經營科學
第20卷 第1號
2003年 5月

수리계획모형을 활용한 대도시 폐기물 관리 시스템의 광역화 운영 계획에 관한 연구*

김재희** · 김승권** · 이용대**

A Study on the Regionalization of the Municipal Solid Waste Management System Using a Mathematical Programming Model*

Jaehee Kim** · Sheung-Kown Kim** · Yongdae Lee**

■ Abstract ■

The increased environmental concerns and the emphasis on recycling are gradually shifting the orientation of municipal solid waste (MSW) management. This paper is designed to evaluate regionalization programs for MSW management system. We developed a mixed integer network programming (MIP) model to identify environment- friendly, cost-effective expansion plans for regionalization scenarios considered. The MIP model is a dynamic capacity expansion model based on the network flow model that depicts the MSW management cycle. In particular, our model is designed to determine the optimal form of regionalization using binary variables.

We apply this model to assess the regionalization program of Seoul Metropolitan City, which includes three scenarios such as 1) districting, 2) regionalization with neighboring self-governing districts, and 3) globalization with all districts. We demonstrate how our model can be used to plan the MSW system. The results indicate that optimal regionalization with nearby self-governing districts can eliminate unnecessary landfills and expansions if jurisdictional obstacles are removed.

Keyword : Municipal Solid Waste Management, Mixed Integer Programming, Capacity Expansion

논문접수일 : 2002년 9월 16일 논문게재확정일 : 2002년 12월 20일

* 본 연구는 2001년 서울특별시에서 고려대학교 환경기술정책 연구소에 의뢰한 '「자원이 순환되는 도시」를 만들기 위한 폐기물관리 종합 계획(2002~2011)'의 연구 성과 중의 일부로서, 폐기물 관리 정책 수립에 많은 관심을 보여주신 전 서울특별시 의회 김은경 의원과, 이 연구를 지원해 주신 서울특별시 폐기물 관리과 관계자들, 그리고 모형 수행에 사용된 ILOG CPLEX를 고려대학교에 기증해 주신 KSTEC에 감사 드립니다.

** 고려대학교 산업시스템정보공학과

1. 서 론

인구의 증가와 급속한 산업화에 따른 대량생산, 다량소비 및 일회용 생활 양식 등으로 인하여 폐기물 발생량이 증가하고 있으며, 발생되는 폐기물의 성상(性狀)도 과거와 달리 플라스틱이나 금속류, 섬유, 유리, 유기성 음식물 등으로 다양해지고 있다. 또한 추가 매립지의 확보가 현실적으로 어려워지고 시민들의 환경에 대한 관심이 높아짐에 따라, 단순한 매립위주 정책에서 벗어나 다양한 폐기물을 효과적으로 처리할 수 있는 폐기물 관리 방안이 요구되고 있다. 실제로 매립을 억제하고 폐기물처리에 의한 2차적인 환경오염을 줄이기 위해 재활용이 권장되고 유기성 폐기물에 대한 퇴비·사료화와 가연성 폐기물의 소각 처리가 시도되고 있다.

그러나, 보다 효과적인 폐기물 관리를 위해서는 다양한 폐기물 처리 공법의 개발 외에, 폐기물 관리 체계를 운용 시스템 관점에서 종합적으로 개선할 필요가 있다. 즉 폐기물 수거 단계에서 요금체계나 분리 수거 체계, 폐기물 관리 시설의 건설·확장 문제, 또는 발생되는 폐기물의 처리 경로 설정 등의 문제를 분석하고 개선방안을 도출해 봄으로써 폐기물 처리 시스템 전반의 효율을 제고할 수 있을 것이다[8].

폐기물 관리 시스템을 분석하기 위하여 여러 최적화 기법들이 사용되어 왔다. 문제의 특성에 따라 선형계획법(Linear Programming), 비선형 계획법(Nonlinear Programming), 동적 계획법(Dynamic Programming), 혼합 정수계획법(Mixed Integer Programming)과 같은 다양한 기법들이 사용되어 왔다.

선형 계획법은 문제의 특성상 시설 용량 확장 과정의 이산성 (discreteness)을 표현할 수 없다는 단점이 있지만, 폐기물 수송의 공간적 형태를 직관적으로 표현하기에 적합해서 간단한 네트워크 분석 문제에 제한적으로 적용되어 왔다[10, 16].

