

폐전자제품 회수물류 최적화 연구*

A Study on the Optimal Method for recycling the Waste Electronics' Reverse Logistics

이석기(Seok Kee Lee)

한성대학교 산업경영공학과 조교수, 주저자

노재확(Jae-Whak Roh)

한성대학교 무역학과 교수, 교신저자

조영빈(Yeong Bin Cho)

건국대학교 국제비즈니스대학 경영학과 부교수,
교신저자

목 차

- | | |
|-------------------|---------------|
| I. 서론 | V. 입지선정모형의 적용 |
| II. 문헌연구 | VI. 결론 |
| III. 회수물류처리 현황 분석 | 참고문헌 |
| IV. 입지선정모형 | ABSTRACT |

국문초록

기술발전에 의한 전자제품의 짧은 소비주기는 폐가전제품의 재활용 처리라는 국제적인 환경 문제를 유발시키고 있다. 인도나 중국과 같이 경제력과 소비수준이 급격히 높아지는 국가들에서는 폐가전제품의 급증이 사회적 이슈가 되고 있다. 이들 나라에서는 대부분의 폐전자제품이 적절하지 못한 방식(uncontrolled recycling)으로 처리됨으로써 심각한 환경오염과 건강문제를 야기하고 있다. 국내의 경우도 이들 국가와 크게 다르지 않다. 국내의 경우 기존의 지역별 혹은 개별 기업 수준에서 재활용센터가 운영 중에 있으나, 대부분 일일 처리한도를 초과하여 운영되고 있어서 잉여 폐전자제품의 처리방안에 대한 고민이 시급한 현실이다. 이에, 본 연구에서는 비용과 이동거리 관점에서 재활용센터 입지를 재조정함으로써 보다 재처리를 보다 효율화 할 수 있는 수리모형을 개발, 제안해 보고자 한다. 국내 특정지역의 실제 폐전자제품과 재처리센터 데이터를 활용하여 제안된 최적화 입지 모형을 검증함으로써 국내는 물론 비슷한 문제를 가진 다른 국가의 재처리 문제 개선에도 도움을 주고자 한다.

주제어 : 회수물류, 폐전자제품, 재처리센터, 입지선정모형

* 본 연구는 한성대학교 교내학술연구비 지원과제임.

I. 서론

최근 국내에서 이슈가 되는 해외직구 열풍에서 보듯이 이제는 세계 어느 곳에서 제품이 생산되고 판매되는 것과 관계없이 성능과 가격, 품질 면에서 검증된 제품이라면 전세계 소비자를 대상으로 생산 및 소비가 가능한 세상이다. 이에 따라 생산규모는 날로 대량화 되고 있으며 소비자의 신제품 소비주기 역시 짧아짐에 따라 재처리가 필요한 폐제품의 물량도 과거에 비해 급증하고 있다. 이러한 폐전자제품은 적절한 방법과 절차에 의해 회수되고 재처리되지 않을 경우 건강과 환경오염 문제 등에 심각한 문제를 야기할 수 있다. 하지만 이 문제에 대한 사회적 공감대의 미형성 혹은 재처리에 소요되는 비용 등의 이유로 배출되는 폐전자제품을 모두 처리할 수 있을 만큼의 재활용센터나 처리시설을 운영하고 있는 국가는 많지 않은 형편이다. 특히 신흥 경제대국인 인도나 중국과 같은 나라에서는 폐전자제품의 물량이 급증과 함께 적법하지 않은 재처리 센터 (uncontrolled recycling center)의 난립으로 인한 환경오염 문제가 해당 국가는 물론 국제적 수준에서 우려를 야기하고 있다 (Manomaivibool, 2009; Wang et al., 2005, Yu et al., 2006). Manmaivibool의 연구에서는 인도의 폐전자제품 현황을 사례로 야기될 수 있는 환경오염의 심각성을 제기하고 이의 해결을 위해 선진국들에서 시행중인 EPR(Extended Producer Responsibility)제도의 조속한 도입과 시행을 주장하고 있다. 폐전자제품의 재처리와 관련된 환경오염의 심각성에 있어서는 국내의 경우도 이들 신흥 경제대국들의 상황과 크게 다르지 않으며 최근 들어 사회적 이슈가 되고 있다.

우리나라도 2003년 이후 EPR 제도를 도입하여 생산자에게 폐기물로 배출되는 제품에 대해 일정량을 회수하여 재활용하도록 책임을 부여하고 있다. 하지만 전자제품을 생산하는 대기업과 지방자치단체 수준에서 전자제품 회수 및 처리를 위한 물류체계가 구축, 운영되고 있으나 몇 가지 문제점을 가지고 있다. 첫째, 지자체의 경우 자체적으로 소비자가 배출한 폐전자제품을 수거하고 있으나 수거범위가 구/군별로 한정되어 있어 권역별로 수월한 곳이 있는 반면 과밀화된 곳도 있어 처리효율에 불균형이 발생하고 있다. 둘째, 가전제품을 대량으로 생산, 판매하는 대기업들도 회수수체를 자회사 혹은 지자체에 위탁하는 등 의무회수량 이외에는 적극적인 회수 노력에 미온적인 형편이다. 결론적으로 우리나라의 폐전자제품 처리능력은 여전히 미흡한 상황이다. 2011년 환경부에서 발표한 가전제품 재활용률 현황을 보더라도 출고량이 가장 많은 냉장고를 비롯하여 컴퓨터, 세탁기, 텔레비전에 이르는 대부분의 전자제품 회수 및 재활용률이 20% 이하에 그치고 있다 (환경부, 2011). 회수 및 재처리되지 못한 대부분의 폐전자제품으로부터 야기될 환경 오염문제의 심각성을 짐작할 수 있는 부분이다.

