

폐가전제품 회수물류 네트워크 최적화

김현수^{1*} · 류재환² · 홍민선³ · 임석철⁴

¹경기대학교 첨단산업공학부 산업공학전공 / ²한국전자산업환경협회

³i2 Technologies Korea / ⁴아주대학교 산업정보시스템공학부

Optimizing Reverse Logistics Network for End-of-Life Electrical Appliances

Hyun-Soo Kim¹ · Jae-Hwan Ryu² · Min-Sun Hong³ · Suk-Chul Rim⁴

¹Division of Advanced Industrial Engineering, Kyonggi University, Suwon 442-760

²Association of Electronics Environment, Yongin 449-831

³i2 Technologies Korea, Seoul 135-080

⁴Division of Industrial & Information Systems Engineering, Ajou University, Suwon 443-749

When the electrical appliances such as TVs and refrigerators become obsolete, they must be collected to the recycling centers to avoid environmental damages. The obsolete home appliances are first moved to the regional collection point; and then transported to one of the recycling centers. Each recycling center has a limited capacity; and some recycling centers can process only certain types of products. For given locations of the existing collection points and recycling centers, optimally assigning the obsolete home appliances of each type from each collection point to the recycling centers can significantly reduce the total transportation cost. We formulate this problem as an LP problem. We also present an approach to determine the locations of additional recycling centers in order to alleviate the over-utilization of the current recycling centers.

Keyword: reverse logistics network, recycling, end-of-life electronic products

1. 서론

무역장벽이 허물어진 오늘날에는 세계 어느 곳에서 제품이 생산되든지 상관없이 그 성능, 품질 및 가격이 우수하다면 누구나 이를 구입하여 사용할 수 있는 글로벌 생산/판매/소비 시대가 되었으며, 이에 따라 더욱 까다로워진 소비자들의 요구조건으로 제조업체들은 더욱 뛰어난 제품을 더욱 빠른 시간 내에 생산하여 소비자에게 제공해야만 하게 되었다. 그 결과로 제품의 수명주기(life cycle)는 급속도로 단축되어 더욱 많은 제

품들이 폐기되고 있고 이로 인하여 제한된 지구자원은 더욱 가속화되어 소모되고 있으며, 폐기물로 인한 환경적 피해 또한 매우 심각할 정도로 커지고 있다.

이러한 문제점을 개선하고자 세계 각국들은 다양한 법적 제도를 실시하여 제품의 무분별한 자원사용을 억제하고 폐기되는 제품에 대해서는 적법한 절차를 통해 처리되게 함으로써 환경피해를 최소로 억제하려고 노력하고 있다. 이에 국내에서도 회수물류에 대한 관심이 더욱 높아지게 되었으며 EPR (Extended Producer Responsibility: 생산자 책임확대) 제도를 도입

본 연구는 2006년도 한국전자산업환경협회 연구비지원에 의해 연구되었음.

*연락처 : 김현수 교수, 442-760 경기도 수원시 영통구 이의동 산 94-6 경기대학교 첨단산업공학부 산업공학전공, Fax : 031-244-3534,

E-mail : hskim@kyonggi.ac.kr

2006년 11월 접수, 2회 수정 후 2007년 02월 게재확정.

하여 '소비자가 사용하던 제품이 용도를 다하여 폐기물로 배출될 때 생산자에게 일정량을 회수하여 재활용하도록 책임을 부여하는 제도'를 시행하고 있다. 회수물류란 기존의 시스템인 포워드 물류(Forward Logistics) 시스템의 활동을 통하여 불가피하게 발생하는 폐기물의 양을 최소화할 수 있도록 대체화 방안을 실시하고, 소비자가 사용했거나 사용 중에 고장 나거나 신제품과 대체하면서 발생하는 유해하거나 유해하지 않은 제품 및 관련 포장재 등의 폐기물 모두를 회수물류 활동을 통하여 다시 회수하고 이를 재사용 또는 재활용하기 위한 적정 프로세스를 실시할 수 있는 곳으로 전달하고 이를 활용함으로써 부가가치를 재창출하는 활동과 관련된 모든 물류관리 기술 및 활동 전체를 의미한다(Lim *et al.*, 2006).

아울러 EPR이란 재활용이 가능한 폐기물의 일정량 이상을 재활용하도록 생산자에게 의무를 부여하는 것으로, 우리나라에서는 2003년 1월부터 시행되고 있는 제도이다. 가전제품의 경우 신제품을 판매할 경우 반드시 사용하던 제품을 무상으로 회수하도록 하고 있으며 의무량을 이행하지 못할 경우 실제 재활용에 소요되는 비용 이상을 생산자에게 부과함으로써 폐가전제품의 회수활동을 계속적으로 수행하도록 하고 있다(AKEE, 2005). 그러나 EPR 제도의 좋은 취지에도 불구하고 폐가전제품의 발생량과 유통경로 등의 현실상황이 제대로 파악되지 못하여 효율적인 방안이 개발되지 못한 상황에서 실시됨으로써 생산자는 부과된 재활용 '의무량'을 기준으로 단지 의무 물량 확보 중심의 회수활동을 실시하여 그 결과 비효율적인 회수물류 체계를 통한 고비용적 폐가전제품 재활용 활동이 실시됨으로써 관련된 생산자 및 폐기물 재활용 업체에게 고비용 부담을 발생시키면서도 아직도 상당부분의 폐가전제품이 적법하게 회수되어 재활용되지 못하고 있는 상황을 초래하고 있다. 따라서 기존의 폐가전제품 배출과 유통에 대한 실태를 정확히 파악하고 이를 바탕으로 기존에 적용되고 있는 폐가전제품의 회수물류체계를 저비용, 고효율적으로 개선하여 국내에서 발생하는 폐가전제품의 회수물량 증대와 적법한 폐기처리와 재활용에 소요되는 비용의 최소화 목표를 시급히 달성해야 할 필요가 있다.