선형계획법의 가정을 완화시킨 비선형 계획법과 동적 계획법은 복잡한 시스템의 반영에 유리한 반면, 문제 크기가 커질 경우 해 도출에 어려움이 있어 아주 드물게 사용 되어왔다[4, 6].

한편 시설의 입지 선정과 관련한 문제에는 고정건설비의 이산성을 고려할 수 있는 혼합 정수 계획 모형이 사용되어져 왔다. Marks et. al.[17]에서는 이 분야에 대한 초창기의 사례가 정리되어 있다. 이후 Jenkins[13], Kirca and Erkip [14], Gottinger [9], Kulcar[15]는 경제적인 요소를 기준으로, 용량 확장을 배제한 채 폐기물 처리 시설의 입지와 경로 설정 문제를 다루었다. 최근 들어, Chang and Wang [7]은 시설의 신규 건설과 건설 후 추가 확장을 함께 고려한 용량 확장 모형을 제시하였고, Chang and Lin[5]에서는 추가 확장 없이 신규건설 만을 고려한 모형을 이용하여 폐기물 시설의 광역화 운영 시나리오들을 평가해 보았다.

본 연구에서는 기존의 외국 사례들이 우리와는 다소 다른 시스템 환경을 반영하고 있는 점을 고려해서, 건설 후 추가 확장까지 고려할 수 있는 Chang and Wang[7]의 모형을 수정 보완하여, 우리 현실에 적합한 형태로 발전시켜 보았다. 즉 폐기물 수집 단계에서 정확한 분리 수거 체계를 갖추지 못한 현실을 반영하여 수집 단계에 한해 폐기물의 수송 경로가 물리적인 성상이 아닌 수집 용기의 형태에 의해 결정되도록 했으며, 폐기물을 중간에 옮겨 싣는 적환장의 운영과 관련한 현실 상황을 반영할 수 있도록 새로운 제약식을 추가했다. 무엇보다도, 본 연구의 가장 큰 차이점은 Chang and Lin [5]이 광역화 운영 범위에 대한 구체적인 대안을 미리 정해 놓고 단순히 각 대안을 평가해 본 것과 달리, 광역화 운영의 최적 범위를 결정해 줄 수 있는 새로운 형태의 혼합 정수계획 모형을 제시해 보았다는 점을 들 수 있다. 그리고, 수립한 모형을 활용하여 처리 시설에 대한 ① 자치구별 단독운영, ② 인접한 자치구간의 광역화 운영, ③ 서울시 전체 시설의 통합 운영 방안, 각각에 대하여 경제성과 환경 친화적인 관점에서 폐기물의 최적 처리 경로 및 시설의 증설 결과를 도출하고, 각 시나리오

별 최적화 결과를 토대로 최선의 시나리오를 제시해 보았다

2. 폐기물 관리 시스템을 위한 수학 모형의 수립

본 연구에서는 생활 폐기물 처리 경로와 처리 시설의 증설 계획 및 광역화 방안을 도출하기 위한 수학 모형을 수립하였다. 수학 모형은 Network Flow 모형을 이용한 동적 시설 확장 문제로서 혼합 정수 계획 문제로 구성되었다.