이러한 문제는 현실적으로 부족한 재활용센터의 수와 처리 용량에서 주요한 원인을 찾을 수 있다. 하지만 이를 개선하기 위한 방안은 비교적 분명하다. 중장기적으로는 재활용센터를 지역 곳곳에 증설할 필요가 있다. 단기적으로는 현재의 폐제품 수집 및 운송 체계를 분석하여 보다 효율적으로 재설계할 수도 있을 것이다. 재활용센터의 증설은 경제적 비용도 매우 클 뿐더러 사회 정서적인 문제 등으로 인해 매우 어려운 부분이 존재한다.

이에 본 연구에서는 국내에서 발생하는 폐가전제품의 회수물류 재활용센터의 입지와 관련하여 비용과 운송거리 관점에서 최적화된 입지 선정에 활용할 수 있는 수리 모형을 제안하고자 한다. 아울러 현재 상황에서 보다 효율성 있는 회수물류 회수/처리 방안에 대한 대안도 제시하고자 한다. 본 연구에서도 제안된 모형은 국내 뿐 아니라 비슷한 상황에 있는 국가들의 문제 해결에도 시사점과 적용가능성을 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

다만 폐전자제품도 종류에 따라 부피, 폐기방법, 처리비용 등이 제각각이기 때문에 품목, 종류에 관계없이 단일한 최적화 모형을 제안하는 데는 모형의 정확성 측면에서 분명한 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 현실에 적용 가능한 대안의 제시를 목표로 회수물류 중에서 가장 큰 비중을 차지하는 제품인 냉장고를 재처리 대상 품목으로 선정, 최적화된 처리 모형을 제안한다. 대상 지역의 경우 폐제품 발생 비중과 처리 비중에서 가장 큰 차이를 보이는 호남 지역의 재활용센터 현황을 이용하여 제안된 모형을 실증 검증하였다.

II. 문헌연구

본 연구는 국내 폐가전제품의 회수물류에 대한 연구에서 기여점과 한계점을 찾기 위해 노력하였다. 관련하여 기존에 수행된 연구들은 대략 다음과 같다.

나호영, 이상현(2009)의 연구에서는 제품의 배송을 담당하는 순방향의 3단계 물류망과 반품의 수집과 처리를 담당하는 역방향의 3단계 물류망을 통합하는 폐쇄공급사슬망을 구성하기 위한 LRP를 연구를 제안하였다. 하지만 다기간(multiperiod)모형 구축을 통해 반품의 재사용시 총 비용의 감소에 대한 분석과 재고 문제와의 연계에 대한 연구에 한계점이 있었다. 김창봉(2011)의 연구에서는 우리나라 수출입 기업의 역물류(Reverse Logistics) 프로세스에서 정보 및 포장 활동이 역물류 성과에 미치는 영향을 연구했다. 정보활동, 포장활동, 경제성, 역물류 성과 간의 관계에 대한 연구는 주요요인과 역물류 성과를 부가가치 창출보다는 제품의 가치의 제조정에 중점을 두어 연구하였다. 또한 역물류 기업의 강화를 위한 정보시스템의 중요성을

설명하였다. 그러나 실제적 실험을 하지 않아 한계점이 있었다. 허태영 등(2009)의 연구에서는 리사이클링센터의 도입효과를 분석하기 위해 2단계로 나누어서 분석을 수행하였다. 그러나 정확한 분석을 수행하기 위해서는 리사이클링센터 입지선정과 폐가전제품 운송차량을 동시에 결정하는 수리 모형을 작성하고 분석해야 한다. 다음으로 리사이클링센터의 입지 결정에 고정비용을 고려하지 않았다. 그러나 리사이클링센터의 입지 결정에 고정비용을 고려하는 것이 현실적으로 타당하며 이에 대한 연구가 필요하다. 셋째 리사이클링센터의 폐가전제품 회수를 위한 중간 거점을 정하고 연구를 시작하였다. 그러나 기능을 제대로 수행하기 위한 입지분석이 더욱 다양하게 해야 한다. 하재원과 이태한(2009)의 연구에서는 Hub-and-Spoke 운송망의 차량 경로계획에서 Hybrid hub and spoke 형태의 운송망을 운영하고 있는 택배 업체의 시제 계약과 가정 사항을 고려하여 운송계획 문제에 대한 정수계획 모형을 제시하고 문제의 해결을 위하여 유전알고리즘을 제시하였다. 하지만 고정적으로 운영하는 노선을 정하는 문제에서 장기간의 운송물량의 변화와 임시차량의 비용 등의 고려의 한계가 있었다. 홍성학과 이영훈(2004)의 연구에서는 비용 제약 하에서 서비스 수준을 최대화하는 설비 입지 선정 문제에 대하여 다루었다. 이를 위하여 라그랑지안 기법으로 이완된 두 가지 수리적 모형을 개발하고 발견적 기법으로 문제를 해결하고자 했다. 하지만 이 논문에서는 커팅 알고리즘이 가지는 가장 큰 특징인 한시적 실행가능영역 허용방법을 다른 라그랑지안 기법에 적용해 보는 것과 논문의 수리적 모형에 몇 가지 현실적인 제약조건을 추가에 따른 결론의 한계점이 있었다. 김순조(2007)의 연구에서는 회수물류를 위한 효율적 평가모형에 대해서 다루었다. 첫째 회수 물류 평가 요인의 다양성 부족이다. 이 연구에서는 기존문헌 연구를 통하여 8개의 회수물류 평가 요소와 추가로 정보통신의 발달과 더불어 화주기업이 절실히 요구하고 있는 유무 요소만을 추가하였다. 하지만 회수물류기업을 평가하는데 있어서 9개의 항목은 다소 부족한 점이 있다. 따라서 더욱 구체화되고 다양한 항목의 개발 및 분석이 필요할 것이다. 둘째, 회수 물류 평가 방법론에 있어서 다양한 평가 기법이 사용될 수 있을 것이다. AHP기법 이외의 다양한 평가 모형을 활용한 회수 물류 기업의 평가 수행이 진행되어야 할 것이다. 셋째, 사례연구에서 현재 계약이 진행되고 있는 회수 물류를 담당하는 제3자 물류 사업자를 대상으로 모형을 적용하였다. 하지만 화주기업의 측면에서 사례를 연구해 볼 필요가 있을 것이다. 김현수 등 (2007)의 연구에서는 폐가전제품 회수물류 네트워크 최적화를 위하여 수집소에서 리사이클링 센터로의 운송비를 최소화하는 수리적 모형을 개발하였다. 운송비용만 고려한 것으로써 그 외에 수거지에서 상, 하차를 위한 처리비용과 재활용 처리에서의 재활용 처리에 투입되는 비용,유가물 판매를 통한 이윤 등을 고려가 미흡한 부분이 있었다. 원승환과 김갑환(2006)의 연구에서는 재고 저장

