



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](#)

2016년 8월  
석사학위 논문

통합형 공급망 네트워크 모델 설계와  
유전알고리즘 접근법을 이용한 해법

조선대학교 대학원

경영학과

Chuluunsukh Anudar i

# 통합형 공급망 네트워크 모델 설계와 유전알고리즘 접근법을 이용한 해법

Design of Integration Supply Chain Network Model:  
Genetic Algorithm Approach

2016년 8월 25일

조선대학교 대학원

경영학과

Chuluunsukh Anudari

# 통합형 공급망 네트워크 모델 설계와 유전알고리즘 접근법을 이용한 해법

지도교수 윤 영 수

이 논문을 경영학석사학위 신청 논문으로 제출함




2016년 4 월

조선대학교 대학원

경영학과

Chuluunsukh Anudar i

Chuluunsukh Anudar i의  
석사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	교수	이 정근 
위 원	조선대학교	교수	최현도 
위 원	조선대학교	교수	을 영주 

2016년 5월

조선대학교 대학원

## 목 차

I. 서론.....	1
1. 연구 배경 및 필요성.....	1
2. 연구 목적 및 방법.....	6
II. 연구 모델 설계 .....	8
1. 기존 통합형 공급망 네트워크모델 분석.....	8
2. 제안된 통합형 공급망 네트워크 모델.....	14
3. 수리모형 설계.....	18
III. 해법.....	23
1. 등반 탐색법(Hill Climbing Method) .....	23
2. 시뮬레이트어닐링 (Simulated Annealing) .....	25
3. 유전알고리즘 (Genetic Algorithm) .....	27
IV. 수치 실험.....	33
V. 결론.....	47
<b>【참고문헌】</b> .....	49
<b>【부록】</b> .....	53

## ABSTRACT

### Design of Integration Supply Chain Network Model: Genetic Algorithm Approach

In general, supply chain (SC) considers two ways of its flow. First way is a forward logistics (FL) network and second way is called as a backward or reverse logistics (RL) network. In FL network, several components such as suppliers, manufactures, distribution centers, and retailers are considered for each stage of SC. In RL network, some components such as collection centers, recovery centers (remanufacturing centers or refurbishing centers), redistribution centers, waster disposal centers and secondary markets (= markets for used products) are taken into consideration for each stage of SC. Many studies for optimizing FL and RL networks have been performed. However, unfortunately, most of these studies mainly focused on each research direction of FL or RL networks separately. Therefore, the research considering both FL and RL networks is required since most of products is produced and distributed in FL network and the retuned (or used) products is collected, remanufactured, reused or disposed in RL network during their product life cycles.

In this paper, a integrated supply chain network (ISCN) model is designed. The ISCN model is consisted of suppliers, manufactures, distribution centers, and retailers in FL network and customers, collection centers, recovery centers, secondary markets and waste disposal centers in RL network. The ISCN model is formulated in a single-objective, non-linear mixed integer programming (SNMIP) model. The SNMIP model is implemented using a hill-climbing (HC), simulated annealing (SA), and

genetic algorithm (GA) approaches. As a benchmark, LINGO approach is used and its performance is compared with those of HC, SA, and GA.

Each approach is programmed on Matlab environment using various types of the ISCN model and compared their performances using various types of measure. The experimental result shows that the GA approach outperforms the HC and SA approaches.

For our future study, larger sized ISCN models will be employed and more recent approaches such as cuckoo search, particle swarm optimization and hybrid GA are used for various comparisons.

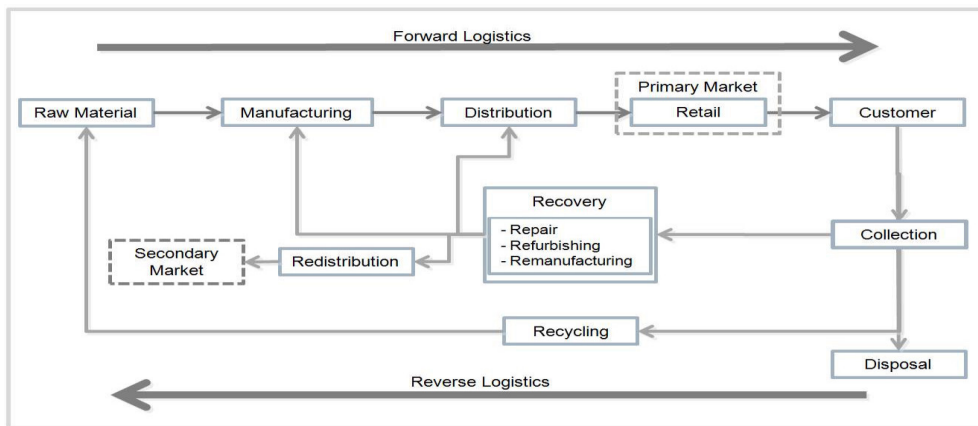


# I. 서론

## 1. 연구 배경 및 필요성

일반적으로 물류 네트워크는 다단계로 구성되는 경우가 대부분이다. 즉 생산된 제품이 최종소비자에게 전달되기 위해서는 원자재 (Raw Material) 혹은 부품 (Part) -> 제품생산(Manufacturing) -> 물류센터(Distribution Center) -> 소매점(Retailer) -> 고객(Customer)의 단계를 따른다. 또한 고객으로부터 사용되어진 후 회수되는 제품은 고객(Customer) -> 수집센터(Collection Center) -> 회복센터(Recovery Center), 리사이클링 센터(Recycling Center) 혹은 폐기 (Waste Disposal Center) -> 재분배센터(Redistribution Center) -> 1차 시장 (Primary Market) 혹은 2차 시장(Secondary Market, 중고시장)의 단계를 거쳐 처리되어지는 것이 일반적이다.

여기에서 전자의 흐름을 순방향물류(Forward Logistics: FL)라고 하고 후자의 흐름을 역방향물류(Backward Logistics) 혹은 역물류(Reverse Logistics: RL)라고 부른다, 이를 요약하면 <그림 1-1>과 같다.



<그림 1-1> 순방향 물류 및 역물류 네트워크

FL은 공급업체로부터 공급받은 원자재 혹은 부품들을 제조업체에서 가공, 조립하여 제품을 만든 후 이를 물류센터를 통해 소매점으로 보내고 최종적으로 고객에게 판매되는 네트워크 구조를 가지고 있다. FL에 관한 연구들은 과거부터 활발하게 이루어져 왔다 (Debanné, 1975; Morris, 1980; Holland, 1995; Giannakis and Louis, 2011). 이러한 기존 연구들은 생산된 제품을 어떻게 하면 효율적으로 (즉 최적의 비용으로) 고객에게 전달하느냐에 관한 연구들이다.

예를 들어 해외연구의 경우, Syarif et al. (2002)는 부품공급자 → 제조공장 → 물류센터 → 고객에게 이르는 다단계 네트워크에서 최소비용으로 고객의 수요를 충족시키기 위한 수리모델을 제시하였다. Moon et al. (2006)은 부품공급자 → 제조공장 → 고객에게 이르는 네트워크에서 작업순서결정(Sequencing)과 자원선택(Resource selection)문제를 일정계획(Scheduling)과 연계하였고, 이러한 연계과정에서 발생하는 작업준비시간, 작업처리시간, 제품수송시간의 합을 최소화하기 위한 수리모델을 제시하였다.

RL은 고객으로부터 사용되어진 사용 후 제품을 수집센터를 통해 수집한 후 재사용 가능 제품은 회복센터를 통해 재제조(혹은 재가공)한 후 1차 혹은 2차 시장에서 재판매하고, 재사용 불가능한 사용 후 제품은 분해 후 재사용 가능한 부품 혹은 원자재로 분류한 후 FL의 각 단계로 보내서 처리하고, 재사용이 불가능한 한 부품 혹은 원자재는 매립의 단계로 거치는 물류 네트워크 구조를 가지고 있다.

RL의 경우 1974년 James(1974)에 의해 처음으로 그 개념이 정립된 이후 구체적인 RL네트워크 설계는 1980년대 말까지 주목할 만한 연구가 진행되지 않았다. 이는 RL네트워크가 FL네트워크보다 구축비용이 2-3배 더 많이 들며 (Min, 1989), 더욱 복잡하고(Rogers, 1999) 효율적인 RL 네트워크설계에 대한 타당성 및 필요성을 기업이나 소비자가 그 당시까지도 인식하지 못했기 때문이다. 하지만 2000년대 초반부터 EU를 중심으로 RoHS(Restriction of the use of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment, 전기 전자 제품 유해물질 사용제한지침)와 WEEE(Waste Electrical and Electronic Equipment, 폐가전제품의 의무재활용에 관한규제)와 같은 환경규제가 강화되고, 소비자의 인식 또한 변화되기 시작하면서 RL 네트워크의 효율적 구축은 기업의

또 다른 경쟁력 확보 측면에서 유리하고, 폐기처분 및 재사용등을 통해 자사가 생산한 제품에 대해 제품의 수명이 다할 때 까지 책임을 진다는 측면을 소비자에게 강조할 수 있어 궁극적으로 자사의 이미지 상승효과를 기대할 수 있게 되었다 (Min, 1989).

이러한 시대적 변화에 따라 RL 네트워크의 효율적 설계를 위한 다양한 연구들이 진행되었다 (Jayaraman, 2003; Min, 2006; Srivastava, 2007, 2008; Lee, 2009). 이들 연구의 대부분은 고객으로부터 사용되어진 제품의 효율적 처리(예를 들어, 재사용, 수리 후 사용, 폐기 등)를 위한 RL 네트워크 각 단계의 설계를 바탕으로 하고 있다. 예를 들어 Min et al. (2006)의 연구에서는 고객으로부터 회수되는 제품을 초기수집지점(Initial Collection Point)를 거쳐 중앙회수센터(Centralized Return Center)에서 분류한 후 사용 가능한 제품(Defect-free Products) 들은 재포장 (Repacking) 혹은 재상표부착 (Relabeling)을 한 후 초기수집지점으로 수송하고, 수리가 필요한 제품들은 제조시설 및 수리시설로 보내는 RL 네트워크를 설계하였다.

Srivastava (2008)는 고객은 재사용이 가능한 제품을 수집센터로 보내고, 그렇지 않은 제품, 즉 폐기 처분할 제품은 폐기처분센터로 보내는 두 가지 경우를 고려한 RL 네트워크를 설계하였다. 또한 수집센터로 보내어진 제품은 회복센터(이 센터는 수리(Repair, Refurbishing)센터, 재제조센터로 나누어 진다)를 거쳐 1차시장과 2차시장으로 수송되는 네트워크를 제시하였다.

이상에서 제시된 물류 네트워크의 두 가지 흐름인 FL과 RL에 관한 기존 연구들 대부분은 그 각각의 방향성만을 고려한 상황에서 효율적 네트워크 구축이라는 목표를 수행하였다. 하지만 FL 및 RL 각각의 방향성만을 고려한 기존연구들은 다음과 같은 근본적인 적용상의 한계점을 가지고 있다.

- 1) 일반적으로 대부분의 제품은 제품수명주기(Product Life Cycle: PLC)를 가지고 있으며 이러한 PLC의 처음은 FL에서 시작하지만 그 마지막은 항상 RL에서 끝나게 된다. 따라서 PLC의 효율적 관리 및 운영을 위해서는 FL과 RL이 서로 연계, 통합되어 고려되어야 한다.

2) 일반적으로 최적해는 전역적 최적해(Global Optimal Solution)와 지역적 최적해(Local Optimal Solution)로 구분할 수 있다. 즉 FL만을 고려할 경우에 구해진 최적해(Optimal Solution)가 전역적 최적해라고 하더라도 RL을 함께 연계한 통합형 공급망에서는 전역적 최적해가 아닌 지역적 최적해일 수도 있다. 따라서 PLC 측면에서 전역적 최적해를 구하기 위해서는 FL 및 RL 각각에서의 최적해가 필요한 것이 아니라 이를 연계한 통합형 공급망에서의 최적해가 필요하다.

예를 들어, 자동차 산업의 경우 FI 단계에서의 중요한 의사결정 목표는 신속한 자동차 생산과 인도가 될 수 있으며, RL 단계에서는 중고자동차의 효율적인 처리가 중요한 의사결정 목표가 될 수 있을 것이다. 따라서 FL과 RL을 연계한 통합형 공급망에서는 신속한 자동차 생산과 인도 및 중고자동차의 효율적인 처리를 함께 고려하는 것이 중요한 의사결정 목표가 될 것이다. 하지만 중고자동차의 효율적 처리를 위해서는 일부 부품을 재사용(Reuse) 혹은 재활용(Recycling)할 수 있으며, 이러한 과정은 새로 만드는 부품에 비해 시간이 더 많이 걸릴 수도 있을 것이다.

결국 이러한 재사용 혹은 재활용은 RL 단계에서 중고자동차의 효율적 처리에는 도움이 되지만, FL 단계에서 고려하는 신속한 자동차 생산과 인도에 도움이 되지 않을 수도 있을 것이다. 이와 같이 FL, RL 각 단계에서 고려한 최적운영방안 (즉 전역적 최적해)이 이를 연계한 통합형 공급망에서는 최적 운영방안이 아닐 수 있으며 가능한 운영방안 (즉 지역적 최적해) 중의 하나일 수 있다.

이와 같은 통합형 공급망 네트워크 설계 및 운영의 필요성에 따라 2000년 이후부터 연구자들을 중심으로 FL 및 RL을 연계한 통합형 공급망 네트워크 설계 연구가 활발히 진행되고 있다. (Fleischmann et al. 2000; Georgiadis and Besiou, 2008; Wang and Hsu, 2010; Amin and Zhang, 2012, 2013; Chen et al. 2015). 이와 같이 FL 및 RL을 연계한 통합형 공급망 네트워크 설계 및 운영은 다음과 같은 효과를 기대할 수 있다.

### 1) 환경보호 측면에서의 기여

일반적으로 FL은 제품생산을 통한 고객의 만족에 중점을 두고 있지만, RL은 사용 후 제품의 효율적 처리에 중점을 두고 있다. RL의 활동에서 사용 후 제품의 효율적 처리를 위해서는 크게 재사용 가능한 활동(예를 들어, 사용 후 제품, 부품, 원자재 등의 재사용 및 재활용)과 재사용이 불가능한 활동(예를 들어, 사용 후 제품의 소각, 매립 등)으로 구분 할 수 있다. 특히 재사용이 불가능한 활동의 경우 이를 처리하는데 환경적 측면을 반드시 고려하여야 한다. 즉 비효율적인 소각, 매립 등의 활동은 대기오염, 토양오염, 수질오염 등을 야기 시킬 수 있으며, 이러한 비효율적 활동은 궁극적으로 기업의 이미지에 중대한 영향을 미쳐 추후 제품생산 및 판매활동에 많은 영향을 줄 수 있기 때문이다. 따라서 기업은 이러한 비효율적 활동의 발생 가능성을 줄이기 위해, FL에서 제품생산시 친환경적 설계 및 생산을 고려하여, RL에서 발생할 수 있는 비효율적 활동을 줄이기 위한 노력을 하여야 한다.

### 2) 부품 및 제품공급의 유연성 증대

RL 활동은 재사용이 가능한 활동과 재사용이 불가능한 활동으로 구분할 수 있다. 특히 재사용이 가능한 활동은 FL의 제품생산에 도움을 줄 수 있다. 예를 들어, 사용 후 제품은 재제조(Remanufacturing) 혹은 재개장(Refurbishing)을 통해 재사용이 가능한 제품으로 바꿀 수 있으며, 이를 FL의 물류센터에 바로 공급할 수 있다. 또한 사용 후 제품은 재제조 혹은 재개장을 통해 재활용이 가능한 부품 혹은 원자재로 바꿀 수 있으며, 이를 FL의 제조업체에 제공할 수 있다. 이와 같이 재사용 및 재활용이 가능한 제품 혹은 부품을 FL로 공급할 경우, 기존 FL에서 부품업체에서의 부품공급, 제조업체의 제품공급과 더불어 추가적인 공급능력을 확보할 수 있다. 이는 결국 RL의 재사용이 가능한 활동을 통해 FL의 부품 및 제품공급의 유연성을 증대시킬 수 있다.

### 3) 제품생산 및 판매비용의 감소

부품 및 제품공급의 유연성 증대에서 언급하였듯이 RL 활동을 통해 재사용 가능한 부품 혹은 제품을 FL로 공급할 경우, 부품공급업체 및 제조업체는 부품 및 제품의 생산에 필요한 비용을 감소시킬 수 있으며, 이는 결국 제품 판매가격의 감소로 이어져 시장에서의 경쟁력을 강화시킬 수 있다.

### 4) 소비자의 제품 선택권 확대

사용 후 제품을 RL 활동을 통해 재사용 가능한 제품으로 재생산할 경우, 이 제품을 2차시장(중고시장)을 통해 재판매할 수 있다. 일반적으로 2차시장에서 판매되는 제품은 FL을 통해 판매되는 신제품에 비해 낮은 가격으로 책정된다. 따라서 소비자는 동일한 성능의 제품에 대해 신제품과 중고제품 중에서 본인의 기호에 따라서 선택할 수 있다.

이상에서 언급한 것과 같이 FL과 RL을 연계한 통합형 공급망 네트워크 설계의 필요성 및 그 운용의 장점에 따라 본 연구에서도 통합형 공급망 네트워크를 설계하고자 한다.

## 2. 연구 목적 및 방법

본 연구의 목적은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째는 기존의 통합형 공급망 네트워크 모델의 장단점을 파악한 후 이를 개선한 새로운 형태의 통합형 공급망 네트워크 모델을 설계하고 것이고, 둘째는 유전알고리즘(Genetic algorithm: GA)를 이용해 설계된 통합형 공급망 네트워크 모델을 해결하는 것이다. 이러한 연구 목적을 달성하기 위한 방법론은 다음과 같다.

첫째, FL과 RL을 연계한 통합형 공급망 네트워크 모델에 대한 기존연구들을 살펴보고 그 장단점을 파악한다.

둘째, 기존 연구들에 대한 분석을 통해 그 단점을 파악한 후 이를 개선하기 위한 새로운 형태의 통합형 공급망 모델을 제안한다.

셋째, 제안된 새로운 통합형 공급망 네트워크 모델을 해결하기 위한 수리모형을 설계한다. 제시한 수리모형은 기존 수리 모형과 차별화 되는 점은 통합형 공급망 네트워크에서 2차 시장 즉 중고 제품의 재판매까지 생각해서 네트워크를 설계하였다는 점에서 기존 수리 모형과 차별화된다.