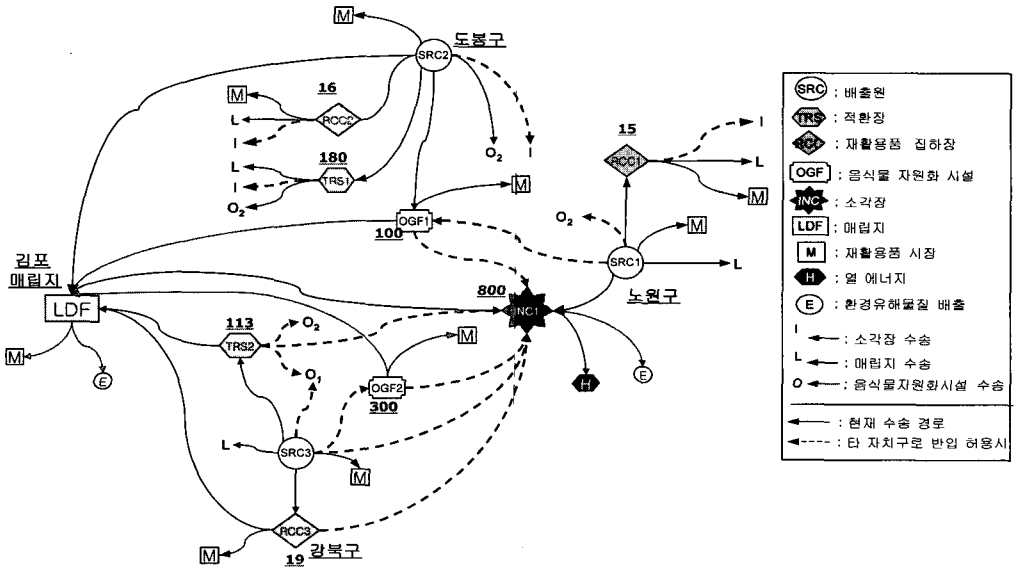
2.1 네트워크 모형

폐기물의 처리 경로를 분석하기 위하여 네트워크 모형을 활용하였으며, 이를 통해 폐기물의 종류(수집 용기 또는 성상)에 따른 처리 경로와 각 시설별 처리량을 계산할 수 있었다.

<그림 1>은 인접구(區)간의 광역화 운영을 가정했을 때, 서울시 북부 3개 자치구에 대한 네트워크를 보여주고 있다. 그림에서 노드는 처리 시설, 아크는 수송 경로를 의미한다[1].

발생원은 Super Source의 역할을 한다. 그리고, 자원 회수 시설(소각장)은 발생원에서 배출된 폐기물과 각 처리시설에서 처리 후 남은 잔재물을 받아 소각하여 열에너지 등으로 자원을 회수한다. 여기서 소각 후 남은 재 등의 잔재물은 매립지로 수송되어 매립된다. 음식물 처리 시설은 발생원에서 배출된 음식 폐기물을 처리하여 시장에 판매하고, 처리 후 남은 일반 잔재물은 자원회수시설이나 매립지로 보내 처리한다. 재활용품 집하장도 음식물 처리 시설처럼 재활용품을 분리·가공하여 시장에 판매하고, 처리 후 남은 잔재물은 자원회수시설로 보내 소각하거나 매립지로 보내 매립한다. 한편, 적환장은 발생원에서 나온 폐기물을 분리·압축하여 매립지까지 수송하는 역할을 담당한다. 적환장은 분리수거가 제대로 안된 폐기물을 성상별로 분리하고 성상에 따라 적절한 처리 시설로 반출시키는 기능을 수행한다. 마지막으로 매립지는 네트워크에서 Super Sink와 같은 역할을 담당한다.

<그림 1>에서는 정확히 나타나지 않지만, 폐기물의 종류에 따라 수송경로는 달라질 수 있다. 각



〈그림 1〉 네트워크 모형의 개략적 표현 예(서울시 북부 3개 자치구)

폐기물은 적환장, 자원회수 시설, 음식물 처리장, 재활용품 처리장, 매립지 등 지정된 처리 시설을 거쳐 이동한다. 한편, 그림에서 보면 발생원에서 재활용품의 일정량이 민간업자에 의해서 바로 수거되어 시장으로 이동될 수 있음을 보여주고 있다[1].

2.2 동적 용량 확장 모형

장기간의 폐기물 처리 계획을 수립하기 위해서는 어느 폐기물 처리 시설을 어느 시점에 얼마만큼의 용량으로 신규 건설하거나 증설할 것인지를 결정할 필요가 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 동적 용량 확장 모형(Dynamic Capacity Expansion Model)을 적용하였다.

동적 용량 확장 모형은 전체 시스템 측면에서 각 시설의 건설비와 운영비, 그리고 기간별 예산 제약 및 배출량과 시설 처리 용량 등을 고려하여, 분석기간 중 총 현가 비용을 최소화시키는 시설의 신규 건설 또는 증설과 관련한 최적의 위치, 시점, 용량을 도출한다.

2.3 혼합 정수계획 모형의 수립

수립한 동적 용량 확장 모형에서 폐기물의 흐름량 및 시설 용량에 관련된 변수는 실수 형태를 갖게 되며, 시설의 신규 건설 여부 및 광역화 추진 여부에 관련된 변수는 이진 정수 형태를 갖는다.