관련 비용을 최소화 하는 저장 공간 할당 문제를 다루었다. 이를 위하여 수송시간, 수송 능력 제약을 고려하였으며 수리적 모형과 발견적 기법을 개발하였다. 그러나 모델이 상당히 복잡하고 매번 시설과 레이아웃, 장비 및 운영논리의 개발에 맞춰 지속적으로 갱신해야 되기 때문에 현실에 적용하기 힘든 면이 있다. 최순식과 이영훈(2007)의 연구에서는 기간별 수요가 변화하는 상황에서 고객의 요구량을 충족시키면서 총비용을 최소화하는 모형을 제시하였으며 실제 데이터 실험을 통하여 실제적인 접근을 시도하였다. 기본적으로 모델의 타당성은 입증되었으나 현실적 데이터를 대입하여 현실성을 높여야 할 것 같고, 알고리즘의 최적해 도출 시간이 오래 걸리므로 직관적인 방법을 추가한 알고리즘의 개발이 효과적일 것으로 판단된다. 정기호와 전원재(2008)의 연구에서는 택배산업의 수익성 악화를 개선하기 위하여 공동수배송에 관한 연구를 진행하였다. 총운송비를 최소화하기 위한 수리적 모형을 개발하고 수치 예제를 통하여 운송비를 절감 효과를 증명하였다. 그러나 단일 기업을 대상으로 운송비와 고객서비스 향상을 목적 함수로 두었으나 현실적으로 여러 기업의 데이터를 입력하면 문제의 규모가 커지는 한계점이 있다. 정기호와 고창성(2002)은 물류 터미널에 할당되는 택배 영업소의 수송비용을 최소화하는 수리적 모형과 발견적 기법을 제안하였다. 하지만 택배기업의 현실 데이터가 아닌 가상난수데이터를 사용하여 현실성에 한계가 있다.

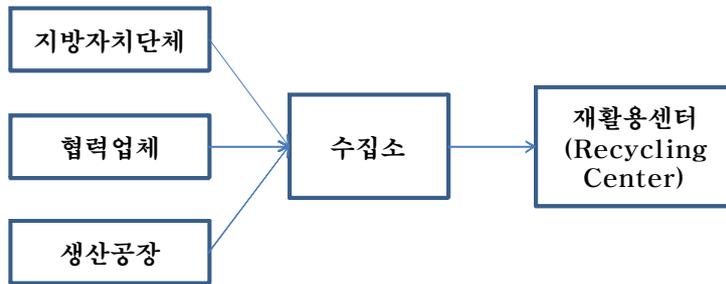
현재 재활용을 위한 폐전자제품 회수물류 활동은 수집소 개별적으로 이루어지고 있어, 과도한 운송거리 및 운송비용의 초래 및 낮은 차량 적재율 등의 비효율적인 면이 존재하고 있다. 본 논문에서는 이러한 비효율적인 점을 개선하기 위해 공동회수모형을 제안하고 이를 선형계획법과 실제 입고자료를 이용하여 그 효과를 분석하고자 한다.

Ⅲ. 회수물류처리 현황 분석

현재 국내의 폐전자제품 회수 물류는 그림 1에 나타난 바와 같이 생산자와 지자체로부터 수집되어 오는 물량과 협력업체에서 자체 회수하는 물량이 있다. 이 밖에 생산 공장에서 발생하는 폐전자제품도 모두 리사이클링센터에서 처리를 하고 있다.

지자체의 경우 리사이클링센터까지 폐전자제품의 운송을 전문 운송업체에게 외주를 주거나 생산자 측과 외주형식의 협의를 맺어 수행하며, 운송비용은 각 지자체별로 자체적으로 부담하고 있다. 지자체의 규모에 따라 발생하는 물량은 다양하게 분포하는 것으로 조사 되었다. 일부 지자체에서는 세탁기와 같이 분해가 간단한 제품에 대해서는 자체적으로 재활용 처

리를 하여 판매하고 있는 것으로 조사 되었다. 협력업체의 경우 자체 회수하는 소량의 물량을 운송하며 운송비용은 정해지지 않았다.



〈그림 1〉 일반적인 회수물류 처리 프로세스

생산 공장의 운송비용은 일반 운송비용의 80% 수준에서 책정되어 있는 것으로 파악되었으며 8톤 트럭으로 1일 1~2회 정도 운행하고 있다. 생산자 측에서는 일반적으로 8톤 트럭을 주로 사용하고 있는 것으로 조사되었다. 각 수집소에서 리사이클링 센터까지의 운송비용은 모두 수집소에서 지불하며 재활용 처리에 드는 비용은 생산자 측에서 부담한다. 각 리사이클링센터는 재활용 처리된 것을 판매한 비용과 생산자 측으로부터 지원 받은 처리비용으로 운영한다.

수집된 폐전자제품의 저장부지는 대체적으로 충분한 것으로 파악된다. 생산 공장의 경우 물류창고의 일부 부지를 활용하여 회수된 폐전자제품의 적재장소로 사용하고 있는데 지자체와 마찬가지로 저장부지는 충분한 것으로 파악된다. 냉장고와 세탁기 같이 부피가 큰 폐전자제품은 팔레트에 적재 후 로프 등을 사용하여 고정시키며, 부피가 작은 TV는 밴딩 처리를 하는 것으로 나타났다.