넷째, 설계된 수리모형을 이행하기 위한 효율적인 방법론으로 GA 접근법을 제안한다. 또한 기존의 접근법인 등반 탐색법(Hill Climbing Method: HC)과 시뮬레이트어닐링(Simulated Annealing: SA) 접근법을 함께 제시한다.

다섯째, 다양한 크기의 통합형 공급망 네트워크 모델을 제시하고 이를 제안된 GA접근법과 HC 및 SA접근법을 통해 그 해를 각각 구한다. 또한 벤치마크(Benchmark) 비교분석을 위해 상업용 프로그램인 LINGO를 이용해 동일한 통합형 공급망 네트워크 모델에서 해를 구한다. 구해진 해들은 다양한 수행도 척도(Measures of Performance)를 이용해 비교 분석하여 각 접근법들의 장단점을 파악한다.

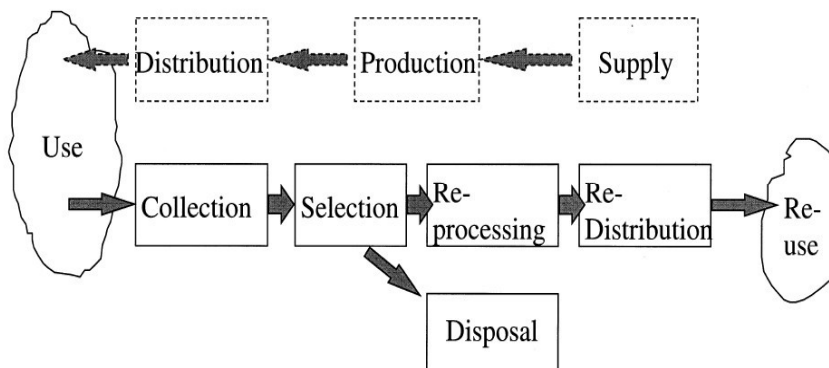
여섯째, 본 연구의 결론으로서 제안된 통합형 공급망 네트워크 모델의 특징 및 기존 통합형 공급망 네트워크 모델과의 차이점을 파악하고, 이를 해결하기 위해 제안된 GA접근법의 우수성을 제시한다. 또한 제안된 통합형 공급망 모델과 GA접근법을 발전시키기 위한 방안을 함께 제시한다.

## II. 연구 모델 설계

### 1. 기존 통합형 공급망 네트워크 모델 분석

1990년대 말 부터 몇몇 연구자들을 중심으로 FL과 RL을 연계한 통합형 공급망 네트워크 모델 설계에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다 (Fleischmann, et. al. 1999; Fleischmann et al. 2000; Georgiadis and Besiou, 2008; Wang and Hsu, 2010; Amin and Zhang, 2012, 2013; Jindal and Sangwan, 2013; Chen et al. 2015).

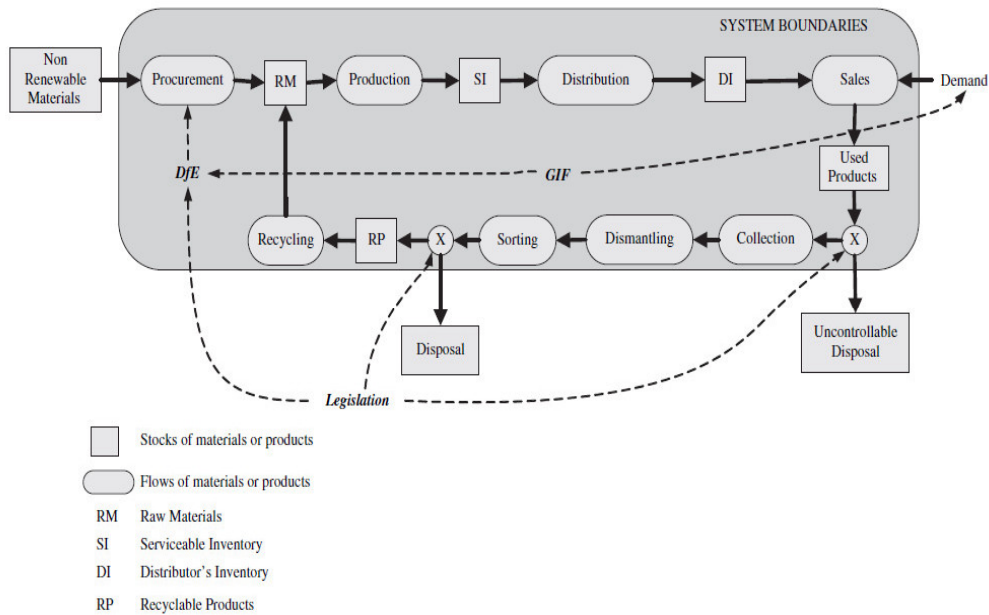
Fleischmann et. al. (1999)의 연구에서 <그림 2-1>과 같은 개념적인 통합형 공급망 네트워크 모델을 제시했다. 이 모델에서는 공급업체로부터 생산, 물류 단계를 거쳐 최종적으로 고객에게 제품이 판매되는 FL과 판매한 후 제품을 수집해서 분류 후 재사용 가능 제품은 재처리(Reprocessing), 재분배단계(Redistribution)의 단계를 거쳐 재사용 되도록 하였고, 재사용 불가능 제품은 폐기되는 RL 네트워크를 제시하였다.



<그림 2-1> Fleischmann et. al. (1999)가 제안한 통합형 공급망 네트워크 모델

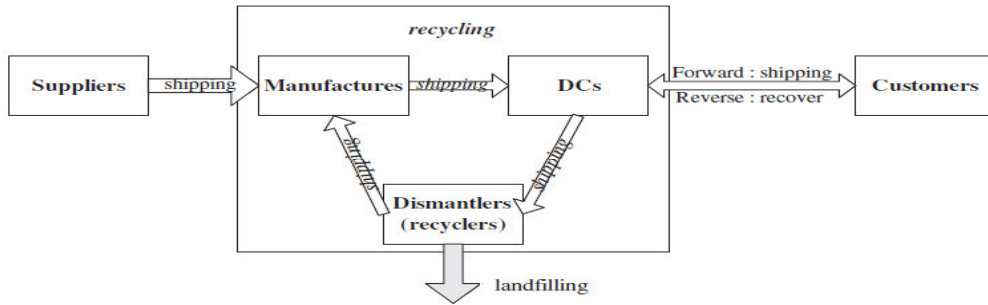


Georgiadis and Besiou (2008)의 연구에서는 <그림 2-2>에서 보는 것과 같이 부품의 구매, 제품생산, 분배의 단계를 거쳐 최종적으로 고객에게 판매되는 FL과 고객으로부터 회수되는 사용후 제품을 수집, 분해(Dismantling), 분류(Sorting)의 단계를 거쳐 재사용이 가능한 부품은 리사이클링을 거쳐 FL의 제조 단계로 보내고, 재사용이 불가능한 부품은 폐기되는 FL를 제시하였다.



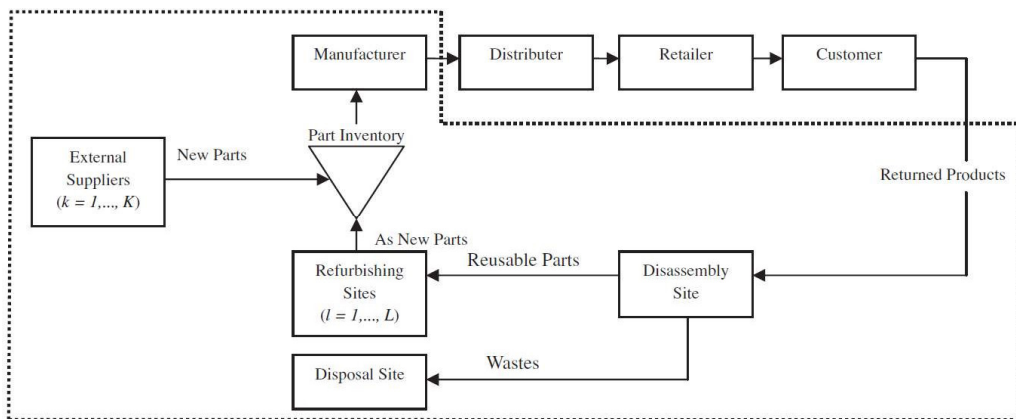
<그림 2-2> Georgiadis and Besiou (2008)이 제안한 통합형 공급망 네트워크 모델

Wang and Hsu (2009)는 <그림 2-3>에서 보는 것과 같이 부품공급업체, 제조업체, 물류센터를 거쳐 고객에게 판매되는 FL과 사용후 제품을 FL의 물류센터를 통해 수집하고, 이를 리사이클링업체(Recycler)로 보내 리사이클링을 한 후 재사용 가능한 부품은 FL의 제조업체로 보내고, 재사용이 불가능한 부품은 매립(Landfill)하는 RL 네트워크를 제시하였다.



<그림 2-3> Wang and Hsu (2009) 제안한 통합형 공급망 네트워크 모델

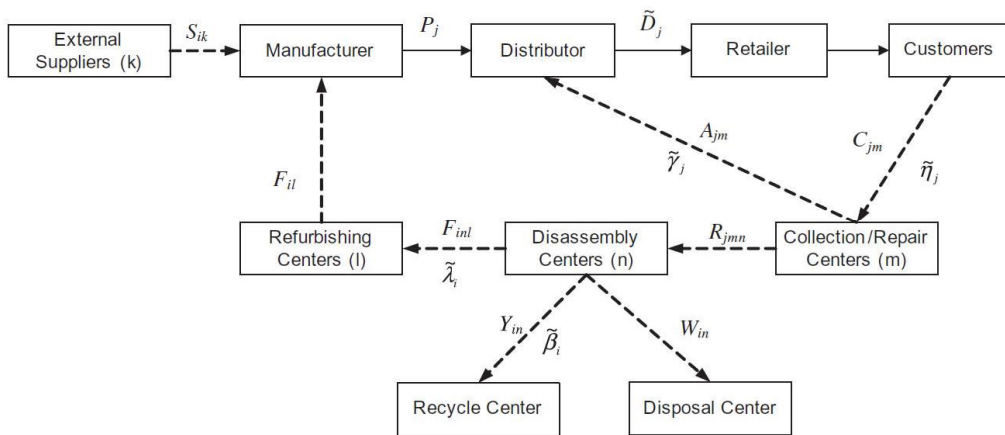
Amin and Zhang (2012)은 <그림 2-4>과 같이 부품공급업체, 제조업체, 물류센터, 소매점을 거쳐 최종적으로 고객에게 전달되는 FL과 고객으로부터 회수되는 사용 후 제품을 분해사이트(Disassembly Site)을 거쳐 재사용 가능한 부품은 재개장사이트(Refurbishing Site)를 거쳐 FL의 제조업체로 공급되고, 재사용이 불가능한 부품은 폐기사이트(Disposal Site)로 보내 처리되는 통합형 공급망 네트워크 모델을 제안하였다.



<그림 2-4> Amin and Zhang (2012)이 제안한 통합형 공급망 네트워크 모델

Jindal and Sangwan (2013)은 <그림 2-5>와 같은 통합형 공급망 네트워크 모델을 제안하였다. 제안된 모델에서는 외부 공급업체(External Suppliers), 제조업체, 물류센터, 소매점을 거쳐 판매된 제품을 고객으로부터 회수한 후 수집

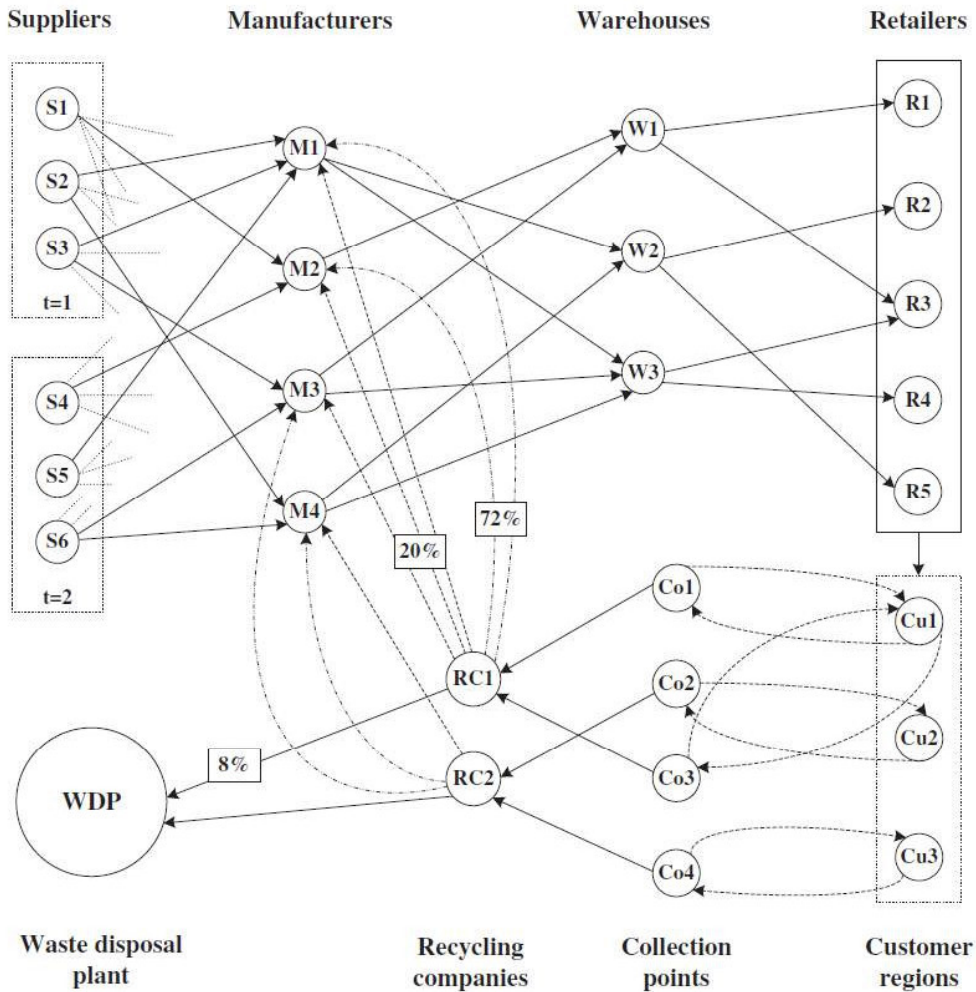
및 수리센터(Collection/Repair Center)를 통해 바로 재사용될 수 있는 제품은 FL의 물류센터로 보내고, 수리 후 재사용 가능한 제품은 분해센터(Disassembly Center)로 보낸다. 분해센터에서는 해당 제품을 분해하여 재사용 가능 부품은 재개장센터를 거쳐 FL의 제조업체로 보내 재사용되게 하였으며, 재사용 불가능한 부품은 다시 재사용 가능한 원자재와 재사용 불가능한 원자재로 구분한 후, 재사용 가능한 원자재는 리사이클링 센터를 통해 리사이클링이 되게 하였으며, 재사용 불가능한 원자재는 폐기센터로 보내 폐기처리 되도록 하는 통합형 공급망 모델을 제시하였다.



<그림 2-5> Jindal and Sangwan(2013)이 제안한 통합형 공급망 네트워크 모델

Chen et al. (2015)의 연구에서는 <그림 2-6>과 같이 공급업체, 제조업체, 물류센터, 소매점을 통해 최종적으로 고객에 이르는 FL과 고객으로부터 시작하여 수집센터, 회복센터를 거쳐 최종적으로 폐기센터에 이르는 RL 네트워크를 제시하였다. 이들의 연구에서는 통합형 공급망 네트워크 설계를 위해 RL의 마지막 단계인 회복센터의 기능을 두 가지로 구분하여 제시하였다. 즉 회복센터에서는 사용후 제품을 검사하여 재사용 가능한 제품과 재사용 불가능한 제품으로 분류하였다. 재사용 가능한 제품은 FL의 제조업체로 보내서 간단한 검사 및 포장을 거친 후 물류센터를 거쳐 소매점에서 재판매가 되도록 하였고, 재사용이 불가능

한 제품은 분해하여 재사용 가능 원자재와 재사용 불가능 원자재로 다시 분류하였다. 재사용 가능 원자재는 FL의 제조업체로 보내 제품생산에 사용되도록 하였고, 재사용 불가능 원자재는 폐기센터로 보내서 처리하는 방법으로 통합형 공급망 네트워크를 설계하였다.



<그림 2-6> Chen et al. (2015)이 제안한 통합형 공급망 네트워크 모델

위에서 제시한 여섯 가지 형태의 기존 통합형 공급망 네트워크 모형의 장단점을 정리하면 다음과 같다.

1) 기존 통합형 공급망 네트워크 모형의 장점:

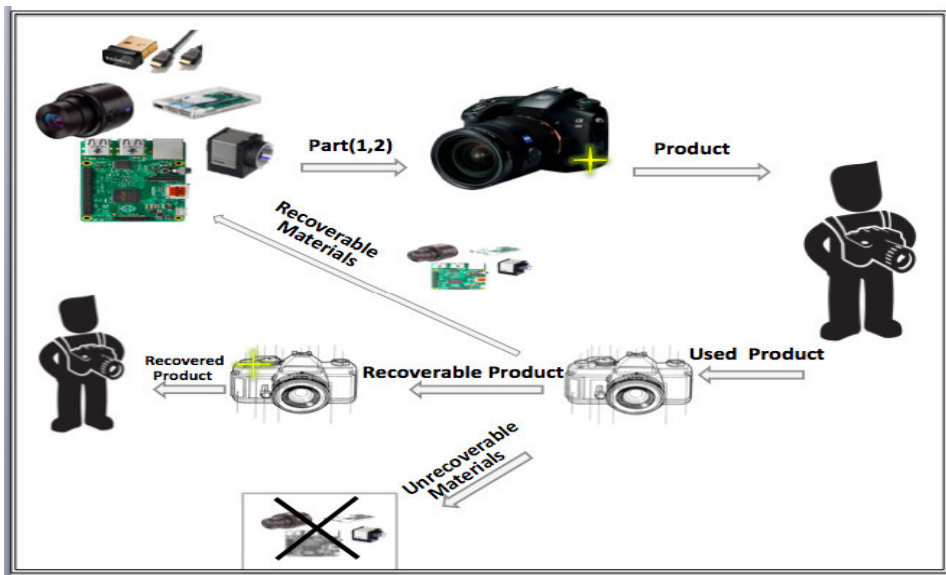
기존연구 대부분은 RL 단계에서 사용후 제품을 수집한 후 이를 적절한 처리과정(예를 들어, 리사이클링, 재개장 등)을 거쳐 재사용 가능 제품 (혹은 부품)을 FL 단계로 보내 처리되는 네트워크 구조를 가지고 있다. 이러한 FL과 RL의 연계과정을 통해 사용후 제품(혹은 부품)의 재사용 가능성을 높이고 있다. 결국 이러한 재사용 가능성의 증대는 환경보호 측면에 도움이 될 뿐만 아니라 해당 기업의 제품 생산 및 판매의 유연성(Flexibility)을 높일 수 있어서 궁극적으로 기업의 이익 증대 효과를 기대할 수 있다.