현재 폐가전제품 회수물류는 생산자와 지자체로부터 수집되어 오는 물량과 협력업체에서 자체 회수하는 소량의 물량이 있다. 이 밖에 회수물류망에는 포함되지 않으나 생산공장에서 발생하는 폐가전제품도 모두 Recycling Center(R/C)에서 처리하고 있다. 각 수집소에서 처리지까지의 운송비용은 모두 수집소에서 지불하며 재활용 처리에 소요되는 비용은 생산자 측에서 부담한다. 각 처리지는 재활용 처리된 유가물을 판매한 비용과 생산자 측으로부터 지원받은 처리비용으로 운영된다.

지자체의 경우 R/C까지 폐가전제품의 운송을 전문 운송업체에게 외주를 주거나 생산자측과 외주 형식의 협의를 맺어 수행하고 있으며, 운송비용은 각 지자체별로 폐기물 배출 스티커를 발부하여 충당하고 있다. 지자체의 규모에 따라 발생하는 폐가전제품의 물량은 다양하게 분포되는 것으로 조사되었다. 일부 지자체에서는 세탁기와 같이 분해가 간단한 제품에

대해서는 자체적으로 재활용 처리를 하여 유가물을 판매하고 있다. 수집된 폐가전제품의 저장부지는 대체적으로 충분한 것으로 파악된다. 생산자의 경우도 물류창고의 일부 부지를 활용하여 회수된 폐가전제품의 적재장소로 사용하고 있는데 지자체와 같이 저장부지는 충분한 것으로 파악된다.

생산자가 회수한 폐가전제품의 R/C로의 운송은 8톤 트럭으로 1일 1~2회 정도 운행되고 있다. 대부분의 R/C에서 처리가 불가능한 TV, 모니터 등의 제품과 그 밖의 냉장고, 세탁기 등의 제품은 민간 협력업체에서 처리하고 있다. 민간업체들은 자동화 설비를 갖추고 있는 곳이 있는가 하면 모든 작업을 수작업으로 처리하는 곳도 있다. 이상과 같이 회수물류체계는 R/C, 민간협력업체, 지자체 재활용센터 등 이외에도 소비자, 생산공장, 재이용업체(개인수집상), 지자체 위탁업체, 유가물 구입업체 및 EPR 수준을 결정하는 정부 등 다양한 구성원들로 이루어져 있다.

본 연구에서는 2장에서 기존의 관련연구를 고찰하고, 3장에서는 회수경로를 최적화하는 선형계획 모형을 제시하고, 4장에서는 신규 R/C의 최적지 선정방법을 다룬다. 마지막으로 5장에서는 결론과 향후 연구과제를 제시한다.

2. 관련연구

Thierry *et al.*(1995)은 회수물류의 범위와 개념 및 전략적 이슈들의 중요성을 다루었다. Moritz *et al.*(2001)은 회수물류의 연구를 목적성과 효과에 따라 분류기준 동기와 대상, 처리 방법 및 실행자 등을 기준으로 분류하였다. Hu(2002)는 다양한 환경에서 회수물류시스템에 대한 비용최소화 모델을 제안하였으며 Shih(2001)는 총비용을 최소화하는 것을 목적으로 혼합정수 계획법을 사용하여 재활용을 고려한 위치선정 문제를 제안하였다.

Vaidyanathan *et al.*(2003)은 일반적인 시설 입지 문제에서 기존의 포워드 물류의 흐름과 리버스 물류(Reverse Logistics)의 흐름을 구분한 것을 리버스 물류 흐름을 통합시켜 물류 네트워크에서 반품의 효과를 분석하고, 혼합정수 선형계획 모델을 제시하였고 특히 공급 시설 전체의 연속적 측면과 리버스 물류의 흐름을 고려한 전체 네트워크 재설계의 필요성을 제시하였다.

Ko *et al.*(2004)은 3자 물류가 증가하는 리버스 물류에 있어 중요한 축을 차지하고 있다고 보고 3자 물류의 제 각각 따로 진행되는 포워드 물류와 리버스 물류를 통합하여 개선하고자 하였는데 다수의 물류센터를 가진 경우와 중앙집중 형태의 물류센터, 그리고 혼합형태의 물류센터를 가진 경우를 유전자 알고리즘을 활용하여 자원공유, 인프라구축 등을 통한 비용절감 효과를 측정하여 분석하였다. Lim *et al.*(2006)은 자동차 산업이 소비자의 주문에 따라 움직이는 Pull 방식의 형태를 가지나 리버스 물류의 경우 환경정책에 따라 최종 소비자로부터 발생하는 수요를 처리하는 Push 방식의 흐름을 가진다고 보고 환경정책에 따른 물류체계와 대안분석이 가능한 시뮬레이션 방법론을 활용하여 자동차 산업의 리버스 물류 도입효과를 분석하였다.