대부분의 폐전자제품은 각 리사이클링센터에서 처리가 가능하나 TV, 모니터 등과 같이 재활용처리 하는데 있어 유리를 처리하는 과정에서 다량의 오염물질이 발생하는 폐전자제품은 일부 협력업체에서만 처리가 가능하다. 폐세탁기의 경우 알루미늄과 같은 수익성이 높은 유가물이 다량 확보가 가능하여 일부 지자체에서는 리사이클링센터로 운송하지 않고 직접 해체하여 재활용 처리 후 지자체의 수익으로 남기고 있다.

협력업체들은 TV와 모니터를 전문적으로 처리하는 곳이 있으며, 다른 폐전자제품까지 모두 처리 가능한 곳도 있었다. 자동화 설비를 갖추고 있는 곳이 있으며 모든 작업을 수작업으로 처리하는 곳도 있었다. 재활용 처리지중 TV를 처리하는 곳으로 처리시설의 일부가 자동화가 이루어져 있는 것으로 파악되었다.

IV. 입지선정 모형

회수경로의 최적화를 위해 본 연구에서 제안하고 있는 수리모형은 기본적으로 Tung-Lai Hu (2002)와 Vaidyanathan (2003)의 연구 등에서 제시된 회수물류 비용최소화 모델 (a reverse logistics cost minimization model)을 근간으로 하고 있다. 위 두 논문에서 제안된 모형은 비용 최소화 모형으로 여러 연구 등에서 매우 널리 활용되고 있는 것으로, 김현수 외 (2007)의 연구에서도 국내 회수물류 네트워크 최적화 등에 활용된 바가 있다. 본 연구에서는 여기에 현재 국내 지방자치단체의 전자제품 회수물류 체제의 실정을 반영하기 위해 몇몇 변수를 추가하거나 기존 변수의 정의를 약간 수정하는 방식으로 연구 목적에 맞는 새로운 수리모형을 완성 하였다. 구체적으로, 목적함수는 물량 * 거리의 합, 즉 총 운송비용을 최소화 하는 것이다. 결정변수는 각 수집소(i)에서 품목별로 폐전자제품을 특정 처리지(j)로 보내도록 지정하는 X_{ij} 이다. 제약 조건으로는 각 처리지의 가동률을 특정값 이상으로 유지하도록 제약식을 사용하여 모델링하였다. 결론적으로 본 연구에서 사용한 선형계획 모형의 수식은 구체적으로 다음과 같다.

목적함수: 최단거리 고려 및 운송비의 최소화

$$\min Z = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I x_{ijk} r (\lambda d_{ij} + \rho) \tag{1}$$

제약조건: 처리지의 능력을 고려

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

$$\sum_k \sum_j x_{ijk} = 1 \text{ for all } i \tag{3}$$

변수설명:

i = 수집소 수 (지자체, 생산자 물류센터), i=1 to I

j = 처리지 수 (Recycling, 협력업체), j=1 to J

k = 품목 수, k=1 to K

λ = 변동비

· 연료비 : 거리 x km당 유류단가(ℓ당 단가÷연비(8톤 트럭))

- 수선비 : km당 평균 소모/수선비 감안(타이어, 오일 등 손망실품).
- ρ = 고정비.
- 세금 및 보험료 : 연간 총금액을 운행일수 \times 1일 평균 운행거리로 나눔.
- 인건비 : 기사 1인당 평균 연봉 or 월봉을 평균 운행일수로 나눔. 인건비는 운송시간별로 감안하여 산출.
- 톨비 : 개별 계산.
- 알선료 : 건당 비용 산출.
- r = 8톤 트럭대수(냉장고개수*냉장고무게/1000kg)/8톤).
- 운반량 : 운반량은 8톤 트럭 1대당 풀 적재량 8톤으로 계산. 8톤 트럭 대수가 전체 폐기물처리 톤수라 할 수 있음.
- c_{jk} = 처리지 j의 품목 k의 처리능력
- d_{ij} = 수집소i와 처리지 j간의 거리
- q_{ik} = 수집소i에서 발생하는 품목 k의 연간 회수량
- α_j = 처리지 j의 최대 가동률(utilization)
- β_j = 처리지 j의 최소 가동률(utilization)

결정변수

X_{ijk} = 수집소i에서 처리지 j로 품목 k 할당시 1; 아니면 0

위 수식 (1)은 각 처리지로 할당된 물량과 처리지와 수거지 간의 거리, 운송비로 구성되어 있으며 총 운송비용을 최소화하는 목적함수이다. 수식 (2)는 처리지의 Load Balancing을 고려한 처리 능력 제약식으로 처리지 j에 최대, 최소 처리 능력 범위 내에서 수집소i의 물량을 할당하는 것을 의미 한다. 즉 최소처리능력을 설정해 줄 경우 설정된 이상의 물량을 기본으로 우선 배당 받는 방식이라 할 수 있겠다. 수식 (3)은 각수집소는 반드시 품목별로 하나의 처리지에 할당되어야 한다는 제약식이다.

V. 입지선정 모형의 적용

본 연구에서는 실증 데이터에 기반을 둔 회수물류 재처리 최적모형을 산출함에 있어 국내 특정지역-그 중에서도 호남권-의 폐가전제품의 회수물류 데이터를 직접 활용하여 실험을 진행하였다. 이는 호남지역이 다른 지역에 비해 가장 재활용센터가 부족한 지역 중의 하나이고 이로 인해 재활용 효율이 낮은 지역 중 하나로서 모형의 효율성 검증에 적절하다고 판단되었기 때문이다.

호남지역의 경우 회수물류 처리방식 자체가 직송직하 방식으로 이루어지고 있다. 구체적으로 현재 역물류방식 하에서 발생할 것으로 예측되는 운송비용을 먼저 산출한 다음에 이를 바탕으로 본 연구에서 제안하는 공동회수법, 추가R/C산정의 대안과 비교해 보았다.

