면 RM의 고정비용은 PM 의 고정비용(f_r)과 개설여부(vr_r)로 계산된다. 이를 표현하면 수식(3)와 같다.

$$TFC_SCLSC\text{-}O = \sum_r f_r \cdot vr_r + \sum_m f_m \cdot vm_m + \sum_p f_p \cdot vp_p + \sum_d f_d \cdot vd_d +$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\sum_b f_b \cdot vb_b + \sum_t f_t \cdot vt_t \tag{3}$$

SCLSC-O 모델의 총 처리비용*(THC_CLSC-O)*은 각 단계 RM, MM, PM, DC, MC, RT에서 발생하는 처리용량과 개설여부로 구성된다. 예를 들면 RM에서 발생하는 처리비용은 RM에서 부품 단위당 처리비용(h_r), 처리수량(C_r), RM 개설여부(vr_r)로 계산된다. 이를 표현하면 수식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} THC_SCLSC\text{-}O = {} & \sum_r h_r \cdot C_r \cdot vr_r + \sum_m h_m \cdot C_m \cdot vm_m + \\ & \sum_p h_p \cdot C_p \cdot vp_p + \sum_d h_d \cdot C_d \cdot vd_d + \\ & \sum_b h_b \cdot C_b \cdot vb_b + \sum_t h_t \cdot C_t \cdot vt_t + \\ & \sum_w h_w \cdot C_w \end{aligned} \tag{4}$$

SCLSC-O 모델의 모든 단계간 모바일폰을 전달할 때 발생하는 총 수송비용*(TTC_CLSC-O)* 에 대해 수식(5)에서 표현했다. 예를 들면 RM에서 MM에 부품을 공급할 때 발생하는 비용은 RM에서 MM에 부품을 공급할 때 단위당 수송비용(tc_{rm}), RM에서 MM에 공급되는 총 부품 수량(C_r), 각 단계의 개설 여부(vr_r, vm_m)로 나타난다.

$$\begin{aligned} TTC_SCLSC\text{-}O = {} & \sum_r \sum_m tc_{rm} \cdot C_r \cdot vr_r \cdot vm_m + \sum_m \sum_p tc_{mp} \cdot C_m \cdot vm_m \cdot vp_p + \\ & \sum_p \sum_d tc_{pd} \cdot \alpha_1 \cdot C_p \cdot vp_p \cdot vd_d + \sum_p \sum_f tc_{pf} \cdot \alpha_2 \cdot C_p \cdot vp_p + \\ & \sum_d \sum_b tc_{db} \cdot C_d \cdot vd_d \cdot vb_b + \sum_b \sum_t tc_{bt} \cdot C_b \cdot vb_b \cdot vt_t + \\ & \sum_t \sum_f tc_{tf} \cdot \beta_1 \cdot C_t \cdot vt_t + \sum_f \sum_w tc_{fw} \cdot \gamma_1 \cdot C_f + \\ & \sum_f \sum_t tc_{ft} \cdot \gamma_2 \cdot C_f \cdot vt_t + \sum_t \sum_w tc_{tw} \cdot \beta_2 \cdot C_t \cdot vt_t \end{aligned} \tag{5}$$

두 번째 목적함수 $F_2(x)$ 는 SCLSC-O 모델의 단계간 수송과정에서 배출되는 CO_2량 *(EPT_SCLSC-O)*과 모바일폰 처리 과정에서 배출되는 CO_2량 *(EPH_CLSC-O)*으로 계산된다. 이를 표현하면 수식 (6)과 같다.

$$Minimize\ F_2(x) = EPT_SCLSC\text{-}O + EPH_SCLSC\text{-}O \tag{6}$$

수식(6)에서 *EPT_SCLSC-O*는 SCLSC-O 모델의 모든 설비간 모바일폰을 수송하는 과정에서 배출되는 CO_2량을 나타내는 수식이다. 예를 들면 RM에서 MM에 부품을 공급하는 과정에서 배출되는 CO_2량을 계산할 때 RM에서 MM까지 총 거리(d_{rm})와 개설 여부(vr_r, vm_m), RM에서 MM까지 가는 차량 수$\left(\frac{C_r}{VE_1}\right)$, 킬로미터 당 배출되는 CO_2량 (ϑ_1)로 계산되며 수식(7)과 같다.

$$EPT_SCLSC\text{-}O = \left(\sum_r \sum_m d_{rm} \cdot vr_r \cdot vm_m\right) \cdot \left(\frac{C_r}{VE_1}\right) \cdot \vartheta_1 +$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\left(\sum_m \sum_p d_{mp} \cdot vm_m \cdot vp_p\right) \cdot \left(\frac{C_m}{VE_2}\right) \cdot \vartheta_1$$
$$\left(\sum_p \sum_d d_{pd} \cdot vp_p\right) \cdot \left(\frac{\alpha_1 \cdot C_p}{VE_3}\right) \cdot \vartheta_1 \ +$$
$$\left(\sum_p \sum_f d_{pf} \cdot vp_p\right) \cdot \left(\frac{\alpha_2 \cdot C_p}{VE_3}\right) \cdot \vartheta_1 \ +$$
$$\left(\sum_d \sum_b d_{db} \cdot vd_d \cdot vb_b\right) \cdot \left(\frac{C_d}{VE_3}\right) \cdot \vartheta_1 \ +$$
$$\left(\sum_b \sum_t d_{bt} \cdot vb_b \cdot vt_t\right) \cdot \left(\frac{C_b}{VE_3}\right) \cdot \vartheta_1 \ +$$
$$\left(\sum_t \sum_f d_{tf} \cdot vt_t\right) \cdot \left(\frac{\beta_1 \cdot C_t}{VE_3}\right) \cdot \vartheta_1 \ +$$
$$\left(\sum_f \sum_t d_{ft} \cdot vt_t\right) \cdot \left(\frac{\gamma_1 \cdot C_f}{VE_4}\right) \cdot \vartheta_1 \ +$$
$$\left(\sum_f \sum_w d_{fw}\right) \cdot \left(\frac{\gamma_2 \cdot C_f}{VE_4}\right) \cdot \vartheta_1 \ +$$
$$\left(\sum_t \sum_w d_{tw} \cdot vt_t\right) \cdot \left(\frac{\beta_2 \cdot C_t}{VE_4}\right) \cdot \vartheta_1 \qquad (7)$$

수식(7)에서의 *EPH_SCLSC-O*는 MM과 PM에서 모바일폰 생산과정에서 배출되는 CO_2량을 나타난 것이다. 예를 들면 MM에서 배출되는 CO_2량은 처리되는 부품 총 수량(C_m), 개설 여부(vm_m), 부품 하나를 처리할 때 배출되는 CO_2량 (ϑ_m)로 계산되며 수식(8)과 같다.

$$EPH_SCLSC\text{-}O = \sum_m C_m \cdot \ vm_m \cdot \vartheta_m \ + \ \sum_p C_p \cdot \ vp_p \cdot \vartheta_p \qquad (8)$$

세 번째 목적함수 $F_3(x)$는 SCLSC-O 모델의 PM에서 사회적인 요인을 고려하며 수식(9) 와 같다.

$$Maximize \ \ F_3(x) = \ SF1_SCLSC\text{-}O \qquad (9)$$

수식 (10)에서 *SF1_SCLSC-O*는 SCLSC-O 모델의 PM에서 사회적인 요인인 일자리 기회(j_{yp}), 실업수(e_{yp}), 손실 일수(l_{yp})와 PM의 개설 여부(vr_r), PM에 도입한 새로운 기술 (v_{yp}) 사용 여부와 각각의 가중치(w_j^p, w_e^p, w_l^p)로 곱한 값으로 계산되며 이를 수식(11)에서 표현했다.

$$\begin{aligned} SP1_SCLSC\text{-}O = \ & w_j^p \cdot \ [(\sum_p j_{yp} \ \cdot vr_r \ \cdot v_{yp}) - \\ & w_e^p \cdot (\sum_p e_{yp} \ \cdot vr_r \ \cdot v_{yp}) - \\ & w_l^p \cdot \left(\sum_p l_{yp} \ \cdot vr_r \ \cdot v_{yp}\right)] \end{aligned} \qquad (10)$$

수식 (1), (6), (10)의 세 가지 목적함수를 최적화시키기 위한 제약조건은 다음과 같다.

$$\sum_r \sum_m Q_{rm} \cdot vr_r \cdot vm_m - \sum_m C_m \cdot vm_m \leq 0 \qquad (11)$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

수식 (11)는 SCLSC-O 모델의 PM에서 보내는 총 부품의 양은 MM에서 처리 할 수 있는 부품 양 보다 적거나 같아야 한다는 제약을 의미한다.

$$\sum_m \sum_p Q_{mp} \cdot vm_m \cdot vp_p - \sum_p C_p \cdot vp_p \leq 0 \tag{12}$$
$$\alpha_1 \cdot \sum_p \sum_d Q_{pd} \cdot vp_p \cdot vd_d - \sum_d C_d \cdot vd_d \leq 0 \tag{13}$$
$$\alpha_2 \cdot \sum_p \sum_d Q_{pd} \cdot vp_p \cdot vd_d - \sum_f C_f \leq 0 \tag{14}$$
$$\sum_d \sum_b Q_{db} \cdot vd_d \cdot vb_b - \sum_b C_b \cdot vb_b \leq 0 \tag{15}$$
$$\sum_b \sum_t Q_{bt} \cdot vb_b \cdot vt_t - \sum_t C_t \cdot vt_t \leq 0 \tag{16}$$
$$\beta_1 \cdot \sum_t \sum_f Q_{tf} \cdot vt_t - \sum_f C_f \leq 0 \tag{17}$$
$$\beta_2 \cdot \sum_t \sum_w Q_{tw} \cdot vt_t - \sum_w C_w \leq 0 \tag{18}$$
$$\gamma_1 \cdot \sum_f \sum_w Q_{fw} - \sum_w C_w \leq 0 \tag{19}$$
$$\gamma_2 \cdot \sum_f \sum_t Q_{ft} \cdot vt_t - \sum_t C_t \cdot vt_t \leq 0 \tag{20}$$

수식(12)에서 수식(20)까지는 수식(12)의 설명과 같이 처리 능력에 대한 제약조건들이다.

$$\sum_r vr_r = 1 \tag{21}$$
$$\sum_m vm_m = 1 \tag{22}$$
$$\sum_p vp_p = 1 \tag{23}$$
$$\sum_d vd_d = 1 \tag{24}$$
$$\sum_b vb_b = 1 \tag{25}$$
$$\sum_t vt_t = 1 \tag{26}$$

SCLSC-O 모델의 RM은 오직 한 군데만 개설된다는 제약은 수식(22)와 같다. 같은 의미로 MM, PM, DC, MC, RT에 대한 개설 제약은 수식(21)에서 수식(26)까지이다.

$$vr_r = \{0,1\}, \quad \forall R \tag{27}$$
$$vm_m = \{0,1\}, \quad \forall M \tag{28}$$
$$vp_p = \{0,1\}, \quad \forall P \tag{29}$$
$$vd_d = \{0,1\}, \quad \forall D \tag{30}$$
$$vb_b = \{0,1\}, \quad \forall B \tag{31}$$
$$vt_t = \{0,1\}, \quad \forall T \tag{32}$$

수식(27)에서 수식(32)까지는 RM, MM, PM, DC, MC, RT 각 단계에서의 개설 여부를 나타내고 있다. 즉 각 단계에서 어떤 센터 (혹은 설비)가 개설 되면 1의 값을 가지며, 개설되지 않을 경우에는 0의 값을 가진다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$C_r, C_m, C_p, C_d, C_b, C_t, \geq 0,\ \forall r \in R, \forall m \in M, \forall p \in P, \forall d \in D, \forall b \in B, \forall t \in T, \quad (33)$$

수식 (33)는 SCLSC-O 모델에 사용되는 의사결정변수가 비부정수(Non-negativity) 임을 나타내고 있다.

다음은 본 연구에서 제안한 SCLSC-N 모델의 수리모형을 제시한다. SCLSC-N 모델의 첫 번째 목적함수 $F_1(x)$ 는 SCLSC-N의 총 이익*(TR_SCLSC-N)*에서 총 고정비용*(TFC_SCLSC-N)*, 총 처리비용*(TFC_SCLSC-N)*, 총 수송비용*(TFC_SCLSC-N)*의 합을 뺀 값으로 계산되며, 이를 표현하면 수식(34)과 같다.

$$Maximize\ \ F_1(x) = TR_SCLSC\text{-}N - (TFC_SCLSC\text{-}N + THC_SCLSC\text{-}N + TTC_SCLSC\text{-}N) \quad (34)$$

수식(35)에서 총 이익*(TR_SCLSC-N)* 은 제품의 총수량과 판매가격으로 계산된다. SCLSC-N 모델에서는 SCLSC-O 모델과 같이 FG에 모바일폰을 NDL와 DSP를 통한 판매하는 판매 이익과 추가로 회복된 재활용 부품을 RM에서 사용한 이익과 재사용 가능한 모바일폰을 SG에 판매하는 이익이 각각 발생된다. 예를 들어 총 이익은 RM에서 FG에 직접 판매하는 모바일폰 수량(Q_{pu})과 직접 판매하는 모바일폰 단위 단 가격(SP_{pu})로 계산되며, 각 단계를 거쳐서 RT에서 FG에 판매하는 모바일폰 수량(Q_{tu})과 직접 판매하는 모바일폰 단위 단 가격(SP_{tu})로 계산된다. RC에서 발생하는 판매이익도 RM에서와 같이 계산되며 수식(35)에서 표현했다.

$$TR_\ SCLSC\text{-}N\ =\ Q_{pu} * SP_{pu} + Q_{tu} * SP_{tu} + Q_{vr} * SP_{vr} + Q_{vz} * SP_{vz} \quad (35)$$

SCLSC-N 모델의 총 고정비용*(TFC_SCLSC-N)*은 각 단계 RM, MM, PM, DC, MC, RT, CC, RC 에 대한 고정비용과 개설여부로 구성된다. 예를 들면, RM의 고정비용은 PM의 고정비용(f_r)과 개설여부(vr_r)로 계산된다. 이를 표현하면 수식(36)와 같다.

$$\begin{aligned} TFC_SCLSC\text{-}N = & \textstyle\sum_r f_r \cdot vr_r + \sum_m f_m \cdot vm_m + \\ & \textstyle\sum_p f_p \cdot vp_p + \sum_d f_d \cdot vd_d + \\ & \textstyle\sum_b f_b \cdot vb_b + \sum_t f_t \cdot vt_t + \\ & \textstyle\sum_c f_c \cdot vc_c + \sum_v f_v \cdot vv_v \end{aligned} \quad (36)$$

SCLSC-N 모델의 총 처리비용*(THC_SCLSC-N)*은 RM, MM, PM, DC, MC, RT, CC, RT의 각 단계에서 발생하는 처리용량과 개설여부로 구성된다. 예를 들면 RM에서 발생하는 처리비용은 RM에서 부품 단위당 처리비용(h_r), 처리수량(C_r), RM의 개설여부(vr_r)로 계산된다. 이를 표현하면 수식(37)와 같다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$THC_SCLSC\text{-}N = \sum_r h_r \cdot C_r \cdot vr_r + \sum_m h_m \cdot C_m \cdot vm_m + \sum_p h_p \cdot C_p \cdot vp_p + \sum_d h_d \cdot C_d \cdot vd_d + \sum_b h_b \cdot C_b \cdot vb_b + \sum_t h_t \cdot C_t \cdot vt_t + \sum_c h_c \cdot C_c \cdot vc_c + \sum_v h_v \cdot C_v \cdot vv_v + \sum_w h_w \cdot C_w \quad (37)$$

SCLSC-N 모델의 총 수송비용*(TTC_ SCLSC-N)*은 RM, MM, PM, DC, MC, RT, CC, RT의 각 단계를 통해 부품과 제품의 수송될 때 발생하는 수송비용의 합으로 구성된다. 예를 들면 RM에서 MM에 부품을 공급할 때 발생하는 수송비용은 RM에서 MM에 부품을 공급할 때 단위당 수송비용(tc_{rm}), RM에서 MM에 공급되는 총 부품수량(C_r), 각 단계의 개설 여부(vr_r, vm_m)로 나타난다. 이를 표현하면 수식(38)와 같다.

$$TTC_SCLSC\text{-}N = \sum_r \sum_m tc_{rm} \cdot C_r \cdot vr_r \cdot vm_m + \sum_m \sum_p tc_{mp} \cdot C_m \cdot vm_m \cdot vp_p + \sum_p \sum_d tc_{pd} \cdot \alpha_1 \cdot C_p \cdot vp_p \cdot vd_d + \sum_p \sum_u tc_{pu} \cdot \alpha_2 \cdot C_p \cdot vp_p + \sum_d \sum_b tc_{db} \cdot C_d \cdot vd_d \cdot vb_b + \sum_b \sum_t tc_{bt} \cdot C_b \cdot vb_b \cdot vt_t + \sum_t \sum_u tc_{tu} \cdot C_t \cdot vt_t + \sum_u \sum_c tc_{uc} \cdot \delta_1 \cdot C_u \cdot vc_c + \sum_u \sum_w tc_{uw} \cdot \delta_2 \cdot C_u + \sum_c \sum_v tc_{cv} \cdot C_c \cdot vc_c + vc_c \cdot vv_v + \sum_v \sum_r tc_{vr} \cdot \varepsilon_1 \cdot C_v \cdot vv_v \cdot vr_r + \sum_v \sum_s tc_{vs} \cdot \varepsilon_2 \cdot C_v \cdot vv_v \quad (38)$$

SCLSC-N 모델의 두 번째 목적함수 $F_2(x)$ 는 단계 간 수송과정에서 배출되는 CO_2량 *(EPT_SCLSC-N)*과 모바일폰 처리 과정에서 배출되는 CO_2량 *(EPH_SCLSC-N)*으로 계산된다. 이를 표현하면 수식 (39)과 같다.

$$Minimize\ F_2(x) = EPT_SCLSC\text{-}N + EPH_SCLSC\text{-}N \quad (39)$$

수식 (39)에서 *EPT_SCLSC-N*은 SCLSC-N 모델의 모든 설비들 간에 모바일폰을 수송하는 과정에서 배출되는 CO_2 총량을 나타나는 수식이다. 예를 들면 RM에서 MM에 부품을 공급하는 과정에서 배출되는 CO_2 량을 계산할 때 RM에서 MM까지 총 거리(d_{rm}), RM과 MM의 개설 여부(vr_r, vm_m), RM에서 MM까지 가는 총 차량 수$\left(\frac{C_r}{VE_1}\right)$, 킬로미터 당 배출되는 CO_2량 (ϑ_1)로 계산된다. 이를 표현하면 수식 (40)과 같다.

$$EPT_CLSC\text{-}N = \left(\sum_r \sum_m d_{rm} \cdot vr_r \cdot vm_m\right) \cdot \left(\frac{C_r}{VE_1}\right) \cdot \vartheta_1 + \left(\sum_m \sum_p d_{mp} \cdot vm_m \cdot vp_p\right) \cdot \left(\frac{C_m}{VE_2}\right) \cdot \vartheta_1 +$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\left(\sum_p \sum_d d_{pd} \cdot vp_p\right) \cdot \left(\frac{\alpha_1 \cdot C_p}{VE_3}\right) \cdot \vartheta_1 +$$
$$\left(\sum_p \sum_u d_{pu} \cdot vp_p\right) \cdot \left(\frac{\alpha_2 \cdot C_p}{VE_3}\right) \cdot \vartheta_1 +$$
$$\left(\sum_d \sum_b d_{db} \cdot vd_d \cdot vb_b\right) \cdot \left(\frac{C_d}{VE_3}\right) \cdot \vartheta_1 +$$
$$\left(\sum_b \sum_t d_{bt} \cdot vb_b \cdot vt_t\right) \cdot \left(\frac{C_b}{VE_3}\right) \cdot \vartheta_1 +$$
$$\left(\sum_t \sum_u d_{tu} \cdot vt_t\right) \cdot \left(\frac{C_t}{VE_3}\right) \cdot \vartheta_1 +$$
$$\left(\sum_u \sum_c d_{uc} \cdot vc_c\right) \cdot \left(\frac{\delta_1 \cdot C_u}{VE_4}\right) \cdot \vartheta_1 +$$
$$\left(\sum_u \sum_w d_{uw}\right) \cdot \left(\frac{\delta_2 \cdot C_u}{VE_4}\right) \cdot \vartheta_1 +$$
$$\left(\sum_c \sum_v d_{cv} \cdot vc_c \cdot vv_c\right) \cdot \left(\frac{C_c}{VE_4}\right) \cdot \vartheta_1 +$$
$$\left(\sum_v \sum_r d_{vr}\right) \cdot \left(\frac{\varepsilon_1 \cdot C_v}{VE_1}\right) \cdot \vartheta_1 +$$
$$\left(\sum_v \sum_s d_{vs} \cdot vv_v\right) \cdot \left(\frac{\varepsilon_2 \cdot C_v}{VE_3}\right) \cdot \vartheta_1 \quad (40)$$

수식 (40)에서 *EPH_SCLSC-N*은 MM, PM, RC의 제품 생산과정에서 배출되는 CO_2 총량을 나타난 것이다. 예를 들면 MM에서 배출되는 CO_2 총량은 처리되는 부품 총 수량(C_m), 개설 여부(vm_m), 부품 하나를 처리할 때 배출되는 CO_2량 (ϑ_m)로 계산된다. 이를 표현하면 수식(41)과 같다.

$$EPH_SCLSC\text{-}N = \sum_m C_m \cdot vm_m \cdot \vartheta_m + \sum_p C_p \cdot vp_p \cdot \vartheta_p + \sum_v C_v \cdot vv_v \cdot \vartheta_v \quad (41)$$

SCLSC-N 모델의 세 번째 목적함수 $F_3(x)$ 는 PM에서의 사회적인 요인(*SF1_SCLSC-N*)과 RC에서의 사회적인 요인(*SF2_SCLSC-N*)으로 구성된다. 이를 표현하면 수식(42)와 같다.

$$Maximize\ \ F_3(x) = SF1_SCLSC\text{-}N + SF2_SCLSC\text{-}N \quad (42)$$

수식(42)에서 *SF1_SCLSC-N*은 PM에서 신기술(v_{yp})을 사용할 경우 생기는 일자리 기회(j_{yp}), 실업수(e_{yp}), 손실 일수(l_{yp})를 각각 가중치(w_j^p, w_e^p, w_l^p)로 곱하여 계산된다. 이를 표현하면 수식(43)과 같다.

$$SF1_SCLSC\text{-}N = w_j^p \cdot \left[\left(\sum_p j_{yp} \cdot vp_p \cdot v_{yp}\right) - w_e^p \cdot \left(\sum_p e_{yp} \cdot vp_p \cdot v_{yp}\right) - w_l^p \cdot \left(\sum_p l_{yp} \cdot vp_p \cdot v_{yp}\right)\right] \quad (43)$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

수식(43)에서 *SF2_SCLSC-N*은 RC에서 신기술(v_{yv})을 사용할 경우 생기는 일자리 기회(j_{yv}), 실업률(e_{yv}), 손실 일수(l_{yv})를 각각 가중치(w_j^v, w_e^v, w_l^v)를 곱하여 계산된다. 이를 표현하면 수식은 (44)과 같다.

$$\begin{aligned} SF2_SCLSC\text{-}N = \; & w_j^v \cdot [(\textstyle\sum_v j_{yv} \cdot vv_v \cdot v_{yv}) - \\ & w_e^v \cdot (\textstyle\sum_v e_{yv} \cdot vv_v \cdot v_{yv}) - \\ & w_l^v \cdot (\textstyle\sum_v l_{yv} \cdot vv_v \cdot v_{yv}); \end{aligned} \tag{44}$$

수식 (34), (39), (42)의 세 가지 목적함수를 최적화시키기 위한 제약조건은 다음과 같다. 수식(45)에서 수식(56)까지는 SCLSC-N 모델의 각 설비들 간의 처리 가능 용량을 제약하고 있다. 예를 들면 수식 (45)는 RM에서 보내는 부품 총 수량(Q_{rm})은 MM의 부품 처리 수량(C_m) 보다 작거나 같아야 한다는 것을 의미한다.

$$\textstyle\sum_r \sum_m Q_{rm} \cdot vr_r \cdot vm_m - \sum_m C_m \cdot vm_m \le 0 \tag{45}$$
$$\textstyle\sum_m \sum_p Q_{mp} \cdot vm_m \cdot vp_p - \sum_p C_p \cdot vp_p \le 0 \tag{46}$$
$$\alpha_1 \cdot \textstyle\sum_p \sum_d Q_{pd} \cdot vp_p \cdot vd_d - \sum_d C_d \cdot vd_d \le 0 \tag{47}$$
$$\alpha_2 \cdot \textstyle\sum_p \sum_d Q_{pd} \cdot vp_p \cdot vd_d - \sum_u C_u \tag{48}$$
$$\textstyle\sum_d \sum_b Q_{db} \cdot vd_d \cdot vb_b - \sum_b C_b \cdot vb_b \le 0 \tag{49}$$
$$\textstyle\sum_b \sum_t Q_{bt} \cdot vb_b \cdot vt_t - \sum_t C_t \cdot vt_t \le 0 \tag{50}$$
$$\textstyle\sum_t \sum_u Q_{tu} \cdot vt_t - \sum_u C_u \le 0 \tag{51}$$
$$\delta_1 \cdot \textstyle\sum_u \sum_w Q_{uw} - \sum_w C_w \le 0 \tag{52}$$
$$\delta_2 \cdot \textstyle\sum_u \sum_c Q_{uc} \cdot vc_c - \sum_c C_c \cdot vc_c \le 0 \tag{53}$$
$$\textstyle\sum_c \sum_v Q_{cv} \cdot vc_c \cdot vv_v - \sum_v C_v \cdot vv_v \le 0 \tag{54}$$
$$\varepsilon_1 \cdot \textstyle\sum_v \sum_r Q_{vr} \cdot vv_v \cdot vr_r - \sum_r C_r \cdot vr_r \le 0 \tag{55}$$
$$\varepsilon_2 \cdot \textstyle\sum_v \sum_s Q_{vs} \cdot vv_v - \sum_s C_s \le 0 \tag{56}$$