3. 회수경로 최적화

3.1 회수물량 데이터

본 연구에서는 가장 정확하게 파악할 수 있는 물량 데이터로서 수도권, 중부권, 영남권, 호남권의 4개 R/C에 2005년도에 입고된 폐가전제품 데이터를 사용하여 분석작업을 실시하였다. 폐가전제품의 회수물량 중 비중이 높은 5가지 품목(냉장고, 세탁기, TV, 모니터, 에어컨)을 수량 기준으로 살펴보면 냉장고가 전체 물량 중 34%, 세탁기 33%, TV 25%로써 세 개 품목만으로도 전체 회수물량의 92%를 차지하고 있다. 재활용 처리에 대한 비용의 관점에서는 수량을 기준으로 하는 것이 유리하지만 운송비용의 관점에서는 트럭당 적재 갯수가 회수품의 부피에 따라 결정되므로 부피기준으로 물량을 파악하는 것이 더 타당하다.

<그림 1>에서 보듯이 수량 기준으로는 냉장고와 세탁기가 비슷하나 이들을 동일한 크기의 팔레트에 적재했을 때의 팔레트수를 기준으로 보면 냉장고의 팔레트수가 세탁기의 두 배 이상이며, 이는 냉장고가 세탁기보다 부피가 상대적으로 크기 때문이다.

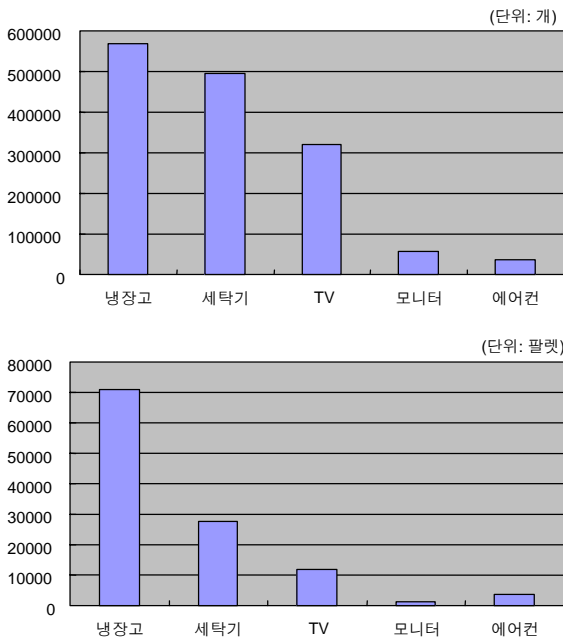


그림 1. 폐가전 품목별 연간 발생량 및 팔레트 수요량

현재 폐가전제품 회수에 사용되고 있는 트럭은 2.5톤에서 11톤까지 다양한 적재 용량을 가지고 있다. 이중 대표적인 5톤, 8톤, 11톤 트럭에는 각각 3개, 4개, 5개의 팔레트가 적재된다. 5톤과 11톤 트럭에 대하여 각 품목별 소요 트럭대수는 <그림 1>에서 보듯이 냉장고와 세탁기를 각각 운송한다고 가정하였을 때 냉장고는 세탁기에 비해 연간 두 배 이상의 트럭이 소요된다.

<표 1>은 2005년도 연간 폐가전 제품의 수거량(회수량)과 처리량을 비교한 것이다. 수거량은 각 수집소(지자체, 생산자물류센터)를 기준으로 물량을 파악한 것이고 처리량은 각 처

리지에 입고된 물량을 집계한 것이다. 각 권역별로 살펴보면 수거량과 처리량이 서로 차이가 나는 것을 발견할 수 있는데 이는 각 수집소로부터의 물량이 동일 권역내의 처리지로 운송되고 있지 않음을 의미한다. 이와 같이 권역별 수거량과 처리량의 불균형은 운송비용의 증가요인이 되고 있다. 이 같은 현상은 각 지역별 발생물량에 대하여 적절한 처리시설이 충분히 갖추어지지 않아 발생하는 것으로 파악된다. 처리시설이 부족한 지역은 폐가전제품의 재활용 처리를 위해서 상대적으로 처리시설이 잘 갖추어진 지역에 비해 높은 운송비용을 부담할 수 밖에 없다.