2) 기존 통합형 공급망 네트워크 모형의 단점:

기존 연구 대부분은 RL 단계에서 사용 후 제품의 수집, 재처리과정을 거쳐 재사용 가능 제품 (혹은 부품)은 FL 단계로 보내고, 재사용 불가능한 제품 (혹은 부품)은 폐기 처리되는 네트워크 구조를 가지고 있다. 하지만 일반적으로 재사용 가능 제품의 경우 FL단계로 보내서 처리하는 경우도 있지만 2차 시장(= 중고시장)을 통해 재판매되는 경우도 많다. 실제로 고객으로부터 수집되는 냉장고, TV, 세탁기 등의 전자제품들 대부분은 수집센터 등에서 적절한 처리과정을 거친 후 중고시장에서 재판매되는 경우가 많다. 하지만 위에서 제시한 기존연구들 모두에서는 RL 단계에서 2차시장(= 중고시장)을 통해 재판매되는 네트워크 구조는 가지고 있지 않다. 이러한 문제점은 많은 선진국에서 중고시장이 활성화되어 운영되고 있는 현실적인 측면을 고려하지 않은 결과이다. 따라서 이를 개선하는 통합형 공급망 네트워크 모델 구축이 필요하다.

## 2. 제안된 통합형 공급망 네트워크 모델

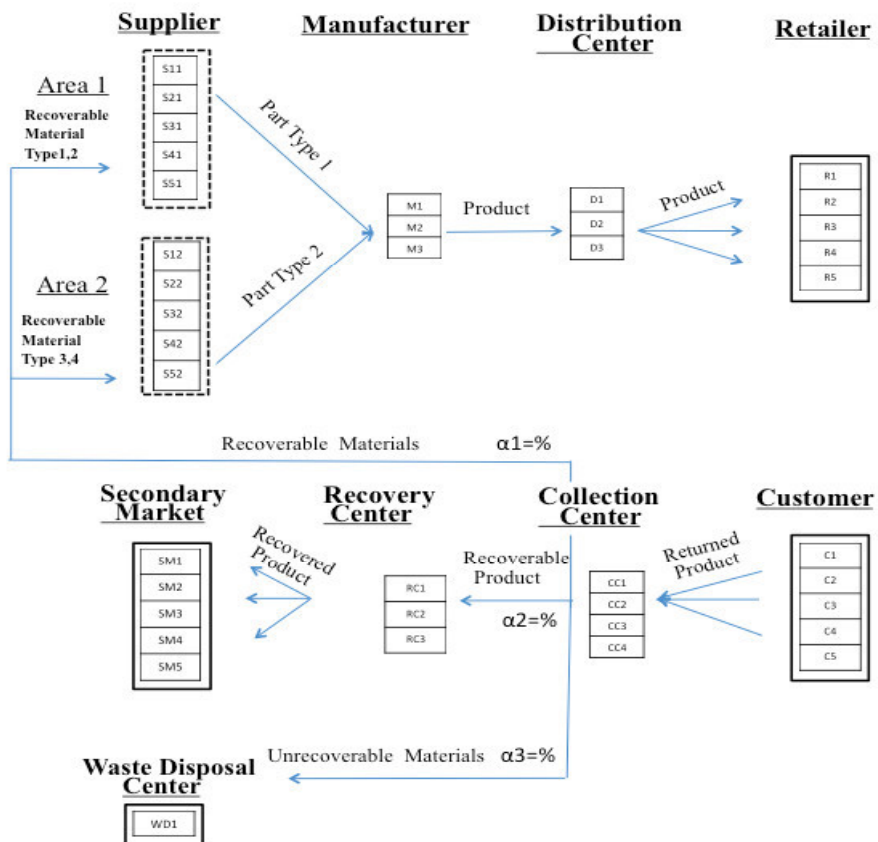
2장 1절의 마지막 부분에서 제시한 기존 통합형 공급망 네트워크 모형의 단점을 극복하기 위해 본 연구에서는 기존 연구들에서 고려한 통합형 네트워크 설계에 회복센터를 통한 재사용 가능한 제품(=중고품)을 중고시장을 통해 재판매하는 네트워크를 추가하였다. 현실적인 측면에서 보면, 사용 후 제품은 수집 후 적절한 처리과정을 통해 중고시장에서 재판매되는 경우가 많다. 따라서 이러한 재판매 네트워크를 추가한 통합형 공급망 네트워크 설계는 이를 고려하지 않은 기존 연구들에 비해 보다 현실적인 측면을 고려한 연구이기 때문에 연구를 수행할 충분한 가치가 있다고 판단된다. <그림 2-7>은 카메라 생산 및 사용 후 제품 및 부품의 처리를 위한 통합형 공급망 네트워크의 예를 보여주고 있다.



<그림 2-7> 카메라 생산 및 사용 후 제품 및 부품 처리를 위한 통합형 공급망 네트워크 예

본 연구에서 제시하는 통합형 공급망 네트워크 모델은 다음과 같이 구성된다. 먼저 FL 네트워크의 경우, 공급업체(Supplier)는 네 종류의 원자재(Material Type 1, 2, 3,

4)을 이용하여 두 종류(Part Type 1, 2)을 조립한 후 이를 제조업체(Manufacturer)로 보낸다. 제조업체는 공급받은 두 종류의 부품을 가공, 조립하여 하나의 제품을 만든 후 이를 물류센터(Distribution center)를 통해 소매점(Retailer)으로 보내고 최종적으로 고객(Customer)에게 판매되는 네트워크 구조를 가지고 있다. RL 네트워크의 경우에는 고객을 떠난 사용 후 제품은 수집센터(Collection center), 회복센터(Recovery Center), 2차시장(Secondary market, 중고시장)을 거쳐 재판매되거나, 폐기센터(Waste disposal center)에서 폐기되거나, 혹은 제품을 분해하여 그 원자재를 FL의 부품공급업체에게 보내는 네트워크 구조를 가지고 있다. 이를 요약하여 표시하면 <그림 2-8>과 같다.



<그림 2-8> 본 연구에서 제시한 통합형 공급망 네트워크 모델

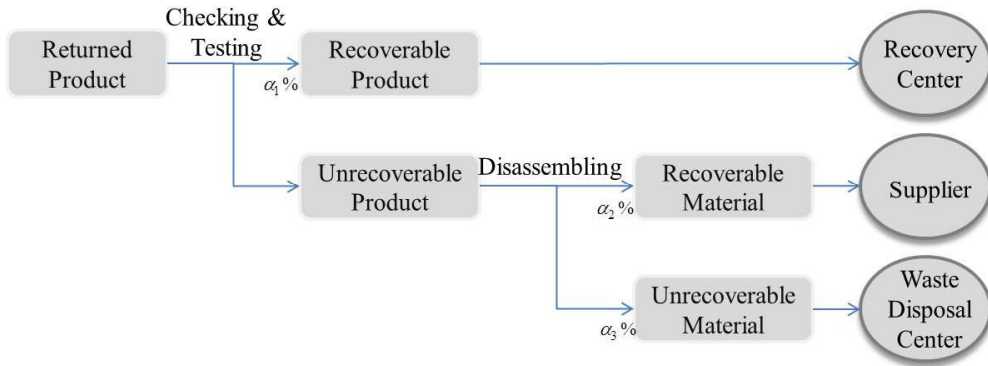
<그림 2-8>에서 알 수 있는 바와 같이 공급업체는 네 종류의 원자재 (Material Type 1, 2, 3, 4)를 이용해 두 종류의 부품(Part type 1, 2)을 생산한다. 이렇게 생산된 두 종류의 부품은 다음단계인 제조업체로 보내어지며, 여기서 하나의 제품이 만들어진다. 결국 하나의 제품을 생산되기 위해서는 두 종류의 부품이 필요하며, 두 종류의 부품이 생산되기 위해서는 네 종류의 원자재가 필요하게 된다. 이러한 관계는 <그림 2-9>에 제시되어 있다.



<그림 2-9> FL네트워크 단계의 원자재, 부품 및 제품의 생산 과정

또한 RL 네트워크 단계의 수집센터는 고객으로부터 수집되는 사용 후 제품을 검사한 후 재사용 가능 제품(Recoverable Product)은  $\alpha_2\%$  (수집되는 사용후 제품 전체에서 비율)로 회복센터로 보내 처리하고 재사용이 불가능 제품(Unrecoverable Product)은 분해하여 재사용 가능 원자재(Recoverable Material)과 재사용이 불가능 원자재(Unrecoverable Material)으로 분류한다. 재사용 가능 원자재는  $\alpha_1\%$  (수집되는 사용후 제품 전체에서 비율)로 FL 네트워크 단계의 공급업체로 보내고, 재사용 불가능 원자재  $\alpha_3\%$ (수집되는 사용 후 제품 전체에서 비율)로 폐기처리센터로 보내 폐기처리 되도록 하는 기능을 가지고 있다. 수집센터의 이러한 기능을 요약하면 <그림 2-10>과 같다.





<그림 2-10> RL 네트워크 단계의 수집센터의 기능

### 3. 수리모형 설계

본 연구에서 제안된 통합형 공급망 네트워크 모델 설계를 이행하기 위해 수리모형을 제시한다. 제시된 수리 모형은 기존 연구인 Chen et al. (2015)의 모형을 근거로 하였으며, 그 차이점은 본 연구의 수리모형은 2차시장을 고려하였지만 Chen et al. (2015)의 연구에서는 이를 고려하지 않았다. 먼저 고려된 가정은 다음과 같다.

- 1) 본 연구는 단일제품에 대한 통합형 공급망 네트워크만을 고려한다.
- 2) 제품 한 개를 생산하기 위해 부품 2개 (part type1 1개, part type2 1개)가 필요하며 part type1을 1개 생산하는데 원자재 2개 (Material type 1, 2 각 1개)가 필요하고, part type 2를 1개 생산하는데 원자재 2개 (Material type 3, 4 각 1개)가 필요하다.
- 3) 공급업체, 제조업체, 물류센터, 수집센터, 회복센터는 각 단계에서 오직 한군데만 개설된다.
- 4) 각 단계별로 개설되는 공급업체, 제조업체, 물류센터, 수집센터, 회복센터 구축에 필요한 고정비용은 각각 다르며 사전에 알려져 있다.
- 5) 각 단계별로 개설되는 공급업체, 제조업체, 물류센터, 수집센터, 회복센터의 처리허용용량은 이전단계에서 공급되는 처리량을 전부 처리할 수 있다.

- 6) 같은 단계 내에서 단위당 제품 처리비용은 전부 동일하다. 예를 들어 FL네트워크의 단계 2에서 어떤 제조업체가 개설된다고 하더라도 그 단위당 제품 처리비용은 전부 동일하다.
- 7) FL 및 RL 네트워크 각 단계에서 고려되는 공급업체, 제조업체, 물류센터, 소매점(=고객), 수집센터, 회복센터, 2차시장, 폐기센터간의 수송에서 발생하는 단위당 수송비용(Transportation cost)은 사전에 알려져 있다.
- 8) 각 센터 및 시장간 단위당 수송비용을 사전에 알려진 위치 정보를 고려하여 계산 되었다.

이상과 같은 가정에 근거하여 통합형 공급망 네트워크 모델설계를 위한 수리모형을 개발한다. 본 연구는 각 단계별로 발생하는 고정비용, 변동비용, 수송비용의 총합을 최소화 할 수 있는 최적 공급망 네트워크 설계가 궁극적인 목표라고 할 수 있다. 따라서 이러한 총비용 최소화를 목적함수로 설정한다. 설정된 목적함수를 최적화하기 위해 각 단계별 다양한 제약조건들을 고려하여야 한다. 먼저 목적함수와 제약조건들에서 사용되는 모수(parameters) 및 변수(variables)를 설정한다.

Indices:

$a$  : index of area,  $a \in A$

$i$  : index of supplier,  $i \in I$

$j$  : index of manufacturer,  $j \in J$

$k$  : index of distribution center,  $k \in K$

$l$  : index of retailer/customer,  $l \in L$

$m$  : index of collection center,  $m \in M$

$n$  : index of recovery center,  $n \in N$

$p$  : index of secondary market,  $p \in P$

$q$  : index of waste disposal center,  $q \in Q$

Parameters:

- $FS_{ia}$  : fixed cost at supplier  $i$  of area  $a$
- $FM_j$  : fixed cost at manufacturing center  $j$
- $FD_k$  : fixed cost at distribution center  $k$
- $FCC_m$  : fixed cost at collection center  $m$
- $FRC_n$  : fixed cost at recovery center  $n$
- $HS_a$  : unit handling cost at supplier of area  $a$
- $HM$  : unit handling cost at manufacturing center
- $HD$  : unit handling cost at distribution center
- $HCC$  : unit handling cost at collection center
- $HRC$  : unit handling cost at recovery center
- $TSM_{iaj}$  : unit transportation cost from supplier  $i$  of area  $a$  to  
manufacturing center  $j$
- $TMD_{jk}$  : unit transportation cost from manufacturing center  $j$  to distribution  
center  $k$
- $TDR_{kl}$  : unit transportation cost from distribution center  $k$  to retailer  $l$
- $TRCC_{lm}$  : unit transportation cost from retailer  $l$  to collection center  $m$
- $TCCS_{mia}$  : unit transportation cost from collection center  $m$  to supplier  $i$  of  
area  $a$
- $TCCRC_{mn}$  : unit transportation cost from collection center  $m$  to recovery  
center  $n$
- $TCCWD_{mq}$  : unit transportation cost from collection center  $m$  to waste  
disposal center  $q$
- $TRCSM_{np}$  : unit transportation cost from recovery center  $n$  to secondary  
market  $p$

**Decision variables:**

- $cs_{ia}$  : treatment capacity at supplier  $i$  of area  $a$

$cm_j$  : treatment capacity at manufacturing center  $j$

$cd_k$  : treatment capacity at distribution center  $k$

$cr_l$  : treatment capacity at retailer  $l$

$ccc_m$  : treatment capacity at collection center  $m$

$crc_n$  : treatment capacity at recovery center  $n$

$csmp_p$  : treatment capacity at secondary market  $p$

$cwd_q$  : treatment capacity at waste disposal center  $q$

$xs_{ia} = \begin{cases} 1, & \text{if supplier } i \text{ at area } a \text{ is open} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$

$xm_j = \begin{cases} 1, & \text{if manufacturing center } j \text{ is open} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$

$xd_k = \begin{cases} 1, & \text{if distribution center } k \text{ is open} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$

$xcc_m = \begin{cases} 1, & \text{if collection center } m \text{ is open} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$

$xrc_n = \begin{cases} 1, & \text{if recovery center } n \text{ is open} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$

위와 같은 파라미터 및 변수를 사용하여 수리모형을 설계하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{Minimize Total cost (TC)} &= \text{total fixed cost (TF)} + \text{total handling cost (TH)} \\
 &+ \text{total transportation cost (TP)} \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$TF = \sum_a \sum_i (FS_{ia} \cdot xs_{ia}) + \sum_j (FM_j \cdot xm_j) + \sum_k (FD_k \cdot xd_k) + \sum_m (FCC_m \cdot xcc_m) + \sum_n (FRC_n \cdot xrc_n) + \quad (2)$$

$$TH = \sum_a \sum_i (AS_a \cdot cs_{ia} \cdot xs_{ia}) + HM \sum_j (cm_j \cdot xm_j) + HD \sum_k (cd_k \cdot xd_k) + HCC \sum_m (ccc_m \cdot xcc_m) + HRC \sum_n (crc_n \cdot xrc_n) + \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 TP = & \sum_a \sum_i \sum_j (TSM_{ija} \cdot cs_{ia} \cdot xs_{ia} \cdot xm_j) + \sum_j \sum_k (TMD_{jk} \cdot cm_j \cdot xm_j \cdot xd_k) + \sum_k \sum_l (TDR_{kl} \cdot cd_k \cdot xd_k) + \\
 & \sum_l \sum_m (TRCC_{lm} \cdot cr_l \cdot xcc_m) + \sum_m \sum_a \sum_i (TCCS_{mia} \cdot ccc_m \cdot xcc_m \cdot xs_{ia}) + \sum_m \sum_n (TCCRC_{mn} \cdot ccc_m \cdot xcc_m \cdot xrc_n) + \\
 & \sum_m \sum_q (TCCWD_{mq} \cdot ccc_m \cdot xcc_m) + \sum_n \sum_p (TRCSM_{np} \cdot crc_n \cdot xrc_n)
 \end{aligned} \tag{4}$$

subject to

$$\sum_i xs_{ia} = 1, \quad \forall a \in A \tag{5}$$

$$\sum_j xm_j = 1 \tag{6}$$

$$\sum_k xd_k = 1 \tag{7}$$

$$\sum_m xcc_m = 1 \tag{8}$$

$$\sum_n xrc_n = 1 \tag{9}$$

$$\sum_i (cs_{ia} \cdot xs_{ia}) - \sum_j (cm_j \cdot xm_j) = 0, \quad \forall a \in A \tag{10}$$

$$\sum_j (cm_j \cdot xm_j) - \sum_k (cd_k \cdot xd_k) = 0 \tag{11}$$

$$\sum_k (cd_k \cdot xd_k) - \sum_l cr_l = 0 \tag{12}$$

$$\sum_l cr_l - \sum_m (ccc_m \cdot xcc_m) = 0 \tag{13}$$

$$\sum_i (cs_{ia} \cdot xs_{ia}) - \alpha_1 \sum_m (ccc_m \cdot xcc_m) \geq 0, \quad \forall a \in A \tag{14}$$

$$\sum_n (crc_n \cdot xrc_n) - \alpha_2 \sum_m (ccc_m \cdot xcc_m) \geq 0 \tag{15}$$

$$\sum_q cwd_q - \alpha_3 \sum_m (ccc_m \cdot xcc_m) \geq 0 \tag{16}$$

$$xs_{ia} = \{0, 1\} \quad \forall i \in I, a \in A \tag{17}$$

$$xm_j = \{0, 1\} \quad \forall j \in J \tag{18}$$

$$xd_k = \{0, 1\} \quad \forall k \in K \tag{19}$$

$$xcc_m = \{0, 1\} \quad \forall m \in M \tag{20}$$

$$xrc_n = \{0, 1\} \quad \forall n \in N \tag{21}$$

$$cs_{ia}, cm_j, cd_k, cr_l, ccc_m, crc_n, csm_p, cwd_q \geq 0, \tag{22}$$

$$\forall i \in I, a \in A, j \in J, \forall k \in K, \forall l \in L, \forall m \in M, \forall n \in N, \forall p \in P, \forall q \in Q \tag{23}$$

수식(1)-(4)의 목적함수는 각 단계에서 발생하는 고정비용, 변동비용, 단계간 수송비용의 총합을 최소화하고 있다. 수식 (5)는 영역 1, 2의 공급업체는 각각 한 군데만 개설되어야 한다는 제약이다. 같은 의미로 수식(6)에서 (9)까지는 제조업체, 물류센터, 수집센터, 회복센터는 각각 한 군데만 개설되어야 한다는 제약이다. 수식 (10)은 영역 1, 2에서 각각 개설되는 공급업체의 처리량은 다음 단계에서 개설되는 제조업체의 처리량과 같아야 한다는 제약이다.