SCLSC-N 모델에서 RM이 오직 한 군데만 개설된다는 제약은 수식 (57)과 같다.

$$\textstyle\sum_r vr_r = 1 \tag{57}$$

수식 (58)에서 수식(64)까지는 수식 (58)과 같은 의미로 MM, PM, DC, MC, RT, CC, RC는 각각 오직 한 군데만 개설된다는 제약이다.

$$\textstyle\sum_m vm_m = 1 \tag{58}$$
$$\textstyle\sum_p vp_p = 1 \tag{59}$$
$$\textstyle\sum_d vd_d = 1 \tag{60}$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\sum_b vb_b = 1 \tag{61}$$
$$\sum_t vt_t = 1 \tag{62}$$
$$\sum_c vc_c = 1 \tag{63}$$
$$\sum_v vv_v = 1 \tag{64}$$

SCLSC-N 모델의 각 단계인 RM, MM, PM, DC, MC, RT, CC, RC의 개설 여부를 나타내는 제약은 수식(65)에서 수식(72)까지에 표현됐다. 예를 들어 수식 (65)는 RM에 대한 개설 여부(vr_r)는 “1”을 가지면 개설되고 “0”을 가지면 개설되지 않다는 제약이다.

$$vr_r = \{0,1\}, \quad \forall R \tag{65}$$
$$vm_m = \{0,1\}, \quad \forall M \tag{66}$$
$$vp_p = \{0,1\}, \quad \forall P \tag{67}$$
$$vd_d = \{0,1\}, \quad \forall D \tag{68}$$
$$vb_b = \{0,1\}, \quad \forall B \tag{69}$$
$$vt_t = \{0,1\}, \quad \forall T \tag{70}$$
$$vc_c = \{0,1\}, \quad \forall C \tag{71}$$
$$vv_v = \{0,1\}, \quad \forall V \tag{72}$$

SCLSC-N 모델의 모든 단계에서의 각 단계들은 비부정수(Non-negativity)를 가져야 한다는 제약은 수식 (73)과 같다.

$$C_r, C_m, C_p, C_d, C_b, C_t, C_c, C_v \geq 0, \forall r \in R, \forall m \in M, \forall p \in P, \forall d \in D, \forall b \in B, \forall t \in T, \forall c \in C, \forall v \in V \tag{73}$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 접근법

4.1 다목적 최적화 방법론

최적화(Optimization)란 주어진 제약조건을 만족하면서 최적해(Optimal Solution)를 찾는 것을 의미한다. 일반적인 최적화 문제는 하나의 목적함수를 가지지만 경우에 따라서는 두 개 또는 그 이상의 목적 함수를 동시에 고려해야 하는 경우도 있다(김갑환 외, 2008). 이와 같은 다목적 함수를 가진 문제를 최적화하고자 할 경우 각 목적함수들은 다양한 원인으로 인해 서로 상충(Trade-off)되며 하나의 목적함수를 향상시키면 다른 목적함수가 희생될 수 있다 (Krokosky 1968; Pearl et al. 1984; Osyczka et al. 1985). 예를 들면 SCLSC 모델을 최적화하는데 있어서 경제적인 요인인 총이익의 최대화와 환경적인 요인인 CO_2 배출량과 같은 요소를 최소화하는 문제를 고려할 때, 총이익을 최대화하기 위해 총비용을 최소화시켜야 한다. 하지만 CO_2 배출량을 최소화시키기 위해서는 적지 않는 비용이 들기 때문에 총 비용이 증가할 것이고, 이는 총 이익의 최대화와 서로 상충되는 현상이 일어날 수밖에 없다(Shin et al., 2011; Kumar et al. 2014). 이와 같이 주어진 제약 조건하에서 복수의 목적함수를 최소화 또는 최대화하는 문제를 다목적 최적화 문제 (Multi-Objective Optimization: MO)라고 한다. 일반적으로 다목적 최적화 문제는 수식 (74) - (75)와 같이 표현할 수 있다.

$$Maximize\ \{Z1=F_1(x), Z1=F_1(x), Z1=\ F_1(x)\ \ Zq=F_q(x)\} \tag{74}$$

$$Subject\ to:\ \ g_i(x) \le 0\ \ \ , i= 1,2.m \tag{75}$$

MO에 대한 연구는 1960년대부터 진행되어 왔으며, 다수의 목적 함수가 서로 상충되는 통신 네트워크 최적화 문제, 제조공정 최적화 문제 등에 주로 적용되어 왔다. 최근에는 경제적, 환경적, 사회적인 요인과 같은 다수의 목적함수를 가지는 SCLSC 모델의 최적화에도 많이 적용되고 있다 (Paksoy et al., 2011; You et al., 2012; Pishvaee et al., 2012; Amin et al., 2012; Liu et al. 2014).

MO 문제에서는 각 목적 함수의 해가 서로 상충되기 때문에 하나의 목적 함수의 해가 최적해가 될 수 없으며, 각 목적 함수의 해를 단순하게 비교하기도 어렵다. 따라서 MO 문제를 해결하기 위해 각 목적 함수의 적합도를 기반으로 하여 서로 간의 해에 뒤처지지 않을 정도의 우수한 해집합을 구하는 방법이 주로 사용되고 있다 (Bentley et al., 1998; Fonseca et al., 1993; Gen et al. 2009). 이를 파레토 최적해 (Pareto Optimal Solution: Pos)라 한다. 예를 들어 목적 함수가 두 개인 경우의 Pos는 그림 4-1과 같이 표현될 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

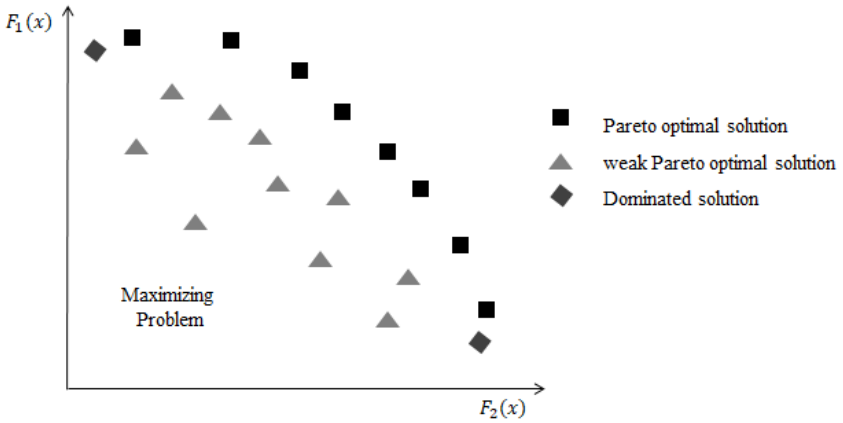

그림 4-1. 목적함수가 두 개인 경우 Pos

MO 문제에서 Pos를 보존하는 방법으로는 ε-Constraint Method, Weighted Sum Method, Normal Boundary Intersection Method 등이 주로 사용되어 왔다(김갑환 외, 2008).

ε-Constraint Method은 주어진 한 개의 목적함수를 제외한 다른 모든 목적 함수의 최대 수준을 정하고 이 범위 내에서 그 목적함수를 최적화시키는 방법이다. 즉, 설정된 최대 수준을 조금씩 바꾸면서 최적 설계를 수행하고 이 과정을 모든 목적 함수에 대해서 수행한다(Steuer, 1986),

MO 문제에서 가장 많이 사용되는 방법인 Weighted Sum method는 MO 문제를 단일 목적 함수(Single objective optimization: SO)를 가지는 여러 개의 최적화 문제로 바꾸어서 해결하는 방법이다. 이때 SO는 주어진 각각의 목적 함수에 가중치를 곱해서 모두 더함으로써 최적해를 얻게 되며, 이 가중치를 조금씩 변화시키면서 만들어진 SO 문제의 해를 목적 함수 공간에 배열하면 Pos을 얻을 수 있다(Marler, and Arora 2009). 그러나 일반적으로 Pos 표면이 균일하게 분산되지 않은 경우 최적해를 찾을 수 없다는 단점이 있다.

Normal Boundary Intersection Method는 균일한 간격으로 효율적인 해 집단을 탐색하기 위한 방법으로 Das et al. (1998)의 연구에서 처음으로 언급되었다. Weighted Sum method 방법에 비해 일반적인 비선형 다목적 최적화 문제에 대해 균일하게 분산된 경계점을 구하는 데 효율적인 방법이지만 경계점 탐색에만 집중해 Pos을 놓치는 경우도 있다(Shukla, 2007).

최근에는 Meta-heuristic 방법 중 하나인 유전알고리즘 (Genetic Algorithm: GA) 접근법을 이용한 MO 방법이 주목받고 있다. 그 이유는 GA 접근법은 실행 과정 중 한번에 복수의 해를 생성하며, 이는 한번의 실행으로 복수의 POS 집합을 구할 수 있기 때문에 탐색 공간이 넓은 MO 문제 해결에 적합한 방법이다(Murata et al. 1996). 다목적 유전알고리즘 (Multi-Objective Genetic Algorithm: MOGA)은 Schaffer et al. (1985) 에서 처음으로 연구되었다, 그 후

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(Goldberg 1989; Murata et al. 1995; Fonseca and Fleming 1993; Gen and Lin 2005)의 연구를 통해 더욱 발전되었으며, 현재까지도 MOGA 기법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 지금까지 제안된 MOGA는 Pareto Ranking 평가 기법과 다목적 함수 가중치 부가 평가 기법 두 가지 종류로 나눌 수 있다. Pareto Ranking 평가 기법은 해의 우월 관계를 기반으로 하여 정해지는 순서로 적합도 함수를 만들어 이것에 의해 선택을 시행한다 (김갑환 외, 2008). 현재까지 다양한 Pareto Ranking 평가 기법이 제안되었다. 예를 들면 Pareto Ranking GA (Goldberg 1989), 다목적GA(Fonseca and Fleming 1995), Non-dominated Sorting GA(Deb, 2002) 등의 방법이 있다. 다목적 함수 가중치 부가 평가 기법은 다목적 함수에 각각의 가중치를 더하여 단일 목적으로 전환하는 것으로 Pos를 구하는 방법이다. 주로 많이 쓰이는 가중치 부가 평가 기법에는 Ishibuchi et al. (2003)의 연구에서 제안된 랜덤 가중치 부가(Random-weight GA) 기법과 Gen and Cheng (2000) 에서 제안된 적응 가중치 부가(Adaptive-weight GA) 기법이 있다.

4.2 메타휴리스틱 기법

휴리스틱(Heuristic) 기법은 최적해를 정확하게 찾는 방법이 아직 없거나 실제로 해결하기 불가능한 문제를 가능하게 해주는 기법이다. 실질적으로 어떤 의사결정을 위해서는 다양한 변수를 고려해야 한다. 이는 정보의 부족과 시간제약으로 완벽한 의사결정을 할 수 없다. 따라서 제한된 정보와 시간 제약을 고려해 실현 가능한 해답이 필요한데 이를 위해 휴리스틱 기법을 사용한다(황숙희, 2011). 하지만 휴리스틱 기법은 전역적 최적해를 보장하지 않아 해결하고자 하는 문제마다 각기 다른 특성에 맞추어 개발해야 하는 어려움이 있다. 이에 따라 특정 문제가 갖는 정보에 크게 구속되지 않고 다양한 문제에 적용 가능한 상위 수준의 방법인 메타휴리스틱(Meta-Heuristic)에 대한 이론과 그 응용에 관한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 1960년대부터 현재까지 메타휴리스틱의 여러 알고리듬이 꾸준히 제안되어 왔다. 대부분의 메타휴리스틱 기법은 자연 현상에서 영감을 얻어 개발되었으며, 과거 탐색에서 얻은 정보를 다음 세대에 이용한다. 이를 모방 현상에 따라 구분하면 첫째, 자연의 진화 과정을 모방한 진화 알고리즘(Evolutionary Algorithm)인 진화 전략(Evolution Strategy), 유전알고리듬(Genetic Algorithm: GA), 둘째, 군집 생활하는 생물들의 행위를 모방한 Particle Swarm Optimization(PSO), Ant Colony Optimization(ACO), Cuckoo Search (CS) 알고리듬, 셋째, 자연 및 사회 현상을 모방한 알고리듬인 Tabu Search(TS), Simulated Annealing(SA), 넷째, 체계적인 반복으로 이웃 탐색하는 알고리듬인 Hill Climbing (HC), Variable Neighborhood Search (VNS), Iterated Local Search (ILS) 등이 있다(김여근 2017). 이를 포함하여 메타휴리스틱 기법들의 관계를 설명하면 그림 4-2와 같다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

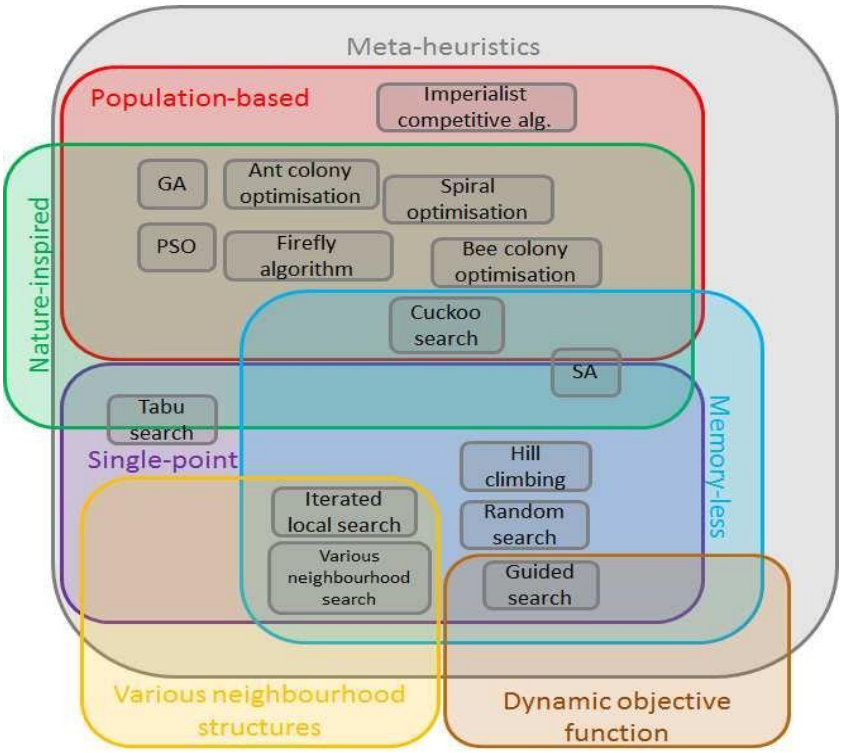

그림 4-2. 메타휴리스틱 기법들

4.2.1 GA

GA 접근법은 자연계의 생물진화 과정의 현상에 기초한 확률적인 최적해 기법으로서 Holland(1975)에 의해 처음으로 개발되었다. 그후 Goldberg(1985), Gen (1997) 등의 연구를 통해 개선되었고 현재까지도 활발한 연구가 이루어지고 있다. GA은 전역적 최적화 기법으로 기존의 접근법으로는 해결하기 어려운 대규모의 NP-hard 문제를 해결할 수 있는 접근법 중의 하나이며, 복잡한 탐색공간에서 전역적 최적해를 탐색하는 접근법이기 때문에 다양한 분야에 적용되어 그 효율성을 증명해 왔다. GA 접근법의 가장 큰 특징은 잠재적 복수해(Potential multi-solution)들로 이루어진 해집단(Population)을 이용한다는 것이다(Johnson, 1997). 메타휴리스틱 접근법인 SA, HC는 하나의 해로부터 탐색을 시작하여 이를 개선시키면서 최적해를 구하는 방법을 사용하고 있다. 반면에 GA 접근법은 잠재적 복수해들로 이루어진 해집단을 이용하여 탐색을 시작하기 때문에 탐색범위가 더 넓고 복잡한 문제에 대해 SA, HC 보다 더 효율적인 접근법으로 알려져 왔다.

GA 접근법은 고려되는 문제에 대해 제약조건을 만족하는 초기집단을 무작위로 생성하며, 이들 초기집단에 대해 유전연산자(Genetic operator)인 교차변이(Crossover), 돌연변이(Mutation), 선택(Selection)을 적용하여 최적해를 도출하는 방법을 사용한다. 여기에서 유전연산자를

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

적용하기 이전 단계의 집단을 부모집단(Parent: P)이라고 하고 유전연산자를 적용한 후에 생성된 집단을 자손집단(Offspring: O)이라고 한다(Cheng et al. 1996).

GA 접근법의 적용절차는 먼저 염색체(Chromosome) 혹은 개체(Individual) 라고 불리는 표현방법을 사용하여 고려된 문제를 표현하며, 이를 통해 초기 집단을 생성한다. 생성된 초기 집단에 대해 교차변이와 돌연변이를 적용하여 유전적 조작을 실행한 후 자손집단을 생성한다. 생성된 자손집단에 대해 적합도 평가(Fitness evaluation)를 실시하여 제약을 만족하는 새로운 집단을 선택한다. 이 과정을 총 세대(Generation) 수가 끝날때까지 반복 실행하여 최적해를 구한다. GA 접근법의 기본적인 진행과정은 그림 4-3과 같다.

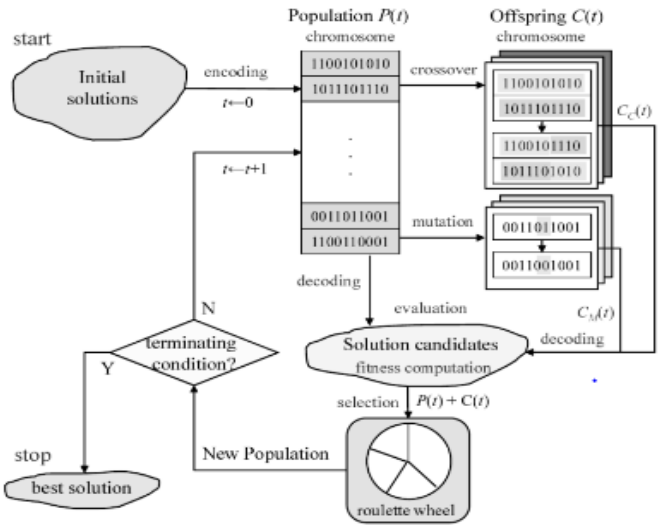

그림 4-3. GA의 기본적인 진행 과정 (Gen et al., 2008)

1) 해의 표현법 및 초기 집단 생성

GA 접근법에서 고려된 문제에 대해 잠재적 해를 유전적으로 표현하고 평가 함수를 어떻게 설정하느냐는 매우 중요한 문제이다. 유전자 표현은 고려된 문제의 해 공간을 어떻게 탐색 공간에 대응시키느냐를 결정하는 것이다. 이것은 탐색 과정의 성공 여부에 크게 영향을 미친다. GA 접근법에는 표현법에는 비트 스트링 표현법(Bit String Representation)과 실수 표현법(Real Number Representation)이 있다. 비트 스트링 표현법은 0 혹은 1과 같은 특정 정수 값은 사용하며, 실수 표현법은 적합한 실수 값을 사용해 잠재 해를 유전적으로 표현한다. 본 연구는 SCLSC 모델에서 각 단계에서 고려되는 설비 혹은 센터의 개설 여부에 따라 발생하는 경제적인 요인, 환경적 요인, 사회적 요인에 대한 각각의 목적함수를 최적화하였다. 이 방법은 각 단계에서 개설되는 설비 혹은 센터에 대해 임의로 번호를 할당시키고 이를

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

랜덤하게 발생시켜 그 개설 여부를 결정하는 방법을 사용하기 때문에 위의 두 가지 표현법 중에서 실수 표현법을 사용하는 것이 바람직하다. 본 연구에서 설계한 SCLSC-N 모델의 각 단계들을 그림 4-4 과 같이 표현했다.

	RM	MM	PM	DC	TC	RT	CC	RC
Initial Solution =	5	3	1	4	1	2	3	2

그림 4-4. 본 연구에서 사용된 실수 표현법

그림 4-4에서 총 8개 단계를 표현했으며, RM은 5번째 공급업체, MM은 3번째 제조 업체, PM은 1번째 제조 업체, DC는 4번째 센터, TC는 1번째 업체, RT 는 2번째 소매점, CC는 3번째 센터, RC는 2번째 센터가 각각 개설된다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 실수 표현법을 사용해 초기 집단을 생성할 수 있다. 만약에 초기 집단의 크기(Population Size)가 5일 경우 그림 4-5와 같은 초기해 집단을 랜덤 하게 만들 수 있다.

	RM	MM	PM	DC	TC	RT	CC	RC
P 1 =	5	3	1	4	1	2	3	2
P 2 =	4	5	4	4	3	2	2	4
P 3 =	2	8	6	2	2	3	6	3
P 4 =	1	3	7	1	2	6	1	1
P 5 =	7	2	2	6	4	1	2	2

그림 4-5. 초기해 집단

2) 유전연산자(Genetic Operator)

생성된 초기해 집단의 해를 개선하기 위해 유전연산자를 적용한다. 유전연산자는 다음과 같이 세 가지 단계를 거쳐 진행된다.

(1) 교차변이(Crossover)

교차변이는 부모 집단을 구성하는 개체들 중에 일부를 랜덤하게 선택하고, 선택된 개체를 구성하는 유전인자(Gene)들의 일부를 서로 교환하며 새로운 개체를 생성하는 절차로 진행된다. 일반적으로 Single-Point Crossover, Multi-Point Crossover, Partial-Mapped Crossover, Order

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Crossover, Cycle Crossover, Position-Based Crossover등의 방법이 개발되어 사용되고 있다(김갑환 외 2008). 본 연구에서는 Michalewicz(1994)에서 제안한 Single-Point Crossover 방법을 사용하며 이를 그림 4-6에서 표현하였다.

↓ 절단점

	RM	MM	PM	DC	TC	RT	CC	RC
P1 =	5	3	1	4	1	2	3	2
P2=	4	5	4	4	3	2	2	4

	RM	MM	PM	DC	TC	RT	CC	RC
O1=	5	3	1	4	3	2	2	4
O2=	4	5	4	4	1	2	3	2

그림 4-6. 교차 변이

Single-Point Crossover 방법은 선택된 두 개의 개체에서 먼저 랜덤하게 한 군데의 절단점을 선택하고, 선택된 절단점을 기준으로 두 개체의 유전인자를 교차시킴으로써 새로운 개체를 만든다. 예를 들면 그림 4-6와 같이 초기집단에서 P1과 P2를 랜덤하게 선택하고, 선택된 P1과 P2에서 랜덤하게 절단점을 선택한다. 여기서는 PM 이후를 절단점으로 정하였기 때문에 그 지점을 기준으로 두 개체의 각 유전인자를 서로 교차하여 자손 O1과 O2를 생성한다. 이렇게 생성된 O1, O2를 기존의 초기 집단에 포함시킨다.

(2) 돌연변이(Mutation)

돌연변이는 개체를 구성하는 유전인자를 랜덤하게 선택한 후 선택된 유전인자의 값을 랜덤하게 변형시키는 방법으로 새로운 개체를 생성한다. GA 접근법의 적용과정에서 돌연변이를 적용하지 않을 경우 기존에 생성된 초기 집단의 개체들과 전혀 다른 새로운 개체를 생성하는 방법이 없다. 따라서 해의 탐색 과정을 통해 지역적 최적해에 수렴하는

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

현상이 자주 발생하며, 결국 전역적 최적해를 찾지 못하게 된다. 따라서 돌연변이의 적용은 집단을 구성하는 개체들의 다양성을 확보할 수 있으며, 이를 통해 전역적 최적해의 탐색 가능성을 높여 줄 수 있다. 돌연변이 방법에는 Inversion Mutation, Insertion Mutation, Displacement Mutation, Duplication Mutation, Random Mutation 등이 있다. 본 연구에서는 Random Mutation을 사용하며 그림4-7에서 이의 적용방법을 표현하였다.