현재 데이터는 가상의 수집소를 선정하여 R/C와의 거리와 수량을 표현한 것이다. 각 수집소의 현재 위치나 크기를 수집할 수 없었기 때문에 호남권의 각 행정구역마다 하나의 수집소가 있다고 가정하고 데이터를 수집하였다.

1. 현재 직송직하 방식을 가정한 운송비 및 이동거리 산출

그림 2는 현재 전남 장성군 삼계면 월연리의 R/C 중심으로 이루어지고 있는 호남권의 회수물류 체계를 보여주고 있다.



<그림 2> 호남권 직송직하 회수물류 체제

월연 R/C는 지난 2008년에 세워진 것으로 호남권에 있는 모든 수집소에서 모아진 폐가전 제품의 리사이클링을 책임지고 있다. 본 논문은 폐냉장고의 운송비만을 생각하기 때문에 다른 폐가전제품을 배제한 폐냉장고를 기준으로 값을 계산하였다. 호남권의 총 폐냉장고 회수량은 조사할 수 있었지만, 각 행정구역내에 있는 수집소의 냉장고 회수량을 조사할 수가 없었다. 그래서 호남권 폐냉장고 수집 양을 기준으로 하여 호남권의 각 행정구역상의 생활 폐기물 양을 비례적으로 계산하여 각 행정구역마다 연간 폐냉장고 회수량을 계산하였다.

냉장고 1대 당 무게는 120Kg이고 8톤 트럭에 8톤을 모두 적재 시킨다고 가정 하였을 때 (냉장고 개수 * 120Kg / 1000Kg) / 8톤 이라는 산출 공식에 의해서 운반트럭의 대수를 계산하였다.

또한 수집소와 처리지간 거리는 수집소가 각 행정구역마다 1개씩 있다는 사실은 알 수 있었으나 수집소의 위치를 정확히 알 수 없었기 때문에 각 행정구역의 구청 또는 군청을 기점으로 수집소의 기점이라 가정하고 리사이클링 센터와의 거리를 산정하였다.

환경부에서 제출한 2008년도 통계자료에 따라 운송에 드는 변동비는 Km당 1475원이라고 계산하였고, 운송 시 드는 고정비는 45,000원으로 가정하였다. 앞에서 만든 운송비 결정 모형에 변동비와 고정비, 운반 트럭 대수와 수집소-R/C 간 거리를 대입하여 현재 R/C로의 운송비를 구해보자면 다음과 같다.

<표 1> 현재 호남권 R/C 체제하에서의 회수물류 현황: 운송비 및 이동거리 위주

현재R/C	운송비 (천원)	연간냉장고회수량 (대)	운반트럭대수 (왕복 8톤)	수집소와 R/C간 거리 (Km)
동구	30,081	3,348	100	34.51
서구	41,445	5,669	170	26.94
남구	31,635	3,098	93	40.05
...
진도군	14,853	462	14	139.18
신안군	15,334	673	20	96.83
합계	1,654,699	89,609	2,688	

* 자료출처: 환경부 (www.me.go.kr)

현재 41군데의 수거지에서 기존R/C로 운송되는 총 운송비는 약 16억 5천만 원으로 나타났다. 이는 호남권 총 생활폐기물 운반비 약 107억에 대비하여 1/10수준으로 상당히 높은 것으로 나타났다.

2. 대안 1: 추가 R/C 선정

이미 과밀화된 월연리 R/C의 상황을 고려할 때 생각해 볼 수 있는 대안은 추가 R/C의 선정이다. 기존의 R/C를 유지 하면서 최적 입지 선정을 통해 나온 R/C를 추가 선정하는 방법을 생각해 보았다. 추가적인 R/C를 선정하는 방법에는 입지 선정 시 자주 이용되는 최단거리법을 사용하였다. Francis & White(1974)에 의하면 두 지점간의 새로운 최단거리 지점은 두 개의 직에 의해서 나온 기존 두 지점의 교점 중 하나라고 정의 하고 있다. 따라서 신규 R/C의 최적위치는 모든 수집소 및 R/C의 경도(x좌표)와 위도(y좌표)를 나타내는 수직선과 수평선의 교점들 중 하나라고 볼 수 있다.

예를 들어 그림 3에서와 같이 수집소1과 수집소2 두 점을 (7,9)와 (2,2)로 가정하면 새로운 최단거리지점은 (2,7)로서 새로운 R/C는 두 점의 x, y좌표의 교점이 되는 것과 같은 원리라 할 수 있다.



<그림 3> 추가R/C 선정을 위한 직각거리 위치선정 예시 (Francis & White, 1974)

이 같은 이론을 넓게 확장하여 호남권에 적용 가능한 추가 R/C의 위치를 실제로 추정 하였다. 이를 위해, 먼저 그림 4에서와 같이 전체 호남권을 모눈종이 상에 표시하여 각각의 수거지의 위치가 X, Y좌표로 표시 될 수 있게 하였다. 그리고 직각거리 위치 선정을 이용해서 각각의 교점을 계산하였다. 이렇게 나온 교점들을 반복하여 직각 거리를 계산해보면 최종적

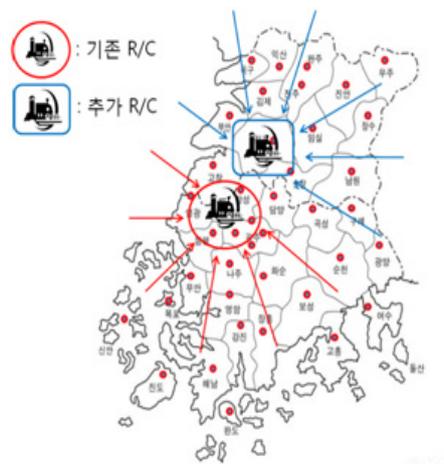
으로 모눈종이 상에 (13.17)라는 좌표가 도출되었다.