같은 방법으로 수식 (11)에서 (13)까지는 각 단계별 제조업체, 물류센터, 소매점, 수집센터의 처리량이 동일하다는 제약이다. 수식(14)에서 (16)까지는 수집센터에서 수집된 사용 후 제품을 분해 후  $a_1$ 의 비율로 생성된 재사용 가능한 원자재 1, 2, 3, 4,  $a_2$ 의 비율로 생성된 재사용가능 제품,  $a_3$ 의 비율로 생성된 재사용 불가능 원자재의 처리량은 각각 영역 1, 2의 공급업체, 재분배센터, 폐기센터의 처리량보다 작거나 같아야 한다는 제약이다. 수식 (17)에서 (21)까지는 영역 1, 2의 공급업체, 제조업체, 물류센터, 수집센터, 회복센터의 개설여부를 나타내는 제약이다. 수식 (23)는 비부 정수(Non-negativity)를 나타내고 있다.

본 연구에서 제시한 통합형 공급망 네트워크 수리모형은 단일목적, 비선형 혼합정수계획법(Single-objective, nonlinear, mixed Integer Programming: SNMIP) 형태로 표시된다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 HC, SA, GA 접근법을 사용한다.

### Ⅲ. 해법

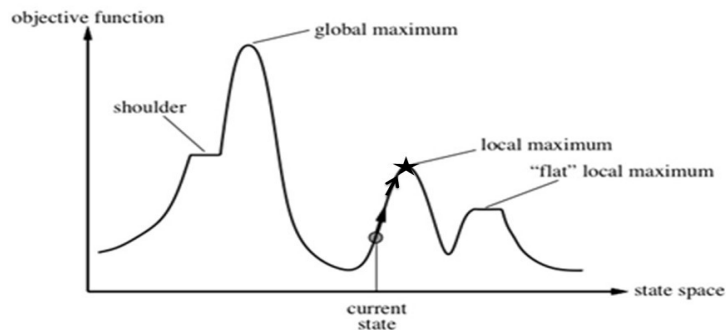
#### 1. 등반 탐색법(Hill Climbing Method)

등반 탐색법(Hill Climbing Method: HC)은 해의 탐색시 랜덤하게 설정된 초기 출발점으로 부터 시작하여 점차적으로 해의 개선을 시도하는 탐색적 접근법이다. 여기서 해의 개선은 현재의 탐색점을 기준으로 그 주위의 새로운 탐색점을 랜덤하게 발생시킨 후 현재의 탐색점의 적합도 값과 새로이 발생된 탐색점의 적합도 값을 비교하여 후자의 적합도 값이 우수할 경우에 현재의 탐색점에서 새로운 탐색점으로 이동(이를 등반탐색(Hill climbing)이라고 한다)하는 과정을 계속 반복하여 더 우수한 탐색점을 지속적으로 찾아나가는 접근법이다. 따라서 초기 출발점을 어떻게 발생시키느냐에 따라 전역적 최적해 혹은 지역적 최적해를 구할 수 있다는 특징 있다.

HC는 탐색구조가 간단하여 실행시간이 많이 걸리지 않다는 장점 있지만, 개개점 탐색(Point to Point Search) 방법이기 때문에 전역적 최적해를 찾기 보다는 지역적 최적해를 찾는 경우가 더 많다고 알려져 있다. 따라서 하나의 전역적 최적해와 비교적 소수의 지역적 최적해가 혼재된 탐색공간에서는 전역적 최적해를 찾을 확률이 높지만, 반대의 경우인 하나의 전역적 최적해와 다수의 지역적 최적해가 혼재되어 있는 탐색공간에서는 전역적 최적해를 찾을 확률이 매우 낮다고 알려져 있다 윤영수 (2003).

HC의 이러한 단점을 개선하기 위해 확률적 등반탐색법(Stochastic Hill Climbing Method), 랜덤 출발점 등반탐색법(Random Restart Hill Climbing Method), 반복적 등반탐색법(Iterative Hill Climbing Method) 등이 개발되었다. HC의 이러한 탐색의 특징 때문에 HC 단독 혹은 다른 접근법들과의 혼합화된 접근법들이 많은 연구자들에 의해 개발되어져 왔다(Renders 1994; Hoffmann 2002; Shena et al. 2004; Wang et al. 2009).

HC의 개략적 탐색구조는 <그림 3-1>과 같으며, 구체적인 탐색절차는 <그림 3-2>와 같다.



<그림 3-1> HC의 개략적 탐색구조

```

Input: Numberofiterations, MaxiumumNumberOfIterations,
        NeighborhoodSize
Output:  $V_c$ 
Begin
    Initialize Maxiumum NumberOfIterations, NeighborhoodSize
    Numberofiterations = 0
    Randomly generate a current solution  $V_c$ 
Do While Numberofiterations < MaxiumumNumberOfIterations
    Randomly generate a new solution  $V_n$  in NeighborhoodSize of  $V_c$ 
    Evaluate  $V_n$  ;
    If  $V_c < V_n$ 
        then  $V_c = V_n$ 
    End if
    Numberofiterations = NumberOfIterations+ 1
Loop
    output  $V_c$ 
End
    
```

<그림 3-2> HC의 구체적 탐색절차

제안된 통합형 공급망 네트워크 모델을 이용해 HC방법을 적용하는 절차는 다음과 같다.

- Step 1: 각 센터들의 개설 여부 결정을 랜덤하게 발생시킨다.
- Step 2: 개설된 각 센터들의 운송비용, 처리비용, 고정비용의 합( $V_c$ )을 계산한다.
- Step 3: Step 1에서 개설된 센터들 중에서 하나의 센터를 랜덤하게 선정하고,



선정된 센터의 주위(NeighborhoodSize)에 다시 랜덤하게 하나의 센터를 선정한다.

Step 4: Step 3에서 새롭게 선정된 센터를 포함하여 전체 개설된 센터들의 운송 비용, 처리비용, 고정비용의 합( $V_n$ )을 계산한다.

Step 5:  $V_c$ 와  $V_n$ 를 비교해 가장 우수한 해를 저장시킨다.

Step 6: 사전에 설정된 최대반복수까지 도달하지 않을 경우 Step 3로 돌아가서 다시 반복한다. 만일 최대반복수에 도달하면 모든 절차를 종료한다.

## 2. 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing)

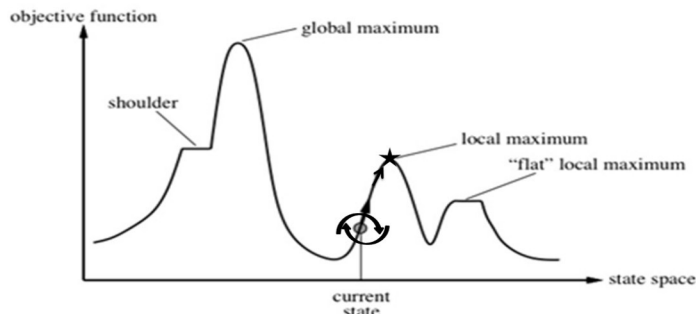
시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing: SA)은 금속에 열을 가하고 이를 냉각시키는 속도를 서서히 조절하는 방법(Controlled cooling)으로 금속을 단련시키는 과정을 묘사한 탐색기법이다. SA는 탐색 초기에 하나의 출발점으로 부터 시작하여 T 값을 점차적으로 감소시켜 해의 개선을 시도하는 방법으로 HC와 비슷하게 초기에 T 값을 어떻게 설정하느냐에 따라 전역적최적해 혹은 지역적최적해를 구할 수 있다.

Kirkpatrick et al. (1983)등에 의해 제안된 SA는 기존의 반복적 개선에 근거한 발견적 기법(heuristic methods)들이 지역적 최소점(local optimum point)에 빠져버리는 단점을 개선한 비용의 최적화 기법으로 현재까지 많은 분야에서 적용 및 응용되고 있다 (Laarhoven et al. 1992; Hwang 1988; Aarts and Korst, 1989).

SA는 두 개의 반복루프를 가지고 있는데 초기 값들이 설정된 후 외부루프에서 우선 T 를 고정시키고 내부루프에서 적절한 방법으로 현재의 해와 근접한 새로운 해를 만들어서 새로운 해의 목적함수의 값이 현재 해의 그것보다 작으면 새로운 해를 현재해로 받아들이고, 그렇지 않는 경우에는 기각하지 않고 적절한 확률로 열등한 해를 현재해로 받아들이는 과정을 반복한다. 그 후 외부루프에서 T 를 점차적으로 낮추고 다시 내부루프의 과정을 반복하게 된다 (김여근 1997).

SA의 탐색구조는 HC의 탐색구조와 비교하여 해의 개선이 두 번에 걸쳐 이루

어 진다는 특징 때문에 HC보다 전역적최적해를 찾을 수 있는 확률은 높아지지만 그 실행속도는 HC보다 느리다는 단점이 있다. SA의 개략적 탐색구조는 <그림 3-3>과 같으며, 구체적인 탐색절차는 <그림 3-4>와 같다.



<그림 3-3>SA의 개략적 탐색구조

```

Input: Numberofiteration1, MaxiumumNumberOfIteration1,
          Numberofiteration2, MaxiumumNumberOfIteration2, T,
Output:  $V_c$ 
Begin
  Initialize MaxiumumNumberOfIterations1,
             MaxiumumNumberOfIterations2, T
  Numberofiteration1 = 0
  Numberofiteration2 = 0
  Randomly generate a current solution  $V_c$ 
  Do While Numberofiteration1 < MaxiumumNumberOfIteration1
    Do While Numberofiteration2 < MaxiumumNumberOfIteration2
      Randomly generate a new solution  $V_n$  in NeighborhoodSize of  $V_c$ ;
      Evaluate  $V_n$  ;
      If  $V_c < V_n$ 
        then  $V_c = V_n$ 
        else randomly generate  $x$  in range  $[0,1]$ 
          If  $x < e^{\frac{eval(v_n) - eval(v_c)}{T}}$ 
            then  $V_c = V_n$ 
          End if
        Endif
      Numberofiteration2 = NumberOfIteration2+ 1
    Loop
    Update T;
    Numberofiteration1 = NumberOfIteration1+ 1
  Loop
  Output  $V_c$ 
End
  
```

<그림 3-4>SA의 구체적 탐색절차

제안된 통합형 공급망 네트워크 모델을 이용해 SA을 적용하는 절차는 다음과 같다.

Step 1: 각 센터들의 개설 여부 결정을 랜덤하게 발생한다.

Step 2: 개설된 각 센터들의 운송비용, 처리 비용, 고정비용의 합( $V_c$ )을 계산한다.

Step 3: Step 1에서 개설된 센터들 중에서 하나의 센터를 랜덤하게 선정하고, 선정된 센터의 주위(NeighborhoodSize)에 다시 랜덤하게 하나의 센터를 선정한다.

Step 4: Step 3에서 새롭게 선정된 센터를 포함하여 전체 개설된 센터들의 운송 비용, 처리비용, 고정비용의 합( $V_n$ )을 계산한다.

Step 5:  $V_c$ 와  $V_n$ 를 비교해 가장 우수한 해를 저장시킨다.

Step 6:  $[0,1]$  사이에서 랜덤하게 발생된 값( $x$ )과  $e^{\frac{eval(v_n)-eval(v_c)}{T}}$  의 계산

값을 비교하여  $e^{\frac{eval(v_n)-eval(v_c)}{T}}$  이 우수하면  $V_n$ 을 저장한다.

Step 7:  $T$  값을 업데이트하고 Step 3로 돌아가서 반복한다.

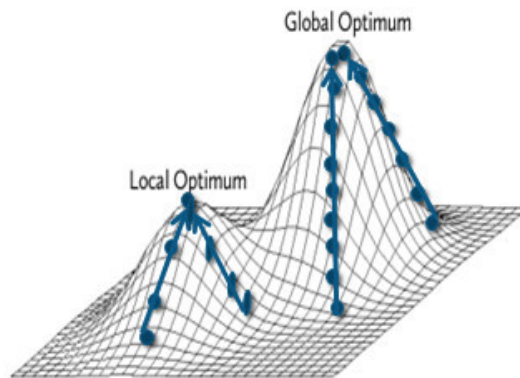
### 3. 유전 알고리즘 (Genetic Algorithm)

유전알고리즘(Genetic Algorithm: GA)은 생물의 진화과정, 즉 자연선택과 유전법칙을 모방한 확률적 탐색기법으로 1975년 홀랜드(Holland)의 논문 “Adaptation in Natural Artificial Systems”에서 처음으로 소개되었다. 그는 자연 시스템의 한 메커니즘으로 생물의 진화과정을 추상화한 인공시스템인 GA를 설계하였다. 그 이후 20년 동안 GA의 이론과 응용에 관하여 활발한 연구가 이루어져 왔다(Cheong and Lai 2000; Gen and Cheng 1997, 2000; Leite 1998, Mak et al 2000)

GA의 가장 큰 특징은 뉴턴법칙과 같은 고전적 최적화기법이나 SA와 같은 이웃해 탐색기법이 하나의 해를 이용하는데 반하여, GA는 복수 개의 잠재해들로 이루어진 해의 집단(population)을 이용한다는 것이다. 이러한 해 집단에 자연선

택과 유전법칙의 메커니즘을 적용하여 세대(generation)를 진행시키면서 해 공간을 탐색해 나간다. 따라서 GA에서는 좋은 해의 응용능력과 해 공간의 탐색능력이 적절히 조화 되어야한다. 따라서 좋은 해의 응용만을 강조하면 조기수렴(Premature Convergence)하여 지역적 최적해에 빠질 수 있고, 해공간의 탐색만을 강조하면 임의 탐색에 가까운 좋은 해를 찾아가지 못하게 된다는 특징이 있다.

GA는 매 세대마다 모집단을 운용함으로써 내재된 병렬성(parallelism)을 갖는 기법이다. (김여근 1997). GA는 그 개념과 이론이 단순하고 해의 탐색성이 우수하여 공학, 자연공학, 분야뿐 아니라 경영학 및 사회과학 등의 여러 분야의 최적화 또는 의사결정 문제에 다양하게 적용 가능하다. 특히 GA는 복잡한 해공간의 탐색성능이 우수하여 변수와 제약이 많은 대형 수리문제를 해결하는 데 적합한 기법이고, 또한 모형에 대한 유연성이 높고 제약조건 추가나 목적함수의 변경이 용이하다는 장점을 가지고 있다 (김여근 1997) GA의 개략적 탐색구조는 <그림 3-5>과 같으며, 구체적인 탐색절차는 <그림 3-6>과 같다.



<그림 3-5> GA의 개략적 탐색구조

```

Input: problem data, GA parameters
Output: a best solution
Begin
   $t \leftarrow 0$  //  $t$ : generation number
  initialize  $P(t)$  ; //  $P(t)$  : population of chromosome
  evaluate  $P(t)$  ;
  While (not termination condition) do
    create  $C(t)$  from  $P(t)$  by crossover operator //  $C(t)$ : offspring
    create  $C(t)$  from  $P(t)$  by mutation operator ;
    evaluate  $C(t)$ 
    select  $P(t+1)$  from  $P(t)$  and  $C(t)$  by selection scheme;
     $t = t + 1$ 
  end
  output a best solution
end
  
```

<그림 3-6> GA의 구체적 탐색절차

제안된 통합형 공급망 네트워크 모델을 이용해 GA를 적용하는 절차는 다음과 같다.

Step 1: 표현법(Representation) 및 초기모집단 (Initial Population) 생성

GA에서 사용하는 표현법에는 0 혹은 1과 같은 특정 정수값을 사용하는 비트 표현법(bit-string representation)과 실수값을 사용하여 유전인자(Gene)를 표현하는 실수표현법(real number representation)이 있다. 본 논문에서는 통합형 공급망 네트워크에서 단계별 센터들의 개설여부에 따라 발생하는 비용을 최적화하는 것이 목적이기 때문에 비용계산을 위한 표현법으로 각 센터 번호를 랜덤하게 발생시키는 방법을 사용한다. 즉 단계별 센터의 개설여부를 센터의 번호로 표현한다. 예를 들면 공급업체 1은 총 4군데 존재하며 그 중의 하나만을 개설해야 한다면, [1,4]의 범위에서 정수값을 랜덤하게 발생시킨다. 만일 발생된 값이 1일 경우에는 공급업체 1은 1번째 센터가 개설된다는 의미이다. 이러한 과정은 <그림 3-7>에 제시되어 있다.