표 1. 권역별 냉장고/세탁기/에어컨 수거량 및 처리량

	수도권	중부권	영남권	호남권
수거량	597 (195)	105 (18)	336 (77)	186 (31)
처리량	511 (190)	331 (0)	314 (131)	68 (0)

(괄호안은 TV 및 모니터)

3.2 운송거리 데이터

본 연구에서는 두 지점간의 운송거리를 추정하기 위해서 두 지점의 경도와 위도를 활용하여 직각거리로 계산된 데이터를 활용하였다. 직각거리와 실제거리의 차이를 확인하기 위해서

표 2. 30개 지점 쌍에 대한 직각거리와 실제거리 비교(단위: km)

	From-To	직각거리	실제거리
1	오산-수도권	17.39624	20.3
2	창원-칠서	17.83214	26
3	동서울-수도권	18.62898	14
4	성남-수도권	31.6429	36.1
5	당신-아산	41.00207	43.2
6	수원CDC-아산	43.7536	55
7	남양주-수도권	53.10341	64.7
8	대구-칠서	59.34941	74
9	원주-수도권	64.25526	89
10	동서울-아산	64.83833	70.4
11	부산-칠서	65.9206	82
12	구로-수도권	66.24141	70
13	울산-칠서	78.35389	127
14	원주-수도권	84.57912	87.8
15	대전-아산	91.71845	92.4
16	구미-칠서	96.16571	110.3
17	대전-수도권	102.1941	110
18	군포-아산	121.9155	127.3
19	경주-칠서	139.3483	152
20	동대문-수도권	59.6618	58.4
21	안동-칠서	145.2602	180
22	포항-칠서	155.6967	164
23	광주-칠서	164.2144	216.1
24	안동-수도권	184.7993	209
25	광주CDC-아산	206.0274	238
26	강릉-수도권	214.5231	218
27	강릉-아산	255.5027	254
28	순천-아산	262.4701	309
29	창원-아산	319.1392	325
30	부산-아산	367.2277	376

<표 2>와 같이 30개의 위치에 대한 거리비교를 실시하였다. 두 지점간의 실제거리는 네비게이션을 활용하여 측정하였다.

<그림 2>에서 보듯이 회귀분석 결과 실제거리 = 9.04 + 1.038 * 직각거리의 회귀식을 얻었고, 이때 상관계수(R²)는 97.63%로 높은 유의수준을 보였다. 이에 따라 본 연구에서는 경도 및 위도를 활용한 직각거리로 두 지점간의 실제거리를 추정하였다.

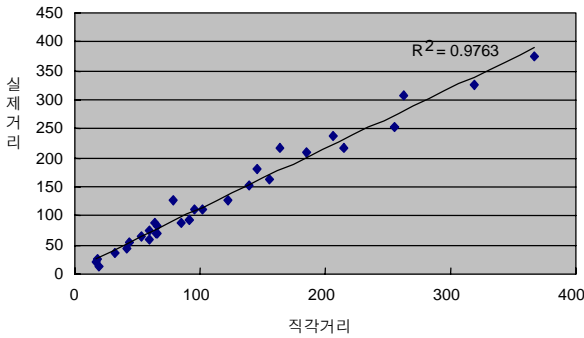


그림 2. 실제거리와 직각거리간의 회귀분석

3.3 운송비용 데이터

5톤, 8톤, 11톤 각 트럭으로 100% 수준의 적재를 실시한다는 가정 하에 팔렛 1대를 1km 운송시 비용은 각각 770원, 707원, 667원 수준으로 나타났다. 이는 각 수집소에서 트럭의 적재용량을 충분히 채우고 처리지로 운송할 경우 운송트럭의 대형화로 팔렛당 최고 약 100원 가량의 운송비가 절감될 수 있음을 의미한다.

운송비용의 절감액을 계산하기 위해서는 두 지점간의 운송비용을 두 지점간의 거리에 대한 함수로 표현해야만 한다. 이를 위하여 국내 전자제품 생산업체인 A사와 B사의 표준운임 데이터를 사용하여 거리와 운송비용간의 관계식을 추정할 결과 <그림 3>에서 보듯이 상관계수값(R²)이 충분히 높은 일차식이 구해졌다.

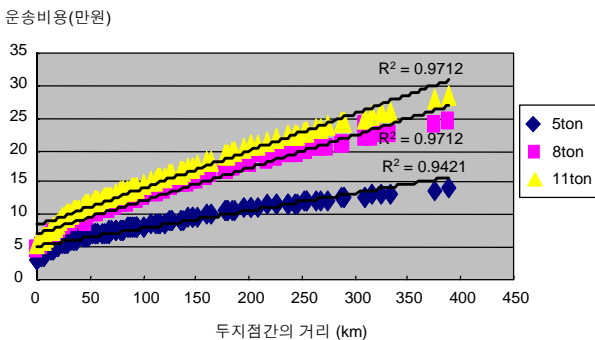


그림 3. 트럭별 운송비용 관계식

5톤 트럭의 경우 km당 약 800원의 변동비가 소요되고 1회 운송에 44,000원의 고정비가 소요되고, 8톤 트럭의 경우 km당

1,105원의 변동비와 49,045원의 고정비가 소요되며, 11톤 트럭의 경우 km당 1,260원의 변동비와 58,360원의 고정비가 소요되는 것으로 나타났다. 다만, 지자체가 사용하는 운송비는 이와 상당한 차이가 있기 때문에 생산자와 지자체의 물량비율을 2005년의 물량 비율인 7대 3이라고 가정하고 생산자 8톤 트럭 물량 변동비인 1,105원과 지자체 평균 변동비인 2,336원을 7 대 3으로 가중 평균한 값인 1,475원을 8톤 트럭의 km당 변동비로 사용하였다.