	RM	MM	PM	DC	TC	RT	CC	RC
P4	1	3	7	1	2	6	1	1

	RM	MM	PM	DC	TC	RT	CC	RC
O4	1	3	7	1	2	5	1	1

그림 4-7. 돌연변이

Random Mutation 방법의 적용 절차는 다음과 같다. 먼저 돌연변이를 적용하기 위해 하나의 개체를 랜덤하게 선택한다. 선택된 개체에서 랜덤하게 하나의 유전인자를 선택하고, 선택된 유전인자 값을 다시 랜덤하게 발생시켜 새로운 개체를 생성한다. 예를 들어 그림 4-7에서와 같이 P4가 선택되었으며, 여기에서 다시 랜덤하게 선택된 유전인자는 RT이다. RT 값인 6을 랜덤하게 다시 발생하면 O4와 같이 RT 값은 5로 변화된다.

(3) 선택(Selection)

GA 접근법에서 선택은 다음 세대 집단을 생성하기 위해 그 이전 부모집단이나 자손 집단을 전체로 선택하거나 일부를 선택하는 방법을 사용한다. 일반적으로 널리 사용되는 선택 방법으로는 Roulette Wheel Selection, Ranking Selection, Fitness Proportional Selection, Expected Selection, Elite Selection 등이 있다(Gen and Cheng 1997). 본 연구에서는 Gen and Cheng (1997)에서 제안한 Elite Selection을 사용했다. 이 선택 방법은 교차변이, 돌연변이 후 새로 생성된 집단과 초기 집단 모두에 대해 적합도 평가를 실시하여 그 적합도 값이 우수한 순서대로 개체를 분류한 다음, 집단의 크기만큼 개체를 다시 선택한다. 선택 과정은 그림 4-8과 같다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

	RM	MM	PM	DC	TC	RT	CC	RC	Total Profit
P 1 =	5	3	1	4	1	2	3	2	3,723,945
P 2 =	4	5	4	4	3	2	2	4	3,723,904
P 3 =	2	8	6	2	2	3	6	3	3,723,715
P 4 =	1	3	7	1	2	6	1	1	3,723,711
P 5 =	7	2	2	6	4	1	2	2	3,723,832
O 1 =	5	3	1	4	3	2	2	4	3,723,992
O 2 =	4	5	4	4	1	2	3	2	3,723,901
O 4 =	1	3	7	1	2	5	1	1	3,723,217

		RM	MM	PM	DC	TC	RT	CC	RC	Total Profit
선택된 집단	P 1 =	5	3	1	4	1	2	3	2	3,723,945
	O 1 =	5	3	1	4	3	2	2	4	3,723,992
	P 2 =	4	5	4	4	3	2	2	4	3,723,904
	O 2 =	4	5	4	4	1	2	3	2	3,723,901
	P 5 =	7	2	2	6	4	1	2	2	3,723,832
선택안된 집단	X	2	8	6	2	2	3	6	3	3,723,715
	X	1	3	7	1	2	6	1	1	3,723,711
	X	1	3	7	1	2	5	1	1	3,723,217

그림 4-8. 선택 과정

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

일반적인 GA의 이행 절차는 그림4-9와 같다.

```
begin
   GC_best = 0
   t ← 0          // t: generation    number
   randomly initialize parent population PP(t);
   while (t < max generation)
      produce offspring population OP(t) from PP(t) by adapting crossover and mutation operators
      evaluate OP(t) and store the best solution to GL_best
         if (F(GC_best) > F(GL_best)) then GC_best ← GL_best
         end if
   end
   output GC_best;
end
```

그림 4-9. GA 이행 절차

GA은 단일개체를 이용한 탐색이 아니라 다수개체로 구성된 집단을 이루어 동시에 탐색하는 기법이기 때문에 해 공간 관점에서 보았을 때 다른 Meta-heuristics 기법에 비해 전역적 최적해를 찾을 확률이 상대적으로 뛰어난 것으로 알려져 있다. 따라서 복잡하고 탐색 공간이 넓은 CLSC 모델을 해결하는 방법으로 많이 사용되고 있다 (Gen and Cheng, 1997). Dehghanian(2009) 연구에서는 지속가능한 공급망 네트워크(Sustainable Supply Chain Network) 문제를 최적화하기 위해 GA 접근법을 사용하였다. Kannan(2010)의 연구는 배터리 재활용에 관한 CLSC 모델을 설계하고, 이를 GA 접근법을 사용해 최적화하였다. Yun(2013)의 연구에서는 역물류 네트워크를 평가하기 위해 GA 접근법을 제안하였다. 제안된 GA 접근법은 역물류의 각 단계를 표현하기 위해 그 개설 여부에 따라 0 또는 1 값으로 표현하였으며, 유전연산자로는 Binary Tournament Selection, Two-point Crossover, Random mutation 사용하였다.

그러나 GA은 탐색 공간에서 다수개체를 통해 동시에 탐색하므로 다른 개체에 비해 매우 높은 적합도 값을 찾을 경우 집단의 다양성이 감소되어 지역적 최적해에 빠질 가능성이 높다. 또한 탐색 공간에서 전역적 최적해와 가까운 해를 구할 경우 전역적 최적해를 발견하지 못하고 수렴 시간이 증가하는 현상이 발생하곤 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 GA 접근법에서 교차변이 또는 돌연변이가 적용된 다음, 지역적 최적해 접근법인 SA, HL, TS, CS 등을 적용하여 탐색 능력을 강화하는 혼합형 유전알고리즘(Hybrid Genetic Algorithm: HGA) 방법이 기존의 많은 연구들에서 제안되었으며, 그 우수성을 입증하였다(Yun et al., 2013; Wen et al., 2011; Soleimani et al., 2015; Li et al. 2016)의 연구에서는 이종 멀티 프로세스 시스템의 작업효율을 향상시키기 위한 HGA 접근법을 제안하였다. HGA 접근법은

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이웃 탐색 법(Neighborhood search)과 GA 접근법을 혼합한 방법이다. Soleimani et al.(2015)의 연구에서는 대규모 CLSC 모델을 해결하기 위한 방법으로 PSO 접근법과 GA접근법을 혼합한 HGA 접근법을 제안하여 일반적인 GA 접근법 보다 HGA 접근법이 우수하다는 것을 입증했다. Li, et al.(2016)의 연구에서는 효율적인 작업 일정 문제를 위해 TS 접근법과 GA 접근법을 혼합한 HGA 접근법을 제안하였다. 따라서 본 연구에서도 SCLSC-N 모델의 최적화를 위해 HGA 접근법을 제안한다. 제안된 HGA 접근법은 GA접근법과 CS접근법을 혼합한 방법이다.

4.2.2 쿠쿠서치(Cuckoo Search: CS)

CS는 생물들의 행위 모방한 알고리즘 중 하나로 뻐꾸기(Cuckoo)가 다른 새 둥지에 알을 낳는 현상과 Heavy-tail 분포를 변화시킨 Levy Flight를 결합한 탐색 기법으로 Yang and Deb(2009)에 의해 처음으로 제안되었다. 뻐꾸기는 자기 알과 비슷한 새의 둥지를 선택하여 주인 새가 둥지를 비운 사이에 알을 낳는다. 둥지에서 먼저 태어난 뻐꾸기는 기존 알을 둥지 밖으로 내보내고 그 둥지를 독점한다. 만약에 둥지의 주인 새가 뻐꾸기 알을 발견할 경우 알을 둥지 밖으로 내보내거나 둥지를 떠난다. 이런 기생 습성을 바탕으로 하여 최적해를 탐색하기 위한 기법으로 둥지의 알들을 기존의 해로 간주하고 뻐꾸기의 알을 새로 수렴된 해로 기존의 알을 대체하는 방식으로 해를 개선한다. CS는 Levy Flight를 통해서 다음 둥지, 즉 해를 개선하며 생물이 음식을 찾는 경로를 토대로 다음 이동 위치로 전환될 확률을 기반으로 무작위 비행을 기초로 한다(Gandomi et al. 2013). Levy Flight의 특징은 좋은 해를 포함한 지역을 집중적으로 탐색할 뿐만 아니라 검색되지 않은 지역을 탐색함으로써 탐색 강화 및 새로운 해 지역, 탐색이 상대적으로 적게 이루어진 지역을 탐사하여 탐색을 다양화할 수 있다 (정일한, 2017). CS에서 다음과 같은 세 가지 규칙을 기초로 한다.

- 뻐꾸기는 한 번에 하나의 알을 낳고 무작위로 선택한 둥지에 놓아둔다.
- 좋은 알(해)이 나타나는 둥지는 다음 세대로 이어진다.
- 사용 가능한 둥지 수는 고정되어 있으며 둥지의 주인 새가 $Pa \in [0, 1]$ 확률로 뻐꾸기의 알을 발견할 수 있다. 이 경우, 알을 버리거나 둥지를 버려서 새로운 위치에 새로운 둥지를 만든다.

이상 CS의 기본 절차는 공식 (76)-(77)과 같다.

$$x_t^{(t+1)} = x_1^{(t)} + \alpha \oplus Levy(\beta) \tag{76}$$

$$\alpha = \alpha_c[\, bestnest\,(t) - x_i(t)] \tag{77}$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

공식 (77)-(78)에서 $x_t^{(t+1)}$ 는 새로운 해를 의미한다. $\alpha > 0$ 는 Levy flight의 스텝 길이를 의미하며 대부분 $\alpha = 1$ 을 가진다. Levy Flight은 좋은 해가 포함된 지역을 집중적으로 탐색하지만 가끔 큰 스텝을 거쳐 탐색되지 않은 지역을 탐색하여 스텝의 길이를 잘 정의해야 하며, 스텝 길이는 검색하는 공간 범위 안에 포함되어야 한다. 개체는 Levy Flight에 의해 여러 개의 작은 스텝과 큰 스텝으로 인해 공간에서 이동한다(Han et al., 2014). 기본적으로 Levy flight는 무작위로 탐색되기 때문에 분포는 무한 평균과 분산을 가지며 단계의 길이는 Levy 분포에 의해 계산된다(Yang et al. 2009). CS는 사용되는 파라미터가 기타 알고리듬보다 대체적으로 적고 다양한 용도로 여러 분야에서 적용하기 쉽다는 장점을 가지고 있으므로 현재까지 용접 설계, 스케줄링 문제에 적용되어 우수한 실행 결과를 보여주고 있다(Yang and Deb,2010, Burnawal et al., 2012; Panda et al., 2013).

그러나 앞에서 살펴본 내용과 같이 기존의 단일 메타휴리스틱 기법들을 이용한 최적화 문제해결 방법은 다음과 같은 몇 가지 한계점을 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 첫째, GA 접근법의 경우 해 집단을 이용해 탐색을 진행하기 때문에 전역적 최적해 탐색에는 유리하지만, 특정 탐색 지역에 집중적인 탐색을 실시하는 지역적 탐색 능력은 부족하다고 알려져 있다(Gen et al. 2000, Yun et al. 2013). 둘째, CS 접근법과 같은 지역 탐색 기법은 집중적인 탐색 측면에서는 유리하지만 탐색 공간이 넓고 복잡한 문제를 해결하는데 적합한 접근법은 아니다. 따라서 본 연구에서 제안한 SCLSC-N과 같은 복잡한 구조의 네트워크 문제는 NP-hard(Savaskan et al., 2004; Gen et al. 2018) 문제이므로 기존의 접근법으로 해결하기 곤란한 경우가 많다. 또한 메타휴리스틱 기법들의 경우에도 단일 접근법만을 이용할 경우 최적해를 찾는 데 어려움이 있다(Gen et al. 1997).

Kanagarag et al. (2013) 연구에서 최적화 문제의 우수한 해를 찾는 것은 사용되는 최적화 기법에 따라 결정된다고 하여 HGA의 필요성을 제시했다. 또한 본 연구에서 제안한 SCLSC-N 모델과 같은 네트워크 문제를 해결하기 위해 HGA 방법을 사용한 연구가 많이 이루어지고 있다 (Wen et al., 2011; Soleimani et al., 2015; Li, et al. 2016).

4.3 제안된 접근법

본 연구에서는 모바일폰을 위한 SCLSC-N 모델을 최적화하기 위해 PHGA 접근법을 제안한다. PHGA 접근법은 기존 연구인 Kanagarag et al. (2013)에서 제안한 HGA 접근법을 개선한 방법이다. Kanagarag et al.(2013)에서 제안된 HGA 접근법은 기존 GA접근법의 유전연산자인 교차변이, 돌연변이의 실행 후 Levy Flight를 통해 해를 개선하는 CS접근법을 적용하여 최적해를 구하는 방법이다. HGA의 탐색 과정은 먼저 GA접근법에서 초기 집단을 생성한 후 유전연산자인 교차변이, 돌연변이를 적용하여 새로운 집단(자손집단)을 생성한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

둘째, CS를 통해 GA에서 생성된 자손집단을 개선한다. CS의 핵심은 최적해를 더 빠르게 찾기 위해 Levy Flight를 사용하는 것이다. 이는 CS에서 자손집단 개체 중에서 랜덤하게 한 개의 개체를 선택하고 Levy Flight를 통해 선택된 개체를 변화시키고 적합도 평가를 실시한다. 만약에 Levy Flight의 적용을 통해 변화된 해가 기존 해보다 개선되었을 경우에는 이를 기존 해 대신 자손집단에 저장한다. 이렇게 개선된 자손집단의 적합도를 평가한 후 다음 세대 부모 집단으로 옮겨 GA을 적용하여 종료 조건이 만족할 때까지 실행해 최적해를 구하는 절차를 가지고 있다. Kanagarag et al. (2013)에서 제안한 HGA접근법의 구체적인 절차를 그림 4-10에서 표현하였다.

```
procedure: HGA approach (Kanagaraj et al. 2013)
begin
   GC_best = 0
   t ← 0          // t: generation number
   randomly initialize parent population PP(t);
   while (t < max generation)
      produce offspring population OP(t) from PP(t) by adapting 1X crossover operator and
      random mutation operator;
      evaluate OP(t) and store the best solution to GL_best ;
      choose a solution x_i randomly among OP(t)
      generate a new solution x_new from x_i by adapting Levy flight scheme
      if (F(x_new) > F(x_i)) then
            Replace CP(t) ← x_new
      end
      evaluate CP(t) and store the best solution to CL_best;
      if (F(GL_best) > F(CL_best)) then GC_best ← GL_best
            else GC_best ← CL_best
      end if
      newly produce PP(t) using OP(t) and CP(t) by adapting elitist selection scheme;
      t ← t+1;
   end
   output GC_best;
end
```

그림 4-10. Kanagarag et al. (2013)에서 제안한 HGA 접근법 절차

Kanagarag et al. (2013)이 제안한 HGA 접근법은 GA접근법의 유전연산자를 통해 만들어진 자손집단 중에서 하나의 개체를 선택하여 CS를 적용하고 있기 때문에 각 반복에서 한번 밖에 해 개선이 시도되지 않는 문제점이 있다. 이를 개선하기 위해 지속적으로 해를 생성하고 개선할 수 있는 대책이 필요하다. 그래서 본 연구에서 Kanagarag et al. (2013)에서 제안한 HGA 방법 CS의 Levy Flight의 적용 방식을 개선하여 PHGA 접근법을 제안했다. PHGA 접근법의 적용 절차는 다음과 같다.

먼저 GA 접근법에서 초기 집단을 랜덤하게 생성한 후 유전연산자인 교차변이, 돌연변이를 적용하여 새로운 집단, 즉 자손집단을 생성한다. 그 다음 CS 접근법을 적용하여

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

자손집단의 모든 개체에 대해 Levy Flight를 적용하고 적합도 평가를 실시한다. 만일 Levy Flight의 적용을 통해 변경된 개체들의 해가 기존 자손집단의 해보다 개선되었을 경우에는 이를 자손집단에 저장하여 개선된 해 집단, 즉 새로운 자손집단을 생성한다. 이 과정을 세대가 끝날 때까지 실행하여 최적해를 구하는 절차를 따른다. 그림 4-11, 4-12 에서는 본 연구에서 제안한 PHGA 접근법의 전체적인 실행 과정 및 절차를 설명하였다.

Step 1: GA approach
Step 1.1: Representation 0-1 bit representation scheme is used for effectively representing opening/closing decision of all facilities at each stage. Step 1.2: Selection Elitist selection strategy in enlarged sampling space, (Gen et al. 1997) is used Step 1.3: Crossover Two-point crossover operator (2X), (Gen et al. 1997) is used. Step 1.4: Mutation Random mutation operator, (Gen et al. 1997)is used. Step 1.5: Produce offspring
Step 2: CS approach
Step 2.1: Apply Levy flight scheme, (Kanagaraj et al. 2013) to the offspring of GA and produce new solution. Step 2.2: (Evaluation) compare the fitness value of the individual by Levy fight with that of the individual randomly chosen by the population and store the best individual among them. Step 2.3: (Iteration) repeat Steps 2.1 and 2.2 for all individuals of population.
Step 3: Termination condition
If pre-determined stop condition is satisfied, then stop all Steps, otherwise go to Step 1.2.

그림 4-11. 본 연구에서 제안한 PHGA 접근법의 전체적인 실행 과정

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

```
procedure: PHGA approach
begin
   GC_best = 0
   t ← 0          // t: generation number
   randomly initialize parent population PP(t);
   while (t < max generation)
       produce offspring population OP(t) from PP(t) by adapting 1X crossover operator and random
       mutation operators;
       evaluate OP(t) and store the best solution to GL_best ;
       for each solution x_i of OP(t) do
           generate a new solution x_new from x_i by adapting Levy flight scheme (Kanagaraj et al. 2013);
           randomly select another solution x_i in OP(t);
           if (F(x_new) > F(x_i)) then CP(t) ← x_new                    // CP(t): CS population
           end if
        end for
        worst solutions with fraction rate (fr) are abandoned;
        randomly regenerate new solutions x_r_new as many as fr;
        CP(t) ← x_r_new
        evaluate CP(t) and store the best solution to CL_best;
        if (F(GL_best) > F(CL_best)) then GC_best ← GL_best
           else GC_best ← CL_best
        end if
        newly produce PP(t) using OP(t) and CP(t) by adapting elitist selection scheme;
        t ← t+1;
    end
    output GC_best;
end
```

그림 4-12. 본 연구에서 제안한 PHGA 접근법의 이행 절차

본 연구에서 제안한 PHGA 접근법은 5 장 사례연구에서 Gen and Cheng (2000)이 제안한 GA 접근법과 Kanagarag et al. (2013)이 제안한 HGA 접근법과 수행도를 비교•분석하여 PHGA 접근법의 우수성을 입증하고자 한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 장 수치 실험

사례 연구에서는 SCLSC-O 모델과 SCLSC-N 모델을 비교, 분석하기 위해 표 5-1과 같은 다섯 가지 Scale를 고려했다. 예를 들어 SCLSC-O 모델인 경우 Scale 1은 RM, MM, PM, DC, RT가 각각 20개씩 고려되고 이들 중에서 각 단계에서 하나의 설비만 개설되며 나머진 모든 설비는 개설되지 않는다. 그리고 TC, CG, DP는 각각 하나의 설비만 고려되고 개설된다. SCLSC-N 모델의 경우 Scale 1은 RM, MM, PM, DC, RT, CC는 각각 20개가 고려되며, 이들 설비 중에서 각 단계에서 하나의 설비만 개설되고 나머진 모든 설비들은 개설되지 않는다. 그리고 TC, FG, SG, DP는 각각 하나의 설비만 고려되고 개설된다.

표 5-1. 수치 실험을 위한 SCLSC-O과 SCLSC-N 모델의 다섯 가지 Scale

						SCLSC-N					
						SCLSC-O					
Scale	RM	MM	PM	DC	TC	RT	CG/FG	DP	CC	RC	SG
1	20	20	20	20	1	20	1	1	20	20	1
2	30	30	30	30	2	30	1	1	30	30	1
3	50	50	50	50	3	50	1	1	50	50	1
4	80	80	80	80	4	80	1	1	80	80	1
5	100	100	100	100	5	100	1	1	100	100	1

수치 실험에 사용된 모바일폰에 대한 단위당 수송비용, 고정비용, 처리비용, 각 설비간 거리, 수송과정 및 제조과정에서 배출되는 CO_2량, 신기술 도입으로 인해 생성되는 신규 일자리 기회, 평균 실업률, 손실 일수 등에 대한 데이터는 Excel을 통해 랜덤하게 발생시켜 사용하였으며, 구체적인 사용 데이터는 부록 1-7과 같이 특정 범위에서 발생하였다(Saffari et al.2015; Talaei et al.2016). 접근방법인 GA, HGA, PHGA의 파라미터 설정은 집단의 크기: 20, 교차변이 비율: 0.5, 돌연변이 비율: 0.3, 총 세대 수: 1,000, Pa:0.5, Levy flight 범위: U[1-2]이며, 각 접근방법들의 시행에서 발생되는 다양한 데이터의 랜덤성을 제거하기 위해 총 20회 반복 수행을 실시하였다. 수치 실험이 실행된 컴퓨터 환경은 IBM 호환 PC 1.3 Ghz Processor (인텔 Core I5-1600 CPU), 4GB RAM, OS-X EI 이며, MATLAB R2014a를 이용해 프로그래밍되었다.

SCLSC-O과 SCLSC-N 모델 비교와 각 접근방법인 GA, HGA, PHGA의 수행도를 비교하기 위해 경제적, 환경적, 사회적 요인에 대한 목적함수$F_1(x), F_2(x), F_3(x)$를 각각 세 가지 형태의 문제(Problem 1, Problem 2, Problem 3)로 구분하여 사용한다(Gen et al., 2018). Problem 1은

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

수리모형에서 제시한 경제적 요인을 의미하는 목적함수 $F_1(x)$을 최대화하면서 환경적 요인을 의미하는 목적함수 $F_2(x)$를 최소화하는 문제이다. Problem 2는 $F_2(x)$를 최소화하면서 사회적 요인을 의미하는 목적함수 $F_3(x)$를 최대화하는 문제이다. Problem 3은 $F_1(x)$를 최대화하면서 $F_3(x)$를 최대화하는 문제이다.

Problem 1: Maximize $F_1(x)$ and Minimize $F_2(x)$;
Problem 2: Minimize $F_2(x)$ and Maximize $F_3(x)$;
Problem 3: Maximize $F_3(x)$ and Maximize $F_1(x)$

Problem 1, Problem 2, Problem 3은 다목적 문제이기 때문에 파레토 해집합 평가 척도를 사용했다(김갑환 외, 2008). 파레토 해집합 평가 척도에는 표 5-2와 같이 Pos 평가하기 위해 참조해집합 *(S*)*과 얻어진 비우월해(Pos)의 수 |*Sj*|, 얻어진 비우월해의 집합과 참조해집합의 비율 *RNDS (Sj)*, 참조해 집합과 비우월해 집합의 거리 *DIR (Sj)* 등이 있으며, 실행 속도를 평가하기 위해 평균 CPU time (sec.)를 고려했다.

표 5-2. SCLSC-O 모델과 SCLSC-N 모델 비교 분석을 위한 척도

Measure	Description
|*Sj*|	Number of Pareto optimal solutions in reference solution set *(S*)*
RNDS (Sj)	Rates of Pareto optimal solutions in *S**
DIR (Sj)	Average distance between Pareto optimal solutions and *S**
CPU time (sec.)	Average CPU time obtained after all trails

본 실험의 목적은 위에서 설명한 척도를 통해 SCLSC-O 모델과 SCLSC-N 모델의 다섯 가지 Scale을 토대로 사례연구를 시행하고자 한다.

첫째, 기존 모바일폰을 위한 SCLSC-O 모델과 본 연구에서 제안한 모바일폰을 위한 SCLSC-N 모델을 Problem 1, Problem 2, Problem 3 측면에서 비교 분석한다. 둘째, 민감도 분석을 위해 SCLSC-N 모델에서 고객이 사용한 모바일폰의 수거비율, 폐기비율, 회복된 모바일폰의 재활용 비율, 재사용 비율을 표 5-9, 5-11과 같이 Case 1 – 14 를 통해 분석한다. 셋째, SCLSC-N 모델을 단일수송채널인 NDL만 가지는 SCLSC-N 모델과 두 가지 수송 채널인 NDL과 DSP를 함께 가지는 SCLSC-N 모델로 구분하여 각 수행도를 비교 분석한다. 마지막으로 기존 접근법 GA, HGA와 본 연구에서 제한한 접근법 PHGA의 성능을 비교하여 우수성을 입증하고자 한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5.1 SCLSC-O 모델과 SCLSC-N 모델 비교

사례 연구에서 SCLSC-O와 SCLSC-N 모델의 물류를 구체적으로 살펴보면 SCLSC-O 모델은 RM에서 모바일폰 모듈에 사용되는 새로운 부품 3,000개를 생산하고 MM에 공급한다. MM에서도 마찬가지로 3,000개의 모듈이 만들어지고, PM에 공급되어 3,000개의 모바일폰이 생산된다. 또한, PM에서 고객에게 모바일폰을 전달할 때 α_1 %는 NDL로 α_2 %는 DSP를 사용한다. CG로 인해 사용수명이 끝난 모바일폰 중 재사용이 가능한 모바일폰을 RT에서 수거하여 단순한 테스트를 통해 평가 후, 재사용 가능한 β_1%의 모바일폰을 CG에 재판매하고 재사용이 불가능한 수거 모바일폰 β_2%를 DP에 보내 폐기한다. 또한, CG로 인해 사용수명이 끝난 모바일폰 γ_1% 는 폐기되고 γ_2%는 RT에서 수거하는 물류 공급망을 가지고 있다.