$xs1$	$xs2$	$xm$	$xd$	$xc$	$xe$
1	3	2	1	4	1

<그림 3-7> 본 논문에 사용된 표현법

<그림 3-7>에서 보면 공급업체1(xs1)은 1번째 , 공급업체2(xs2)는 3번째, 제조업체(xm)는 2번째, 물류센터는 1번째, 회복센터(xc)는 4번째, 제분배센터(xe)는 1번째가 개설된다는 것을 알 수 있다. 이러한 표현법을 사용해서 만일 집단의 크기(population size)가 5일 경우 <그림 3-8>과 같은 초기집단을 생성할 수 있다.

$V_1=$	1	3	2	1	4	1
$V_2=$	3	2	1	1	4	1
$V_3=$	2	2	2	1	1	1
$V_4=$	1	1	3	1	4	1
$V_5=$	4	3	2	4	4	1

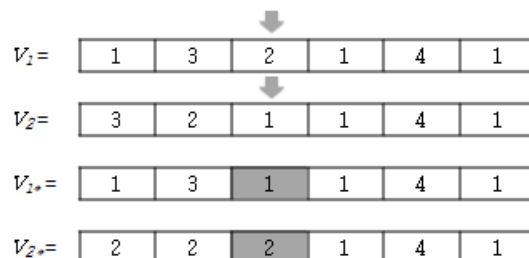
<그림 3-8> 초기모집단 (초기 모집단 크기 = 5)

Step 2: 유전 연산자 (GA operators)

GA에서는 선택(Selection), 교차변이(crossover), 돌연변이(mutation), 적합도 함수 (fitness function) 등 유전연산자가 사용된다. 본 논문에서는 다음과 같은 유전연산자가 사용된다.

Step 2-1: 교차변이(Crossover)

본 논문에서 Michalewicz (1994)가 제안한 일점교차변이(one point crossover:1X) 을 사용한다. 1X는 집단에서 임의로 선택된 두 개의 개체에 대해 한 군데의 유전인자 위치를 랜덤하게 선택한 후 선택된 유전인자의 값을 서로 교환하는 기법이다. 이러한 과정은 <그림 3-9>에 제시되어 있다.

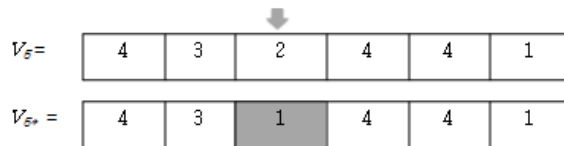


<그림 3-9> 교차변이 과정

<그림 3-9> 교차변이 과정을 자세하게 설명하면 먼저 초기집단 중에서 임의로 두 개의 개체( $V_1, V_2$ )를 선택한다. 선택된 개체들에 대해 랜덤하게 하나를 유전인자(Gene)를 선택하면  $V_1, V_2$  각각에서 세 번째 유전인자가 선택된다. 이렇게 선택된 두 개의 유전인자를 서로 교차함으로써 새로운 개체  $V_{1*}, V_{2*}$ 이 생긴다.

Step 2-2: 돌연변이(Mutation)

본 논문에서는 Gen and Cheng(1997)이 제안한 랜덤돌연변이(random mutation)를 사용하였다. 랜덤돌연변이는 집단 중에서 임의로 하나를 선택해서 그 중에서 하나의 연산자를 선택해 임의로 바꾸어주는 방법이다. 이러한 과정은 <그림 3-10>에 제시되어 있다.



<그림3-10> 돌연변이 과정

<그림 3-10> 돌연변이 과정을 설명하면 집단 중에서 랜덤하게 한 개의 개체 ( $V_5$ )를 선택한다. 선택된 개체에 대해 랜덤하게 하나를 유전인자(Gene)를 랜덤하게 선택하면 3번째 유전인자가 선택된다. 이렇게 선택된 유전인자의 값을 다시 랜덤하게 발생시키면 1번의 유전인자가 선택되어 결국  $V_{5*}$  와 같은 새로운 개체가 생성된다.

Step 2-3: 선택(Selection)

본 논문에서 Gen and Cheng(1997)이 제안한 엘리트선택전략(elitist strategy in enlarged sampling space)을 사용했다. 이 방법은 교차변이와 돌연변이 과정이 끝난 다음에 새로 생성된 집단과 초기집단 모두의 적합도 평가(계산된 비용)를 통해 우수한 개체 순서로 분류한 후 집단크기 만큼 개체를 다시 선택하여 다음 세대를 구성하는 방법이다.

Step 2-4: 적합도 검사

적합도란 새롭게 생성된 모든 개체에 대해 설정된 제약조건을 만족하는 조건 하에서의 목적함수(총비용)를 말한다. 본 연구에서는 수식 (1)의 목적함수 값을 구하는 방법으로 적합도 함수를 사용한다.

Step 3: 종료조건(Termination condition)

만일 사전에 설정된 최대세대수에 도달하거나 혹은 사전에 알려진 전역적 최적해를 발견할 경우 종료한다. 그렇지 않을 경우에는 Step 2로 간다.



## IV. 수치 실험

수치실험에서는 본 연구에서 제시한 통합형 공급망 네트워크 모델을 이용하여 HC, SA, GA 접근법의 수행도를 비교, 분석한다. 먼저 다양한 비교분석을 위해 <표 4-1>과 같은 다섯 가지 형태의 통합형 공급망 네트워크 모델을 사용한다.

<표 4-1> 수치실험을 위한 통합형 공급망 네트워크 모델

Type	Suppliers		Manufacturers	Distribution Center	Retailer = customer	Collection Center	Recovery Center	Second Market	Waste Disposal Center
	1	2							
1	2	2	3	2	3	2	2	3	1
2	4	4	4	3	5	3	3	5	1
3	6	6	6	4	10	6	4	10	2
4	12	12	12	8	20	12	8	20	4
5	15	15	15	10	20	15	10	20	4

<표 4-1>에 제시한 다양한 규모의 통합형 공급망 네트워크 모델의 이행을 위해서 필요한 고정비용, 처리비용, 수송비용의 구체적인 자료는 <부록 1>에서 <부록 11>까지에 제시되어 있다.

비교 분석을 위해 사용되는 HC, SA, GA 접근법의 파라미터 설정은 다음과 같다. 먼저 HC에서는 전체 반복수(Total Number of Iteration) 1000회, 이웃탐색 크기 (Neighborhood Size) 200으로 설정하였고, SA에서는 전체 반복수 1000회, T값 100으로 설정했다. GA에서는 전체 세대수(Total Number of Generation) 1000회, 집단크기(Population Size) 50개, 교차변이율(Crossover Rate) 0.5, 돌연변이율(Mutation Rate) 0.2로 설정하였다.

컴퓨터 사용환경은 IBM 호환 PC 1.3 GHz Processor (인텔 Core i5-1600 CPU), 4GB RAM이다. 제시된 HC, SA, GA 접근법은 Matlab Version R2014a을 이용해 프로그래밍되었다. 또한 실험결과의 비교기준을 제시하기 위해 상업용 프로그램인 LINGO (2016)를 함께 이용하였다. 적용된 각 접근법의 비교를 위해 <표 4-2>에서 제시한 수행도 척도를 사용하였다.

<표 4-2> 비교분석을 위한 수행도 척도

Measure	Description
Best Solution	Best solution among all solutions
Average Solution	Average solution of all solutions
Worst Solution	Worst solution among all solutions
Average Iteration	Average number of iteration
CPU Time	Average CPU Time (unit: sec.)
NGS	Average number of getting stuck at local optimal solutions
Best Setting	Component number opened in each stage when best solution is located

<표 4-1>에서 제시한 Type 1의 통합형 공급망 네트워크 모델을 이용해 HC, SA, GA, LINGO의 수행도를 측정하였으며, 이를 <표 4-2>에서 제시한 수행도 척도에 따라 분류하면 <표 4-3>과 같다.

<표 4-3> Type 1을 이용한 HC, SA, GA, LINGO의 수행도 결과

Measure	Type 1			
	HC	SA	GA	LINGO
Best Solution	19,685	19,685	19,685	19,685*
Average Solution	19,685	19,685	19,685	-
Worst Solution	19,685	19,685	19,685	-
Average Iteration	86	26	1	-
CPU Time(Sec.)	1.3	1.3	2.3	0.1
NGS	0	0	0	-
Best Setting	XS1	2	2	2
	XS2	2	2	2
	XM	1	1	1
	XD	1	1	1
	XC	1	1	1
	XE	1	1	1

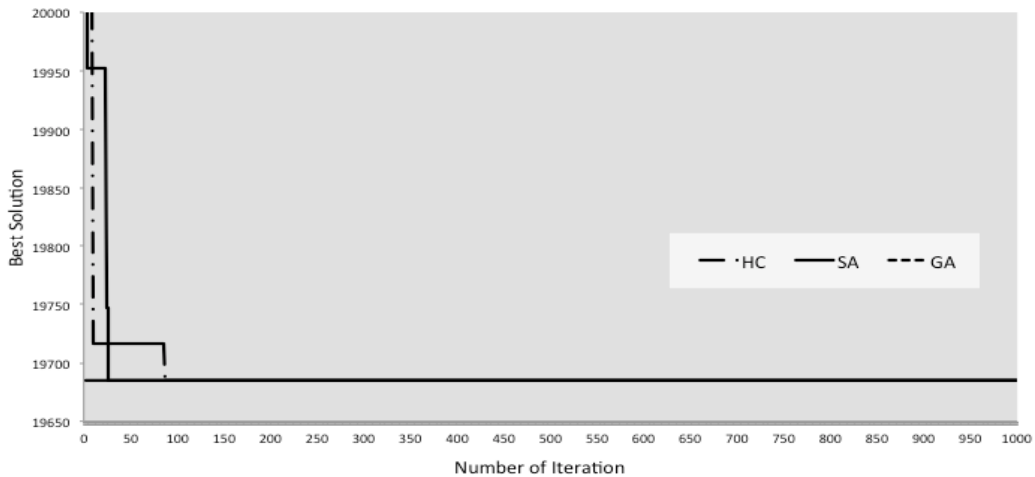
\* 전역적 최적해

<표 4-3>에서 보듯이 Type 1의 전역적 최적해는 LINGO의 실행결과에 의해

19,685 라는 것을 알 수 있으며. 사용된 모든 접근법(HC, SA, GA)이 동일한 전역적 최적해를 구하였다. 또한 Average Solution과 Worst Solution에서도 HC, SA 와 GA 모두 동일한 결과(19,685)를 도출하였다. 이러한 결과는 NGS의 분석에서도 알 수 있다. 즉 HC, SA와 GA는 전체 30회의 반복실행에서 단 한번의 실수도 없이 모든 실행에서 전역적 최적해를 구하였다.

하지만 Average Iteration을 이용한 분석에서는 GA가 가장 빠른 결과를 보이고 있으며, HC가 가장 느린 결과를 보이고 있다. CPU Time에서는 LINGO의 결과가 가장 우수하며, 나머지 HC, SA, GA의 결과는 거의 비슷하다. Best Setting의 경우 LINGO를 포함하여 사용된 모든 접근법 (HC, SA, GA)이 동일한 결과를 나타내고 있다. 이것은 모든 접근법들이 전역적 최적해를 구했기 때문이다.

<표 4-3>의 결과를 좀 더 상세히 분석하기 위해 HC, SA, GA의 수렴과정을 <그림 4-1>에 제시하였다. <그림 4-1>에서는 HC, SA, GA 모두 1,000번 반복 실행하는 과정 동안의 해의 수렴현상을 보여주고 있다.



<그림 4-1> Type 1을 이용한 HC, SA, GA의 수렴과정

<그림 4-1>에서 알 수 있듯이 초기 수렴과정 동안에 HC, SA, GA 모두는 다양하고 빠른 수렴현상을 보이고 있으며, GA는 1세대 이후, HC는 약 100회 반복 이후, SA는 약 25회 반복 이후에 전역적최적해에 수렴하는 것을 알 수 있다.

이상의 비교분석결과를 살펴보면 Type 1의 경우 비교대상인 모든 접근법(HC, SA, GA)이 전역적최적해를 구하였지만 Average Iteration 척도에서 GA, SA, HC 순서로 우수한 접근법이라는 것을 알 수 있다.

<표 4-1>에서 제시한 Type 2의 통합형 공급망 네트워크 모델을 이용해 HC, SA, GA, LINGO의 수행도를 측정하였으며, 이를 <표 4-2>에서 제시한 수행도 척도에 따라 분류하면 <표 4-4>과 같다.

<표 4-4> Type 2을 이용한 HC, SA, GA, Lingo의 수행도 결과

Measure	Type 2			
	HC	SA	GA	LINGO
Best Solution	20,117	20,117	20,117	20,117*
Average Solution	20,137	20,131	20,126	-
Worst Solution	20,176	20,226	20,154	-
Average Iteration	855	830	11	-
CPU Time (Sec.)	1.3	1.4	2.3	0.1
NGS	18	18	2	-
Best Setting				
XS1	2	2	2	2
XS2	3	3	3	3
XM	1	1	1	1
XD	1	1	1	1
XC	1	1	1	1
XE	3	3	3	3

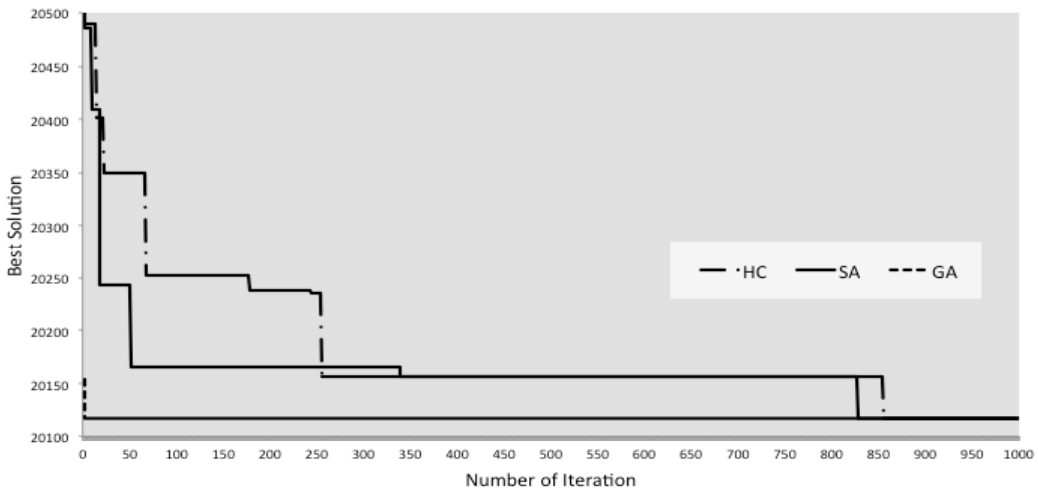
\* 전역적 최적해

<표 4-4>를 살펴보면, LINGO의 결과에 의해 전역 적최적해는 20,117이다. 이러한 전역적 최적해는 HC, SA, GA 접근법을 통해서도 동일한 결과를 얻었다. 하지만 Average Solution의 결과를 보면 GA가 가장 우수하고 HC가 가장 열등한 해를 구하였다. Worst Solution의 결과에서도 GA와 HC가 SA보다는 약간 더 우수한 결과를 보이고 있다. Average Iteration의 결과에서는 HC, SA보다는 GA가 월등히 우수한 결과를 보이고 있으며, 각 접근법의 실행속도를 제시한 CPU Time의 결과에서는 LINGO가 가장 빠르고, 나머지 HC, SA, GA는 거의 비슷한 결과를 보이고 있다. 가장 큰 차이를 보이고 있는 수행도 척도는 NGS이다. 즉 NGS에서 GA는 총 반복수 30회 중에서 단지 2회만 지역적 최적해에 빠졌으며, 나머지 28회는 전역적 최적해

를 찾을 것을 알 수 있다. 하지만 HC와 SA의 경우에는 18회 지역적 최적해에 빠졌으며, 단지 12회만 전역적 최적해를 구한 것을 알 수 있다. Best Setting의 경우 LINGO를 포함하여 사용된 모든 접근법 (HC, SA, GA)이 동일한 결과를 나타내고 있다. 이것은 모든 접근법들이 전역적 최적해를 1회 이상은 구했기 때문이다.

<표 4-4>의 결과를 좀 더 상세히 분석하기 위해 HC, SA, GA의 수렴과정을 <그림 4-2>에 제시하였다.

<그림 4-2> Type 2을 이용한 HC, SA, GA의 수렴과정



<그림 4-2>에서 HC는 약 250회의 반복수행 동안 빠른 수렴현상을 보이고 있으며, 그 이후의 수렴과정 동안에는 별다른 수렴현상을 보이지 않다가 약 850회에 약간의 수렴현상을 보인 후 전역적 최적해에 수렴하는 것을 알 수 있다. SA의 경우에는 약 50회의 반복수행 동안에 빠른 수렴현상을 보이고 있으며, 그 후에는 별다른 수렴현상을 보이지 않다가 약 820회 반복에서 전역적 최적해로 수렴하는 것을 알 수 있다. 하지만 GA의 경우에는 초기 반복 수행 동안에 빠르게 전역적 최적해로 수렴되는 것을 알 수 있다.

이상의 비교 분석결과를 살펴보면 Type 2의 경우 비교 대상인 모든 접근법(HC, SA, GA)이 전역적 최적해를 구하였다. 또한 NGS를 제외한 모든 수행도 척도에서는

서로 약간의 차이는 있지만 그 우수성을 입증할 만한 차이점은 발견할 수 없었다. 하지만 NGS 측면에서 보면 GA 접근법이 HC와 SA 접근법보다 상당히 우수하다는 것을 알 수 있다.

<표 4-1>에서 제시한 Type 3의 통합형 공급망 네트워크 모델을 이용해 HC, SA, GA, LINGO의 수행도를 측정하였으며, 이를 <표 4-2>에서 제시한 수행도 척도에 따라 분류하면 <표 4-5>과 같다.