아래 그림 4와 같이 표시된 좌표를 실제 지도 좌표에서 찾아보면 대략적으로 위도(y) 33.8, 경도(x)130.2의 지역임을 알 수 있다. 이는 대략 정읍과 장성 사이의 지역으로서 그림 5에 표시된 지역임을 알 수 있다. 류재환(2007)의 논문에서는 이러한 계산 절차를 하나의 최적화 프로그램으로 만들어서 통계량 생성 및 계산의 비교가 가능 하도록 제시하고 있다.



<그림 4> 호남권 수집소 X, Y 좌표현황

이 연구에서 나온 최적화 좌표는 위도(y) 35.2, 경도(x)126.8로 계산되어졌는데 정확한 데이터에 의해 산출된 위 좌표값 역시 위에서 대략적으로 산출해본 최적화 위치와 유사한 곳임을 알 수 있다.



<그림 5> 호남권 추가 R/C 선정 위치

이는 새로운 R/C의 입지 역시 현재 존재하는 R/C와 거리상 가까운 곳으로서 현재 월연 R/C의 입지 적절성을 나타내는 것으로도 해석할 수 있겠지만 두 개의 R/C가 인접하게 될 경우 발생할 수 있는 비효율성을 해결할 수 있는 추가적인 고려가 필요하다.

따라서, 현재의 월연 R/C와 병존하는 새로운 R/C의 입지를 산정하기 위해서 본 연구에서는 산출된 추가R/C와 기존R/C를 기준으로 하여 거리와 수거량을 생각한 경계선을 선정하였다. 그리고 각각의 수거지에서 알맞은 R/C로 운반하도록 가정하였다. 경계선은 아래 그림 6에 나타난 바와 같다. 경계선을 기준으로 호남권 내 24개의 행정구역은 기존 월연 R/C로 재처리 회수물류를 운송하고 17개의 행정구역에서는 추가될 R/C로 재처리 물량을 운송하는 것으로 가정 하였다.



<그림 6> 기존 R/C와 추가 R/C 입지를 기준으로 나눈 경계선

위 경계선을 기준으로 회수물류 수집이 이원화 된 상황을 가정하여, 4 장에서 제안한 운송비 결정 모형에 변동비와 고정비, 운반 트럭 대수와 수집소- R/C거리를 대입하여 현재 R/C와 추가 R/C로의 구체적인 운송비 및 이동거리등은 아래 표 2와 표 3에 나타나 있다. 표 2에서 알 수 있는 것처럼, 기존의 R/C로 폐냉장고 운반이 결정된 24곳의 행정구역 수거지로부터의 총 운송비는 약 10억 2천만 원 정도로 계산되었다. 표 3에서는 추가R/C로 17개 행정구역에서 발생하는 냉장고 회수물류를 운반할 때 소요되는 운송비와 이동거리 등이 나타나 있다. 대략적인 운송비는 연간 약 5억3천만 원 정도인 것으로 계산됐다.

〈표 2〉 현재 R/C로의 운송비 및 이동거리 현황

현재R/C	운송비 (천원)	연간냉장고회수량 (대)	운반트럭대수 (8톤)	수집소와R/C센터간거리 (Km)
동구	30,081	3348	100	34.51
서구	41,445	5669	170	26.94
남구	31,635	3098	93	40.05
...
합계	1,027,299			

〈표 3〉 추가 R/C로의 운송비 및 이동거리 현황

현재R/C	운송비 (천원)	연간냉장고회수량 (대)	운반트럭대수 (8톤)	수집소와R/C센터간거리 (Km)
전주시	202,506	11,309	170	74.83
군산시	80,071	4,197	63	80.13
익산시	109,094	5,165	77	89.37
...
합계	539,737			

결론적으로 본 연구에서 제안한 운송비 결정모형을 토대로 만약 현재의 R/C에 더하여 추가 R/C 입지를 선정하고 두 개의 R/C를 동시에 가동했을 경우에 발생하는 총 운송비는 대략 15억으로 계산되었다. 이는 현재 R/C센터로만 운반했을 때 드는 비용의 16억 원보다 1억 원 가량 적은 비용이 소요된다는 의미이다. 장기적으로 리사이클링 센터를 가동 시킬 경우 지속적으로 이익을 얻을 수는 있겠지만 폐냉장고만을 처리할 경우에는 이익이 미미해서 추가적인 폐가전제품을 처리하여야지만 큰 이익을 창출할 수 있을 것으로 생각된다.

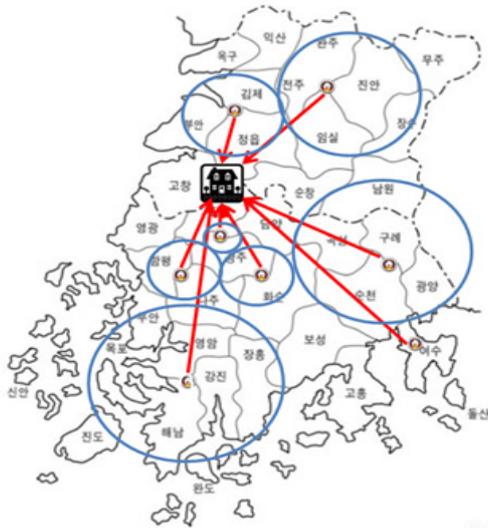
3. 대안 2: 발생 폐기물량을 기준으로 한 공동회수

앞에서 언급한 바와 같이 호남권은 현재 장성군에 세워진 R/C로 다양한 폐가전제품들이 모여져 처리되거나 재활용 되고 있다. 하지만 각 행정구역마다 이동 거리가 상이하고, 발생하는 폐기물의 양도 차이가 크다. 그럼에도 기존의 연구에서는 실제 발생하는 폐기물의 양을 중요시 하게 여기지 않았다.

따라서 본 연구에서는 두 번째 대안으로서 폐기물 발생량을 기준으로 한 공동회수 모형을 제안한다. 모든 행정구역에서 일률적으로 R/C로 운송하지 않고 적정수준 이상의 물량이 지역에서 집합된 후 운송된다면 운송비용을 줄일 수 있을 것으로 판단되기 때문이다. 실제적인

검증을 위해 앞서 2 절에서 산출하였던 호남권 최적의 추가R/C 지역(인정읍과 장성 사이, 위도 33.8, 경도 130.2)를 공동 R/C로 가정하고, 폐기물 발생량을 고려한 운송비를 계산해 보았다. 운송에 드는 변동비 및 고정비는 앞에서 언급한 수치와 같다고 가정하였다.