3.4 선형계획 모델링

본 연구에서는 국내의 총 322개의 수집소와 12개의 처리지를 대상으로 회수경로 최적화를 실시하였다. 회수경로 최적화란 수집소로부터 처리지까지의 운송거리와 처리지의 처리능력 등을 고려하여 총 운송비용이 최소화되도록 각 수집소에서 품목별로 폐가전제품을 어떤 처리지로 보낼지를 결정하는 것이다. 이 때 수도권, 중부권, 영남권의 3개 R/C를 기준으로 할당되고 남은 물량은 민간 협력업체에 할당하도록 하였다. 각 처리지는 품목별(냉장고, 세탁기, 에어컨, TV, 모니터)로 다른 처리능력을 보유하고 있으며, 특히 TV와 모니터의 경우 일부 처리지에 처리능력이 한정되어 있다. 각 품목은 동일한 크기의 팔레트를 활용하여 트럭에 적재되는데 품목별 팔레트당 적재수량은 <표 3>과 같다.

표 3. 품목별 팔레트당 적재수량

품목	냉장고	세탁기	에어컨	TV	모니터
적재수량(대)	8	18	10	27	45

트럭별 팔레트 적재용량은 5톤, 8톤, 11톤 트럭이 각각 3, 4, 5개의 팔레트를 적재 할 수 있으며, 본 연구에서는 각 처리지의 입고 트럭의 분포를 확인한 결과 8톤 트럭을 기준으로 적재용량을 사용하였다.

회수경로 최적화를 선형계획(Linear Programming)으로 모델링할 때 사용한 목적함수는 물량 * 거리의 합, 즉 총 운송비용을 최소화하는 것이다. 결정변수는 각 수집소(i)에서 품목(k)별로 폐가전제품을 처리지(j)로 보내도록 지정하는 x_{ijk} 이다. 제약조건으로는 각 R/C의 가동율을 특정값 이상으로 유지하도록 제약식을 사용하여 다음과 같이 모델링하였다.

$$Z = \min \sum_k \sum_j \sum_i x_{ijk} q_{ik} (\lambda d_{ij} + \rho) \tag{1}$$

subject to

$$\alpha_j c_{jk} \geq \sum_i x_{ijk} q_{ik} \geq \beta_j c_{jk} \quad \text{for all } j, k \tag{2}$$

$$\sum_j x_{ijk} = 1 \quad \text{for all } j, k \tag{3}$$

i = 수집소(지자체, 생산자 물류센터)

j = 처리지(Recycling Center, 협력업체)

- k = 품목
- λ = 변동비
- ρ = 고정비
- c_{jk} = 처리지 j 의 품목 k 의 처리능력(capacity)
- d_{ij} = 수집소 i 와 처리지 j 간의 거리
- q_{ik} = 수집소 i 에서 발생하는 품목 k 의 연간 회수량
- α_j = 처리지 j 의 최대 가동율(utilization)
- β_j = 처리지 j 의 최소 가동율

결정변수는 x_{ijk} = 수집소 i 에서 품목 k 가 처리지 j 로 할당되면 1; 그렇지 않으면 0이다. 식 (1)은 총 운송비용을 최소화하는 목적함수이다. 식 (2)는 처리지 j 에 최대, 최소 처리능력 범위내에서 수집소 i 의 물량을 할당하는 것을 의미한다. 식 (3)은 각 수집소는 반드시 품목별로 하나의 처리지에 할당되어야 한다는 제약식이다.

회수경로 최적화 프로그램은 앞 절에서 제시한 선형계획 모델에 다양한 입력 데이터를 데이터베이스와 연동하여 사용할 수 있도록 프로그램을 개발하였다. 입력 데이터로는 폐가전제품 처리지 정보(지리적 위치, 처리가능 품목, 처리용량), 폐가전 수집소 정보(지리적 위치, 품목별 발생량 및 부피), 각 R/C의 최대 및 최소 가동율 등이 사용될 수 있도록 함으로써 향후 사용자가 정책적 의사결정을 다양하게 수행하도록 개발하였다. 또한 연산결과에 이해가 쉽도록 지도에 표시하는 그래픽 표현(GUI: Graphic User Interface)을 제공하며 입력 정보의 수정 및 삭제 기능도 포함하였다. 모델의 결과값은 Excel 파일 형태인 CSV로 출력하여 Excel로 통계량 생성 및 계산 비교가 가능하도록 개발하였다.