<표 4-5> Type 3을 이용한 HC, SA, GA, LINGO의 수행도 결과

Measure	Type 3			
	HC	SA	GA	LINGO
Best Solution	19,941	19,880	19,880	19,880
Average Solution	20,032	20,070	19,896	-
Worst Solution	20,154	20,235	20,064	-
Average Iteration	1,000	382	2	-
CPU Time (Sec.)	1.3	1.4	2.3	0.15
NGS	30	29	20	-
Best Setting				
XS1	4	1	1	1
XS2	1	1	1	1
XM	3	3	3	3
XD	4	4	4	4
XC	4	2	2	2
XE	2	2	2	2

\* 전역적 최적해

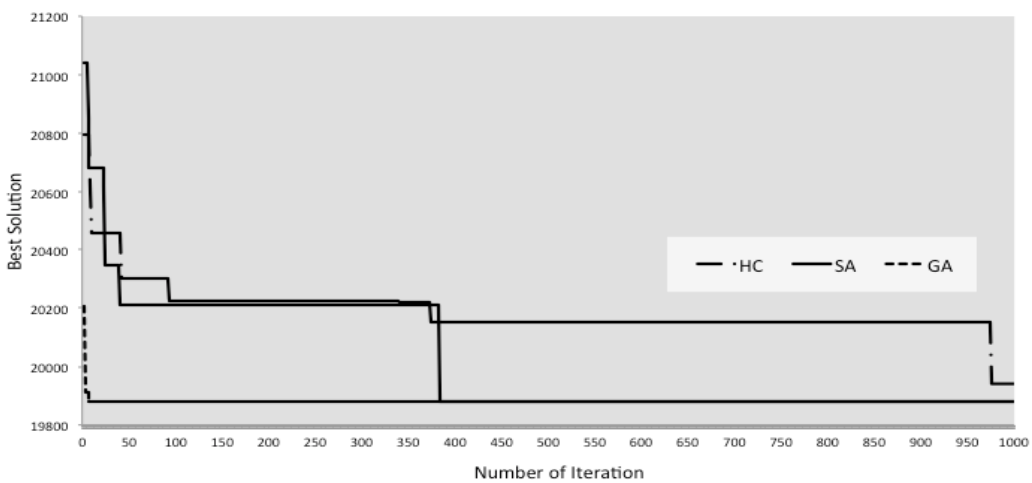
<표 4-5>의 결과를 분석해 보면, 전역적 최적해는 19,880이며, LINGO를 포함하여 SA, GA 접근법이 동일한 전역적 최적해를 구하였지만, HC의 경우에는 전역적 최적해를 구하지 못한 것을 알 수 있다. Average Solution에서는 GA가 가장 우수하고 SA가 가장 열등하다. Worst Solution에서도 Average Solution의 분석과 마찬가지로 GA가 가장 우수하고 HC가 가장 열등하다. 하지만 Average Solution, Worst Solution에서 이러한 각 접근법들의 수행도 차이는 크지 않다는 것을 알 수 있다. Average Iteration에서는 각 접근법들의 차이가 확실히 구분된다. 즉 GA가 가장 우수하며, SA, HC 순서로 열등하다. 특히 HC의 경우 그 수행도 값이 1,000이라는 것은 총 30회의 반복실행에서 단 한 번도 전역적 최적

해를 구하지 못한 것을 알 수 있다. 또한 이러한 차이는 각 접근법들 간에 상당히 큰 것을 알 수 있다.

CPU Time에서는 HC, SA, GA 모두 약간의 차이는 있지만 거의 비슷한 결과를 보이고 있다. NGS의 분석결과에서는 HC의 결과가 30이라는 것은 Average Iteration의 분석에서도 언급하였듯이 총 30회 반복실행에서 단 한 번도 전역적 최적해를 발견하지 못한 것을 의미한다. 하지만 SA의 경우에는 1회, GA의 경우 10회 동안 전역적 최적해를 발견한 것을 알 수 있다. Best Setting의 경우 LINGO를 포함하여 SA, GA가 동일한 결과를 나타내고 있다. 이것은 모든 접근법들이 전역적 최적해를 1회 이상은 구했기 때문이다. 하지만 HC의 경우 총 30회 반복실행 동안 단 한 번도 전역적 최적해를 구하지 못하였기 때문에 LINGO, SA, GA와는 다른 결과를 보여주고 있다.

<표 4-5>의 결과를 좀 더 상세히 분석하기 위해 HC, SA, GA의 수렴과정을 <그림 4-3>에 제시하였다.

<그림 4-3> Type 3을 이용한 HC, SA, GA의 수렴과정



<그림 4-3>에서 HC의 경우에는 초기 반복에서 약 50회까지 급격한 수렴현상을 보이고 있지만 그 이후의 반복수행 동안에는 별 다른 수렴현상을 보이고 있지 않았다. 다만 약 100회, 380회, 정도에서 약간의 수렴현상을 보여주었지만 결국 전역적 최적해는 찾지 못하고 있다. SA의 경우에는 초기 반복에서 약 30회까지는 급격하고

단계적인 수렴현상을 보이고 있지만 그 이후의 반복수행 동안에는 별 다른 수렴 현상을 보이고 있지 않고 있다. 하지만 결국 약 380회 정도에서 전역적 최적해를 찾는 것을 알 수 있다. 반면 GA의 경우에는 초기 반복에서 바로 전역적 최적해를 찾는 것을 알 수 있다.

이상의 비교 분석 결과를 살펴보면 Type 3의 경우 비교대상인 SA, GA 접근법만이 전역적 최적해를 구하였고, HC의 경우에는 전역적 최적해를 구하지 못한 것을 알 수 있다. 또한 비록 NGS에서 SA와 GA가 여러번 지역적 최적해에 빠지는 결과(SA는 총 29회, GA는 총 20회)를 보여주었지만, 몇 번의 경우에는 전역적 최적해를 구하였기 때문에 전체적으로 보면, SA와 GA 접근법이 HC 접근법 보다 더 우수한 접근법이라는 것을 알 수 있다.

<표 4-1>에서 제시한 Type 4의 통합형 공급망 네트워크 모델을 이용해 HC, SA, GA, LINGO의 수행도를 측정하였으며, 이를 <표 4-2>에서 제시한 수행도 척도에 따라 분류하면 <표 4-6>과 같다.

<표 4-6> Type 4을 이용한 HC, SA, GA, LINGO의 수행도 결과

Measure	Type 4				
	HC	SA	GA	LINGO	
Best Solution	19,903	19,984	19,873	19,873*	
Average Solution	20,185	20,216	19,913	-	
Worst Solution	20,379	20,352	20,121	-	
Average Iteration	1,000	1,000	15	-	
CPU Time (Sec.)	1.4	1.5	2.6	0.15	
NGS	30	30	16	-	
Best Setting					
	XS1	1	4	1	1
	XS2	3	1	6	6
	XM	8	8	3	3
	XD	4	4	4	4
	XC	6	4	6	6
	XE	5	2	5	5

\* 전역적 최적해

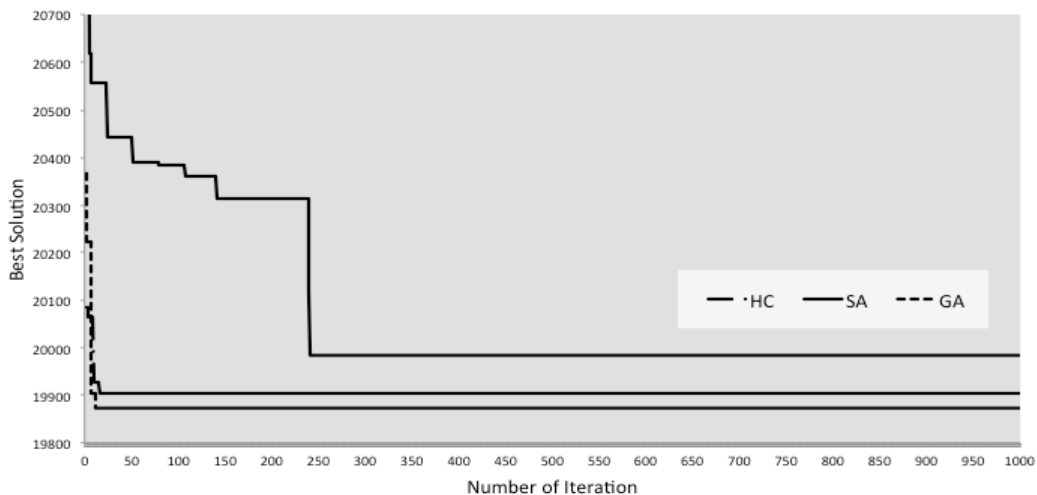
<표 4-6>의 결과를 분석해 보면, LINGO에 의한 전역적최적해는 19,873 이며, 오직 GA 만이 전역적 최적해를 찾을 수 있었고, SA, HC는 단 한 번도 전역적



최적해를 찾지 못한 것을 Best solution, Average Iteration, NGS를 통해 알 수 있다. 이러한 결과는 Average Solution, Worst Solution의 결과에도 영향을 미친다. 즉 GA의 수행도가 비교대상인 HC, SA보다 Average Solution, Worst Solution에서 더 우수한 결과를 보여주고 있는 것을 알 수 있다. 다만 평균 실행 속도를 측정하는 CPU Time의 경우에는 HC, SA가 GA 보다 약간 더 빠른 것을 알 수 있다. 이것은 비록 HC, SA가 전역적 최적해를 찾지 못하여 총 반복수 1,000회까지 탐색을 진행하였지만 그 탐색구조가 GA보다는 단순하기 때문인 것으로 분석된다. Best Setting에서는 전역적최적해를 구한 LINGO의 결과와 GA의 결과가 동일하지만, 전역적 최적해를 구하지 못한 HC, SA는 상이한 결과를 도출한 것을 알 수 있다.

<표 4-6>의 결과를 좀 더 상세히 분석하기 위해 HC, SA, GA의 수렴과정을 <그림 4-4>에 제시하였다.

<그림 4-4> Type 4을 이용한 HC, SA, GA의 수렴과정



<그림 4-4>에서 HC는 초기반복수행과정 동안에 급격한 수렴현상을 보이고 있으며, 그 이후 반복과정 동안에는 더 이상의 해의 개선은 보여주지 못하고 있다. 결국 전역적 최적해를 찾는 데는 실패했다. SA의 경우에는 HC와 마찬가지로 초기반복 약 100회 동안에 급격한 수렴현상을 보이고 있으며, 그 이후 약 250회

정도에서 또 한 번의 수렴현상을 보인 후 더 이상의 해의 개선은 이루어지지 않고 있는 것을 알 수 있다. 결국 HC와 마찬가지로 전역적 최적해를 찾는 데는 실패했다. 하지만 GA는 초기반복수행 과정동안에 급격한 수렴현상을 보인 후 빠르게 전역적 최적해를 찾는 것을 알 수 있다.

이상의 비교분석결과를 살펴보면 Type 4의 경우 비교대상인 GA 접근법만이 전역적 최적해를 구하였고 HC와 SA의 경우에는 단 한번도 전역적 최적해를 구하지 못한 것을 알 수 있다. 또한 비록 CPU Time에서 HC와 SA가 GA 보다 더 빠른 수행도를 보여주었지만 전역적 최적해를 찾는 것이 본 연구의 주된 목적이기 때문에 이러한 측면을 고려한다면 GA 접근법이 HC, SA 접근법보다는 더 우수한 접근법이라는 것을 알 수 있다.

<표 4-1>에서 제시한 Type 5의 통합형 공급망 네트워크 모델을 이용해 HC, SA, GA, LINGO의 수행도를 측정하였으며, 이를 <표 4-2>에서 제시한 수행도 척도에 따라 분류하면 <표 4-7>과 같다.

<표 4-7> Type 5을 이용한 HC, SA, GA, LINGO의 수행도 결과

Measure	Type 5				
	HC	SA	GA	LINGO	
Best Solution	20,544	20,417	20,339	20,339*	
Average Solution	20,703	20,525	20,430	-	
Worst Solution	20,913	20,656	20,684	-	
Average Iteration	1,000	1,000	19	-	
CPU Time	1.3	1.5	2.5	0.2	
NGS	30	30	25		
Best Setting					
	XS1	14	1	1	1
	XS2	4	14	14	14
	XM	8	8	3	3
	XD	4	4	4	4
	XC	6	6	6	6
	XE	5	2	5	5

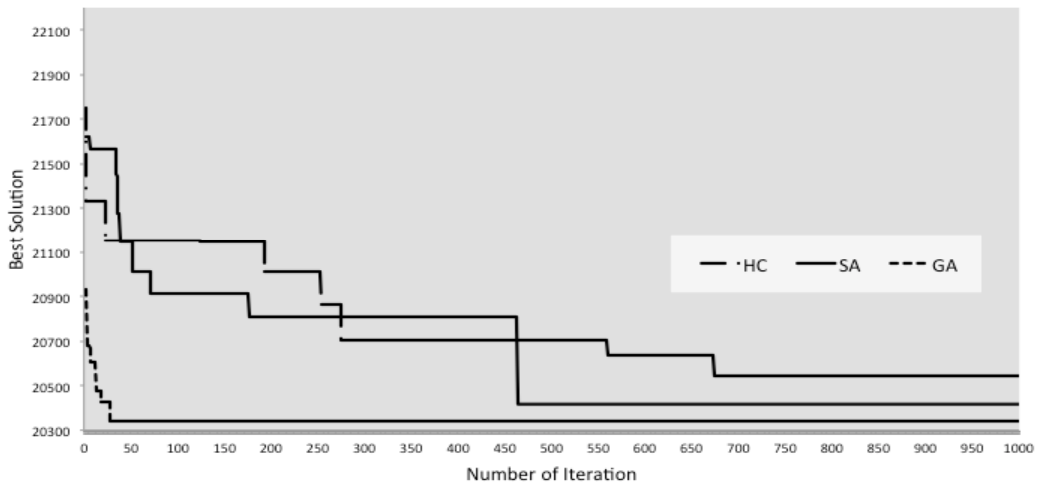
\* Global optimal solution

<표 4-7>에서는 <표 4-6>의 결과와 마찬가지로 LINGO의 결과인 전역적 최적해 20,339를 GA만 구하였고, 나머지 HC, SA의 경우에는 각각 20,544,

20,417으로 지역적 최적해를 구하여 단 한 번도 전역적 최적해를 구하지 못한 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 Average Iteration, NGS의 결과에서도 확인할 수 있다. 즉 Average Iteration에서 HC, SA가 모두 1,000을 가지고 NGS에서 30을 가진다는 것은 총 30회 반복수행 동안 단 한 번도 전역적 최적해를 찾지 못한다는 것을 의미한다.

하지만 GA는 NGS에서 총 30회 반복동안 15회는 전역적 최적해를 찾았다는 것을 알 수 있다. 하지만 <표 4-6>의 결과분석과 마찬가지로 CPU Time의 경우에는 HC, SA가 GA보다 약 두 배 정도 더 빠른 수행도를 보여주었다. 이것은 <표 4-6>의 분석에서도 언급하였듯이 HC, SA가 GA 보다 탐색구조가 더 간단한 데에서 기인한다. Best Solution에서 전역적 최적해를 찾은 GA와 LINGO는 Best Setting에서 동일한 결과를 보여주지만 전역적 최적해를 단 한 번도 찾지 못한 HC, SA는 상이한 결과를 보여주고 있는 것을 알 수 있다.

<표 4-7>의 결과를 좀 더 상세히 분석하기 위해 HC, SA, GA의 수렴과정을 <그림 4-5>에 제시하였다.

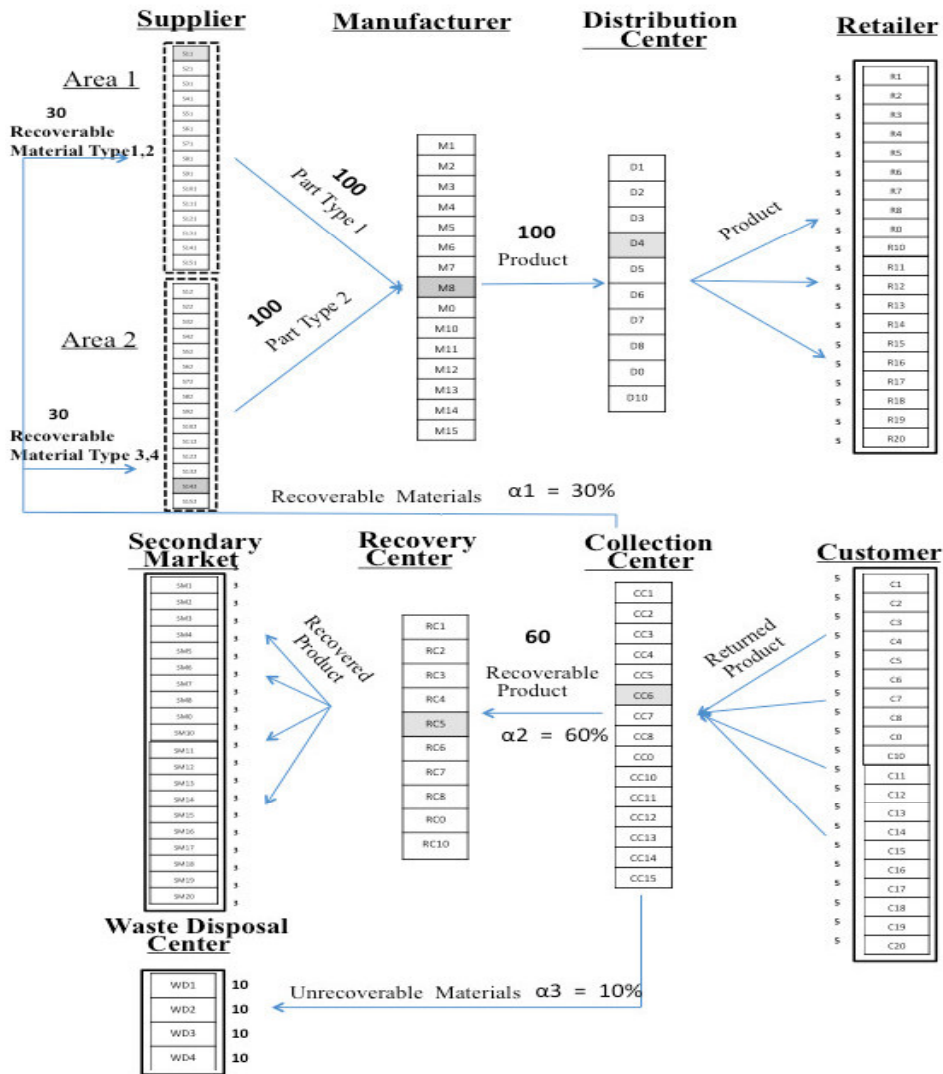


<그림 4-5> Type 5을 이용한 HC, SA, GA의 수렴과정

<그림 4-5>에서 HC와 SA는 초기 반복수행 과정에서 급격한 수렴현상을 보이고 있으며, 그 이후 전 반복수행 기간 동안 약간의 단계적 수렴현상을 보였지만 결국 전역적 최적해를 찾는 데는 실패했다. 하지만 GA의 경우에는 약 50회까

지의 반복수행 동안에 급격한 수렴현상을 보인 후 바로 전역적 최적해를 찾는 것을 알 수 있다.