반면에 SCLSC-N 모델은 RM에서 새로운 부품 1,800개를 생산하고 1,200개의 회복된 부품을 재활용하여 총 3,000개 부품을 MM에 공급한다. 마찬가지로 PM에서 두 가지 수송채널을 통해 보내어지고 FG에서 모바일폰을 판매한다. 역물류에서 SCLSC-N 모델은 SCLSC-O 모델과 달리 FG로부터 사용된 사용수명이 끝난 모바일폰의 δ_1 %를 CC를 통해 수거하고, 재활용 및 재사용이 불가능한 δ_2 % 모바일폰을 DP에 보내 폐기한다. 수거된 모바일폰은 RC에서 회복과정을 거쳐 재사용 가능한 ε_1 % 모바일폰을 SG에 재판매하고 재사용이 불가능한 ε_1 %의 모바일폰을 분해하여 재활용 가능한 모바일폰 부품을 RM에 공급하는 물류를 가지고 있다. SCLSC-O와 SCLSC-N 모델에 대한 모바일폰 공급비율을 표 5-3에서 제시하였다.

표 5-3. SCLSC-O와 SCLSC-N 모델의 물류 공급 비율

	SCLSC-O	SCLSC-N
α_1	0.8	0.8
α_2	0.2	0.2
β_1	0.8	-
β_2	0.2	-
γ_1	0.8	-
γ_2	0.2	-
δ_1	-	0.8
δ_2	-	0.2
ε_1	-	0.5
ε_2	-	0.5

이와 같은 물류 흐름을 가진 SCLSC-O와 SCLSC-N 모델을 Problem 1, Problem 2, Problem 3 측면에서 비교하였으며, 다섯 가지 Scale에 대한 결과는 표 5-4에서 표 5-8까지 제시하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 5-4. SCLSC-O과 SCLSC-N 모델의 비교•분석 결과 (Scale 1)

	Problem 1		Problem 2		Problem 3	
	SCLCS-O	SCLCS-N	SCLCS-O	SCLCS-N	SCLCS-O	SCLCS-N
$\|S_j\|$	6	9	3	0	0	3
$R_{NDS}(S_j)$	0.4	0.6	0.0	1.0	0.0	1.0
$DI_R(S_j)$	0	0	0	294	898,513	0
CPU time(s)	44.6	60.9	44.6	60.9	44.6	60.9

표 5-4에서 Scale 1에 대해 SCLSC-O과 SCLSC-N 모델을 비교한 결과를 제시하였다. 분석 결과 경제적 요인 $F_1(x)$과 환경적 요인 $F_2(x)$를 고려한 Problem 1 측면에서 총 15개의 비우월해 값이 얻어졌다. SCLSC-O 모델에서 구해진 모든 Pos 중에서 비우월해 수를 나타내는 $|Sj|$ 값은 6이며 SCLSC-N 모델의 $|Sj|$ 값은 SCLSC-O 모델보다 더 많이 발생된 9로 나타났다. 총 얻어진 비우월해 중에서 비율을 나타내는 *RNDS(Sj)* 측면에서 SCLSC-O 모델의 4개의 *RNDS(Sj)* 값은 40%로 확인되었다. SCLSC-N 모델은 15개의 비우월해 중에서 9개의 비우월해가 얻어졌기 때문에 *RNDS(Sj)* 값은 60%로 SCLSC-O 모델보다 SCLSC-N 모델이 높게 나타났다. 구해진 모든 참조해와 비우월해 간의 거리를 나타내는 *DIR (Sj)* 값은 SCLSC-O 모델에서 0으로 나타났으며, 이는 SCLSC-O 모델에서 구해진 모든 Pos가 비우월해라는 의미로 해석된다. SCLSC-N 모델에서 얻어진 Pos는 모두 비우월해이기 때문에 *DIR (Sj)* 값도 0으로 나타났다. 이는 SCLSC-N 모델이 모바일폰의 재활용 또는 재사용을 고려하여 Problem 1에 대한 측면에서 효율적이며, 모바일폰 수거 및 회복을 위해 CC, RT를 추가적으로 고려한 SCLSC-N 모델이 우수하다는 것으로 해석할 수 있다.

환경적 요인 $F_2(x)$와 사회적 요인$F_3(x)$을 고려한 Problem 2에 대한 분석결과는 다음과 같다. $|Sj|$측면에서 SCLSC-O 모델의 비우월해 수는 3, SCLSC-N 모델의 비우월해 수는 0으로 나타났다. *RNDS(Sj)* 측면에서도 SCLSC-O 모델의 비우월해 비율은 100%, SCLSC-N 모델의 비우월해 비율은 0%로 나타났다. *DIR (Sj)*에서 SCLSC-O 모델의 모든 Pos는 비우월해이기 때문에 0으로 나타났으며, SCLSC-N 모델의 *DIR (Sj)* 값은 294로 SCLSC-O 모델이 Problem 2에서 더 좋은 결과를 보이고 있다. 이는 SCLSC-N 모델에서 사용된 모바일폰의 수거 및 회복을 위한 CC와 RT, 모바일폰을 재판매 하기 위한 SG를 추가로 고려했기 때문에 모바일폰을 처리하는 과정에서 배출되는 CO_2 또는 수송 과정에서 배출되는 CO_2의 발생으로 인해 SCLSC-N 모델이 환경 측면에서 좋지 않는 결과를 보였다.

사회적 요인 $F_3(x)$와 경제적 요인 $F_1(x)$을 고려한 Problem 3에서는 SCLSC-O 모델의 $|Sj|$ 값은 0, SCLSC-N 모델의 $|S_j|$ 값은 3으로 나타났으며, $|S_j|$ 값에 따라 $R_{NDS}(S_j)$ 측면에서 SCLSC-O 모델은 비우월해 비율이 0%, SCLSC-N 모델의 비우월해 비율은 100%로 총 비우월해를 차지하는 비율이 SCLSC-N 모델에서 더 높게 나타나는 것을 알 수 있다. SCLSC-O 모델에서

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

구해진 해가 비우월해가 아닌 참조해이기 때문에 $DI_R(S_j)$ 값은 898,513 이고 SCLSC-N 모델의 모든 Pos이 비우월해이기 때문에 $DI_R(S_j)$ 값은 0으로 나타났다. 결론적으로 Problem 3 측면에서는 SCLSC-O 모델보다 SCLSC-N 모델이 더 우수함이 확인되었다. 이상 Scale 1에 대한 결과를 요약해보면 SCLSC-N 모델은 Pos 측면에서 Problem 1과 Problem 3에서 우수한 결과를 보이고, SCLSC-O 모델은 Problem 2에서 우수한 결과를 나타났다. 실행시간을 나타낸 CPU time(s)은 SCLSC-O 모델의 실행시간은 44.6 초이며 SCLSC-N 모델의 실행시간은 좀 더 느린 속도를 보여 60.9초로 나타났다. 이는 SCLSC-N 모델이 CC, RT, SG와 같은 추가적인 단계를 고려하였기 때문에 실행시간이 더 오래 걸린다는 것을 알 수 있다.

표5-5. SCLSC-O과 SCLSC-N 모델의 비교•분석 결과 (Scale 2)

	Problem 1		Problem 2		Problem 3	
	SCLCS-O	SCLCS-N	SCLCS-O	SCLCS-N	SCLCS-O	SCLCS-N
$\|S_j\|$	4	3	4	1	0	5
$R_{NDS}(S_j)$	0.43	0.57	0.8	0.2	0.0	0.1
$DI_R(S_j)$	59	0	0	543	903,024	0
CPU time(s)	44.9	61.3	44.9	61.3	44.9	61.3

SCLSC-O와 SCLSC-N 모델의 Scale 2에 대한 비교 분석 결과를 제시한 표 5-5에서 Problem 1 결과를 보면, SCLSC-O 모델의 $|Sj|$ 값은 4, SCLSC-N 모델의 $|Sj|$ 값은 3으로 나타났다. $|Sj|$ 결과에 따라 SCLSC-O 모델의 $R_{NDS}(S_j)$은 43%로 SCLSC-N 모델의 $R_{NDS}(S_j)$은 SCLSC-O 모델보다 더 높은 비율인 57%로 나타났다. SCLSC-O 모델의 비우월해와 참조해간 거리를 나타내는 $DI_R(S_j)$ 값은 59이며, 구해진 모든 Pos는 비우월해인 SCLSC-N 모델의 $DI_R(S_j)$ 값이 0으로 나타나 Problem1에서 SCLSC-N 모델이 우수하다는 것을 알 수 있다.

Problem 2에서는 SCLSC-O 모델의 $|Sj|$ 값은 4이며, SCLSC-N 모델의 $|Sj|$ 값은 1로 SCLSC-O 모델 보다 낮은 값으로 나타났다. 그러므로 $R_{NDS}(S_j)$ 측면에서 SCLSC-O 모델의 비우월해 비율은 80%이며, SCLSC-N 모델의 비우월해 비율은 20%로 나타났다. SCLSC-O 모델의 모든 Pos는 비우월해 이기 때문에 $DI_R(S_j)$ 값은 0이며, SCLSC-N 모델에서 $DI_R(S_j)$ 값은 543으로 나타나 Problem 2 측면에서 SCLSC-O 모델이 SCLSC-N 모델보다 우수한 결과를 나타남을 알 수 있다.

Problem 3에서 SCLSC-O 모델은 비우월해를 구하지 못하여 $|Sj|$ 값은 0이며, $R_{NDS}(S_j)$값도 0%로 나타났다. SCLSC-N 모델에서 총 5개의 Pos가 구해져 이들은 모두 비우월해로서 $|Sj|$ 값은 SCLSC-O 모델보다 높게 나타나고 $R_{NDS}(S_j)$는 100%로 나타났다. $DI_R(S_j)$ 측면에서 SCLSC-O 모델 거리 값은 903,024이며 SCLSC-N 모델의 거리 값은 0으로 나타나 SCLSC-O 모델보다 SCLSC-N 모델의 우수성을 입증하고 있다. 하지만 Scale 2에서 SCLSC-O 모델과

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

SCLSC-N 모델의 실행 시간은 나타낸 CPU time(s) 결과 Problem 1, Problem 2, Problem 3 에서 SCLSC-N 모델의 CPU time(s)은 44.9초, SCLSC-O 모델의 CPU time(s)은 61.3초로 SCLSC-O 모델보다 SCLSC-N 모델이 실행 속도가 느린 것을 알 수 있다. 그 이유는 SCLCS-O 모델은 SCLSC-N모델 보다 물류 구조와 흐름이 단순하기 때문에 빠른 실행 속도를 보이고 있다.

표 5-6. SCLSC-O과 SCLSC-N 모델의 비교•분석 결과 (Scale 3)

	Problem 1		Problem 2		Problem 3	
	SCLCS-O	SCLCS-N	SCLCS-O	SCLCS-N	SCLCS-O	SCLCS-N
$\|S_j\|$	4	10	2	0	1	3
$R_{NDS}(S_j)$	0.28	0.72	1.0	0.0	0.28	0.72
$DI_R(S_j)$	279,495	0	0	1,274	618,680	0
CPU time(s)	45.4	61.5	45.4	61.5	45.4	61.5

Scale 3에 대한 비교 분석 결과를 제시한 표 5-6에서는 Problem 1 결과는 총 14개의 비우월해가 구해졌다. 이중에서 SCLSC-O 모델의 $|Sj|$는 4개, 나머진 10개의 비우월해는 SCLSC-N 모델에서 구해졌다. 따라서 비우월해 비율인 $R_{NDS}(S_j)$는 SCLSC-O 모델이 28%, SCLSC-N 모델은 약 3배 더 높은 비율인 72%으로 나타났다. SCLSC-O 모델의 $DI_R(S_j)$ 값은 279,495이고 SCLSC-N 모델의 $DI_R(S_j)$ 값은 0으로 나타나 본 연구에서 제안한 SCLSC-N 모델은 Problem 1 측면에서 기존 SCLSC-O 모델 보다 더 우수하다는 것을 알 수 있다.

Problem 2 결과에서는 총 2개의 비우월해가 구해져 SCLSC-O과 SCLSC-N 모델의 $|Sj|$ 값은 각각 2와 0으로 나타났다. $R_{NDS}(S_j)$의 SCLSC-O모델은 100%, SCLSC-N 모델은 0%로 나타났다. $DI_R(S_j)$ 값의 SCLSC-O 모델은 0, 구해진 모든 Pos가 비우월해가 아닌 SCLSC-N 모델의 거리 값이 1,274로 나타나 SCLSC-O 모델이 Problem 2측면에서 우수한 해를 보였디.

Scale 3에 대한 결과 Problem 3에서 총 4개의 비우월해가 구해졌으며, SCLSC-O 모델의 $|Sj|$는 1개, SCLSC-N 모델의 $|Sj|$는 3개로 나타났다. 또한 $R_{NDS}(S_j)$는 SCLSC-O 모델이 28%이며 SCLSC-N 모델은 72%으로 나타났다. SCLSC-O 모델의 $DI_R(S_j)$ 값은 618,680이고 SCLSC-N 모델의 $DI_R(S_j)$ 값은 0으로 나타나 SCLSC-N 모델이 SCLSC-O 모델 보다 효율적이라는 것을 입증하고 있다. 결론적으로 Scale 3은 Problem 1과 Problem 2에서 본 연구에서 제안한 SCLSC-N 모델이 우수한 결과 보였다. 하지만 Problem 2측면에서는 기존 연구에서 제안한 SCLSC-O 모델이 SCLSC-N 모델보다 우수한 결과를 나타내었다.

Scale 3에서 CPU time(s)은 단순한 구조의 SCLSC-O 모델은 45.4초, 추가적으로 다양한 단계를 고려한 SCLSC-N 모델이 그 보다 조금 더 느리게 61.5초로 확인되었다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 5-7. SCLSC-O과 SCLSC-N 모델의 비교•분석 결과 (Scale 4)

	Problem 1		Problem 2		Problem 3	
	SCLCS-O	SCLCS-N	SCLCS-O	SCLCS-N	SCLCS-O	SCLCS-N
$\|S_j\|$	4	10	1	1	1	5
$R_{NDS}(S_j)$	0.28	0.72	0.5	0.5	0.16	0.84
$DI_R(S_j)$	270,350	0	257	296	525	0
CPU time(s)	45.8	61.9	45.8	61.9	45.8	61.9

표 5-7에서 SCLSC-O와 SCLSC-N 모델의 Scale 4에 대한 분석 결과를 제시했다. Problem 1에 대한 결과 총 14개의 비우월해가 구해져 이중에서 SCLSC-O 모델의 $|Sj|$ 값은 4, SCLSC-N 모델의 $|Sj|$ 값은 10으로 나타나 SCLSC-O 모델이 보다 높은 값을 보였다. $R_{NDS}(S_j)$ 측면에서도 마찬가지로 SCLSC-N 모델이 72%로 우수한 결과를 나타났다. $DI_R(S_j)$ 측면에서 SCLSC-O 모델의 거리 값은 270,350 이고 SCLSC-N 모델의 거리 값은 0으로 나타나 본 연구에서 제시한 SCLSC-N 모델에서 구해진 모든 Pos가 비우월해와 가깝다는 것을 알 수 있다.

Problem 2 결과에서 비우월해 2개가 구해져 SCLSC-O 모델과 SCLSC-N 모델의 $|Sj|$ 값은 각각 1로 나타났다. 그러므로 $R_{NDS}(S_j)$ 측면에서 SCLSC-O 모델과 SCLSC-N 모델의 비우월해 비율 또한 50%로 나타났다. 또한 SCLSC-O 모델의 $DI_R(S_j)$ 값은 257이며 SCLSC-O 모델의 $DI_R(S_j)$ 값은 296로 조금 더 높게 나타났다. Problem 2 측면에서는 SCLSC-O 모델이 SCLSC-N 모델 보다 우수하다는 것을 알 수 있다.

Problem 3에서 총 6개의 비우월해가 구해졌다. 이중에서 SCLSC-O 모델의 $|Sj|$ 값은 1이며, $R_{NDS}(S_j)$ 값은 16%로 나타났다. SCLSC-N 모델의 $|Sj|$ 값은 SCLSC-O 모델보다 높은 5, $R_{NDS}(S_j)$ 값은 84%로 나타났다. $DI_R(S_j)$ 측면에서 마찬가지로 SCLSC-O 모델 거리 값은 525이며 SCLSC-N 모델의 거리 값은 0이로 나타나 SCLSC-O 모델보다 SCLSC-N 모델의 우수성을 입증하고 있다. CPU time(s)에서 SCLSC-O 모델의 실행시간은 45.8 초이며 SCLSC-N 모델의 실행시간은 좀 더 느린 속도를 보여 61.9초로 나타났다. 이는 SCLSC-N 모델이 CC, RT, SG와 같은 추가 적인 단계를 고려했기 때문이다.

표 5-8. SCLSC-O과 SCLSC-N 모델의 비교•분석 결과 (Scale 5)

	Problem 1		Problem 2		Problem 3	
	SCLCS-O	SCLCS-N	SCLCS-O	SCLCS-N	SCLCS-O	SCLCS-N
$\|S_j\|$	1	14	2	2	0	5
$R_{NDS}(S_j)$	0.06	0.94	0.5	0.5	0.0	0.84
$DI_R(S_j)$	6,989	0	0	166	678,352	0
CPU time(s)	46.1	62.4	46.1	62.4	46.1	61.9

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 5-8에서는 SCLSC-O와 SCLSC-N 모델의 Scale 5에 대한 분석결과를 제시하였다. Scale 5의 Problem 1에 대한 결과는 총 15개의 비우월해가 구해졌다. 이중에서 SCLSC-O 모델의 $|Sj|$ 값은 1, SCLSC-N 모델의 $|Sj|$ 값은 14으로 나타나 SCLSC-N 모델이 SCLSC-O 모델 보다 높은 값을 보였다. $R_{NDS}(S_j)$ 측면에서도 마찬가지로 SCLSC-O 모델이 7%, SCLSC-N 모델이 93%로 우수한 결과를 나타났다. DI_R (S_j) 측면에서 SCLSC-O 모델의 거리 값은 6,989이고 SCLSC-N 모델의 거리 값은 0으로 나타나 본 연구에서 제시한 SCLSC-N 모델에서 구해진 모든 Pos가 비우월해라는 의미이다.

Problem 2에 대한 결과 비우월해가 총 4개가 구해져 SCLSC-O 모델과 SCLSC-N 모델의 $|Sj|$ 값은 각각 2로 나타났다. 같은 의미로 $R_{NDS}(S_j)$ 측면에서 SCLSC-O 모델과 SCLSC-N 모델의 비우월해 비율도 마찬가지로 50%로 나타났다. 또한 SCLSC-O 모델의 DI_R (S_j) 값은 0이며 SCLSC-N 모델의 DI_R (S_j) 값은 166로 나타나 Problem 2 측면에서 SCLSC-O 모델이 우수하다는 것을 알 수 있다.

Problem 3에 대한 각 접근법을 통해 구해진 총 8개의 비우월해는 SCLSC-N 모델에서 $|Sj|$ 값은 8이며 SCLSC-O 모델의 $|Sj|$ 값은 0으로 나타났다. 그러므로 SCLSC-N 모델의 $R_{NDS}(S_j)$는 100%이다. DIR 측면에서 SCLSC-O 모델의 DI_R (S_j) 값은 678,352, SCLSC-N 모델의 DI_R (S_j) 값은 0으로 나타나 SCLSC-O 모델보다 SCLSC-N 모델이 우수함을 입증하고 있다. CPU time(s)은 SCLSC-O 모델의 실행시간은 46.1 초이며 SCLSC-N 모델의 실행시간은 좀 더 느린 속도를 보여 62.4초로 나타났다.

다음은 SCLSC-O과 SCLSC-N 모델의 Scale 5에 대한 Problem 1, Problem 2, Problem 3 측면에서 비우월해 수렴 과정을 그림 5-1에서 그림 5-3까지 나타냈다.

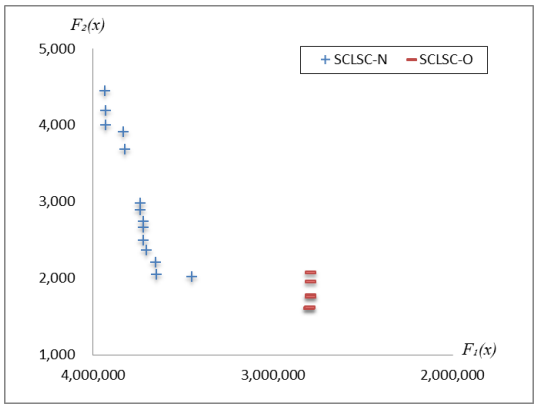

그림 5-1. Problem 1에 대한 SCLSC-O과 SCLSC-N 모델의 수렴 과정(Scale 5)

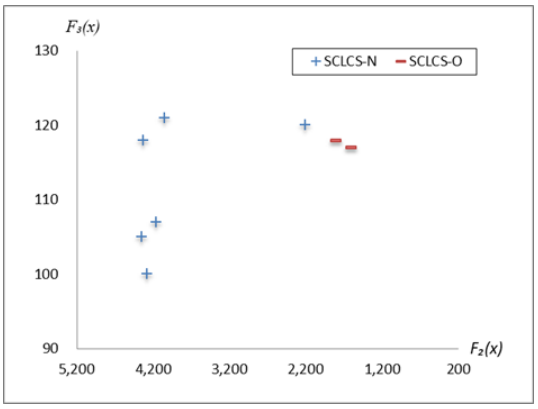

그림 5-2. Problem 2에 대한 SCLSC-O과 SCLSC-N 모델의 수렴 과정(Scale 5)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

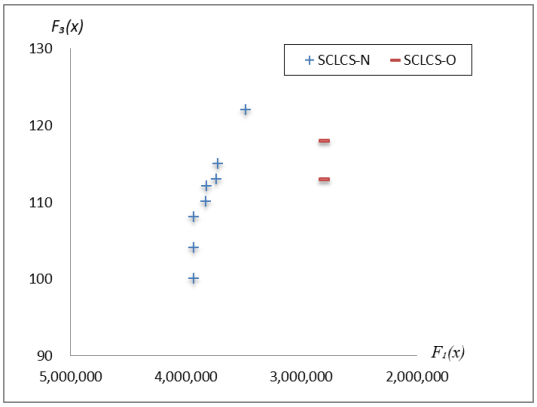

그림 5-3. Problem 3에 대한 SCLSC-O과 SCLSC-N 모델의 수렴 과정(Scale 5)

그림 5-1에서는 SCLSC-O과 SCLSC-N 모델의 Problem 1에 대한 수치 실험에서 얻어진 실행 결과를 보면 목적한수 $F_1(x)$ 을 최대화하고 $F_2(x)$ 를 최소화하는 비우월해는 그래프 안 쪽으로 위치하고 있어 SCLSC-N 모델에서 얻어진 모든 참조해와 SCLSC-O 모델에서 얻어진 6개 참조해 중 1개기 비우월해임을 알 수 있다. 그림 5-2에서 나타낸 Problem 2는 $F_2(x)$ 을 최소화하고 $F_3(x)$ 를 최대화하는 문제이기 때문에 비우월해는 그래프 바깥 쪽에 위치하고 있어 SCLSC-N 모델에서 얻어진 6 개 참조해 중에서 2개가 비우월해, SCLSC-O 모델에서 총 얻어진 참조해 2 개가 모두 비우월해인을 확인할 수 있다. 그림 5-3에서 나타낸 Problem 3의 각 목적함수는 $F_1(x)$을 최대화하고 $F_3(x)$를 최대화하는 문제이다. 그러므로 비우월해는 그래프 안 쪽에 위치하고 수치 실험 실행 결과 SCLSC-N 모델에서 얻어진 8 개 참조해 중에서 5 개가 비우월해임을 확인 하였다.

이상 다섯 가지 Scale을 고려한 SCLSC-O와 SCLSC-N 모델을 비교 분석한 결과 본 연구에서 제안한 SCLSC-N 모델이 모든 Scale에 대한 경제적 요인의 이익을 최대화하면서 환경적 요인인 CO_2 배출량을 최소화하는 Problem 1과 경제적 요인의 이익을 최대화면서 사회적 요인을 최대화하는 Problem 3 측면에서 우월한 결과를 나타냈다. SCLSC-N 모델은 수명이 끝난 모바일폰을 전문적인 수거 센터 (CC)를 통해 수거하여 회복 단계인 (RT)를 거쳐 회복된 모바일폰을 SG에 재판매 하거나 RM에 재활용하여 경제적인 이익 측면에서 더 효율적이다. 또한 CC와 RT를 추가로 설계함으로써 사회적 요인 측면에서 사회적인 영향은 증가 시킴으로서 우수한 결과가 나타났다. 환경적인 요인인 CO_2 배출량을 최소화하면서 사회적 영향을 최대화하는 Problem 2에서 SCLSC-O 모델이 SCLSC-N 모델보다 더 우수한 결과를 보였다. 그 이유는 본 연구에서 제안한 SCLSC-N 모델에서는 모바일폰 수거 및 회복을 위해 CC와 RT를 설계했기 때문에 수송 단계가 늘어나 각 단계 간 CO_2 배출량과 CC와 RC에서 모바일폰을 처리할 때 배출되는 CO_2 량이 증가하여 환경적인 측면에서 좋은 해를 나타내지 못 하고 있다. 그러나 SCLSC-N 모델에서 고려된 모바일폰 수거 및 회복과정은 RM에서 부품의 재활용 단계까지 이어져 있기 때문에 부품에 새로운 원자재를 사용하지 않아 자원순환 측면에서 효율적이라고 할 수 있다. 예를들면 SCLSC-O 모델의 RM에서는 총 3000 개의 새로운 부품을 처리하여 MM에 공급하고 있지만 SCLSC-N 모델은 RM에서 1800개 새로운 부품을

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

처리하고 1200개의 부품을 재활용하고 있다. 또한 Problem 1과 같이 이익을 최대화하면서 CO_2 배출량을 최소화하는 문제와 Problem 3과 같이 이익을 최대화면서 사회적 영향을 최대화하는 문제에서는 SCLSC-N 모델이 우수하기 때문에 모바일폰을 효율적으로 처리하기 위해서는 SCLSC-N 모델이 더 우수하다고 볼 수 있다. 하지만 실행속도 부분에서는 SCLSC-O 모델이 네트워크 구조적으로 단순하기 때문에 SCLSC-N 모델 보다 빠른 실행속도를 나타났다. 왜냐하면 SCLSC-N 모델은 모바일폰의 효율적인 처리를 위해 CC, RT, SG를 추가적으로 설계했기 때문에, 물류가 더 복잡해져 최적해를 구하는 실행 속도가 비교적으로 느린 것으로 판단된다.