선정기준은 우선 폐기물 발생량이 많은 지역을 으뜸차순으로 정렬하여 80톤 이상의 폐기물이 발생하는 지역만을 폐기물이 많이 발생하는 지역으로 먼저 지정하였다. 이후 이에 미치지 못하는 나머지 폐기물 발생량이 미미한 지역은 제일 근접한 곳으로 합류를 시키는 방법으로 지역을 그룹화 하였다.



<그림 7> 폐기물 발생량 기준 공동회수 지도

이처럼 임의의 초기지역을 선정하고 다시 우리나라의 실제 지도의 좌표에 대입하여 묶인 지역들이 지리적으로도 적절성을 가지는 지를 검토하였다. 이를 통해 실제 두 지역을 잇는 도로가 멀리 있거나 거리가 긴 경우 가까운 다른 지역으로 합류를 시키는 조정 작업을 진행하였다. 결과적으로, 폐기물 발생량을 기준으로 총 8개의 지역그룹이 선정되었다. 제일 범위가 큰 지역은 10개의 행정구역이 합쳐진 것부터 1개의 행정구역만으로 구성된 지역그룹도 존재 하였다. 또한 지도상으로 확인해 보면 광주지역에는 많은 수의 지역그룹이 배정되었고 상대적으로 광주에서 멀어질수록 구역의 범위가 넓어져서 여러 행정구역이 하나의 지역그룹으로 묶이는 것을 볼 수 있다. 구체적인 그룹화 결과는 위 표 4에 제시되어 있으며, 이들 지역그룹에서 R/C로 회수물류를 운반하는데 필요한 운송비와 이동거리 현황은 표 5에서 확인할 수 있다.

〈표 4〉 공동회수를 위한 지역 그룹 (초기)

지역그룹번호	포함 지역
1	북구, 고창군, 장성군
2	서구, 남구, 영광군, 함평군
3	광산구, 동구
4	전주시, 정읍시, 완주군, 진안군, 무주군, 임실군, 장수군
5	여주시
6	익산시, 군산시, 김제시, 부안군
7	목포시, 나주시, 화순군, 해남군, 완도군, 무안군, 영암군, 장흥군, 신안군, 진도군, 강진군
8	순천시, 광양시, 남원시, 고흥군, 보성군, 담양군, 곡성군, 구례군, 순창군

결국 8개 각각의 구역에서 발생하는 폐기물의 총합은 크기는 800톤에서부터 작게는 500톤 정도로 평균 670톤 정도의 규모이다. 결론적으로 폐기물 발생량을 기준으로 행정구역을 그룹화할 경우 소요되는 총 운송비는 약 9억7천만 원 정도이다. 이는 폐기물량에 따라 적절히 운송방식을 재조정하는 것도 운송비 절감에 큰 효과가 있음을 보여주는 결과라고 할 수 있겠다.

〈표 5〉 지역그룹별 운송비 및 이동거리 현황

지역그룹	총운송비 (천원)	수집소와 R/C센터간거리 (Km)	위도. 경도
1	87,110	29	(352,127.1)
2	95,653	35	(351,126.9)
3	86,516	40	(35.04,126.79)
4	157,155	119	(35.78,127.15)
5	87,830	143	(34.79,127.69)
6	115,539	97	(34.97,126.87)
7	142,820	84	(34.79,126.38)
8	220,163	97	(34.98,127.43)
합계	972,790		

VI. 결론

소비자의 소비 욕구주기가 짧아짐에 따라 우리가 사용하는 전자제품들의 사용주기도 날이 갈수록 짧아지고 있다. 이에 따라 사용 후 버려지는 전자제품 회수물류의 양도 날이 갈수록 증가하고 있으며 이를 처리하기 위한 재활용센터의 구축과 효율적인 운영이라는 환경 문제 국제적으로 매우 중요한 이슈이다. 본 연구는 전자제품 회수물류 재처리센터의 입지와 관련하여 운송비와 이동거리 관점에서 가장 효과적인 장소와 물류 수집 방식과 관련하여 활용할 수 있는 입지선정모형을 제안하고자 하였다. 전자제품의 종류가 워낙 다양하고, 또 국내의 경우 전자제품 재처리 시스템 자체가 지역자치단체 주도하에 개별적으로 운영되고 있는 만큼 모든 제품에 대해, 또 국내 전 지역을 하나로 고려한 에서 단일한 최적 모형을 제안하기에는 연구의 한계가 존재한다. 이에 전자제품 중에서도 회수물류 비중이 큰 편에 속하는 냉장고, 그리고 재처리 비율이 상대적으로 떨어지는 호남을 대상지역으로 선택하여 관련한 실제 데이터에 기반을 둔 운송 최적화 모형을 제안하였다. 제안된 모형을 기반으로 호남지역에서 최적의 R/C센터 입지를 계산하였으며, 이 곳에 R/C센터가 구축된다는 가정 하에 총 운송비를 절감할 수 있는 다양한 대안까지 제안하였다. 첫째, 현존하는 R/C센터에 추가하여 또 하나의 R/C를 건설하는 방법, 둘째, 발생하는 냉장고 폐기물량을 고려하여 행정구역을 그룹화 하고, 그룹 내 지역별로 발생하는 회수물류를 공동 회수하는 방법 등이 그것이다. 구체적인 연구결과를 종합하면 다음과 같다.