2.3.1 집합정의

AI^m = 폐기물 m의 경로 중 입력 아크집합

AO^m = 폐기물 m의 경로 중 출력 아크집합

$A^m = AI^m \cup AO^m$

SRC_N = 신규 발생원 집합

SRC_O = 기존 발생원 집합

$SRC = SRC_N \cup SRC_O$

TRS_N = 신규 적환장 집합

TRS_O = 기존 적환장 집합

$TRS = TRS_N \cup TRS_O$

RCC_N = 신규 재활용품 집하장 집합

RCC_O = 기존 재활용품 집하장 집합

$RCC = RCC_N \cup RCC_O$

OGF_N = 신규 음식물 처리 시설 집합

OGF_O = 기존 음식물 처리 시설 집합

$OGF = OGF_N \cup OGF_O$

INC_N = 신규 자원회수 시설 집합

INC_O = 기존 자원회수 시설 집합

$INC = INC_N \cup INC_O$

LDF_N = 신규 매립지 집합

LDF_O = 기존 매립지 집합

$LDF = LDF_N \cup LDF_O$

MRK = 폐기물 시장 집합

$MPF_N = RCC_N \cup OGF_N \cup INC_N$

$MPF_O = RCC_O \cup OGF_O \cup INC_O$

MPF(중간 처리 시설) $= MPF_N \cup MPF_O$

$FAC_N = MPF_N \cup TRS_N \cup LDF_N$

$FAC_O = MPF_O \cup TRS_O \cup LDF_O$

FAC(전체 시설) $= FAC_N \cup FAC_O$

$SITE$(모든 노드) $= FAC \cup SRC \cup MRK$

N_i = 발생원 i 자치구 내의 모든 노드

M = 전체 폐기물 종류 집합

M_1 = 가연성 폐기물 종류 집합

MC_k^m = 시설 k에서 폐기물 m을 유발하는 폐기물 집합

T(기간 집합) $= \{1, 2, \cdots, TN\}$

2.3.2 상수 정의

ct_{jkt}^m = 폐기물 m의 t시점의 아크 (j→k)간 단위 운송비

fc_{kt} = 시설 k의 t 시점에서의 고정 건설비

cc_{kt} = 시설 k의 t 시점에서의 변동 건설비

ce_{kt} = 시설 k의 t 시점에서의 단위용량 확장비

co_{kt}^{m} = 시설 k에서 폐기물 m의 t시점에서의 처리단가

G_{it} = 발생원 i에서 t시점에의 폐기물 발생 총량

Mr_{it}^{m} = 발생원 i에서 폐기물 m의 t시점에서의 구성비율

Sr_{it}^{m} = 발생원 i에서 폐기물 m의 t시점에서의 판매율

CR_{k}^{gm} = 시설 k에서 폐기물 g중 폐기물 m으로 변환률

$MinTake_{k}$ = 적환장 k로의 의무반입량

IRS_{it}^{m} = 발생원 i에서 폐기물 m의 t시점 판매단가

IRF_{kt}^{m} = 시설 k에서 폐기물 m의 t시점 판매단가

MIN_{k} = 시설 k의 최소 건설용량

MAX_{k} = 시설 k의 최대 건설용량

DC_{k} = 기존 시설 k의 현재 시설용량

$bigM$ = 다른 상수에 비해 월등히 큰 수

TL = 단위 기간 크기(일수)

β_{t} = t시점의 현가계수

2.3.3 변수정의

$TEXP_{kt}$ = t시점에 시설 k의 총 확장량

$NEXP_{ykt}$ = y시점에 건설한 시설 k의 t시점에서의 확장량

Y_{kt} = t시점에 시설 k의 건설유무를 나타내는 이진변수

FL_{jkt}^{m} = t시점에 노드 j에서 k로 수송된 폐기물 m의 중량

DC_{kt} = t시점에 시설 k의 설계 용량

YRI_{ikt} = t시점에 노드 i 발생원에서 k 자원회수시설을 이용할 수 있음을 나타내는 결정 변수

YR_{ijt} = t시점에 노드 i와 j가 서로 광역화되었음을 결정하는 변수

YRZ_{ijkt} = YR_{ijt} 결정을 위한 임시 이진 변수

2.3.4 목적함수

목적함수는 식 (1)과 같다. 전체 목적함수 식은 경제적인 요소를 수익과 비용으로 나누어, 분석기간중 총 현가 개념에서 비용은 최소화하고 수익은 최대화하도록 구성하였다. 비용은 수송비, 설비의 건설비(고정비, 변동비), 처리 시설 증설비, 처리 시설 운영비로 구성되었다. 그리고, 수익은 재활용품의 민간 처리 수익 및 처리 시설에서 발생한 재활용품 판매 수익으로 구성했다.