5.2 SCLSC-N 모델에 대한 민감도 분석

모바일폰의 효율적인 처리를 위해 SCLSC-N 모델은 고객으로부터 사용수명이 끝난 모바일폰을 CC를 통해 수거하거나, 바로 폐기하는 단계, 그리고 수거된 모바일폰을 RT에서 회복하고 이를 SG에서 재사용하거나 RM에 공급하여 재활용하는 물류흐름을 추가로 고려하였다. 이러한 과정의 각 단계에서 모바일폰을 처리하는 비율을 조절하는 방법으로 민감도 분석을 실시하였다.

민감도 분석은 SCLSC-N 모델의 물류과정에서 고려되는 각 비율을 변화시켜 목적함수 $F_1(x)$, $F_2(x)$, $F_3(x)$ 에 어떤 영향을 미치는지를 확인했다. 먼저, FG부터 사용된 모바일폰을 CC에서 수거하는 비율 또는 DP에 보내서 폐기하는 비율을 표 5-10에서 제시한 Case 1-7을 통해 분석한다. Case 1-7은 수거 비율(δ_1%)과 폐기 비율(δ_2%)을 변화시켜 (NDL 비율(α1%), DSP 비율(α2%), 재활용 비율 (ε_1%), 재사용 비율 (ε_2%)을 고정시킴) 각 목적함수인 $F_1(x)$, $F_2(x)$, $F_3(x)$ 에 어떤 영향을 미치는지를 확인하였다. 표 5-9에서와 같이 δ_1%는 10%씩 증가시키고 δ_2%는 10%씩 감소시켰다.

표 5-9. Case 1-7에 대한 수거 또는 폐기 비율

Rate	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
α_1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
α_2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
δ_1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
δ_2	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
ε_1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ε_2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

SCLSC-N 모델을 표 5-9에서 제시한 비율을 통해 Case1-7을 비교 분석한 결과는 표 5-10 에서 제시했다. 비교 결과 수거 비율이 높을수록 폐기 비율은 작을수록 목적함수 $F_1(x)$ 증가하고 있다. FG에서 수거되는 모바일폰 양이 많을수록 재활용과 재사용이 증가되기 때문에 이익을 증가 시키고 있다. $F_2(x)$ 측면에서는 사용수명이 끝난 모바일폰을 수거하고 폐기되는 모바일폰의 양을 줄이기 때문에 환경적인 측면에서도 효율적으로 나타났다. 본 연구는 MM, PM과 RC에서의 발생되는

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

사회적 요인을 고려했기 때문에 사회적 요인인 $F_3(x)$ 측면에서 모바일폰을 수거하여 RC에서 회복하기 때문에 회복되는 제품률이 증가할수록 사회적 요인인 RC의 처리량을 증가시키고 있다. 결과적으로 사용된 모바일폰을 폐기하는 것보다 수거하여 재활용 또는 재사용하는 것이 더 효율적으로 나타났다.

그림 5-4, 5-5, 5-6은 표 5-10의 Case 1-7에 대한 수렴결과를 나타내고 있다.

표 5-10. Case 1-7 민감도분석 결과

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
$F_1(x)$	3,035,673	3,168,914	3,253,475	3,335,275	3,428,328	3,575,337	3,677,905
$F_2(x)$	3,289	3,230	3,224	3,163	2,973	2,757	2,478
$F_3(x)$	104	106	107	107	108	110	112

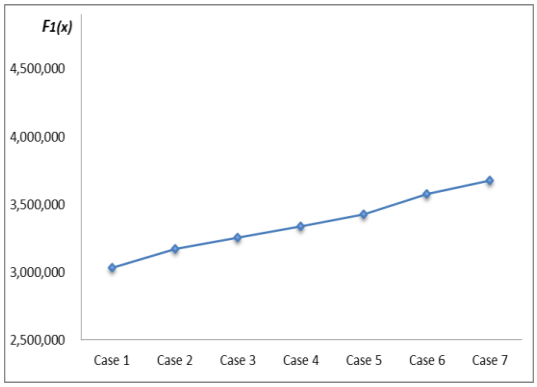

그림 5-4. Case 1-7에 대한 $F_1(x)$ 결과

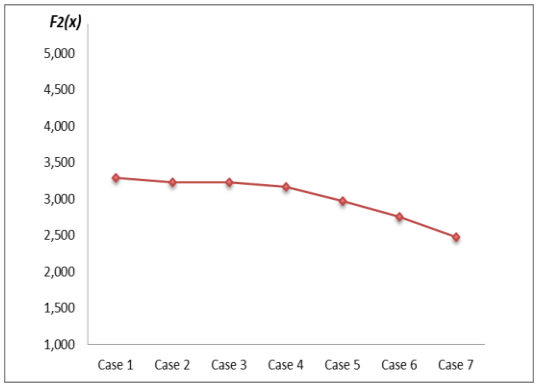

그림 5-5. Case 1-7에 대한 $F_2(x)$ 결과

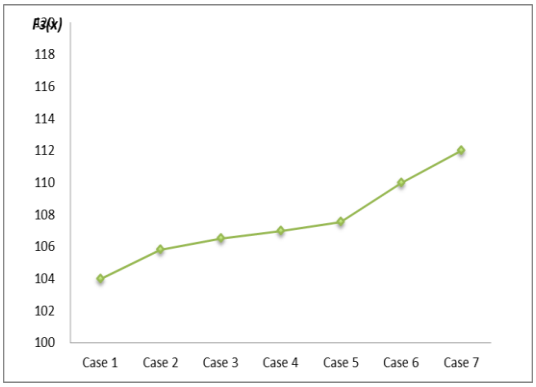

그림 5-6. Case 1-7에 대한 $F_3(x)$ 결과

SCLSC-N 모델은 수거된 모바일폰을 재활용 또는 재사용하기 위해 RC에서 회복 과정을 거치고 있다. RC에서 회복된 모바일폰을 재활용하는 것이 더 효율적인지 재사용하는 것이 더

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

효율적인지를 확인하기 위해 SCLSC-N 모델의 RM에서 모바일폰 부품의 재활용 비율이나 SG에서 재사용되는 비율을 각각 조절해 목적함수에 대한 변화를 표 5-12에서 제시한 Case 8-14를 통해 확인했다. 표 5-12와 같이 Case 8-14는 재사용 비율 (ε_1%), 재활용 비율 (ε_2%)에 변화시켜 NDL 비율 α_1 = 80%, DSP 비율 α_2 = 0.2%, 수거 비율 δ_1=80% 과 폐기 비율을 δ_2=20%로 고정시키고, 각 $F_1(x), F_2(x), F_3(x)$에 어떠한 영향을 주는지 확인했다. 표 5-11에서 제시한 것과 같이 각 재사용비율 ε_1%는 10%씩 증가시키고 재활용비율은 ε_2% 감소시켰다.

표 5-11. Case 8-14에 대한 재활용 또는 재사용 비율

Rate	Case 8	Case 9	Case 10	Case 11	Case 12	Case 13	Case 14
α_1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
α_2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
δ_1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
δ_2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
ε_1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
ε_2	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2

수거된 모바일폰은 재활용 또는 재사용하기 위해 RC에 공급된다. 표 5-12에서 회복된 모바일폰을 SG에서 재사용이 가능한 모바일폰 비율과 RM에서 재활용이 가능한 부품의 비율을 조절하여 분석한 결과를 Case 8-14에서 보여주고 있다. 모바일폰의 재사용 비율은 10%씩 증가시키고, 재활용 비율은 10%씩 감소시켜 분석한 결과 목적함수 $F_1(x)$는 Case 8부터 14까지 계속 증가하고 있다. 이는 회복된 모바일폰을 부품으로 분해하여 RM에서 재활용하는 것보다 SG에 판매하여 재사용하는 것이 이익적 측면에서 더 효율적임을 알 수 있다. 하지만 환경적인 요인을 고려한 목적함수 $F_2(x)$ 는 Case 8에서 Case 14까지 증가하고 있다. 이는 모바일폰을 환경적인 측면에서 회복된 모바일폰을 SG에서 재사용하는 것 보다 부품으로 RM에서 재활용하는 것이 더 효율적이라는 것을 알 수 있다. SCLSC-N 모델의 RM에서 새로운 부품을 처리하는 과정에는 CO_2 량이 많이 배출되기 때문에 재활용하는 것이 환경 측면에서 더 효율적이라는 것을 확인 할 수 있다. $F_3(x)$ 측면에서는 회복된 모바일폰을 재사용하거나 재활용하는 것이 사회적 요인에 영향을 미치지 않는 것으로 확인 되었다. 그 이유는 본 연구에서 제안한 SCLSC-N 모델에서는 MM, PM, RC에서의 발생되는 사회적 영향을 고려했기 때문에 사회적 요인인 $F_3(x)$ 측면에서 SG에서의 모바일폰의 재사용률과 RM에서 모바일폰 부품의 재활용률이 영향을 미치지 않다는 것이다.

그림 5-7, 5-8, 5-9에서 Case 8-14에 대한 각 목적 함수 $F_1(x), F_2(x), F_3(x)$의 수렴된 결과를 나타냈다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 5-12. Case 8-14 민감도분석 결과

	Case 8	Case 9	Case 10	Case 11	Case 12	Case 13	Case 14
$F_1(x)$	3,495,940	3,508,256	3,561,849	3,552,888	3,555,985	3,642,368	3,741,085
$F_2(x)$	3,430	3,666	3,658	3,683	3,810	3,887	3,958
$F_3(x)$	106	106	107	105	104	106	108

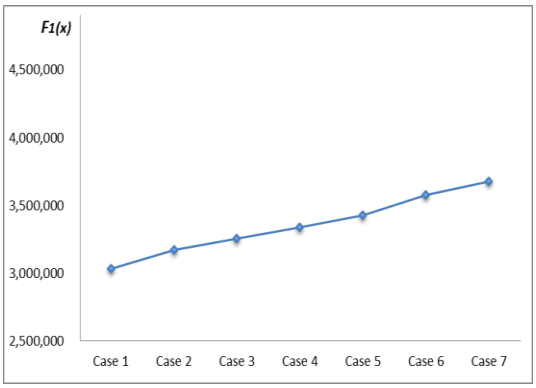

그림 5-7. Case 8-14에 대한 $F_1(x)$ 결과

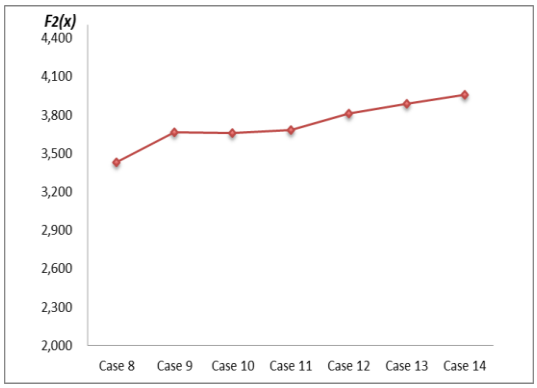

그림 5-8. Case 18-14에 대한 $F_2(x)$ 결과

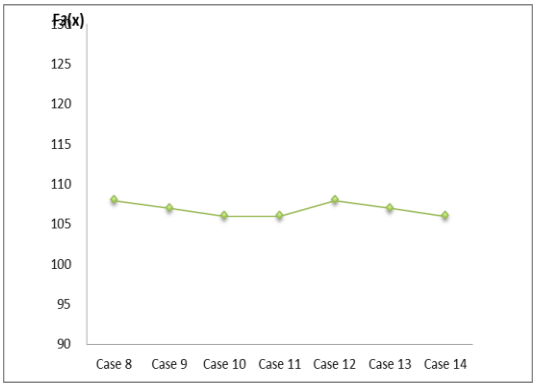

그림 5-9. Case 8-14에 대한 $F_3(x)$ 결과

이상의 결과를 요약하면, SCLSC-N 모델의 민감도 분석 결과 FG에서 사용된 모바일폰을 폐기하는 것 보다 수거하는 것은 모바일폰을 재사용 및 재활용률을 높여 이로 인한 비용을 감소시켜 이익을 증가시길 수 있다. 또한 모바일폰 부품을 재사용하기 때문에 환경적 측면에서도 CO_2 배출량을 줄일 수 있다. 사회적 요인 측면에서 수거된 모바일폰을 RC에 공급하기 때문에 RC에서 발생되는 일자리 기회, 실업수, 손실일수에 영향을 미쳐 효율적인 것으로 나타났다. 그러나 회복된 모바일폰을 재사용하는 것은 경제적인 측면에서는 효율적이지만 이를 재활용하는 것 보다 환경적으로 효율적이지 않다고 분석되었으며, 재활용률과 재사용률은 사회적 요인에 아무런 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5.3 SCLSC-N 모델에 대한 수송채널 비교

본 연구에서 제안한 SCLSC-N 모델의 단일 수송채널인 NDL만을 가지는 SCLSC-N (SCLSC-N1) 모델과 이중 수송채널인 NDL과 DSP을 함께 가지는 SCLSC-N (SCLSC-N2) 모델을 고려하여 수행도를 비교분석하였다. 비교분석을 위해 표 5-1에서 제시한 다섯 가지 Scale과 표 5-2에서 제시한 척도를 사용하였다. 표 5-13에서는 SCLSC-N1와 SCLSC-N2 모델의 Scale 1에 대해 Problem 1, Problem 2, Problem 3을 비교 분석한 결과를 제시했다.

표 5-13. SCLSC-N1과 SCLSC-N2 모델에 대한 비교 결과 (Scale 1)

	Problem 1		Problem 2		Problem 3	
	SCLSC-N1	SCLSC-N2	SCLSC-N1	SCLSC-N2	SCLSC-N1	SCLSC-N2
$\|S_j\|$	1	9	4	3	1	4
$R_{NDS}(S_j)$	0.1	0.9	0.57	0.43	0.2	0.8
$DI_R(S_j)$	135,661	0	71	0	145,429	0
CPU time(s)	51.5	60.9	51.5	60.9	51.5	60.9

표 5-13의 비교 분석 결과 Problem 1에서는 SCLSC-N1 모델의 Pos 평가 측면에서 $|Sj|$ 값은 1, SCLSC-N2 모델의 $|Sj|$ 값은 9로 나타나고, 이에 따라 $R_{NDS}(S_j)$ 값은 SCLSC-N1 모델이 10%이며 SCLSC-N2 모델은 90%로 SCLSC-N1 모델보다 비우월해 비율이 더 높게 나타났다. SCLSC-N2 모델의 모든 Pos가 비우월해이기 때문에 $DI_R(S_j)$ 값이 0으로 나타나고 SCLSC-N1 모델의 $DI_R(S_j)$ 값은 135,661 나타났다. 이와 같이 Problem 1의 Pos를 평가하는 모든 척도에서는 SCLSC-N2 모델이 우수한 결과를 보였다.

Problem 2에서 SCLSC-N1 모델의 Pos 평가 측면에서 $|Sj|$ 값은 4, SCLSC-N2 모델의 $|Sj|$ 값은 3로 나타나고, $R_{NDS}(S_j)$ 값은 SCLSC-N1 모델이 57%, SCLSC-N2 모델은 43%로 SCLSC-N2 모델보다 비우월해 비율이 더 높게 나타났다. SCLSC-N2 모델의 모든 Pos가 비우월해이기 때문에 $DI_R(S_j)$ 값이 0으로 나타나고 SCLSC-N1 모델의 $DI_R(S_j)$ 값은 71로 나타났다. 이와 같이 Problem 2에서는 $R_{NDS}(S_j)$ 와 $DI_R(S_j)$ 척도에서 SCLSC-N2 모델이 더 우수한 결과를 보였으며, 비우월해 개수를 나타나는 $|Sj|$ 척도에서는 SCLSC-N1 모델이 더 우수한 해를 보이고 있다.

Problem 3에서는 SCLSC-N1 모델의 Pos 평가 측면에서 $|Sj|$ 값은 1, SCLSC-N2 모델의 $|Sj|$ 값은 5로 나타나고 $R_{NDS}(S_j)$ 값은 SCLSC-N1 모델이 20%이며 SCLSC-N2 모델은 80%으로 SCLSC-N1 모델보다 비우월해 비율이 더 높게 나타났다. 또한 SCLSC-N2 모델의 모든 Pos가 비우월해이기 때문에 $DI_R(S_j)$ 값은 0, SCLSC-N1 모델의 $DI_R(S_j)$ 값은 145,429 나타났다. 마찬가지로 Problem 3의 Pos를 평가하는 모든 척도에서 SCLSC-N2 모델이 더 우수한 결과를 보였다. Scale 1에 대한 Problem 1, Problem 2, Problem 3에 대한 실행 속도를 나타나는 CPU time(s)은 같으며 SCLSC-N1 모델은 가장

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

빠른 실행속도를 보인 51.5초, SCLSC-N2 모델은 그보다 느리게 60.9로 나타났다. SCLSC-N1와 SCLSC-N2 모델의 Scale 1에 대한 비교 결과 Problem 1, Problem 2, Problem 3에서 두 가지 수송채널인 NDL과 DSP을 함께 가지는 것이 SCLSC-N2 모델이 더 우수함을 알 수 있다. 하지만 CPU time(s) 측면에서는 SCLSC-N1 모델이 단일 수송 채널을 고려하기 때문에 실행시간이 이중 수송 채널을 고려한 SCLSC-N2 모델 보다 더 빠른 실행 속도를 보이는 것을 확인하였다.

표 5-14에서는 SCLSC-N1와 SCLSC-N2 모델의 Scale 2에 대한 비교 분석한 결과를 제시했다.

표 5-14. SCLSC-N1과 SCLSC-N2 모델에 대한 비교 결과(Scale 2)

	Problem 1		Problem 2		Problem 3	
	SCLSC-N1	SCLSC-N2	SCLSC-N1	SCLSC-N2	SCLSC-N12	SCLSC-N2
$\|S_j\|$	2	3	2	3	1	5
$R_{NDS}(S_j)$	0.4	0.6	0.4	0.6	0.16	0.84
$DI_R(S_j)$	63,968	0	183	0	366,677	0
CPU time(s)	52.4	61.3	52.4	61.3	52.4	61.3

분석 결과 Problem 1에서 총 5개의 비우월해가 구해지고 이 중에서 SCLSC-N1 모델의 $|Sj|$ 값은 2, SCLSC-N2 모델의 $|Sj|$ 값은 3로 나타났다. 또한 $R_{NDS}(S_j)$ 척도에서 SCLSC-N1 모델의 값은 40%, SCLSC-N 모델은 60%으로 SCLSC-N1 모델보다 비우월해 비율이 더 높게 나타났다. SCLSC-N2 모델의 모든 Pos가 비우월해이기 때문에 $DI_R(S_j)$ 값이 0이며, SCLSC-N1 모델의 $DI_R(S_j)$ 값은 63,968으로 나타났다. Problem 2에서 SCLSC-N1 모델의 $|Sj|$ 값이 2이며 SCLSC-N 모델의 $|Sj|$ 값은 3로 나타났다. 비우월해 비율은 SCLSC-N2 모델이 가장 높은 60%이며 SCLSC-N1 모델은 40%이다. 비우월해와 참조해 거리를 나타나는 $DI_R(S_j)$ 값은 SCLSC-N1 모델의 경우 183이며, SCLSC-N2 모델은 모든 해가 비우월해이기 때문에 $DI_R(S_j)$ 값이 0로 나타났다. Problem 3에서 SCLSC-N1 모델의 $|Sj|$ 값은 1이며 그 보다 더 높게 SCLSC-N2 모델의 $|Sj|$ 값은 5로 나타나 $R_{NDS}(S_j)$ 측면에서 각 모델의 비우월해의 비율은 16%, 84%로 확인되었다. SCLSC-N1 모델에서 구해진 Pos들은 비우월해와 비교적 멀리 있어 $DI_R(S_j)$ 값은 366,677이며, SCLSC-N2 모델에서 구해진 Pos들은 모두 비우월해이기 때문에 $DI_R(S_j)$ 값은 0로 나타났다. Scale 2에 대한 두 모델의 Problem 1, Problem 2, Problem 3에 대한 CPU time(s)은 같으며, SCLSC-N1 모델은 제일 빠른 실행속도인 52.4초, SCLSC-N2 모델은 그보다 느린 61.3초로 나타났다. SCLSC-N1과 SCLSC-N2 모델의 Scale 2에 대한 Pos평가 결과 Problem 1, Problem 2, Problem 3에서 두 가지 수송채널 NDL과 DSP을 함께 가지는 SCLSC-N 모델이 더 우수한 것을 알 수 있다. 하지만 CPU time(s) 측면에서 봤을 때 SCLSC-N1 모델이 단일 수송 채널을 고려했기 때문에 이중 수송 채널을 고려한 SCLSC-N2 모델 보다 빠른 실행 속도를 보였다.

표 5-15 에서는 SCLSC-N1와 SCLSC-N2 모델의 Scale 3에 대해 Problem 1, Problem 2, Problem 3을 비교 분석한 결과를 제시했다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 5-15. SCLSC-N1과 SCLSC-N2 모델에 대한 비교 결과(Scale 3)

	Problem 1		Problem 2		Problem 3	
	SCLSC-N1	SCLSC-N2	SCLSC-N1	SCLSC-N2	SCLSC-N1	SCLSC-N2
$\|S_j\|$	0	10	3	4	1	3
$R_{NDS}(S_j)$	0.0	1.0	0.42	0.58	0.25	0.75
$DI_R(S_j)$	127,965	0	876	797	106,357	0
CPU time(s)	54.0	61.5	54.0	61.5	54.0	61.5

표 5-15의 비교 분석 결과 Problem 1에서 SCLSC-N1 모델의 $|Sj|$ 값은 0으로 비우월해가 구해지지 않았다. 그러므로 $R_{NDS}(S_j)$ 값은 0이다. SCLSC-N2 모델의 $|Sj|$ 값은 10으로 $R_{NDS}(S_j)$ 값이 100%으로 구해졌기 때문에 SCLSC-N2 모델이 SCLSC-N1 모델보다 더 우수한 결과 값으로 나타났다. SCLSC-N2 모델의 모든 Pos는 비우월해이기 때문에 DI_R (S_j) 값이 0, SCLSC-N1 모델의 DI_R (S_j) 값은 127,965이다. 이와 같이 Problem1의 Pos를 평가하는 모든 척도에서 SCLSC-N 모델이 우수한 결과를 보였다.

Problem 2에서 SCLSC-N1 모델과 SCLSC-N2 모델을 비교 분석한 결과 비우월해 수를 나타나는 $|Sj|$ 값이 3이며 SCLSC-N2 모델의 $|Sj|$ 값은 4로 나타났다. 비우월해 비율은 SCLSC-N2 모델이 가장 높은 결과를 보인 58%이며 SCLSC-N1 모델은 42%로 나타났다. 비우월해와 참조해 거리를 나타나는 DI_R (S_j) 값은 SCLSC-N1 모델의 값이 876이며, SCLSC-N2 모델의 DI_R (S_j) 값은 797로 나타났다. SCLSC-O 모델이 우수한 것으로 보이고 있다.