3.5 회수경로 최적화 결과

회수경로 최적화 프로그램을 사용하여 얻을 수 있는 기대효과 금액은 정책적 결정에 따라 다양하게 발생할 수 있다. 예를 들어 2005년의 회수물량 데이터와 3.3절에서 추정한 8톤 트럭 운송비 데이터를 사용하여 제약식 (2), 즉 각 R/C의 가동율 상한 및 하한 제약조건을 삭제할 경우 기존 총 운송비용의 약 22%가 절감되는 것으로 나타났다. 그러나 이 경우 주요 R/C의 가동율이 지나치게 낮아지는 결과를 초래하게 되므로 정책적 고려가 필요할 것이다. 이에 따라 각 R/C의 가동율 상한 및 하한값

표 4. 연간처리량 상한치 및 하한치(단위: 천대)

		R/C			협력업체	
		A	B	C	A	B
냉장고	상한	∞	∞	∞	128	105
	하한	117	117	117	0	0
세탁기	상한	∞	∞	∞	128	62
	하한	126	126	126	0	0

을 현재수준으로 유지할 수 있도록 <표 4>와 같은 대표적인 값으로 제약식 (2)를 부과하는 경우 총 운송비용은 약 12%까지 감축될 수 있는 것으로 나타나 현행 운송비와 비교할 때 유의한 비용감소가 나타났다.

4. 신규 R/C 최적지 선정

본 장에서는 향후 증가할 폐가전제품의 처리 수요를 감당하기 위해 R/C를 신규로 건립할 경우 그 최적위치를 선정하였다. 최적위치란 총비용을 최소화하는 위치로 총비용은 총 운송비용과 지가를 포함한 건설비용의 합을 의미한다. 본 연구에서는 동일규모의 시설에 대하여 건설비용은 동일하다고 가정하였다. 지가는 동일한 지역이라도 도심으로부터의 거리, 상권, 교통 등의 입지조건에 따라 상당한 차이가 난다. 만일 신규 R/C의 후보지가 특정한 몇 군데일 경우 그 특정 부지의 지가를 사용하여 총비용이 최소화되는 최적 후보지를 선정할 수 있으나, 본 논문에서 다루는 문제는 신규 R/C 후보지를 특정 후보지 중에서 아닌 연속평면상의 모든 지점 중에서 찾는 문제이므로 선정된 지역의 어느 정도 범위 내에서 지가가 동일한 수준의 지점을 찾을 수 있다고 가정하고 총 운송비용만을 비교하여 최적위치를 선정하였다. 본 연구에서는 신규 R/C의 위치를 총 운송비용을 최소화하는 우선순위에 따라 선정할 수 있는 알고리즘 및 프로그램을 개발하였다.

4.1 알고리즘

두 지점간의 거리가 직각거리일때 신규 R/C의 최적위치는 기존의 모든 수집소의 경도(x 좌표)와 위도(y 좌표)를 나타내는 수직선들과 수평선들의 교점들 중 하나라는 사실(median condition)이 수학적으로 이미 증명되어 있다(Francis and White, 1974). 앞서 3.2절에서 본 문제의 두 지점간의 거리가 직각거리로 잘 추정된다고 판단하였기 때문에 상기 이론을 사용하여 각 교점이 신규 R/C 위치로 선정된 경우의 총 운송비용을 비교하는 단순한 enumeration 방법을 사용하여 최적의 신규 R/C 위치를 결정하였다.

4.2 신규 R/C 최적지 선정 프로그램

신규 R/C 최적지 선정 프로그램 개발 환경은 Visual C++ .net으로 구성되었으며 Optimization 라이브러리로 ILOG CPLEX 모듈을 사용하였다. 데이터베이스로는 MySQL 5.0을 활용하여 입력 데이터를 관리하였다. 본 프로그램의 주요기능은 크게 데이터베이스 입력기능, 발생지-R/C 최적할당 기능, 신규 R/C 위치 기능, 지도보기의 4가지로 구분된다. 첫 번째 데이터베이스 입력기능으로는 <그림 4>에서 보듯이 폐가전제품의 처리지 정보(지리적 위치, 처리품목, 처리용량) 입력기능, 폐가전제품

의 수집소 정보(지리적 위치, 품목별 발생량 및 부피) 입력기능과 입력정보의 수정 및 삭제 기능 등이 포함되어 있다.

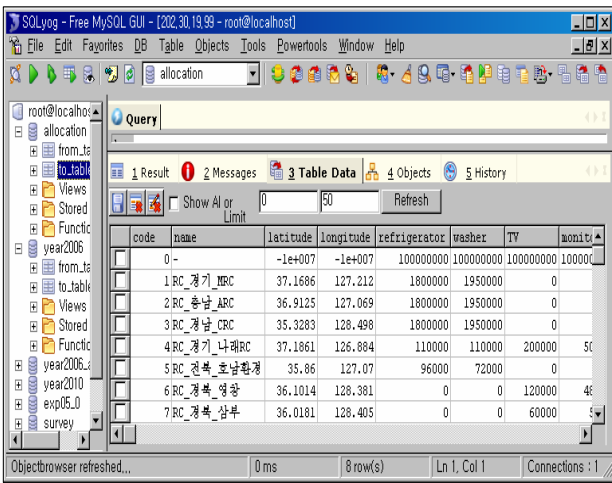


그림 4. 데이터베이스 입력기능의 예



그림 5. 발생지-R/C 최적할당 기능의 예

두 번째 발생지-R/C 최적할당 기능으로는 <그림 5>와 같이 ILOG CPLEX의 수리모형을 활용하여 다양한 제약조건을 만족하는 최적값을 찾을 수 있게 하였다. 세 번째 신규 R/C 위치 기능은 위에서 언급된 알고리즘으로 최적의 신규 R/C 위치의 대안을 제시하여 준다. 마지막으로 지도보기 기능은 신규 R/C 위치 선정의 연산결과를 이해가 쉽도록 경도와 위도의 데이터를 활용하여 위치를 지도에 표시하고, 발생지의 발생물량의 크기에 따라 크기를 달리하여 전체적인 네트워크를 표시하였다.