<그림 4-6>은 Type 5에서 각 단계별 공급업체, 제조업체, 물류센터, 수집센터, 회복센터, 재분배센터의 개설여부를 보여주고 있다.



<그림 4-6> Type 5에서 각 단계별 개설여부 및 물류 상태

<그림 4-6>를 살펴보면, 공급업체 Area 1에서 Material Type 1, 2를 이용하여 Part Type 1을 100개 생산하고, Area 2에서 Material Type 3, 4를 이용하여 Part Type 2을 100개 생산한다. 이렇게 생산된 Material Type 1, 2, Material Type 3, 4 각 100개는 다음단계인 제조업체로 보내어져 100개의 제품을 만들게 된다. 이를 물류센터를 거쳐 총 20개의 소매점에 각각 5개씩의 제품을 배송하게 된다. 배송된 각 5개의 제품들은 해당 지역의 고객에서 판매되며, 고객으로부터 수집되는 사용 후 제품들은 전량 수집센터로 수집된다.

수집센터에서는 이를 검사, 분류하여 재사용가능 제품(전체 사용 후 제품의 60%) 60개는 회복센터를 거쳐 2차시장을 통해 재판매 되도록 하였으며, 재사용 불가능 제품은 분해하여 재사용 가능 원자재와 재사용 불가능 원자재로 구분한다. 재사용 가능 원자재(전체 사용 후 제품의 30%) 30개는 Recoverable Material Type 1, 2 각 30개, Recoverable Material Type 3, 4 각 30개로 분류하여 Area 1과 Area 2로 보내서 재사용 되도록 하였다. 재사용 불가능 원자재 (전체 사용 후 제품의 10%) 10개를 폐기센터로 보내져 폐기되도록 하였다.

이상의 비교분석 결과를 살펴보면, <표 4-6>의 Type 4 분석에서와 마찬가지로 Type 5의 경우에도 비교대상인 GA 접근법만이 전역적 최적해를 구하였고 HC와 SA의 경우에는 단 한번도 전역적 최적해를 구하지 못한 것을 알 수 있다. 또한 비록 CPU Time에서 HC와 SA가 GA 보다 약 두배 정도 더 빠른 수행도를 보여주었지만 전역적 최적해를 찾는 것이 본 연구의 주된 목적이기 때문에 이러한 측면을 고려한다면 GA 접근법이 HC, SA 접근법 보다는 더 우수한 접근법이라는 것을 알 수 있다.

이상에서 총 5가지 형태의 통합형 공급망 네트워크 모델을 제시하였으며, 이를 이용해 LINGO를 비교기준으로 정한 다음 HC, SA, GA 접근법의 수행도를 각각 비교분석하였다. 비교분석 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 실행속도 측면에서 보면, 통합형 공급망 네트워크 모델 사이즈가 비교적 작은 Type 1, 2, 3에서는 비교대상인 HC, SA, GA 모두가 비슷한 결과를 보이는 것을 알 수 있다. 하지만 모델 사이즈가 비교적 큰 Type 4, 5에서는 GA가 HC, SA보다 약간 느린 수행도를 보여주었다. 이것은 HC, SA 접근

법이 최적해 탐색시 개별점 (Point to point) 탐색을 실시하여 탐색구조가 비교적 간단하지만 GA 접근법은 집단 (Population) 탐색을 실시하기 때문에 탐색구조가 HC, SA 접근법보다는 복잡하다. 즉 각 접근법의 탐색구조적인 차이 때문에 그 실행속도에서 차이가 나는 것을 알 수 있다. 결국 탐색속도 측면에서 보면 HC, SA 접근법이 GA 접근법 보다는 더 우수하다고 볼 수 있다.

- 2) 전역적 최적해 탐색측면에서 보면, 통합형 공급망 네트워크 모델 사이즈가 비교적 작은 Type 1, 2에서는 비교대상인 HC, SA, GA 모두가 전역적 최적해를 찾는 것을 알 수 있다. 하지만 Type 3에서는 SA와 GA가 전역적 최적해를 찾았고, Type 4, 5에서는 GA만이 전역적 최적해를 찾는 것을 알 수 있다. 결국 모델 사이즈가 커질수록 전역적 최적해를 찾을 경우는 GA만이 유일한 것을 알 수 있다. 결국 Best Solution, Average Solution, Worst Solution등과 같은 다양한 수행도 비교에서도 알 수 있듯이 모델 사이즈가 커질 경우 HC, SA접근법 보다는 GA접근법이 가장 우수한 접근법이라는 것을 알 수 있다.

## IV. 결론

본 연구는 전방향물류(Forward Logistics: FL)와 역물류(Reverse Logistic: RL)를 통합한 통합형 공급망 네트워크 모델을 제시하고 이를 유전 알고리즘 접근방법을 이용해서 해결하고 있다. FL을 위해 두 군데 영역(Area 1, 2)에 존재하는 공급업체(Supplier), 제조업체(Manufacturer), 물류센터(Distribution Center), 소매점(Retailer)를 고려하였으며, RL을 위해 고객(Customer), 수집센터(Collection Center), 회복센터(Recovery Center), 2차시장(Secondary Market), 폐기센터(Waste Disposal Center)를 고려하였다. 이러한 통합형 공급망 네트워크에서 수집된 사용 후 제품의 재사용 및 폐기 여부를 수집센터를 통해 결정하도록 하였다.

즉 수집센터에서는 수집된 사용 후 제품을 재사용 가능 제품(Recoverable Product)과 재사용 불가능 제품(Unrecoverable Product)으로 구분하였고, 재사용 불가능 제품은 다시 분해하여 재사용 가능 원자재(Recoverable Material)와 재사용 불가능 원자재(Unrecoverable Material)로 분류하였다. 재사용 가능 제품은 회복센터를 거쳐 2차시장을 통해 재판매하도록 하였으며, 재사용 가능 원자재는 FL의 공급업체로 보내어 제품생산에 재사용되도록 하였고, 재사용 불가능 원자재는 폐기센터를 통해 폐기되도록 하였다.

본 연구에서 제안된 통합형 공급망 네트워크 모델은 기존 연구들과 다음과 같은 차별성이 있다. 윤영수 (2014)에서는 2차시장을 고려했지만 통합형 공급망 네트워크 모델은 설계한 기존 논문 (Fleischmann, et. al. 1999; Fleischmann et al. 2000; Georgiadis and Besiou, 2008; Wang and Hsu, 2010; Amin and Zhang, 2012, 2013; Jindal and Sangwan, 2013; Chen et al. 2015)에서는 이를 고려하지 않았다. 하지만 본 논문에서 고려된 통합형 공급망 모델은 기존의 통합형 공급망 네트워크 모델의 고려하지 않은 사용 후 제품의 재사용을 위한 2차 시장은 고려하였다는 점이 본 논문의 특징이다. 따라서 본 연구에서 제시한 모델이 좀 더 현실적인 측면을 반영한 것이라고 볼 수 있다.

본 연구에서는 제안된 통합형 공급망 네트워크 모델을 해결하기 위해 단일목적 비선형 혼합정수계획법(Single-objective, Nonlinear Mixed Integer Programming: SNMIP)을 설계하였다. 설계된 SNMIP를 이행하기 위한 방법론으로 등반탐색법(Hill Climbing Method: HC), 시뮬레이트어닐링(Simulated Annealing: SA), 유전알고리즘(Genetic Algorithm: GA) 접근법을 제안하였다.

사례연구에서는 다양한 크기의 통합형 공급망 네트워크 모델을 제시하고 이를 제안된 HC, SA, GA 접근법과 비교기준인 LINGO를 이용해 그 해를 각각 구했으며, 구해진 해들은 다양한 수행도 척도 (Measures of Performance)를 이용해 각 접근법들의 장단점을 파악하였다. 분석결과, 비록 실행속도 측면에서 GA 접근법이 HC, SA 접근법들보다 더 느린 수행도를 보여주었지만, 전역적 최적해 탐색 측면에서는 GA 접근법이 HC, SA 접근법들보다 더 우수한 결과를 나타내었다. 결국 본 연구의 목적이 통합형 공급망 네트워크 모델에 대한 전역적 최적해를 찾는 것이기 때문에 전체적인 수행도 측면에서 보면 GA 접근법이 HC, SA 접근법 보다 더 우수한 접근법이라고 결론 내릴 수 있다.

다만 본 연구는 다음과 같은 측면에서 몇 가지 적용상의 한계를 가지고 있다. 첫째, 제시한 통합형 공급망 네트워크 모델의 사이즈가 현실적인 측면에서 보면 너무 작기 때문에 더 큰 사이즈의 모델을 제시하여 분석해 볼 필요가 있을 것이다. 둘째, 본 연구에서 사용한 데이터는 가상의 환경에서 가공된 데이터(즉 Excel을 이용해 랜덤하게 발생된 데이터)를 사용하였다. 따라서 보다 현실적인 상황을 고려하기 위해서는 현실 상황에서 발생하는 각종 실제 데이터 (예를 들어, 수송비용, 개설비용 등)를 활용할 필요가 있을 것이다. 셋째, 제시된 통합형 공급망 네트워크 모델을 최적화하기 위해 본 연구에서는 HC, SA, GA 접근법만을 이용하여 비교분석을 실시하였다. 따라서 최근에 개발된 새로운 접근법 (예를 들어, Particle Swarm Optimization, Cuckoo Search 등)들을 함께 비교분석해 볼 필요가 있을 것이다. 이상과 같은 적용상의 한계점은 향후 진행할 연구방향이 될 것이다.



## 【참고문헌】

- 김여근, (1997), 메타 휴리스틱, 영지문화사
- Aarts, E. and Korst, J. (1988), Simulated annealing and boltzmann machines, New York, NY; John Wiley and Sons.
- Amin, S. H. and Zhang, G. (2012), An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi-objective approach, *Expert Systems with Applications*, 39: 6782-6791.
- Amin, S. H. and Zhang, G. (2013), A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return, *Applied Mathematical Modelling*, 37: 4165-4176.
- Chen, T. T., Chan, F. T. S. and Chung, S. H. (2015), An integrated closed-loop supply chain model with location allocation problem and product recycling decisions, *International Journal of Production Research*, 53(10): 3120-3140.
- Cheong, F. and Lai, R. (2000), Constraining the optimization of a fuzzy logic controller using an enhanced genetic algorithm, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 30(1): 31-46.
- Debanné, J. G. (1975), A regional techno-economic energy supply-distribution - demand model for North America, *Computers and Operations Research*, 2(3-4): 153-193.
- Fleischmann, M., Krikke, H. R., Dekker, R. & Flapper, S. D. P. (2000), A characterization of logistics networks for product recovery, *Omega*, 28(6): 653-666.
- Gen, M. and Cheng, R. (1997), *Genetic algorithms and engineering design*, John Wiley & Son, New York.
- Gen, M. and Cheng, R. (2000), *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*, John-Wiley & Sons, New York

- Georgiadis P. and Besiou, M. (2008), Sustainability in electrical and electronic equipment closed-loop supply chains: A System Dynamics approach, *Journal of Cleaner Production*, 16: 1665-1678.
- Giannakis, M. and Louis, M. (2011), Readiness assessment of the construction supply chain for concurrent engineering, *European Journal of Purchasing and Supply Management*, 7(2):141-153.
- Hoffmann J. (2002), A Heuristic for Domain Independent Planning and Its Use in an Enforced Hill-Climbing Algorithm, *Foundations of Intelligent Systems Volume 1932 of the series Lecture Notes in Computer Science*, 216-227.
- Holland, J. (1975), *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*, University of Michigan Press.
- Holland, C. P. (1995), Cooperative supply chain management: the impact of inter-organizational information systems, *The Journal of Strategic Information Systems*, 4(2):117-133.
- Hwang, C. R. (1988), *Simulated annealing: theory and applications*, Springer.
- James, D. E. (1974), *Distribution channel considerations*, In *managing product recalls*, edited by McGuire EP, pp. 77-81, The Conference Board, NY.
- Jayaraman, V., Patterson, R. A. and Rolland, E. (2003), The design of reverse distribution networks: models and solution procedures, *European Journal of Operational Research*, 150: 128-149.
- Jindal A. and Sangwan, K. S. (2014) Closed loop supply chain network design and optimization using fuzzy mixed integer linear programming model, *International Journal of Production Research*, 52(14): 4156-4173
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P. (1983). Optimization by

- Simulated Annealing. *Science*, pp. 671-680.
- Laarhoven P. J. M., Aarts E. H. L. and Lenstra J. K. (1992), Job Shop Scheduling by Simulated Annealing, *Operations Research*, pp. 113-125.
- Lee, J. E., Gen, M. and Rhee. K. G. (2009), Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm, *Computers and Industrial Engineering*, 56: 951-964
- Leite, J. P. B. and Topping, B. H. V. (1998), Improved genetic operators for structural engineering optimization, *Advances in Engineering Software*, 29(7-8): 529-562.
- LINGO, 2006, www.lindo.com.
- Mak, K. L., Wong, Y. S. and Wang, X. X. (2000), An adaptive genetic algorithm for manufacturing cell formation, *International Journal of Manufacturing Technology*, 16: 491-497.
- Michalewicz, Z. (1994). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Program*, Springer-Verlag.
- Min, H. (1989), A bicriterion reverse distribution model for product recall, *OMEGA*, 17(5):483-490.
- Min, H., Ko, H. J. and Ko, C. S. (2006), A genetic algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics network for product returns, *OMEGA*, 34:56-69.
- Moon, C., Seo, Y. H., Yun, Y. S. and Gen, M. (2006), Adaptive Genetic Algorithm for Advanced Planning in Manufacturing Supply Chain, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17(4):509-522.
- Morris, R. M. (1980), Feed conversion efficiency and the efficiency of the UK food chain, *Agricultural Systems*, 5(4):267-278.
- Renders, J. M. (1994), Hybridizing genetic algorithms with hill-climbing methods for global optimization: two possible ways, *IEEE World Congress on Computational Intelligence*.

- Rogers, D. S. and Tibben-Lembke, R. S. (1999), *Going backwards: reverse logistics trends and practices*, Pittsburgh, RLEC Press.
- Shena, C. Y. Yua, X. R., Lia, Q. and Lia, H. M. (2004), Gate Location Optimization in Injection Molding By Using Modified Hill-Climbing Algorithm, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 43(3): 649-659
- Srivastava, S. K. (2007), Green supply-chain management: a state-of-the-art literature review, *International Journal of Management Reviews*, 9(1): 53-80.
- Syarif A., Yun, Y. S. and Gen. M. (2002), Study on Multi-Stage Logistic Chain Network: A Spanning Tree Based Genetic Algorithm Approach, *Computers and Industrial Engineering*, 43(1-2): 299-314.
- Wang, H.-F. and Hsu, H.-W. (2010). A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm, *Computers and Operations Research*, 37: 376-389.
- Wang, H., Wang, D. amd Yang, S. (2009) A memetic algorithm with adaptive hill climbing strategy for dynamic optimization problems, *Soft Computing* 13(8): 763-780.
- Yun, Y. S., Gen. M. and Seo, S. L. ,(2003). Various Hybrid Methods Based on Genetic Algorithm with Fuzzy Logic Controller, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 14(3-4): 401-419.
- Yun, Y. S., Chuluunsukh Anudari, (2014).Daily Waste Collection at Local Autonomous Entity: Strategizing Using Reverse Logistics Network, *Journal of International Trade & Commerce* 10(6): 425-444.