$$Min \sum_{t}^{T} \beta_t \left(\begin{array}{l} \sum_{m \in M} \sum_{(j,k) \in A^m} [ct_{jkt}^{m} FL_{jkt}^{m}] \\ + \sum_{k \in FAC_N} (cc_{kt} DC_{kt} + fc_{kt} Y_{kt}) \\ + \sum_{k \in FAC} [ce_{kt} TEXP_{kt}] \\ + \sum_{k \in FAC} \sum_{m \in M} \left[co_{kt}^{m} \sum_{(j,k) \in AI^m} FL_{jkt}^{m} \right] \\ - \sum_{m \in M} \sum_{i \in SRC} \sum_{k \in MRK} IRS_{it}^{m} FL_{ikt}^{m} \\ - \sum_{m \in M} \sum_{j \in (SITE \setminus SRC)} \sum_{k \in MRK} IRF_{jt}^{m} FL_{jkt}^{m} \end{array} \right) \quad (1)$$

2.3.5 제약식

(1) 흐름량 보전(Flow Conservation) 제약

흐름량 보전 제약식은 네트워크 상의 각 노드에 들어오고 나가는 아크의 흐름량을 같게 한다.

$$\sum_{k \in MRK} FL_{ikt}^{m} = Mr_{it}^{m} \cdot G_{it} \cdot Sr_{it}^{m} \quad (2)$$

for all $m \in M,\ i \in SRC,\ t \in T$

$$\sum_{k \in FAC} FL_{ikt}^{m} = Mr_{it}^{m} \cdot G_{it} \cdot (1 - Sr_{it}^{m}) \quad (3)$$

for all $m \in M,\ i \in SRC,\ t \in T$

$$\sum_{m \in M} Mr_{it}^{m} = 1 \quad \text{for all } i \in SRC,\ t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{(j,k) \in AI^m} \sum_{g \in MC_k^m} (FL_{jkt}^{g} \cdot CR_{k}^{gm}) = \sum_{(k,l) \in AO^m} FL_{klt}^{m} \quad (5)$$

for all $m \in M,\ k \in MPF,\ t \in T$

식 (2)는 발생량의 일부분이 민간업자에 의해 직접 수거되어 판매되는 것을 의미한다. 식 (3)은 발생원에서 발생한 폐기물 중 민간업자의 재활용품 처리 비율을 제외한 나머지가 처리 시스템 내로 반입되는 것을 의미한다. 식 (4)는 전체 폐기물 종류 비율의 합은 1이라는 것을 의미하고, 식 (5)는 각 처리 시설의 반입량과 반출량을 같게 한다.

(2) 처리 시설 신규 건설 및 건설 후 확장 용량 제약

다음의 식 (6)~식 (9)는 Chang and Wang[7]에서 제시된 식으로 처리 시설을 신규 건설하고 추가 확장할 때의 최소 값 및 최대 값을 설정한다.

$$\sum_{y}^{T} DC_{ky} \geq MIN_k \cdot \sum_{y}^{T} Y_{ky} \quad \text{for all } k \in FAC_N \tag{6}$$

$$DC_{ky} + \sum_{t=y+1}^{TN} NEXP_{kyt} \leq MAX_k \cdot Y_{ky} \quad \text{for all } k \in FAC_N,\ y \in \{1, \cdots, \mathrm{TN}-1\}) \tag{7}$$

$$\sum_{y}^{T} NEXP_{kyt} = TEXP_{kt} \quad \text{for all } k \in FAC_N,\ t \in T \tag{8}$$

$$DC_k + \sum_{t}^{T} TEXP_{kt} \leq MAX_k \quad \text{for all } k \in FAC_O \tag{9}$$

식 (6)은 신규 건설시 최소 건설 용량(MIN_k)제약을 의미하고, 식 (7) 역시 신규 시설의 경우에 대해, 최초의 시설 용량에 추가 확장량($NEXP_{kyt}$)의 총합을 더한 값이 정해진 최대값(MAX_k)를 넘을 수 없음을 의미한다. 식 (7)의 두 번째 항에서 변수 $NEXP_{kyt}$을 도입하여 y시점 이후에 대한 확장량만을 더한 이유는 최초 건설된 이후에만 추가 확장이 가능하도록 하기 위해서다. 식 (9)는 기존 시설에 대한 최대 확장량 제약으로 식 (7)과 달리 최초 건설 시점(y)의 구분 없이 단순히 t시점의 확장량 변수 $TEXP_{kt}$로 표현할 수 있다.