4.3 신규 R/C 최적위치

앞 절에서 소개한 신규 R/C 최적지 선정 프로그램을 사용하여 <표 5>와 같이 총 운송비용이 최소화되는 4개의 신규 R/C 대안을 선정하였다. 이들 4개의 신규 R/C 대안의 위치는 <그림 6>과 같다. 이들 4개의 신규 R/C 후보지들은 총 운송비용을

최소화하는 위치들이다. 그러나 이들 간의 우선순위를 결정하기 위해서 총 운송비용과 함께 신규 R/C의 건립시 발생하는 최대운송거리도 고려할 필요가 있다. 그 이유는 지나치게 긴 거리를 운송하게 되는 수집소의 불만요인을 해소하는 형평성을 고려하는 것이 현실적으로 매우 중요하기 때문이다.

표 5. 4개의 신규 R/C 위치 대안

위치	위도 경도	현행대비 운송비 수준	회수영역
호남권 (1) (전남 지역)	35.2 126.8	75.0%	광주전남 전북일부
수도권 (2) (경기 북부)	37.6 126.9	82.5%	한강이북 강원서북부
경남권 (3) (부산 지역)	35.2 129.0	83.6%	울산, 부산 경남동부 경북동부
경북권 (4) (대구동북부)	35.9 128.5	84.5%	대구경북 경남일부 강원남부

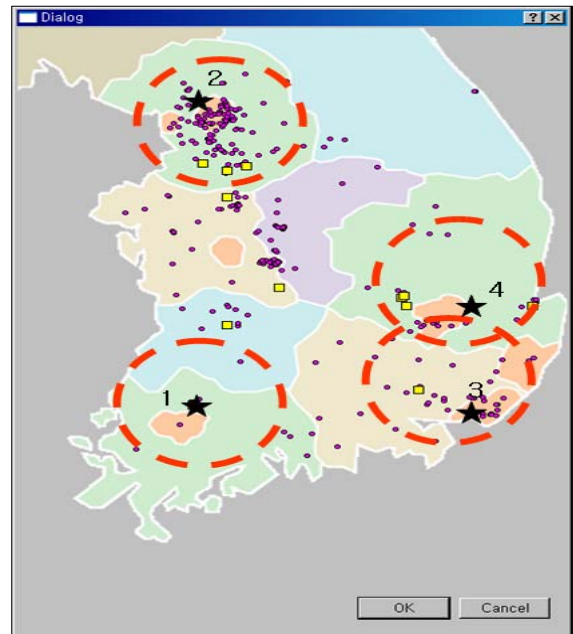


그림 6. 선정된 신규 R/C 위치 대안

<표 6>은 신규 R/C 위치별로 발생하는 최대운송거리 및 평균운송거리를 나타낸다. 총 운송비용과 최대운송거리 및 평균운송거리를 분석해 보면 세 가지 기준조건 중 두 가지 조건에서 가장 우수한 대안인 호남권 지역이 가장 우선적으로 건립되어야 하는 신규 R/C의 위치로 판단된다. 두 번째로 건립되어야 하는 신규 R/C 위치로는 호남권을 제외하고 총 운송비용이 큰 차이가 없기 때문에 나머지 두 가지 기준조건인 최대운송거리 및 평균운송거리에서 가장 우수한 대안인 경북권 지역이 바람직한 것으로 판단된다.

표 6. 권역별 평균, 최대 운송거리의 변화(km)

위치	신설전		신설후		절감거리	
	최대	평균	최대	평균	최대	평균
호남권 (전남 지역)	223	102	128	69	95	32
경북권 (대구 동북부)	263	112	183	63	80	49
경남권 (부산 지역)	95	57	51	32	44	25
수도권 (경기 북부)	223	68	223	45	0	23

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 우리나라의 폐가전제품 회수물류체계를 효율화하고 지속적으로 증가하고 있는 폐가전제품 회수물량 처리에 효과적으로 대응할 수 있는 정책결정에 사용할 수 있는 두 가지 프로그램을 개발했다. 첫 째는 기존 현행 수집소와 처리지를 사용하여 그 회수경로만을 재지정함으로써 총 운송비용을 최소화하는 회수경로 최적화 프로그램이다.

회수경로 최적화 프로그램을 가동한 결과로 얻어질 수 있는 기대효과 금액은 결정변수들에 따라 다양하게 발생할 수 있다. 예를 들어 제약식 중 각 R/C의 가동을 상한 및 하한 제약조건을 삭제하면 결과값은 각 수집소에서 가장 가까운 처리지로 배정되며 이 경우 2005년 물량 기준으로 연간 최대 약 22% 수준의 총 운송비용이 절감되는 것으로 나타났다. 그러나 이 경우 주요 R/C의 가동율이 지나치게 낮아지는 결과를 가져오는 것으로 실험 결과 나타났다. 따라서, 각 R/C의 가동율을 현재수준으로 유지할 수 있도록 연간 처리물량의 대표적인 상한 및 하한 값을 제약조건으로 부가하는 경우 총 운송비용의 감축 기대효과는 약 12% 정도로 나타났다.