**【부록】**

〈부록 1〉 공급업체 1 에서 제조업체간의 단위당 수송비용

S1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	3.4	3.9	1.1	2.1	3.9	1.6	3.8	1.6	1.4	2.9	3.1	2.5	3.2	2.9	2.8
2	1.1	1.9	3.6	1.6	3.6	1	3.2	1.6	1.4	2.2	1.5	3.1	2.6	3.3	2.9
3	1.4	2.1	2.1	1.1	2.8	1.7	3	3.5	2.7	2.5	3.6	1.7	1.6	2.2	2.9
4	1.6	2.4	1.1	3.1	2.7	2.1	1.5	2.4	3.9	1.8	3	1.2	2.9	1.5	1.4
5	3.1	1.4	1.7	2.7	1.7	3.9	2.7	1.9	2.2	3.1	3.2	1.4	2.5	1.4	3
6	1.4	2.9	3.1	3.1	1.9	3	2.7	1.7	2.2	3.4	1.8	3.9	1.5	3.8	1.3
7	2.8	3	2.7	3.8	1.8	3	1.8	2.9	3.3	4	3.6	2.3	3.1	3.1	1.1
8	3.7	1.1	3.2	2.7	1.2	2.8	1.5	1.1	4	1	1.9	1.2	3.6	2.9	2.9
9	2.2	3.3	1.9	2.2	3	1.3	2.6	2.4	3.4	2.8	2.4	3.7	3.3	3	1.7
10	2.6	3.1	1.8	3.9	1.8	2.9	3	3.3	3.6	2.7	3.3	3.7	1.8	1.2	1.6
11	2.4	1.5	1.6	2.1	3.5	1.4	3.1	1.9	3	1.3	1.8	1.3	3.9	2.4	3.4
12	1.8	1	2.3	3.5	3.6	3.1	3.7	2.8	2.3	1.1	2.8	3.5	3.7	2.2	1.3
13	2	1.4	1.5	3	2.5	1.2	2.1	3.8	2.5	1.7	3.9	1.5	3.4	2.1	3.7
14	1.1	2.5	3.6	3	3.8	2.4	1.4	2.2	1.9	3.6	1.6	1	3.6	1.7	3.2
15	1.3	3.3	3	2.2	3.2	3.9	1.7	2.4	1.5	3.5	1.4	1.8	1.9	2.3	1.1

〈부록 2〉 공급업체 2 에서 제조업체간의 단위당 수송비용

S2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2.2	2.5	2.4	1.4	3.5	2	2.9	2	1.8	1.7	1.2	2.7	1.4	2.3	1.7
2	3.7	2.2	3.8	2.8	2.6	1.6	3.6	3	2.7	2.3	2.9	2.1	1.8	2	3.6
3	1.1	3.3	2.8	1.8	3.8	2.3	2.4	1.8	2.2	2.2	1.7	1.9	1.7	2	2.8
4	1.3	2.2	1.9	2.9	3.2	2.9	3.8	2.4	2.7	1.3	2.4	3.1	2	4	2.1
5	1.5	1.3	2.9	3.7	2.2	1.3	2.8	1.7	1.6	2.4	1.1	2.1	1.8	2.8	3
6	2.1	2.2	1.6	3.5	3.7	1.2	3.1	1.3	1.4	1.6	2	2.6	4	3.3	3
7	1.1	2.9	1.5	3.5	3.4	2	2.8	1.1	1.7	1.9	3.2	3	3.6	1.2	1.8
8	3.9	3	1.6	1.2	2.2	3.5	2.8	3	1.6	3.8	3.4	3.8	3.8	1.8	2.3
9	1.7	3	2.5	3	2.4	2.5	1.4	3	2	1.5	2.9	2.9	1.7	1.4	2.3
10	1.8	3.8	3.9	3.4	1.6	3.5	3.8	1.8	3.4	2.5	2.4	3.6	3.1	1.9	3.4
11	1.2	1.8	1.9	3.7	2.1	2.5	1.2	2.5	2.5	2.1	1.6	3.1	3.4	1.4	3.2
12	1.7	1.7	3.2	3.5	2.9	4	2	3.3	3.5	3.4	1.7	1.1	3	3.5	2.7
13	1.5	3.5	3.2	1.5	1.4	2.5	2	1.4	3.8	2.8	2.1	2.1	2.3	2.2	3.1
14	1.3	1.6	1.7	2.1	1.8	1.8	1	1.3	3.5	3	2.5	3.3	1.3	2.7	1.4
15	2.4	3.3	1.9	2.1	2.1	3.8	2.2	2.7	1.5	3	3.9	3.8	3.8	1.5	1.1

<부록 3> 제조업체에서 물류센터까지의 단위당 수송비용

MD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2.3	1.5	1.7	3.2	3.3	3.1	3.3	3	3.5	2.5
2	3.4	2.4	1.9	3.7	2.1	3.3	2.5	2.9	2.1	4
3	3.3	2.6	2.8	1.9	2.7	2	1.4	3	3.6	3.4
4	2.3	1.6	1.3	3.6	1.6	1.2	3.1	3.9	1.9	3.4
5	2.9	2.1	1.6	3.6	1.1	3.6	1.3	2.7	2.8	2.3
6	1.4	1.2	1	1.8	3.2	2.1	2.4	3.6	1.6	2.7
7	3.5	3.5	3.5	2.9	3.2	2.6	1.5	1.3	2.4	1.1
8	3.1	1.3	3.8	1.9	3.8	3.1	1.1	2.5	1.7	2.7
9	2.7	1.8	3.7	2.3	2.5	3.4	1.2	3	1.9	2.9
10	3.9	2.9	2.5	2.6	2.9	1.1	1.9	1.2	1.1	3.3
11	1.6	3.1	2.8	1.3	2.9	3	1.9	1.5	2.4	3.2
12	3.8	3.2	3.9	2.5	2.5	3.6	2.3	1.5	2.3	3.8
13	4	2.4	2.1	1.9	2.9	1.1	3.3	1.3	2.4	2.3
14	1.4	3.7	3.4	3.5	2.3	1.7	2.9	1.5	3.8	3.2
15	3.2	2.6	1.7	1.2	2.5	1.2	1.5	1.3	2.5	3.2

<부록 4> 물류센터에서 소매점까지의 단위당 수송비용

DR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1.8	2	2.6	1.4	1.6	2.9	3	2.2	2.3	2.2	2.4	3.3	2.4	2.2	3.6	3.1	2.4	3.7	1.8	2.4
2	1.8	2.5	2.5	1.4	2.6	2.2	3.5	1.8	1.1	1.7	1.7	3.4	3.8	3.1	3.4	2.4	3	3.9	2.2	3.2
3	1.5	3.5	2.6	1.3	3.2	2	2	1.4	1.1	2.4	3.5	3	2.2	1.2	3.8	3.9	1.3	1	2.9	1.6
4	2.5	2.2	1.7	3.1	1.3	2.5	2.4	1.4	1.1	1.9	2.1	3.9	4	3.4	1.1	3.3	3.6	2.4	1.7	3.2
5	2.3	3.4	1.5	2.9	1.4	1.7	1.6	2.3	3.4	1.3	2.5	2.1	2.9	1.9	1.3	3.3	3.8	1.5	2.1	2.7
6	1.4	3.2	1.6	3.5	3.8	3.9	2.8	2.7	3.3	1.2	2.1	3.8	2.3	2.9	1.6	3.9	1.3	3.7	2.9	1
7	3.3	1.8	1.7	1.8	2.6	1.5	3.2	1.7	1.8	3.3	3.3	1.4	2.8	1.2	1.8	2.6	1.3	1.8	2.7	3.2
8	3.1	1.6	3.7	2.7	1.7	3.4	1.5	3.2	1.7	2.3	3.8	3.7	2.4	2.7	1.4	1.1	2	1.3	2.4	1.5
9	2	3.6	2.5	2.3	3.2	1.1	3.7	3.6	2.2	3	3.7	2.2	2.7	2.8	3	3.9	2.6	2.5	2.1	3.2
10	1.3	3.5	3.6	3.6	3.2	3.5	3.3	2	3.1	3.6	1.8	2.5	1.2	1.8	1.3	3	3.7	2.4	1.5	2.9

<부록 5> 고객에서 수집센터까지의 단위당 수송비용

CC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	3	3	1.8	3.8	1	2.1	2.7	3.4	2.2	2.5	1.3	1.4	2	2.5	2.7
2	1.6	2.6	2.9	2.6	1.6	2.1	2.5	2.5	2.9	2.3	3	2.6	1.1	3.5	2.6
3	1.6	3.8	3.6	3.8	3.3	2	3.7	1.5	3.2	2.5	2.1	2.2	1.6	1.9	3.8
4	2.1	1.6	3.9	2.7	3.7	1.9	3.6	3.4	2.9	2.2	3.2	2.5	1.1	2.1	2.2
5	2.1	1.9	1.7	1.5	1.8	2.7	2.7	1.4	1.3	1.2	2.4	2.4	2.4	3	2.2
6	2.8	2.5	4	1.1	2.5	3.1	2.4	3	3.5	3.2	1.4	2.3	3.2	1.3	4
7	3.1	2.9	3.8	1.9	3.7	3.2	2.7	2.2	3.9	2.2	3.7	1.3	1.8	3.5	1.9
8	4	1.3	2.3	2.8	2.4	3.8	2.7	2	2.2	1.8	2.6	1.9	2.9	3.1	3
9	1.3	1.6	3.1	1.9	2.1	2	3.2	1.8	3.2	1.6	1.7	2.7	2.7	3.2	1.9
10	1.7	1.8	3.6	1.1	2.1	1.7	3.7	1.3	3.4	1	1	1.2	2.1	1.6	3.9
11	1.7	2.4	2.8	1.9	1	2.9	2.4	3.9	2.8	1.6	2.1	2.3	2.4	2.4	1.9
12	2.2	2.4	1.3	1.6	2.1	3.7	2.6	1.2	3.6	1.3	2.3	2.8	3.5	3.5	1.4
13	1.7	1.7	2.8	2.1	3.8	4	1.8	1.3	1.5	1.8	2.6	1.8	3.8	2.3	1.6
14	1.5	3.6	1.2	1.1	3.5	3.9	3.6	4	2.9	1.4	1.4	3.6	1.7	3.5	2.2
15	1.1	2.1	3.2	2.7	2.7	1.5	3.3	2.8	3.2	1.7	1.1	1.6	1.3	1	1.8
16	3.5	1.9	1.6	3.2	2.2	2.9	2.6	3.4	1.6	2	2.5	3	3	2.9	3.1
17	1.8	2.6	2.8	1.7	1.9	1.5	2.7	3.4	1.4	3.6	2.4	2.6	3.4	3.2	1.4
18	2.9	1.6	3.2	3.4	1.4	2.4	2.6	3.8	3.3	1.1	1.1	1.4	2.3	3.3	1.5
19	3.7	2.3	3.6	2.1	3.9	2.8	2.8	3.6	1.9	2.6	3.2	2.8	2.7	1.6	3.5
20	20	2.4	1.9	1.9	2.9	3.1	1	3.3	2.7	3	3.6	3.9	3.1	3.9	1.3

<부록 6> 수집센터에서 회복센터까지의 단위당 수송비용

CRC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3.1	2.1	1.8	2.4	3.2	2.7	1.8	1	1.2
2	3.3	1.9	1.5	3.5	1.9	1.3	2.7	2.9	2.2	3.1
3	3	2.6	3.6	3.5	1.3	4	2.9	1.2	1	1.4
4	1.7	3	2.5	2.9	1.2	3.6	1.6	1.8	2	3.5
5	3.2	1.6	2.5	3.1	1.6	1.4	1.5	1.3	2.3	2.4
6	1.1	1.3	1.1	2.7	1.8	2	1.2	2.6	2.6	3
7	1.8	3.6	1.7	1.1	1.9	2.9	1.4	1.4	2.5	2.1
8	2.3	3.9	1.4	1.5	1.6	1.5	3.2	1.3	1.2	2.4
9	1	3.7	2.7	2.9	1.3	3.1	3.1	1.1	3.8	3.9
10	2.8	2.9	2.7	1.6	1.4	2.9	2.9	2.3	3.2	1.1
11	1.6	3.1	3.6	3.3	1.3	1.9	2	1.2	1.3	3.4
12	1.2	1.9	3.9	2	3.9	3.7	2.6	3.1	3.7	1.4
13	2.1	3.6	1.6	1.1	2	3.2	3.5	3.4	1.2	1.3
14	1.8	3.4	1.7	3.4	3.3	3.2	2.9	2	2	3.9
15	1.3	1.4	3.8	2.9	3.1	3.9	1.2	3.4	1.5	2.6

<부록 7> 수집센터에서 공급업체 1까지의 단위당 수송비용

cs1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	3.5	1.1	3.2	3.3	1.5	3.9	2.1	2.8	2.8	2.7	3.4	3.1	3.6	1.2	2.9
2	3	2.6	1.7	2.2	1.5	3.2	1.1	2.7	3.7	3.7	3.8	3.9	1.5	2.9	1.3
3	2.8	3.5	1.9	1.8	2.3	1.7	3.6	3.8	2.8	3	4	2.7	2.7	1.7	2.4
4	2.2	2.1	1.3	2.4	2.1	1.9	1.4	3.6	3.6	1.7	1.2	3.9	4	2.1	3.9
5	2.7	1.3	3	3	3.4	3.4	1.2	1.7	2.3	1.4	1.1	1.9	1.5	2.2	2.2
6	2.6	2.3	1.8	1.2	2.6	2.7	3.6	1.5	1.9	2.6	2	2.6	2.7	1.2	4
7	3.6	2.5	2.7	2.2	3.9	2.2	1.2	3.3	1.7	3.3	2.2	3.2	3.3	2.7	1.1
8	3.7	1.9	3.4	2.5	3.6	3.3	3.7	1.5	2.6	2.8	3.7	2.6	2.9	1.2	2.9
9	1.6	1.2	3.4	1.2	3.9	2	1.9	2.3	1.8	3.6	3.6	3.1	3	3.6	2.5
10	1.7	1.3	3.8	1.9	1.6	4	1.8	2.1	2.8	2.6	1.4	3.6	2.1	1.5	2.6
11	2.7	2.3	1	3.4	2.6	3.9	2.1	2.4	1.9	1.8	3	1.4	3.1	2	2.4
12	1.2	3.5	3.9	2.6	1.5	2.3	3.9	3.9	4	2.4	3.5	2.3	1.4	2.8	2.2
13	3	2.6	3	3.8	2.7	1.9	1.2	3.8	1.7	2.4	2.8	1.3	1.8	3.9	3.2
14	3.1	2.7	2.2	1.6	2.6	1.5	3.3	2.8	3.9	1.2	2.9	3	3.1	2.1	3.1
15	3.1	2.2	3.2	2.6	2.8	3.9	3.8	1.2	3.6	1	2.9	3.2	3.1	3.6	2.8

<부록 8> 수집센터에서 공급업체 2까지의 단위당 수송비용

cs2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2.6	3.1	1.8	3.9	1.8	2.9	3	3.3	3.6	2.7	3.3	3.7	1.8	1.2	1.6
2	2.4	1.5	1.6	2.1	3.5	1.4	3.1	1.9	3	1.3	1.8	1.3	3.9	2.4	3.4
3	1.8	1	2.3	3.5	3.6	3.1	3.7	2.8	2.3	1.1	2.8	3.5	3.7	2.2	1.3
4	2	1.4	1.5	3	2.5	1.2	2.1	3.8	2.5	1.7	3.9	1.5	3.4	2.1	3.7
5	1.1	2.5	3.6	3	3.8	2.4	1.4	2.2	1.9	3.6	1.6	1	3.6	1.7	3.2
6	1.3	3.3	3		3.2	3.9	1.7	2.4	1.5	3.5	1.4	1.8	1.9	2.3	1.1
7	2.2	2.5	2.4	1.4	3.5	2	2.9	2	1.8	1.7	1.2	2.7	1.4	2.3	1.7
8	3.7	2.2	3.8	2.8	2.6	1.6	3.6	3	2.7	2.3	2.9	2.1	1.8	2	3.6
9	1.1	3.3	2.8	1.8	3.8	2.3	2.4	1.8	2.2	2.2	1.7	1.9	1.7	2	2.8
10	1.3	2.2	1.9	2.9	3.2	2.9	3.8	2.4	2.7	1.3	2.4	3.1	2	4	2.1
11	1.5	1.3	2.9	3.7	2.2	1.3	2.8	1.7	1.6	2.4	1.1	2.1	1.8	2.8	3
12	2.1	2.2	1.6	3.5	3.7	1.2	3.1	1.3	1.4	1.6	2	2.6	4	3.3	3
13	1.1	2.9	1.5	3.5	3.4	2	2.8	1.1	1.7	1.9	3.2	3	3.6	1.2	1.8
14	3.9	3	1.6	1.2	2.2	3.5	2.8	3	1.6	3.8	3.4	3.8	3.8	1.8	2.3
15	1.7	3	2.5	3	2.4	2.5	1.4	3	2	1.5	2.9	2.9	1.7	1.4	2.3



<부록 9> 수집센터에서 폐기센터까지의 단위당 수송비용

CW	1	2	3	4
1	2.2	1.5	1.4	1.6
2	3.3	1.1	2.8	3.2
3	2.6	2.8	3.9	2.1
4	2.4	2.3	2.1	3.6
5	2.8	3.3	3.9	2.9
6	1.7	3.8	3.2	1.5
7	2.2	3.6	3.2	3.6
8	3.8	2.5	1.5	2.1
9	3.9	1.1	4	1.8
10	2.8	3.9	3.6	1.3
11	3.9	3.1	2.1	3.3
12	1.1	3.3	2.7	3.8
13	3.8	3.4	3.3	2
14	3.9	1.5	4	1.1
15	2.5	1.6	1.7	3.2

<부록 9> 회복센터에서 2차시장까지의 단위당 수송비용

EP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	2	3.5	1.1	3.1	1.9	1.5	1.7	2.3	3.9	2	2.9	1.3	2.7	2.4	4	3.7	1.5	3	1.9	1.1
2	1.8	1.8	1.5	2	1.7	3.8	3.3	1.9	1.7	1.4	1.7	3.5	1.8	2.7	2.7	1.3	4	1.9	3.9	2.4
3	2.2	3.5	3	3.4	1.3	1.8	1.3	2.5	1	2.3	3.6	2.7	3.3	1.7	3.4	2.3	3.4	2.7	3.3	3.5
4	1.7	1.2	2.8	1.4	1.5	2.5	2.2	3	2.5	1.7	1.5	2.7	1.4	1.6	1.2	3.1	1.8	1.9	3.2	2.5
5	2.9	1.1	2	1.1	1.2	3.4	2.5	2.5	1	1.4	2.4	3	2.2	1.7	2.2	2.4	1	2.2	3.3	3.4
6	2	2.4	1.6	1.1	3.8	2.3	2.1	1.2	2.7	2.7	2.6	2.9	2.9	2.3	2.6	1.9	2	2.6	1.9	3
7	3.6	2.7	3	1.3	3.4	1.1	1	3.4	3	3.8	1.4	3.7	3.7	1.8	2.7	3.4	3.4	4	1.7	2.3
8	3.5	3.5	1.8	3.6	1.2	3.9	2.7	3.5	1.8	1.2	4	3.3	1.3	2	2.2	3.2	2	4	3.6	3.6
9	4	2.6	2.6	2.6	2.8	2.5	2.3	1.9	3.7	3.5	2.9	2.7	1.7	2.5	3	1.9	1.5	1.4	1.1	3.2
10	1.6	3.9	3.8	3.8	2.5	1.5	4	2.4	3.1	1.5	1.9	2.9	3.2	3	2.4	3.6	1.4	3	3.2	2.8

<부록 10> 각 구성요소들의 단위당 처리비용

Supplier1	Supplier2	Manufacturer	Distribution center	Collection Center			Recovery center
				RC	S	W	
930	860	1,670	880	552	270	127	456

<부록 11> 각 구성요소들의 고정비용

N	Supplier1	Supplier2	Manufacturer	Distribution center	Collection Center	Recovery center
1	2,041	2,491	2,702	2,129	2,322	2,187
2	2,131	2,420	2,796	2,394	2,304	2,094
3	2,175	2,023	2,553	2,491	2,233	2,253
4	2,114	2,444	2,636	2,057	2,405	2,216
5	2,164	2,377	2,780	2,226	2,306	2,021
6	2,352	2,050	2,925	2,457	2,058	2,286
7	2,012	2,399	2,851	2,142	2,379	2,408
8	2,224	2,141	2,567	2,307	2,344	2,180
9	2,377	2,130	2,578	2,408	2,425	2,157
10	2,382	2,160	2,804	2,072	2,478	2,341
11	2,177	2,430	2,960	-	2,363	-
12	2,443	2,195	2,546	-	2,437	-
13	2,137	2,447	2,818	-	2,443	-
14	2,164	2,054	2,844	-	2,085	-
15	2,041	2,105	2,692	-	2,098	-