먼저 추가 R/C를 선정하는 대안 1의 경우, 현재의 데이터를 기반으로 예측된 총 운송비는 약 15억 원 가량이다. 이는 현재 하나의 R/C를 운영하는 비용에서 약 6%정도의 비용절감을 의미한다. R/C가 두 곳으로 나뉘었기 때문에 운송거리가 기존보다는 감소되어 운송비용의 절감으로 나타난 측면이 크다고 하겠다. 또한 현재 호남지역의 심각한 회수량과 처리량 사이의 불균형 문제를 추가 R/C를 통해 완화시킬 수 있는 긍정적인 면이 있었다. 하지만 현실적으로, 새로운 R/C건설에 소요되는 각종 경비나 기타 사회문제 해결을 위한 비용과 시간 등을 고려하여 효과에 대해 보다 면밀한 분석이 필요할 것으로 보인다.

폐기물 발생량을 기준으로 공동 회수하는 방법을 제안한 대안 2에서는 예상 총 운송비가 약 9억7천만 원 정도로 계산되었다. 이는 기존 16억 원에 비해 약 61%에 불과한 비용으로서 대폭적인 운송비용 감소 효과를 기대할 수 있는 방법으로 나타났다. 중간집하장이라고 하는 중간 거점을 활용하여 공동 수송이 가능하게 됨으로써 적재 효율이 향상되었기 때문으로 추측된다. 대안2와 같은 방식은 향후 호남권과 유사한 상황, 즉 폐전자제품의 회수량과 처리량

의 불균형이 마찬가지로 심한 수도권이나 영남권의 R/C의 입지 문제 혹은 R/C로의 운송방안 등을 고민하는 데 있어도 약간의 시사점을 줄 것으로 판단된다. 중앙정부가 아닌 지방자치단체 주도 하의 R/C 건설 추세가 보편화되는 최근의 국내 실정을 감안해 볼 때 지자체별로 최적의 R/C 입지를 검토시 활용 가능한 모형을 제안했다는 측면에서 연구의 상당한 의의가 있다. 또한 서론에서 언급한 바와 같이, 폐전자제품의 처리가 국내 뿐 아니라 세계적으로도 다양한 방안을 고민하는 시점인 만큼 연구의 결과는 국내와 비슷한 상황 하에 있는 신흥 개발도상 국가의 환경 문제 해결에도 약간의 시사점을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- 권오영, 김대진, “전자기업의 회수물류 촉진방안에 관한 전략적 고찰”, 「대한경영학회지」, 제25권 제2호, pp. 1219-1236, 2012.
- 김창봉, “우리나라 수출입 기업의 역물류(Reverse Logistics) 프로세스에서 정보 및 포장활동이 역물류 성과에 미치는 영향”, 「한국물류학회지」, 제21권 제1호, pp. 229-249, 2011.
- 김현수, 류재환, 홍민선, 임석철, “폐가전제품 회수물류 네트워크 최적화”, 「IE interfaces」, 제22권 제2호, pp. 154-161, 2007.
- 나호영, 이상현, “역물류를 고려한 통합물류망에서의 입지 : 경로문제”, 「IE Interfaces」, 제22권 제2호, pp. 153-164, 2009.
- 서창적, 전희준, “회수물류 운영 요인의 우선순위 선정”, 「대한경영학회지」, 제20권 제1호, pp. 175-190, 2006.
- 정기호, 고창성, “택배 운송 네트워크 설계를 위한 할당 문제”, 「대한산업공학회 춘계학술대회 논문집」, pp. 970-976, 2002.
- 정기호, 정원재, “택배산업의 효율적 공동수배송을 위한 수리적 모형 개발에 관한 연구”, 「물류학회지」, 제18권 제2호, pp. 131-147, 2008.
- 최순식, 이영훈, “기간별 수요가 변하는 상황에서의 입지선정 문제에 관한 연구”, 「대한산업공학회지」, 제33권 제4호, pp. 439-446, 2007.
- 한 대희, 한우철, 허태영, 원중현, 김현수, “폐가전제품 재활용을 위한 공동회수 모형”, 「한국컴퓨터정보학회논문지」, 제14권 제7호, pp. 161-168, 2009.
- 홍성학, 이영훈, “비용 제약 하에서 서비스 수준을 최대화하는 설비 입지 선정에 관한 연구”,

- 「대한산업공학회지」, 제30권 제2호, pp. 93-106, 2004.
- Manomaivibool P, “Extended Producer Responsibility in a non-OECD context: The management of waste electrical and electronic equipment in India”, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 53, No. 3, pp. 136-144, 2009.
- Tung-Lai H, “A Reverse logistics cost minimization model for the treatment of hazardous wastes”, *Transportation Research Part E*, Vol. 38, pp. 457-473, 2002.
- Vaidyanathan J, “The design of reverse distribution networks: Models and solution procedures”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 150, pp. 128-149, 2003.
- Wang D, Cai Z, Jiang G, Leuang A, Wong MH, Wong WK, “Determination of polybrominated diphenyl ethers in soil and sediment from an electronic waste recycling facility”, *Chemosphere*, Vol.60, PP.810-816, 2005.

ABSTRACT

A Study on the Optimal Method for the Waste Electronic Equipment Recycling Center: A Contribution to Environmental Hazards

Seok Kee Lee* · Jae-Whak Roh** · Yeong Bin Cho***

A short consumption cycle caused by the technological development and the diversification of customer lead to both the dynamic growth of the industry and the waste recycling issue at the same time. Including Korea, the situation is particularly worrisome in some countries, such as India and China, where acute environmental hazards have resulted from a combination of a lack of recycling centers' capacity and the domination of a large backyard recycling sector. A study about to maximize the current recycling center efficiency with minimal changes is required. In this study, we suggest the optimal location selection method for the recycling center based on the well-known reverse logistics cost minimization model. An actual recycling data about a specific electronic equipment and region in Korea are used for the verification of the method suggested.

Key Words : Reverse Logistics, Waste Electronics, Recycling Center, Location Selection Model

* Assistant Professor, Department of Industrial and Management Engineering, Hansung University, First Author

** Professor, Department of International Trade, Hansung University, Co-Author

*** Associate Professor, Division of Business Administration and Economics, Konkuk University, Corresponding Author.