두 번째 프로그램은 신규 R/C를 건립할 때 총 운송비용이 최소화되며, 신규 R/C의 건립을 통해 발생하는 최대 및 평균 수송구간의 절감거리를 고려할 수 있는 의사결정지원 프로그램이다. 특별히 최대운송거리가 최소화되는 신규 R/C 위치 대안을 찾고자 하는 이유는 새로운 회수경로의 할당으로 인한 과도한 수송거리의 발생 상황을 최소화하여 각 수집소별로 폐가전제품의 수송에 있어서 이동거리의 형평성을 제공하는 것이 현실적으로 매우 중요하기 때문이다.

개발된 프로그램을 사용한 결과 발생한 총 운송비용의 최소화 수준에 따라 4개의 신규 R/C 최적지 대안들을 파악할 수 있었고 그 중에서 총 운송비용, 최대운송거리 및 평균운송거리

등 세 가지 기준조건 중 두 가지 조건에서 가장 우수한 대안인 호남권의 전남 장성 지역이 가장 우선적으로 건립되어야 하는 신규 R/C 위치로 파악된다. 두 번째로 건립되어야 하는 신규 R/C 위치로는 호남권을 제외하고 총 운송비용이 큰 차이가 없기 때문에 나머지 두 가지 기준조건인 최대운송거리 및 평균 운송거리의 절감에서 가장 우수한 대안인 경북권(대구 동북부) 지역이 바람직한 것으로 판단된다.

폐가전제품은 소비자로부터 배출되어 최종 재활용 처리가 이루어지기 까지 다양한 비용이 발생하게 된다. 본 연구에서는 운송비용만을 고려한 것으로서, 그 외에 수집소에서 상·하차를 위한 처리비용과 재활용 처리지에서의 재활용 처리에 투입되는 비용, 유가물 판매를 통한 이윤 등은 고려되지 않았다. 향후 본 연구의 모델을 확장하여 폐가전제품이 배출되어 최종 유가물로 판매될 때 까지 발생하는 모든 비용을 함께 고려한 연구가 필요하다.

참고문헌

Association of Korean Electronics Environment (2005), *Statistics of Recovery and Recycle of End-of-Life Electrical Appliances*, Association of Korean Electronics Environment.

Environmental Health Institute of Gachon University of Medicine and Science (2006), *A Study of Recovery and Recycle of End-of-Life Electrical Appliances*, Association of Korean Electronics Environment.

Francis, R. L. and White, J. A. (1974), *Facility Layout and Location*, Prentice Hall, 170-179.

Hu, T-L. (2002), A Reverse Logistics Cost Minimization Model for The Treatment of Hazardous Wastes, *Transportation Research Part E*, **38**, 457-473.

Ko, H-J., Ko, C-S., and Jung, K-H. (2004), *A Genetic Algorithm Approach for Logistics Network Integrating Forward and Reverse Flows*, Fall Conference of Korean Institute of Industrial Engineers.

Lim, J-S., Jung, S-J., and Kim, K-S. (2006), Analysis of Introduction of Reverse Logistics By Simulation Methods: Automobile Industry, *The Korea Society For Simulation*, **15**(2), 13-21.

Moritz, F., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J. M., and Wassenhov, L. N. V. (2001), The Impact of Product Recovery on Logistics Network Design, *Production and Operation Management*, **10**(2), 156-172.

Shih, L. (2001), Reverse Logistics System Planning for Recycling Electrical Appliance and Computers in Taiwan, *Conservation and Recycling*, **32**, 55-72.

Thierry, M., Salmon, M., Van Nunen, J., and Wassenhove, L. N. V. (1995), Strategic Issues in Product Recovery Management, *California Management Review*, **37**(2), 114-135.

Vaidyanathan, J., Raymond, A. P., and Erik, P. (2003), The Design of Reverse Distribution Networks: Models and Solution Procedures, *European Journal of Operational Research*, **150**, 128-149.



김현수

성균관대학교 산업공학과 학사
Ohio State University 산업공학과 석사
Ohio State University 산업공학과 박사
현재: 경기대학교 산업공학전공 부교수
관심분야: 환경물류, E-SCM, 생산계획



홍민선

경기대학교 산업공학과 학사
아주대학교 산업공학과 석사
아주대학교 산업공학과 박사
현재: i2 Technologies Korea, 컨설턴트
관심분야: 스케줄링, SCM, 물류, 시뮬레이션,
계약이론



류재환

아주대학교 산업정보시스템공학 학사
아주대학교 산업공학 석사
현재: 한국전자산업환경협회
관심분야: 회수물류, RFID



임석철

서울대학교 산업공학과 학사
한국과학기술원 산업공학과 석사
The Univ.of Michigan 산업공학과 박사
현재: 아주대학교 산업정보시스템공학부 교수
관심분야: 물류, SCM, 시뮬레이션, 계약이론