Problem 3에서도 마찬가지로 이중 채널을 고려한 SCLSC-N2 모델이 더 우수한 결과를 나타나고 있으며 각 척도에서는 SCLSC-N1 모델의 $|Sj|$ 값은 1, SCLSC-N2 모델의 $|Sj|$ 값은 3으로 $R_{NDS}(S_j)$ 측면에서 각 모델의 비우월해의 비율은 25%, 75%로 확인되었다. SCLSC-N1 모델에서 구해진 Pos들은 비우월해와 비교적 멀리 있어 DI_R (S_j) 값은 106,357이며, SCLSC-N2 모델에서 구해진 Pos들은 모두 비우월해이기 때문에 $DI_R(S_j)$ 값은 0로 나타났다. Scale 3에 대한 각 모델의 Problem 1, Problem 2, Problem 3에 대한 CPU time(s)은 같으며 SCLSC-N1 모델이 가장 빠른 실행속도를 보여 54초이며, SCLSC-N2 모델은 그보다 느린 61.5초로 나타났다. SCLSC-N1과 SCLSC-N2 모델의 Scale 3에 대한 Pos평가 결과 단일 수송채널 NDL을 고려한 SCLSC-N1모델 보다 두 개의 수송채널 NDL과 DSP을 함께 가지는 SCLSC-N2 모델이 Problem 1, Problem 2, Problem 3에서 모두 우수한 것을 알 수 있다. 하지만 CPU time(s) 측면에서 SCLSC-N1 모델은 단일 수송 채널을 고려하기 때문에 물류 흐름 구조가 단순하며, 실행시간이 이중 수송 채널을 고려한 SCLSC-N2 모델 보다 빠른 실행 속도를 보였다.

표 5-16에서는 SCLSC-N1와 SCLSC-N2 모델의 Scale 4에 대한 비교 분석한 결과를 제시했다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 5-16. SCLSC-N1과 SCLSC-N2 모델의 대한 결과(Scale 3)

	Problem 1		Problem 2		Problem 3	
	SCLSC-N1	SCLSC-N2	SCLSC-N1	SCLSC-N2	SCLSC-N1	SCLSC-N2
$\|S_j\|$	0	10	1	2	1	5
$R_{NDS}(S_j)$	0.0	1.0	0.33	0.67	0.16	0.84
$DI_R(S_j)$	308,715	0	259	201	166,526	0
CPU time(s)	55.5	61.9	55.5	61.9	55.5	61.9

표 5-16의 분석 결과 Problem 1에서 SCLSC-N1 모델의 비우월해가 구해지지 않기 때문에 $|Sj|$ 값은 0, SCLSC-N2 모델의 $|Sj|$ 값은 10으로 나타났다. 그러므로 SCLSC-N1 모델과 SCLSC-N2 모델의 $R_{NDS}(S_j)$ 값은 각각 0%와 100%로 SCLSC-N2 모델이 SCLSC-N1 모델보다 더 우수한 결과를 보였다. SCLSC-N2 모델의 모든 Pos는 비우월해이기 때문에 $DI_R(S_j)$ 값이 0으로 나타나고 SCLSC-N1 모델의 $DI_R(S_j)$ 값은 308,715이다. 이와 같이 Problem1의 Pos를 평가하는 모든 척도에서 SCLSC-N2 모델이 더 우수한 결과를 보였다.

Problem 2에서 SCLSC-N1 모델과 SCLSC-N2 모델을 비교 분석한 결과 SCLSC-N1 모델의 $|Sj|$ 값이 1이며 SCLSC-N2 모델의 $|Sj|$ 값은 2로 나타났다. 비우월해 비율은 SCLSC-N2 모델이 가장 높은 결과를 보여 67%이며 SCLSC-N1 모델은 33%로 확인되었다. 비우월해와 참조해 거리를 나타나는 $DI_R(S_j)$ 값은 SCLSC-N1 모델의 경우 259이며, SCLSC-N2 모델은 201로 나타났다.

Problem 3에서도 마찬가지로 이중 채널을 고려한 SCLSC-N2 모델이 더 우수한 결과를 나타나고 있으며, 각 척도에서는 SCLSC-N1 모델의 $|Sj|$ 값은 1이며, SCLSC-N2 모델의 $|Sj|$ 값은 5로 나타났으며 $R_{NDS}(S_j)$ 측면에서도 각 모델의 비우월해의 비율은 16%, 84%로 나타났다. SCLSC-N1 모델에서 $DI_R(S_j)$ 값은 166,526이며, SCLSC-N2 모델에서 구해진 Pos들은 모두 비우월해이기 때문에 $DI_R(S_j)$ 값은 0로 나타났다. Scale 4에 대한 CPU time(s)은 같으며 SCLSC-N1 모델이 가장 빠른 실행속도를 보여 55.5초 그리고 SCLSC-N2 모델은 그보다 느린 61.9초로 나타났다. SCLSC-N1과 SCLSC-N2 모델의 Scale 4에 대한 Pos평가 결과 SCLSC-N2 모델이 Problem 1, Problem 2, Problem 3에서 모두 우수한 것을 알 수 있다. 하지만 CPU time(s) 측면에서 SCLSC-N1 모델은 단일 수송 채널을 고려하기 때문에 물류 흐름 구조가 단순하기 때문에 이중 수송 채널을 고려한 SCLSC-N2 모델 보다 더 빠른 실행 속도를 보였다.

표 5-17에서는 Scale 5에 대한 비교 분석한 결과를 제시했다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 5-17. SCLSC-N1과 SCLSC-N2 모델의 Scale 5에 대한 비교 결과

	Problem 1		Problem 2		Problem 3	
	SCLSC-N1	SCLSC-N	SCLSC-N1	SCLSC-N	SCLSC-N1	SCLSC-N
$\|S_j\|$	1	13	3	4	1	7
$R_{NDS}(S_j)$	1/14	13/14	0.42	0.58	0.12	0.88
$DI_R(S_j)$	48,827	7,363	107	37	57,360	15,570
CPU time(s)	55.9	62.4	55.9	62.4	55.9	62.4

표 5-17의 비교 분석 결과 Problem 1에서 총 14개의 비우월해가 구해졌으며 이중에서 SCLSC-N1 모델의 $|Sj|$ 값은 1, $R_{NDS}(S_j)$는 0.07% 이고, SCLSC-N2 모델에서 $|Sj|$ 값은 13, $R_{NDS}(S_j)$는 0.93%으로 SCLSC-N2 모델이 SCLSC-N1 모델보다 더 우수한 결과를 보였다. SCLSC-N2 모델의 $DI_R(S_j)$ 값은 7,363, SCLSC-N1 모델의 $DI_R(S_j)$ 값은 48,827로 나타났다. Problem 1의 Pos를 평가하는 모든 척도에서 SCLSC-N2 모델이 더 우수한 결과를 보였다.

Problem 2에서 SCLSC-N1 모델과 SCLSC-N2 모델을 비교 분석한 결과 비우월해 수를 나타나는 $|Sj|$ 값이 3이며 SCLSC-N2 모델의 $|Sj|$ 값은 4로 확인되었다. 비우월해 비율은 SCLSC-N2 모델이 가장 높은 결과를 보여 58%이며 SCLSC-N1 모델은 42%로 나타났다. $DI_R(S_j)$ 값은 SCLSC-N1 모델의 경우 107이며, SCLSC-N2 모델은 $DI_R(S_j)$ 값이 37로 나타났다.

Problem 3에서도 마찬가지로 이중 채널을 고려한 SCLSC-N2 모델이 더 우수한 결과를 나타내고 있으며, 각 척도에서 SCLSC-N1 모델의 $|Sj|$ 값은 1, SCLSC-N2 모델의 $|Sj|$ 값은 7로 나타났다. $R_{NDS}(S_j)$ 측면에서 각 모델의 비우월해의 비율은 12%, 88%로 나타났다. SCLSC-N1 모델의 $DI_R(S_j)$ 값은 57,360이며, SCLSC-N2 모델의 $DI_R(S_j)$ 값은 15,570로 SCLSC-N1 모델보다 더 우수한 결과를 보였다.

CPU time(s) 측면에서 SCLSC-N1 모델이 가장 빠른 실행속도를 보여 55.9초, SCLSC-N2 모델은 그보다 느린 62.4초로 나타났다. SCLSC-N1과 SCLSC-N2 모델의 Scale 5에 대한 비교 분석결과 단일 수송채널 NDL 만을 고려한 SCLSC-N1 모델 보다 두 개의 수송채널 NDL과 DSP을 함께 가지는 SCLSC-N2 모델이 Problem 1, Problem 2, Problem 3에서 모두 우수한 것을 알 수 있다. 하지만 CPU time(s) 측면에서 SCLSC-N1 모델이 단일 수송 채널을 고려하기 때문에 물류 흐름 구조가 단순하며 실행시간이 이중 수송 채널을 고려한 SCLSC-N2 모델 보다 빠른 실행 속도를 보였다.

표 5-13에서 표 5-17까지 제시된 결과와 같이 SCLSC-N1 모델과 SCLSC-N2 모델을 수송 채널 측면에서 비교한 결과 경제적 요인을 최대화하고 환경적 요인을 최소화하는 문제인 Problem 1, 환경적 요인을 최소화하고 사회적 요인을 최대화하는 문제인 Problem 2 그리고 경제적 요인을 최대화하고 사회적 요인을 최대화하는 문제인 Problem 3에서 NDL와 DSP를 함께 고려한 SCLSC-N2 모델이 NDL 만을 고려한 SCLSC-N1 모델 보다 우수한 결과를 나타나고 있다. 이는 모바일폰을 위한 공급망에서 NDL만 고려하는 것 보다 NDL와 DSP를 같이 고려하는 것이 효율적이라는 것을

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

입증하였다.

5.4 기존 접근법과 제안된 접근법 비교

본 절에서는 5.1절에서 제시한 SCLSC-N 모델의 다섯 가지 Scale을 고려하여 기존 접근법과 본 연구에서 제안한 PHGA 접근방법을 비교 분석하였다. 비교 분석에 사용된 기존 연구로는 Gen et al.(2009)에서 제안한 GA 접근법과 Kanagaraj et al. (2013)에서 제안한 HGA 접근법을 사용했다. 각 접근방법을 비교 분석한 결과는 표 5-18에서 표 5-22까지 나타냈다.

표 5-18은 SCLSC-N 모델의 Scale 1을 이용하여 GA, HGA, PHGA 접근법의 적용결과를 나타내고 있다.

표 5-18. GA, HGA, PHGA의 비교 분석 결과 (Scale 1)

	Problem 1			Problem 2			Problem 3		
	GA	HGA	PHGA	GA	HGA	PHGA	GA	HGA	PHGA
$\|S_j\|$	0	1	6	0	1	3	0	1	3
$R_{NDS}(S_j)$	0.0	0.14	0.86	0.0	0.25	0.75	0.0	0.25	0.75
$DI_R(S_j)$	48,422	0	170	526	132	0	27,644	45,966	0
CPU time(s)	58.9	59.1	60.9	58.9	59.1	60.9	58.9	59.1	60.9

표 5-18의 Problem 1에서 GA 접근법을 통해 구해진 참조해 중에서 비우월해 수를 나타나는 $|Sj|$ 값은 0이다. 이는 GA 접근법에서 비우월해를 구하지 못했다는 의미이다. HGA 접근법에서 발생된 모든 참조해 중에서 1개의 해가 비우월해 집합에 포함 되기 때문에 $|Sj|$ 값은 1로 나타났다. 그러나 PHGA 접근법을 통해 구해진 참조해 중에서 가장 많은 수의 해들이 비우월해 집합에 포함되어 있어 $|Sj|$ 값은 6으로 나타났다. 이에 따라 Problem 1에서 각 접근방법들로부터 구해진 $R_{NDS}(S_j)$ 값은 GA는 0%, HGA는 14%, PHGA는 86%로 나타났다. $DI_R(S_j)$ 값은 각 접근법에서 GA접근법이 가장 높은 48,422, PHGA 접근법은 170, HGA 접근법은 0으로 나타났다. Problem 1에 대한 결과 PHGA 접근법은 $|Sj|$와 $R_{NDS}(S_j)$ 측면에서 가장 우수한 해를 보였으며, HGA 접근법은 비우월해 수가 PHGA 접근법보다 작지만 $DI_R(S_j)$ 측면에서 가장 높은 값을 보였다. 이는 GA 접근법이 단일접근 방법이기 때문에 SCLSC-N 모델과 같은 복잡하고 Scale이 큰 문제를 해결하는데 한계점이 있다는 것을 의미한다. HGA와 PHGA 접근법은 혼합형 최적화 방법 즉, 혼합형 유전알고리즘 방법이기 때문에 GA보다 우수한 결과를 나타나고 있지만 PHGA 접근법이 HGA 접근법보다 해의 개선을 시도하는 과정이 정밀하기 때문에 HGA보다 PHGA 접근법이 더욱 우수한 결과를 보이고 있다.

Problem 2에서는 GA 접근법에서 $|Sj|$ 값은 0으로 나타났고, HGA 접근법의 $|Sj|$ 값은 1, PHGA 접근법의 $|Sj|$ 값은 3으로 본 연구에서 제안한 PHGA 접근법에서 제일 많은 비우월해가 발생된

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

것을 알 수 있다. $R_{NDS}(S_j)$ 의 GA 접근법은 0%, HGA 접근법은 25%, PHGA 접근법은 75%로 나타났다. DI_R (S_j) 값은 각 접근법에서 GA 접근법이 가장 높은 값인 526, HGA 접근법은 132이며, 구해진 모든 해가 비우월해이기 때문에 PHGA 접근법의 $DI_R(S_j)$ 값은 0으로 나타났다.

Problem 3의 GA 접근법에서도 마찬가지로 $|Sj|$ 값은 0로 나타나고 HGA 접근법의 $|Sj|$ 값은 1, PHGA 접근법의 $|Sj|$ 값은 3으로 나타나 가장 많은 비우월해를 구하고 있다. $R_{NDS}(S_j)$ 에서 GA 접근법은 비우월해를 구하지 못하고 있기 때문에 0%이며, HGA 접근법은 25%, PHGA 접근법은 75%로 나타났다. DI_R (S_j) 값은 각각 방법에서 GA 접근법인 경우 27,644, HGA 접근법은 제일 높은 거리 값인 45,966으로 PHGA 접근법은 0으로 나타났다. 그러므로 Scale 1 경우 PHGA 접근법은 Pos를 평가하기 위한 모든 척도에서 가장 우수한 해를 보였다. 즉, GA 접근법은 단일 최적화 접근법이기 때문에 탐색 공간이 넓은 다목적 문제에 적합하지 않아 최적해를 찾지 못했다. HGA 접근법은 기존 연구에서 제안한 혼합형 유전알고리즘 접근법이긴 하지만 다목적 최적해를 고려한 문제에서 우수한 결과를 얻지 못했다. 그러나 본 연구에서 개선한 PHGA 접근법은 모든 Problem (Problem 1, 2, 3) 측면에서 가장 우수한 결과를 보이고 있다. 각 접근법들의 실행 속도를 나타내는 CPU time(s) 측면에서는 GA 접근법이 단일 접근방법이기 때문에 가장 빠른 실행 속도인 58.9초, 혼합형 접근법인 HGA접근법의 실행 속도는 59.1초, PHGA 접근법의 실행속도 60.9초로 상대적으로 느린 실행속도를 보이고 있다.

그림 5-10, 5-11, 5-12은 Scale 1을 고려한 Problem1, 2, 3에 대해 GA, HGA, PHGA 접근법의 수행도 결과를 나타내고 있다

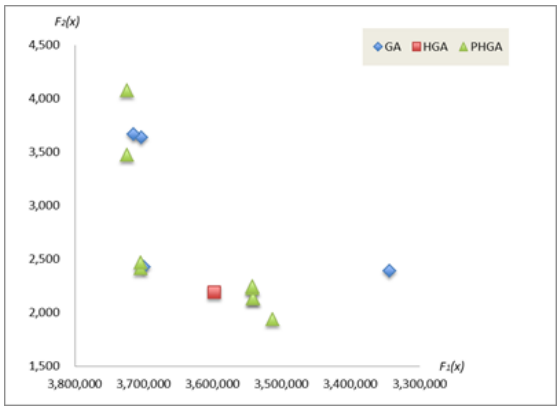

그림 5-10. Problem 1에 대한 GA, HGA, PHGA의 실행 결과 (Scale1)

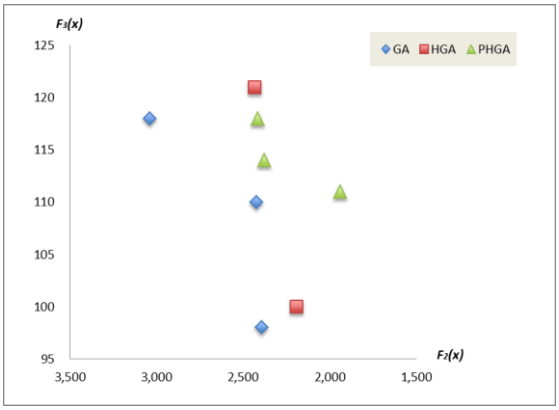

그림 5-11. Problem 2에 대한 GA, HGA, PHGA의 실행 결과 (Scale1)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

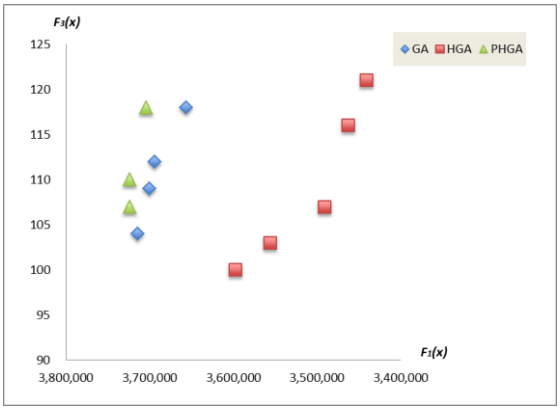

그림 5-12. Problem 3에 대한 GA, HGA, PHGA의 실행 결과 (Scale1)

그림 5-10에서 Scale 1에 대한 GA, HGA, PHGA 접근법의 Problem 1 실행 결과를 보여주고 있다. 각 접근법의 실행 결과 GA 접근법은 0개, HGA 접근법은 1개, PHGA 접근법은 6개의 Pos를 수렴하고 있다. 이 중에서 $F_1(x)$ 과 $F_2(x)$ 가 가장 우수한 값은 제일 안 쪽에 위치하며 HGA 접근법에서 1개 비우월해, PHGA 접근법에서 6개의 비우월해가 발생되었다는 것을 알 수 있다. 그림 5-11에서 Problem 2 실행 결과 GA 접근법은 3개, HGA 접근법은 2개, PHGA 접근법은 3개의 Pos를 수렴하고 있으며, 이 중에서 $F_2(x)$과 $F_3(x)$가 가장 높은 값은 그래프 바깥 쪽에 위치하므로서 HGA 접근법에서 1개, PHGA 접근법에서 3개가 비우월해로 선택되었다. 그림 5-12에서 Problem 3 실행 결과를 보여주고 있다. 각 접근법의 실행 결과 GA 접근법은 3개, HGA 접근법은 4개, PHGA 접근법은 6개의 Pos를 수렴하고 있으며 이 중에서 $F_1(x)$과 $F_3(x)$가 가장 우수한 값은 제일 안 쪽에 위치하며 PHGA 접근법에서 발생되었다는 것을 알 수 있다.

표 5-19에서는 Scale 2을 이용한 GA, HGA, PHGA 접근법을 비교 분석한 결과를 제시하였다.

표 5-19. GA, HGA, PHGA의 비교 분석 결과(Scale 2)

	Problem 1			Problem 2			Problem 3		
	GA	HGA	PHGA	GA	HGA	PHGA	GA	HGA	PHGA
$\|S_j\|$	2	1	3	2	0	2	1	1	5
$R_{NDS}(S_j)$	0.0	0.25	0.75	0.5	0.0	0.5	0.14	0.14	0.72
$DI_R(S_j)$	50,930	92,657	0	0	413	336	13,161	79,390	0
CPU time(s)	59.2	59.9	61.3	59.2	59.9	61.3	59.2	59.9	61.3

표 5-19의 Scale 2에서 Problem 1은 모든 접근법들로부터 구해진 참조해 중에서 총 5개의 비우월해가 얻어졌다. 이중에서 GA접근법의 $|Sj|$ 값은 2, HGA접근법의 $|Sj|$ 값은 1로 나타나고

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

PHGA접근법으로부터 얻어진 $|Sj|$ 값은 3으로 나타났다. 이에 따라 $R_{NDS}(S_j)$는 GA접근법은 0%, HGA접근법은 25%, PHGA접근법은 75%이다. DI_R (S_j) 값은 GA접근법인 경우 50,930 이며, HGA접근법은 각 방법 중에서 가장 높은 DI_R (S_j) 값을 나타났다. PHGA접근법은 모든 참조해가 비우월해이기 때문에 $DI_R(S_j)$ 값이 0으로 나타났다.

Problem 2에 대한 결과 $|Sj|$ 측면에서 GA와 PHGA접근법에서 발생된 비우월해의 수 $|Sj|$는 동일하게 나타났다. HGA접근법에서 비우월해가 구해지지 않았기 때문에 $|Sj|$는 0이다. 그러므로 $R_{NDS}(S_j)$ 측면에서 GA과 PHGA접근법의 비우월해 비율이 50%씩이며, HGA접근법에서 비우월해가 발생되지 않았기 때문에 비율이 0%으로 나타났다. DI_R (S_j) 측면에서도 마찬가지로 GA과 PHGA접근법의 참조해가 모두 비우월해이기 때문에 0으로 나타났다. 하지만 HGA접근법인 경우 $DI_R(S_j)$ 값은 413으로 나타났다.

Problem 3에서 모든 접근법들로부터 구해진 참조해 중에서 총 7 개의 비우월해가 구해졌다. 이 중에서 GA과 HGA접근법의 비우월해 수 $|Sj|$ 값은 각각 1로 나타났다. 반면에 PHGA접근법에서는 비우월해가 가장 많이 구해져 $|Sj|$ 값이 5이다. 얻어진 비우월해의 수에 따라 $R_{NDS}(S_j)$ 값은 PHGA접근법이 72%, GA와 HGA접근법은 각각 14%, 14%로 나타났다. GA접근법에 대한 $DI_R(S_j)$ 값은 13,161이고 HGA접근법에 대한 $DI_R(S_j)$ 값이 가장 높은 79,390이다. PHGA접근법인 경우 발생된 모든 해가 비우월해이기 때문에 $DI_R(S_j)$ 값은 0으로 나타났다. Scale 2에 대한 각 접근법들 비교 결과 본 연구에서 제안한 PHGA접근법은 Problem 1, Problem 2, Problem 3에 대한 모든 측면에서 가장 우수한 해를 보이고 있다. 하지만 실행속도를 나타내는 CPU time(s) 측면에서 단일 방법인 GA접근법은 가장 빠른 59.2초 이며, 혼합형 유전알고리즘 방법인 HGA접근법은 59.9초, PHGA접근법은 가장 느린 61.3초로 실행되었다.

그림 5-13, 5-14, 5-15는 Scale 2에서 Problem 1, 2, 3에 대해 GA, HGA, PHGA접근법의 수행도 결과를 나타내고 있다.

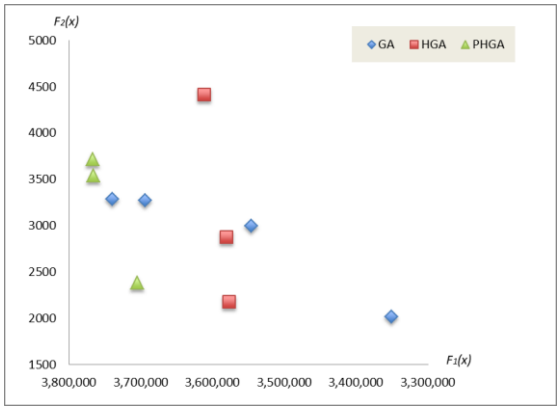

그림 5-13. Problem 1에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Scale 2)

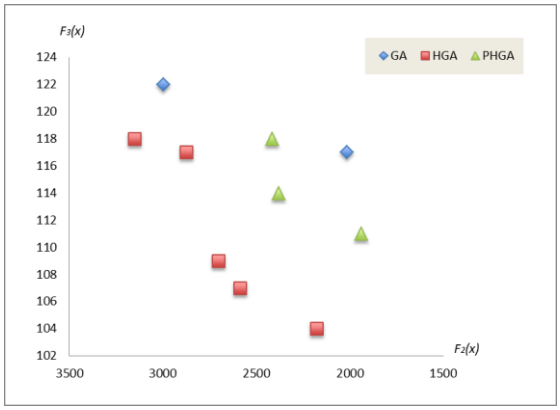

그림 5-14. Problem 2에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Scale 2)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

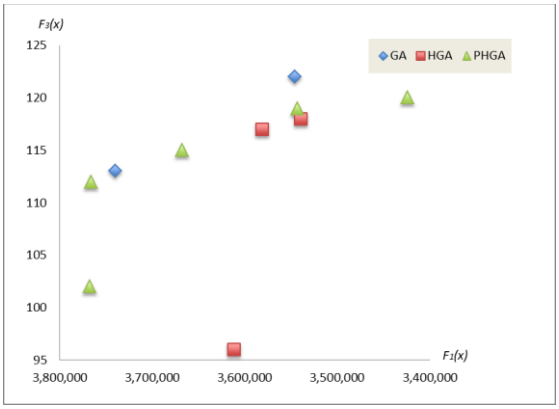

그림 5-15. Problem 3에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Scale 2)

그림 5-13에서 Scale 2에 대한 GA, HGA, PHGA접근법의 Problem 1 실행 결과를 보여주고 있다. 각 방법의 실행 결과 GA접근법은 4개, HGA접근법은 3개, PHGA접근법은 3개의 Pos를 수렴하고 있다. 이 중에서 $F_1(x)$과 $F_2(x)$가 가장 우수한 값은 제일 안 쪽에 위치하며, GA접근법에서 3개의 비우월해, HGA접근법에서 1개 비우월해, PHGA접근법에서 3개의 비우월해가 발생되었다는 것을 알 수 있다. 그림 5-14에서 Problem 2 실행 결과 GA접근법은 2개, HGA접근법은 5개, PHGA접근법은 3개의 Pos를 수렴하고 있으며, 이 중에서 $F_2(x)$과 $F_3(x)$가 가장 높은 값은 그래프 바깥쪽에 위치하므로서 GA접근법에서 2개, HGA접근법에서 0개, PHGA접근법에서 2개가 비우월해로 선택되었다. 그림 5-15에서 Problem 3 실행 결과를 보여주고 있다. 각 방법의 실행 결과 GA접근법은 2개, HGA접근법은 3개, PHGA접근법은 5개의 Pos를 수렴하고 있으며 이 중에서 $F_1(x)$과 $F_3(x)$가 가장 우수한 값은 제일 안쪽에 위치하며 GA와 HGA접근법에서 각 각 1개의 비우월해, PHGA접근법에서 5 개의 비우월해가 발생되었다는 것을 알 수 있다.

표 5-20에서는 Scale 3을 이용한 GA, HGA, PHGA 접근법을 비교 분석한 결과를 제시했다.

표 5-20. GA, HGA, PHGA의 비교 분석 결과 (Scale 3)

	Problem 1			Problem 2			Problem 3		
	GA	HGA	PHGA	GA	HGA	PHGA	GA	HGA	PHGA
$\|S_j\|$	2	1	6	1	1	3	1	2	2
$R_{NDS}(S_j)$	0.22	0.11	0.66	0.2	0.2	0.60	0.2	0.4	0.4
$DI_R(S_j)$	46,612	26,225	6,873	271	328	164	16,381	41,312	18,953
CPU time(s)	60.5	60.9	61.7	60.5	60.9	61.7	60.5	60.9	61.7

표 5-20의 Scale 3에 대한 Problem 1 결과 총 9 개의 비우월해가 얻어져 이중에서 GA접근법의 $|Sj|$ 값은 2, HGA접근법의 $|Sj|$ 값은 1, PHGA접근법으로부터 얻어진 $|Sj|$ 값은 6으로 나타났다. $R_{NDS}(S_j)$의

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

GA접근법은 22%, HGA접근법은 11%, PHGA접근법은 67%이다. DI_R (S_j) 값은 각 방법에서 GA접근법인 경우 가장 높은 값인 46,612이며, HGA접근법의 DI_R (S_j) 값은 26,225로 나타났다. 본 연구에서 제안한 PHGA접근법의 경우 제일 낮은 $DI_R(S_j)$ 값은 6,873으로 나타났다.

Problem 2에 대한 결과 $|Sj|$ 측면에서 GA과 HGA 접근법의 비우월해의 수 $|Sj|$는 동일하게 나타나고, PHGA접근법는 가장 많은 비우월해를 나타내 $|Sj|$ 값은 3이다. 그러므로 $R_{NDS}(S_j)$ 측면에서 GA과 HGA접근법의 비우월해 비율이 각각 20%씩이며, PHGA접근법을 통해 구해진 비우월해 비율 $R_{NDS}(S_j)$은 60%이다. DI_R (S_j) 측면에서는 HGA접근법이 가장 높은 거리 값인 328, 그 다음 GA접근법은 271 그리고 PHGA접근법의 $DI_R(S_j)$ 값은 164로 제일 낮은 것을 알 수 있다.

Problem 3에서 각 접근법들로부터 구해진 모든 참조해 중에 총 5 개의 비우월해가 얻어졌으며, GA접근법의 $|Sj|$ 값은 1, HGA과 PHGA접근법의 $|Sj|$ 값은 각각 2로 나타났다. 얻어진 비우월해의 수에 따라 GA접근법의 $R_{NDS}(S_j)$ 값은 20%이고 HGA과 PHGA접근법의 $R_{NDS}(S_j)$는 각각 40%이다. GA접근법에 대한 DI_R (S_j) 값은 16,381이고 HGA접근법에 대한 DI_R (S_j) 값이 41,312이며 가장 높게 나타났다. PHGA접근법인 경우 $DI_R(S_j)$ 값은 18,953으로 나타났다.

Scale 3에 대한 각 접근법들의 비교 결과 본 연구에서 제안한 PHGA접근법은 Pos을 평가하기 위해 사용된 $|Sj|$과 $R_{NDS}(S_j)$ 측면에서 우수한 결과를 보이고 DI_R (S_j) 측면에서는 Problem 1, Problem 2에서 우수한 결과를 나타났으며, Problem 3에서 GA접근법이 가장 우수한 결과를 보이고 있다. Scale 3에 대한 GA, HGA, PHGA접근법의 실행속도를 비교한 결과 CPU time(s) 측면에서 단일 방법인 GA접근법이 가장 빠른 60.5초이며, 혼합형 유전알고리즘 방법인 HGA접근법는 60.9초, PHGA접근법은 가장 느린 61.7초로 실행되었다.

그림 5-16, 5-17, 5-18은 Scale 3을 고려한 GA, HGA, PHGA 접근법의 수행도 결과를 표현했다.

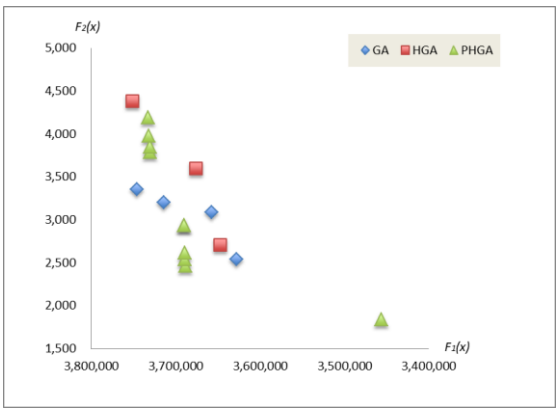

그림 5-16. Problem1에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Sale 3)

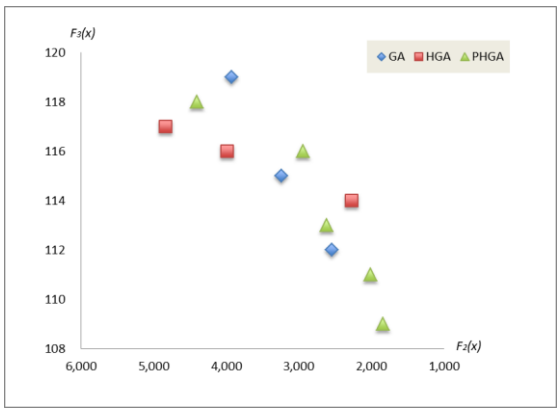

그림 5-17. Problem2에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Scale 3)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

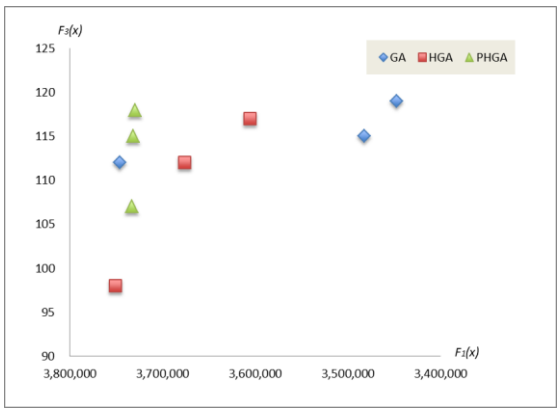

그림 5-18. Problem1에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Scale 3)

그림 5-16에서 Scale 3에 대한 GA, HGA, PHGA접근법의 Problem 1 실행 결과를 보여주고 있다. 각 방법의 실행 결과 GA접근법은 4개, HGA접근법은 3개, PHGA접근법은 10개의 Pos를 수렴하고 있다. 이 중에서 $F_1(x)$과 $F_2(x)$가 가장 우수한 값은 제일 안 쪽에 위치하며 GA접근법에서 2개의 비우월해, HGA접근법에서 1개 비우월해, PHGA접근법에서 6개의 비우월해가 발생되었다는 것을 알 수 있다. 그림 5-17에서 Problem2 실행 결과 GA접근법은 3개, HGA접근법은 3개, PHGA접근법은 5개의 Pos를 수렴하고 있으며 이 중에서 $F_2(x)$ 과 $F_3(x)$ 가 가장 높은 값은 그래프 바깥쪽에 위치하므로서 GA접근법에서 0개, HGA접근법에서 1개, PHGA접근법에서 3개가 비우월해로 선택되었다. 그림 5-18에서 Problem 3 실행 결과를 보여주고 있다. 각 접근법의 실행 결과 GA접근법은 3개, HGA접근법은 3개, PHGA접근법은 3개의 Pos를 수렴하고 있으며 이 중에서 $F_1(x)$과 $F_3(x)$가 가장 우수한 값은 제일 안 쪽에 위치하며 GA 접근법이 1개의 비우월해, HGA와 PHGA접근법에서는 각각 2 개의 비우월해가 발생되었다는 것을 알 수 있다.

표 5-21에서 Scale 4를 고려하여 GA, HGA, PHGA 접근법을 비교 분석한 결과를 제시했다.

표 5-21. GA, HGA, PHGA의 비교 분석 결과 (Scale 4)

	Problem 1			Problem 2			Problem 3		
	GA	HGA	PHGA	GA	HGA	PHGA	GA	HGA	PHGA
$\lvert S_j \rvert$	0	1	7	0	1	2	0	2	5
$R_{NDS}(S_j)$	0.0	0.16	0.84	0.0	0.33	0.67	0.0	0.28	0.72
$DI_R(S_j)$	23,659	0	8.625	453	379	221	46,156	98,144	0
CPU time(s)	61.6	61.9	62.4	61.6	61.9	62.4	61.6	61.9	62.4

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 5-21의 Scale 4에 대한 Problem 1 결과 총 8개의 비우월해가 얻어졌다. 이중에서 PHGA접근법은 가장 많은 비우월해를 구하여 $|Sj|$ 값은 7이고 HGA접근법의 $|Sj|$ 값은 1, GA접근법에서 구해진 참조해중에 비우월해에 해당되는 값이 없기 때문에 $|Sj|$ 값은 0으로 나타났다. 이에 따라 비우월해 비율을 나타나는 $R_{NDS}(S_j)$ 값의 GA접근법은 0%, HGA접근법은 16%, PHGA접근법은 84%로 나타났다. DI_R (S_j) 값은 각 접근법에서 GA접근법인 경우 23,659로 가장 높은 DI_R (S_j) 값을 보였으며, PHGA접근법의 DI_R (S_j) 값은 8.625로 나타났다. HGA접근법에서 총 1개의 참조해 즉 비우월해가 구해졌기 때문에 $DI_R(S_j)$ 값은 0이다.

Problem 2에 대한 다목적 최적해 결과 모든 방법을 통해 구해진 비우월해에서 PHGA접근법을 통해 가장 많은 비우월해를 구해 $|Sj|$ 값은 2, HGA접근법의 $|Sj|$ 값은 1로 나타났다. GA접근법을 통해 비우월해를 구하지 못했기 때문에 $|Sj|$ 값은 0이다. $R_{NDS}(S_j)$ 측면에서도 마찬가지로 GA접근법은 0%, HGA접근법은 33%, PHGA접근법은 67%로 나타났으며 DI_R (S_j) 측면에서 GA접근법은 453, HGA접근법은 379, PHGA접근법은 DI_R (S_j) 측면에서 가장 낮은 값 221으로 나타났다.

Problem 3에서도 마찬가지로 PHGA접근법이 가장 많은 비우월해가 발생하여 $|Sj|$ 값은 5, HGA접근법의 $|Sj|$ 값은 1이다. 그러나 GA접근법에서 비우월해를 못 구했기 때문에 $|Sj|$ 값은 0이다. $R_{NDS}(S_j)$ 측면에서 GA접근법은 0%, HGA접근법은 28%, PHGA접근법은 72%로 나타났으며. DI_R (S_j) 측면에서 PHGA접근법의 모든 해가 비우월해이기 때문에 DI_R (S_j) 값은 0이고 HGA접근법의 DI_R (S_j) 가장 높게 나타났다. Scale 4에 대한 GA, HGA, PHGA접근법의 실행속도를 비교한 결과 CPU time(s) 측면에서 단일 방법인 GA접근법가 가장 빠른 61.6초이며, 혼합형 유전알고리즘 방법인 HGA접근법은 61.9초, PHGA접근법은 가장 느린 62.4초로 실행되었다.

그림 5-19, 5-20, 5-21에서는 Scale 4를 고려한 Problem 1, 2, 3에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과를 나타내었다.

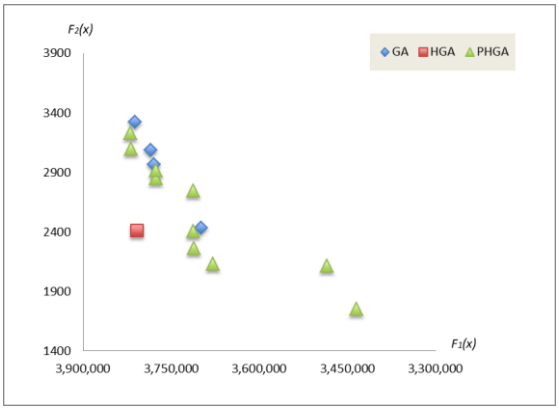

그림 5-19. Problem1에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Scale 4)

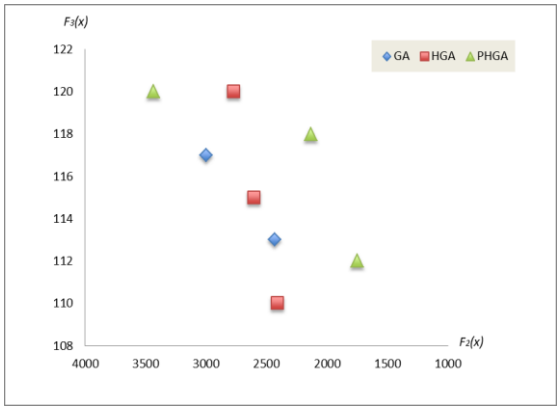

그림 5-20. Problem2에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Scale 4)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

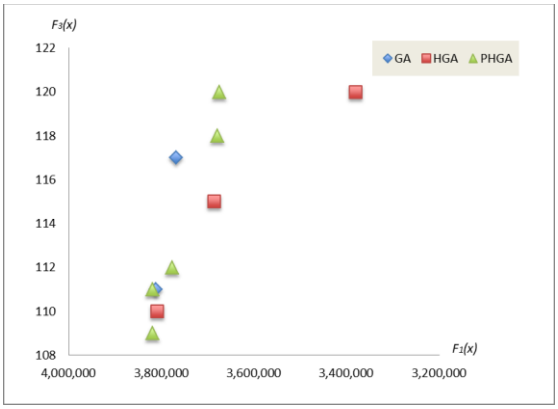

그림 5-21. Problem3에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Scale 4)

그림 5-19에서 Scale 4에 대한 GA, HGA, PHGA접근법의 Problem 1 실행 결과를 보여주고 있다. 각 방법의 실행 결과 GA접근법은 4개, HGA접근법은 1개, PHGA접근법은 10개의 Pos를 수렴하고 있다. 이 중에서 $F_1(x)$과 $F_2(x)$가 가장 우수한 값은 제일 안 쪽에 위치하고 있다. 그림에서 나타난 것과 같이 GA접근법에서 비우월해가 발생되지 않았다, HGA접근법에서 1개 비우월해, PHGA접근법에서 7개의 비우월해가 발생되었다. 그림 5-20에서 Problem 2 실행 결과 GA접근법은 2개, HGA접근법은 3개, PHGA접근법은 3개의 Pos를 수렴하고 있으며 이 중에서 $F_2(x)$과 $F_3(x)$가 가장 높은 값은 그래프 바깥 쪽에 위치한다. 비우월해는 GA접근법에서 0개, HGA접근법에서 1개, PHGA접근법에서 2개가 선택되었다. 그림 5-21은 Problem 3 실행 결과를 보여주고 있다. 각 접근법의 실행 결과 GA접근법은 2개, HGA접근법은 3개, PHGA접근법은 5개의 Pos를 수렴하고 있으며 이 중에서 $F_1(x)$과 $F_3(x)$가 가장 우수한 값은 제일 안 쪽에 위치한다. 즉 GA접근법 결과에서 비우월해가 발생되지 않았다, HGA와 PHGA접근법에서는 각각 2, 5 개의 비우월해가 발생되었다는 것을 알 수 있다.

마지막으로 표 5-22에서는 Scale 5를 고려해 GA, HGA, PHGA 접근법을 비교 분석한 결과를 제시했다.

표 5-22. GA, HGA, PHGA의 비교 분석 결과 (Scale 5)

	Problem 1			Problem 2			Problem 3		
	GA	HGA	PHGA	GA	HGA	PHGA	GA	HGA	PHGA
$\lvert S_j \rvert$	1	3	10	1	0	3	0	1	8
$R_{NDS}(S_j)$	1/14	3/14	10/14	1/4	0/4	3/4	0/9	1/9	8/9
$DI_R(S_j)$	23,275	16,491	2,268	0	706	86	63,155	30,079	0
CPU time(s)	62.1	62.4	63.8	62.1	62.4	63.8	62.1	62.4	63.8

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 5-22의 Problem 1에 대한 결과, 각 접근법들을 통해 14개의 비우월해가 얻어졌다. 이중에서 PHGA접근법을 통해 가장 많은 비우월해가 구했으며, PHGA접근법의 $|Sj|$ 값은 10, HGA접근법의 $|Sj|$ 값은 3, GA접근법의 $|Sj|$ 값은 1으로 나타났다. 이에 따라 $R_{NDS}(S_j)$ 측면에서도 마찬가지로 GA접근법은 7%, HGA접근법은 21%, PHGA접근법은 72%로 각각 나타났다. PHGA접근법에서 구해진 참조해와 비우월해 거리를 나타나는 DI_R (S_j) 값은 2,268이며 가장 우수한 값을 보이고 있다. HGA접근법의 DI_R (S_j) 값은 PHGA접근법 보다 조금 높은 16,491로 나타났다. 그리고 GA접근법에서는 가장 높은 $DI_R(S_j)$ 값을 보이고 있다.

Problem 2에 대한 결과 각 방법들을 통해 4개의 비우월해가 얻어졌다. 이중에서 PHGA접근법의 $|Sj|$ 값은 3, HGA접근법의 $|Sj|$ 값은 0, GA접근법의 $|Sj|$ 값은 1으로 각각 나타났다. 이에 따라 GA접근법의 비우월해 비율을 나타낸 $R_{NDS}(S_j)$ 값은 0.25%, HGA접근법은 0%, PHGA접근법은 75%로 나타났다. PHGA접근법에서 구해진 참조해와 비우월해 거리를 나타나는 DI_R (S_j) 값은 86이며 HGA접근법의 DIR 값은 PHGA 보다 높은 706로 나타났다. GA에서 총 하나의 참조해가 구해져 이는 비우월해기 때문에 거리 값을 나타내는 DI_R (S_j) 값은 0이다. Problem 3에 대한 결과 총 9개 비우월해 중에 PHGA의 $|Sj|$ 값은 8, HGA의 $|Sj|$ 값은 1, GA의 $|Sj|$ 값은 0으로 각각 나타났다. 이에 따라 각 방법들의 $R_{NDS}(S_j)$ 값은 GA의 경우 0%, HGA은 11%, PHGA은 89%로 각각 나타났다. 그리고 DI_R (S_j) 측면에서 PHGA접근법에서 구해진 해들이 모두 비우월해이다 그렇기 때문에 DI_R (S_j) 값은 0으로 나타나고 HGA접근법은 30,079, GA접근법은 DI_R (S_j) 에서 가장 높은 63,155로 나타났다. Scale 5에 대한 각 방법들의 실행속도를 비교한 결과 CPU time(s) 측면에서 단일 방법인 GA접근법이 가장 빠르게 62.1초이며, 혼합형 유전알고리즘 방법인 HGA접근법는 62.4초, PHGA접근법은 가장 느리게 63.8초로 실행되어 CPU time(s) 측면에서 GA접근법이 가장 우수한 해를 보이고 있다.

그림 5-22, 5-23, 5-24은 Scale 3을 고려한 Problem 1, 2, 3에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과를 나타내고 있다.

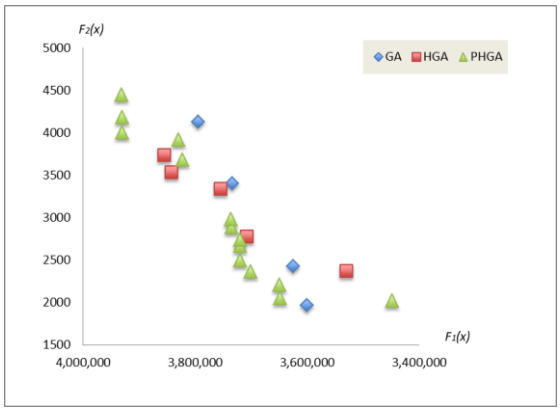

그림 5-22. Problem 1에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Scale 5)

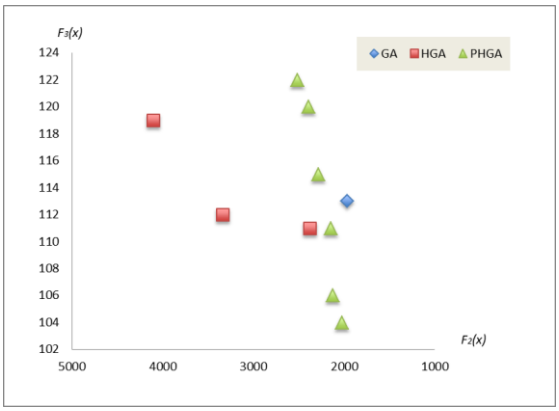

그림 5-23. Problem 2에 대한 GA, HGA, PHGA의 수행도 결과 (Scale5)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

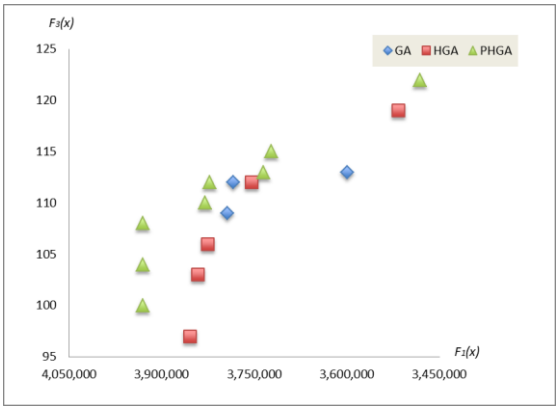

그림 5-24. Problem 3에 대한 GA, HGA,
PHGA의 수행도 결과 (Scale 5)

그림 5-22에서 Scale 5에 대한 GA, HGA, PHGA접근법의 Problem 1 실행 결과를 보여주고 있다. 각 접근법의 실행 결과 GA접근법은 4개, HGA접근법은 5개, PHGA접근법은 14개의 Pos를 수렴하였다. 이 중에서 $F_1(x)$과 $F_2(x)$가 가장 우수한 값은 제일 안 쪽에 위치하기 때문에 GA접근법에서 1개의 비우월해가 발생되었으며, HGA접근법에서는 3개, PHGA접근법에서 14개의 비우월해가 발생되었다. 그림 5-23에서 Problem 2 실행 결과 GA접근법은 1개, HGA접근법은 3개, PHGA접근법은 6개의 Pos를 수렴하고 있으며 이 중에서 $F_2(x)$과 $F_3(x)$가 가장 높은 값은 그래프 바깥쪽에 위치한다. 그래서 비우월해는 GA접근법에서 1개, HGA접근법에서 0개, PHGA접근법에서 3개가 발생되었다. 그림 5-24에서 Problem 3 실행 결과를 보여주고 있으며 각 접근법의 실행 결과 GA접근법은 3개, HGA접근법은 5개, PHGA접근법은 8개의 Pos를 수렴하고 있으며 이 중에서 $F_1(x)$과 $F_3(x)$가 가장 우수한 값은 제일 안 쪽에 위치한다. 그래서 GA접근법 결과에서 비우월해가 발생되지 않았다, HGA와 PHGA접근법에서는 각각 1, 8 개의 비우월해가 발생되었다는 것을 알 수 있다.

위에서 분석된 결과를 종합하면 다음과 같다. 본 연구에서 고려한 SCLSC-N 모델에 대한 다섯 가지 Scale을 통해 GA, HGA, PHGA 접근법을 비교 분석한 결과 SCLSC-N 모델을 다목적 최적화하기 위해 사용된 Pos를 평가 척도인 비우월해의 개수와 그 비율을 나타내는 $|Sj|$와 $R_{NDS}(S_j)$ 측면에서 본 연구에서 제안한 PHGA접근법이 고려된 모든 Scale에서 가장 우수한 해를 나타내고 있다. 그리고 각 접근법들로부터 구해진 참조해와 비우월해간 평균 거리를 나타나는 DI_R (S_j) 값은 대부분의 경우 PHGA접근법이 가장 우수한 해를 보이고 있지만, HGA접근법에서도 좋은 해를 보이는 경우가 있다. 기존 연구 Gen et al. (2009)에서 제안한 GA접근법은 단일접근 방법이기 때문에 본 연구에서 제안한 SCLSC-N 모델과 같은 다목적 최적화가 요구되는 복잡한 문제에 적합하지 않다는 것을 알 수 있다. 또한 기존연구 Kanagaraj et al. (2013)에서 제안한 HGA접근법은 다목적 최적화가 요구되는 SCLSC-N 모델을 최적화하고 있긴 하지만 제안한 PHGA접근법은 HGA의 문제점을 파악하고 SCLSC-N 모델에 적합하게 개선했기 때문에 비교 분석한 결과 각 Scale에서

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

우수한 해를 보여준 것으로 분석된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 6 장 결론

빠르게 변화되고 있는 시장 환경에서 기업들이 생존하고 경쟁우위를 확보하기 위해서는 지속 가능한 SCLSC 모델의 설계가 필요하다. SCLSC의 설계에 있어 기존의 많은 연구들처럼 단순히 경제적 요인만을 고려해 이를 최적화하는 것이 아니라 환경적, 사회적 요인을 함께 고려하여 최적화 하는 것이 지속 가능한 SCLSC 모델 설계를 위해 더 타당성 있는 대안이 될 수 있다.

본 연구에서는 기존의 연구에서 제시한 SCLSC 모델의 문제점을 개선한 SCLSC 모델을 설계하였으며, 특히 실질적인 모바일폰의 생산, 유통 및 사후 처리에 대한 사례연구를 함께 제시하여 그 현장적용능력을 높이고자 하였다. 모바일폰의 경우 최근 들어 신제품 출시 시기가 점점 더 짧아지고 있으며, 고성능, 고사양을 요구하는 사용자의 더 높아진 구매 욕구로 인해 막대한 양의 폐기 모바일폰이 발생되고 있는 상황이다. 그러나 아직까지 폐기 모바일폰의 수거 및 재활용은 체계적으로 이루어지지 않고 있다. 특히 국내 폐기 모바일폰의 수거 방법 대부분이 이동통신 사업자로부터 이루어지고 있기 때문에, 폐기 모바일폰의 수거 이후의 재활용 혹은 재사용이 제대로 이루어지지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 모바일폰을 위한 효율적인 SCLSC-N 모델을 설계하는 것이다. 이를 위해 기존연구와 현재 국내 모바일폰 CLSC 현황을 통해 SCLSC-O 모델을 도출하고, 이를 개선하여 SCLSC-N 모델을 설계하였다.

SCLSC-N 모델에서는 경제적, 환경적, 사회적 요인들을 함께 고려하며, 이를 다목적 최적화 문제로 해결하였다. SCLSC-N 모델의 우수성을 입증하기 위해 다음과 같은 세 가지 측면에서 수행도 비교를 실시하였다.

첫째, SCLSC-O 모델과 SCLSC-N 모델을 다목적 최적화 측면에서 비교, 분석하였다. 분석 결과 SCLSC-N 모델이 Problem 1, Problem 3에서 SCLSC-O 모델 보다 우수한 결과를 나타냈으며, Problem 2에서는 SCLSC-O 모델이 효율적으로 나타났지만 SCLSC-N 모델에서 고려된 모바일폰 수거 및 회복과정은 RM에서 부품의 재활용 단계까지 이어지기 때문에 부품에 새로운 원자재를 사용하지 않아 자원순환 측면에서 효율적이라고 할 수 있다. 그러므로 전체적으로 다목적 최적화 측면에서 보았을 때 SCLSC-N 모델이 다소 우수하다는 것을 입증하였다.

둘째, 민감도 분석에서 Case 1 - 7을 통해 SCLSC-N 모델의 수거 비율이 높을수록 경제적 요인인 총이익을 나타내는 $F_1(x)$ 과 환경적 요인인 CO2 배출량을 나타내는 $F_2(x)$ 이 증가하고 사회적 요인을 나타나는 $F_3(x)$는 감소하였다. 또한 모바일폰 재사용 비율이 높을수록 $F_1(x)$ 증가하였지만 $F_2(x)$ 또한 증가하고 있어 환경적으로는 효율적이지 않는 것으로 나타났다. 결국, 모바일폰 재사용 비율과 재활용 비율은 $F_3(x)$에 영향을 주지 않고 있다는 것을 확인하였다.

셋째, SCLSC-N 모델의 수송 채널 측면에서 NDL 만 고려한 SCLSC-N1 모델과 NDL과 DSP를 함께 고려한 SCLSC-N2 모델을 비교 분석한 결과, SCLSC-N2 모델이 SCLSC-N1 모델 보다 더 우수한 결과를 나타내어 단일 수송채널 만을 이용하는 방법 보다는 이중 수송채널을 고려하는

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

것이 더 효율적이라는 것을 확인 할 수 있었다.

SCLSC-N 모델의 설계와 이행을 위해 먼저 수리 모형을 제시하고 이를 해결하기 위해 GA와 CS를 혼합한 PHGA 접근법을 제안하였다. 제안된 PHGA 접근법의 수행도 검증과 그 우수성을 입증하기 위해 기존 연구에서 제안한 GA과 HGA 접근법과의 비교 분석을 실시하였다. 비교 결과, 다목적 최적화를 위한 사용된 다양한 척도들에서 PHGA 접근법이 GA과 HGA 접근법 보다 더 우수한 것을 확인하였지만, 실행시간 측면에서는 GA 접근법이 가장 빠른 수행속도를 보였으며, 혼합 접근법인 HGA와 PHGA 중에서는 기존 HGA 접근법이 PHGA 접근법 보다 더 빠른 수행속도를 보였다.

이상과 같은 비교 분석을 통해 본 연구에서 제안한 SCLSC-N 모델이 국내 폐기 모바일폰의 수거량을 높여 재사용 및 재활용을 증가 시킬 수 있는 효율적인 공급망 관리에 기여 할 수 있을 것이라고 판단된다. 다만 본 연구에서는 다음과 같은 한계 점이 존재한다.

첫째. 본 연구에서 고려된 경제적인 요인과 환경적인 요인에 관련된 각종 비용에 대한 데이터가 있었지만 모바일폰 공급 단위는 킬로그램 또는 톤으로 되어 있기 때문에 SCLSC 모델에 적용하기 어려운 측면이 있었다. 또한 사회적인 요인으로 고려된 일자리 기회, 실업 일수, 손실 일수 등에 대한 데이터는 기업의 내부적인 데이터이기 때문에 현실적으로 정확한 데이터를 구할 수 없어 수치 실험에서는 일정 범위에서 랜덤하게 발생한 데이터를 사용하였다. 그러므로 향후 연구에서는 모바일폰을 위한 SCLSC에서 발생되는 각종 수송비용, 처리비용, 고정비용 또는 모바일폰 공급량, 고객으로부터 사용된 모바일폰의 수거량, 회복량, 재사용량, 재활용량 등과 같은 실질적인 데이터 수집이 필요하다.

둘째, 본 연구에서 제안한 PHGA접근법이 자손집단의 모든 개체에 Levy flight를 적용하기 때문에 각 반복에서 자손집단 수만큼 해의 개선이 시도된다는 장점이 있지만 반면에 모든 개체에 Levy flight를 적용하기 때문에 기존의 HGA접근법에 비해 실행속도 측면에서 좋은 결과를 제시하지 못 하였다. 따라서 PHGA접근법을 실행속도 측면에서 개선하거나 GA접근법를 다른 메타휴리스틱 접근법인 PSO, TS 등과 혼합하여 새로운 PHGA접근법을 제안해 볼 수도 있을 것이다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참고 문헌

김갑환, 조정복, 고창성, 김종율 (2008), 네트워크모델과 다목적 GA.

김기법, 정봉주, (2007), 폐기휴대폰의 환경친화적 역공급망 네트워크 설계 및 전략 수립 모델. 대한산업공학회 춘계공동학술대회 논문집, 254-261.

김여근, 외 (2017), 메타휴리스틱스

김회석, 윤현명, 장용철, 김민철, 이원영, 송효택, (2007), 국내 폐휴대폰의 발생량 예측 및 수거 관리체계, *Environmental Social Joint Conference*, 78-81.

박상옥, (2006), 한국 제조 기업 공급사슬관리의 발전, *Journal of Business Economics*, 40(1): 125-155.

만정웅, (2014), 미친 SCM이 성공한다: 예측불허의 시대, 글로벌 기업들의 생존 전략기.

이수열, 이준겸, (2015), 글로벌 공급망 지속가능 공급사슬 관리와 성과: 베트남 수출중심 공급 사슬를 대상으로 한 실증 연구, 대한경영학회지, 28(2): 453-468.

윤영수, 추룬수크아누다리, 진성, (2016) 폐쇄루프 공급망 모델을 이용한 혼합형 유전알고리즘 접근법, 한국 산업 정보 학회논문지, 21(4): 31-41.

정일한, (2017), 뻐꾸기 탐색 방법을 활용한 다계층 시스템의 중복 할당 최적화, 한국산학기술학회 논문지 18(4): 334-340.

한용호, (2013), 다중 집단 기반의 협력적 공진화 알고리즘을 사용한 폐쇄루프 공급사슬 네트워크의 설계, *Journal of Korean Society of Supply Chain Management*, 13(1): 55-66.

황숙희, (2011), 탐색영역과 집중탐색의 효율적 활용을 적용한 메타 휴리스틱 알고리즘, 건국대학교 컴퓨터정보통신공학과 박사학위 논문.

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.

Ahmadi, S. and Amin, S. H., (2019), An integrated chance-constrained stocastic model for a mobile phone closed-loop supply chain with supplier selection, *Journal of Cleaner Production* 226*:* 988-1003.

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

Bentley, P. L., and Wakefield, J. P., (1998), Finding acceptable solution s in the pareto-optimal range using multiobjective genetic algorithms, *Soft Computing in Engineering Design and Manufacturing Springer*, 231-240.

Burnawal, V. K., Mikkilineni, V., Tyagi, A. K., and Kapoor, S., (2012), Heterosis: emerging ideas about hybrid vigour, *Journal of Experimental Botany*, 63(18):6309-6314.

Chaabane, A., Ramudhin, A., and Paquet, M., (2012), Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme, *International Journal of Production Economics*, 135:37-49.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Chen, Y. T., Chan, F. T. S., and Chung, S. H., (2015), An integrated closed-loop supply chain model with location and allocation problem and product recycling decisions, *International Journal of Production Research*, 53(10):3120-3140.

Chen. X., Yun, Y. S., and Anudari, C., (2018), Optimization of closed-loop supply chain model sing hybrid genetic algorithm approach for tire industry in Korea, *The 12th International Conference on Management Science and Engineering Management (ICMSEM2018)*, 1593-1612.

Cheng, R. W., Gen, M. and Tsujimura, Y., (1996), A tutorial survey of job-shop scheduling problems using genetic algorithm – I. representation, *Computer & Industrial Engineering*, 30(4):983-997.

Cheong, H. H., Kim, S. G., and Heo, S. H., (2009), A Sustainability study based on farm management value-chain structure, *Korean Journal of Agricultural Extension*, 16(2):363-384.

Chiang, W. K., Chajed, D., and Hess, J. D., (2003), Direct marketing, indirect profits: a strategic analysis of dual channel supply chain, *Management Science*, 49(1): 1-20.

Christopher, M. L., (1992), *Logistics and supply chain management*, London: Pitman Publishing.

Chung, I. H., (2017), Redundancy allocation in a multi-level series system by cuckoo search, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 18(4): 334-340.

Das, I. and Dennis, J. E., (1998), Normal-boundary intersection: a new method for generating Pareto optimal points in multicriteria optimization problems, *SIAM Journal on Optimization*, 8(3):631-657,

Dehghanian, F., and Mansour, S., (2009), Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm, *Resources, Conservation and Recycling*, 53: 559-570.

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, *Europian Journal of Operation Research*, 235: 594-615.

Deb, K., Pratap, A., Agrarwal, S., and Meyarivan, T. (2002), A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2):182-197.

Fathollahi-Fard, A. M., Keshteli, M. H., and Mirjalili, S., (2018), Hybrid optimizer to solve a tri-level programming model for a tire closed-loop supply chain network design problem, *Applied Soft Computing*, 70:701-722.

Fleischmann, M., K Rikke, H. R., Dekker, R. and Flapper, S. D. P., (2000), A characterization of logistics networks for product recovery, *Omega*, 28(6):653-666.

Fihimnia, B., Sarkis, J., Dehghanian, F., Banihashemi, N., and Rahman, S., (2013), The impact of carbon pricing on a closed-loop supply chain: an Australian case study, *Journal of Cleaner Production*, 59: 210-225.

Fonseca, C. M., and Fleming, P. L., (1993), Genetic algorithms for multi-objective optimization: formulation, discussion and generalization, *Proceedings of the 5th international Conference on Genetic Algorithms*, 416:423.

Fonseca, C. M., and Fleming, P. L., (1995), An overview of evolutionary algorithms in multi optimization, *Evolutionary Computation*, 3(1):1-16.

Gandomi, A. H., Yang, X. S., and Alavi, A. H., (2013), Cuckoo search algorithm: a metaheuristic approach to solve structural optimization problems, *Engineering with Computers*, 29(1): 17-35.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

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. and Lin, L., (2005), Multi objective hybrid genetic algorithm for bicriteria network design problems, *Complexity International* , 11:73-83.

Gen, M., Lin, L., and Zhang, H., (2009), Evolutionary techniques for optimization problems in integrated manufacturing system: state-of-the-art-survey, *Computers & Industrial Engineering*, 56(3): 779-808.

Gen, M., Cheng, R. and., Lin, L., (2008), *Network Models and Optimization: Multiobjective Genetic Algorithm Approach*, Springer

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 & Industrial Engineering*, 115:394-412.

Goldberg, D. E., (1989), *Genetic algorithms in search optimization and machine learning*, Addison-Wesley Publishing Company.

Holland, J. H., (1975), *Adaptation in natural and artificial systems*, University of Michigan Press.

Holland, C. P., (1995), *Adaptation in nature and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*, University of Michigan Press.

Han, J. Jung, H. and Baik, D. K., (2014), Ontology alignment by using discrete cuckoo search, *Software and Data Engineering*, 3(12):523-530.

Hua, G., Wang, SH., and Cheng, T. C. E., (2009), Price and lead time decisions in dual channel sapply chains, *Europian Journal of Operational Research*, 205: 113-126.

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), Reverce logistics network design: A case of mobile phones and digital cameras, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94:615-631.

Johnson, J. M. and Rahmat-Samii, V., (1997), Genetic algorithm in engineering electromagnetics, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 39(4):7-21.

Kannan, G., Sasikumar, P., and Devika, K., (2010), A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: A case of battery recycling, *Applied Mathematical Modelling* 34:655-670.

Kanagaraj, G., Phonnambalm, S. G., and Jawahar, N., (2013), A hybrid cuckoo search and genetic algorithm for reliability redundancy allocacion problems, *Computers & Industrial Engineering*, 66:1115-1124.

Krikke, H., Bloemhof-Ruwaard, J., and Van Wassenhove, L. N., (2003), Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators, *International Journal of Production Research*, 41(16):3689-3719.

Krokosky E. M., (1968), The ideal multifunctional constructural material, *Journal of the Structural Division*, 94(4): 959-982.

Kumar, V., and Minz, S., (2014), Multi-objective particle swarm optimization: an introduction, *Smart Computing*

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Review, 4(5): 335-353.

La Londe, B. J., and Master, J. M., (1994). Emerging logistics strategies: blueprint for the next centry, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 24(7): 35-37.

Lambert, D. M., Cooper, M. C., and Pagh, J. D., (1998), Supply chain management: implementation issues and research opportunities, *The International Journal of Logistics Management*, 9(2): 1-19.

Lee, D. H., Kin, B. R., Yang, J. K., and Oh, S. H., (2017), Dual response surface optimization using multi objective genetic algorithm, *Journal of the Korean Institute if Industrial Engineers*, 43(3): 164-175.

Li, X., and Gao, L., (2016), An effective hybrid genetic algorithm and tabu search for flexible job shop scheduling problem, *International Journal of Production Economics*, 174:93-110.

Liu, Z., Liu, S., Li, Y., and Meehan, P. A., (2014), Modeling and optimization of surface roughness in incremental sheet forming using a multi-objective function, *Materials and Manufacturing Processes*, 29(7): 808-818.

Marler, R.T., and Arora, J.S., (2009), The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41(6):853-862.

Mentze J. T., DeWitt, W., Keebler, J.S., and Min, S., (2001), Defining supply chain management, *Journal of Business Logistics*, 22(2): 1-25.

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.

Min, H., (1989), A bicriterion reverse distribution model for product recall, *Omega*, 17(5):483-490.

Michalewicz, Z., (1996), *Genetic algorithm + data structure = evolution programs, 3rd edition*, Spring-Verlag, New York.

Murata, T., Ishibushi, H., and Tanaka, H., (1996), Multi objective genetic algorithm and its application to flowshop scheduling, *Computers & Industrial Engineering*, 30(4):957-968.

Oliver, R. K., and Webber, M. D., (1982), *Supply chain management: logistics catches up with strategy, outlook*, Allen and Hamilton Inc., New York.

Osyczka, A., (1985), *Multicriteria optimization for engineering design, design optimization*, Academic Press.

Ö zceylan, E., Demirel, N., Ç etinkaya, C., and Demirel, E., (2017), A closed loop supply chain network design for automotive industry in Turkey, *Computers & Industrial Engineering*, http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2016.12.022.

Panda, S., and Dash, S., (2013), Trust and reputation in new ventures: insights from an Indian venture capital firm, *Development and Learning in Organizations*, 27(4): 9-11.

Paksoy. T., Bektaş. T., and Ö zceylan. E., (2011) Operational and environmental performance measures in a multi-product closed-loop supply chain, *Transportaion Research. Part E*, 47: 532-546.

Paksoy, T., (2012), Optimizing a supply chain network with emission trading factor, *Scientific Research and Essays*, 5(17):2535-3246.

Pearl, J., (1984), *Heuristics: intelligent search strategies for computer problem solving*, Wesley.

Pishvaee, M. S., Jolai, F., and Torabi, S. A., (2012), A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Applied Mathematical Modeling*, 35(2):637-649.

Pishvaee, M. S., Razmi, J., and Torabi, S. A., (2014), An accelerated benders decomposition algorithm for

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

sustainable supply chain network design under uncertainty: A case study of medical needle and syringe supple chain, *Transportation Research. Part E*, 67: 14-38.

Santibarez-Aguilar, J. E., Gonzalez Campos, B., Ponce- Ortega, J. M., Serna-Gonzalez, M., and EI-Halwagi, M., (2014), Optimal planning and site selection for distributed multiproduct biorefineries involving economic, environmental and social objectives, *Journal of Cleaner Production*, 65: 270-294.

Saffari, H., Makui, A., Mahmoodian, V., and Pishvaee, M. S., (2015), Multi-objective robust optimization model for social responsible closed-loop supply chain solved by non-dominated sorting genetic algorithm, *Journal of Industrial and Systems Engineering* 8(3):42-58.

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: 239-252.

Schaffer, J. D., (1985), Multi objective optimization with vector evaluated genetic algorithms, *Proceedings of 1st International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications*, 93-100.

Shin, K. S., Park, J. O., and Kim, Y. K., (2011), Multi-objective FMS process planning with various flexibilities using a symbiotic evolutionary algorithm, *Computer & Operations Research*, 38(3):700-712.

Shukla, P. K., (2007), On the normal boundary intersection method for generation of efficient front, *International Conference on Computational Science*, Part I: 310-317.

Soleimani, H., and Kannan, G., (2015), A hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for closed loop supply chain network design in large scale networks, *Applied Mathematical Modeling*, 19:3090-4012.

Steuer, R. E., (1986), *Multiple criteria optimization: theory, computation, and application*, John-Wiley & Sons, New York.

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.

Thavalingam, V., and Karunasena, G., (2016), Mobile phone waste management in developing countries: a case of Sri Lanka, *Recourses, Conservation and Recycling* 109: 34-43.

Wang, H. F., and Hsu, H. W., (2010), A closed-loop logistic model with a spanning tree based genetic algorithm, *Computers & Operations Research*, 37(2):376-389.

Wen, Y., Xu, H., and Yang, J., (2011), A heuristic- based hybrid genetic variable neighborhood search algorithm for task scheduling in heterogeneous multiprocessor system. *Information Sciences*, 181:567-581.

Xinyu, L., and Liang, G., (2016), An effective hybrid genetic algorithm and taby search for flexible job shop scheduling problem, *International Journal of Production Economics*, 174:93-110.

Xu, C., Zhang, W., and He, Q., (2016), The situation of waste mobile phone management in development countries and development status in China, *Waste Management* 58:341-347.

Yang X. S., and Deb, S., (2009), Cuckoo search via lévy flights, *World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing*, 210–214.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Yang X. S., and Deb, S., (2010), Engineering optimization by cuckoo search, *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimization*, 1(4): 330-343.

Yun, Y. S., (2013), Evaluating reverse logistics networks using genetic algorithm approach, *Journal of the Korean Society of supply Chain Management* 13(1):1-14.

Yun, Y. S., Chung, H. S., and Moon, C. U., (2013), Hybrid genetic algorithm approach for precedence-constrained sequencing problem, *Computer & Industrial Engineering*, 65: 137-147.

Yun, Y. S., Chen, X., and Anudari, C., (2018), Hybrid genetic algorithm for optimizing the closed-loop supply chain model with direct shipment and delivery, *New Physics: Sea Mulli*, 68(6): 683-692.

You, F., Tao, L., Graziano D. J., and Snyder, S.W., (2012), Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input-output analysis, *Journal of American Institute of Chemical Engineers*, 58(4):1157-1179.

Zhalechian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., and Mohammadi, M., (2016), Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty, *Transportation Research Part E*, 89: 182-214.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[부록]

부록 1. 단위당 수송 비용

	Parameters	Value
Transportation cost	tc_{rm}	U[0.1, 0.4]
	tc_{mp}	U[0.1, 0.4]
	tc_{pd}	U[0.1, 0.4]
	tc_{pu}	U[0.8, 1.2]
	tc_{pf}	U[0.8, 1.2]
	tc_{db}	U[0.1, 0.4]
	tc_{bt}	U[0.1, 0.4]
	tc_{tu}	U[0.1, 0.4]
	tc_{tf}	U[0.1, 0.4]
	tc_{tw}	U[0.1, 0.4]
	tc_{uw}	U[0.1, 0.4]
	tc_{fw}	U[0.1, 0.4]
	tc_{uc}	U[0.1, 0.4]
	tc_{ft}	U[0.1, 0.4]
	tc_{cv}	U[0.1, 0.4]
	tc_{vr}	U[0.1, 0.4]
	tc_{vs}	U[0.1, 0.4]

부록 2. 단위당 처리 비용

	Parameters	Value
Handling cost	h_r	1.5
	h_m	3.5
	h_p	5.0
	h_d	3.0
	h_r	2.5
	h_t	2.0
	h_w	U[5.0, 7.0]
	h_c	U[2.0, 2.5]
	h_v	U[3.0, 3.5]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

부록 3. 설비 고정 비용

	Parameters	Value
Fixed cost	$f_r, f_m, f_p, f_d, f_b, f_t, f_w,$	U[2000,2500]

부록 4. 설비간 거리

	Parameters	Value
Distance of each facility	d_{rm}	U[0.1, 4.0]
	d_{mp}	U[0.1, 4.0]
	d_{mp}	U[0.1, 4.0]
	d_{pd}	U[0.1, 4.0]
	d_{pu}	U[8.0, 12.0]
	d_{pf}	U[8.0, 12.0]
	d_{db}	U[0.1, 4.0]
	d_{bt}	U[0.1, 4.0]
	d_{tu}	U[0.1, 4.0]
	d_{tf}	U[0.1, 4.0]
	d_{uw}	U[0.1, 4.0]
	d_{fw}	U[0.1, 4.0]
	d_{uc}	U[0.1, 4.0]
	d_{ft}	U[0.1, 4.0]
	d_{cv}	U[0.1, 4.0]
	d_{vr}	U[0.1, 4.0]
	d_{vs}	U[0.1, 4.0]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

부록 5. 환경적인 요인

	Parameters	Value
Ebvironmental Factors	ϑ_1	U[0.1,3.0]
	ϑ_m	U[0.3, 0.6]
	ϑ_p	U[0.2, 0.6]
	ϑ_v	U[0.0, 1.0]
	VE_1	500
	VE_2	100
	VE_3	150
	VE_4	200

부록 6. 사회적인 요인

	Parameters	Value
Social Factors	j_{yp}	U[90, 100]
	l_{yp}	U[20, 30]
	e_{yp}	U[15, 20]
	j_{yv}	U[80, 90]
	l_{yv}	U[10, 15]
	e_{yv}	U[15, 18]
	w_j^p	1
	w_e^p	1
	w_l^p	1
	w_j^v	1
	w_e^v	1
	w_l^v	1

부록 7. 판매 가격

Selling price	SP_{pu}	971$
	SP_{pf}	874$
	SP_{tu}	971$
	SP_{tf}	971$
	SP_{vr}	390$ * U[0.5, 0.8]
	SP_{vs}	971$ * U[0.4, 0.6]