식 (8)은 신규 시설의 확장량 $NEXP_{kyt}$을 최초 건설 시점(y)의 구별 없이 확장 시점 t를 기준으로 한 $TEXP_{kt}$으로 바꿔주는 데, 이것은 목적함수 식 (1) 에서 확인할 수 있는 바와 같이, 단위 확장 비용(ce_{kt})이 시간(t)에 따라 달라지고, 또 $TEXP_{kt}$가 현가 계수(β_t)와 곱해져 최종적인 현가 비용으로 환산되기 때문이다.

(3) 시설 처리 용량 제약

다음은 각 시설에서 처리하는 양(반입량)이 시설 용량을 초과하지 못하고, 반대로 최소 반입요구량보다는 커야 한다는 제약이다.

$$TL\left[\sum_{y=1}^{t'}\left(DC_{ky} + \sum_{t=y+1}^{t'} \mathrm{NEXP}_{kyt}\right)\right] \geq \sum_{m \in M}\sum_{(j,k) \in AI^m} FL_{jkt}^m \quad \text{for all } k \in FAC_N,\ t' \in T \tag{10}$$

$$TL\left(DC_k + \sum_{t=1}^{t'} TEXP_{kt}\right) \geq \sum_{m \in M}\sum_{(j,k) \in AI^m} FL_{jkt}^m \quad \text{for all } k \in FAC_O,\ t' \in T \tag{11}$$

$$\sum_{m \in M}\sum_{(j,k) \in AI^m} FL_{jkt}^m \geq TL \cdot MinTake_k \quad \text{for all } k \in TRS, t \in T \tag{12}$$

식 (10)은 신규 시설의 처리량이 신규 건설 용량과 추가 증설량의 합보다 작음을 의미한다. 그리고 식 (11)는 기존시설의 처리량을 최초 설계 용량과 증설량의 합보다 작게 한다.

한편 우리나라의 경우, 좁은 골목이 많은 지역의 폐기물 수집에 한해 소형 수집 차량이 이용된다. 소형 수집 차량으로 수집한 폐기물 전량은 일단 적환장으로 반입되어 분리 · 압축 후 다음 처리 시설로 수송된다. 식 (12)는 이와 같은 상황을 반영하여 소형 차량을 통한 폐기물이 반드시 적환장으로 반입되어야 한다(의무 반입량)는 제약을 하고 있다.

(4) 기간별 신규 건설 및 증설 예산 제약

예산 제약식은 시설의 신규 건설 및 증설 비용의 합이 각 기간별로 책정된 예산을 넘을 수 없음을 의미한다.

$$\beta_t \left[\begin{array}{c} \sum_{k \in FAC_N} (cc_k DC_{kt} + fc_{kt} Y_{kt}) \\ + \sum_{k \in FAC} ce_{kt} TEXP_{kt} \end{array} \right] \leq B_t \quad \text{for all } t \in T \tag{13}$$

(5) 광역화 지역 선정을 위한 제약식

본 연구에서 고려하는 광역화는 자원 회수 시설을 중심으로 몇개 자치구를 묶은 후, 처리 시설을 공유하여 사용하는 운영 방안이다. 이 제약식은 자원 회수 시설을 공유할 수 있는 지역을 광역화하고, 일단 광역화 운영이 가능한 후보 지역에 한해 자원회수 시설과 음식물 처리 시설, 재활용품 처리 시설을 서로 연계해 공동으로 사용할 수 있도록 허용하고 있다. 물론 광역화 지역에 선정되지 못한 자치구는 단독 운영하며, 다른 자치구로 폐기물의 반입이 불가능하다고 가정하였다.

$$FL^m_{ikt} = Mr^m_{it} \cdot G_{it}(1 - Sr^m_{it}) \cdot YRI_{ikt} \quad \text{for all } i \in SRC, k \in INC, m \in M_1, t \in T \tag{14}$$

$$YRZ_{ijkt} \leq \frac{(YRI_{ikt} + YRI_{jkt})}{2} \quad \text{for all } k \in INC,\ i, j \in SRC, t \in T \tag{15}$$

$$YRZ_{ijkt} \geq \frac{(YRI_{ikt} + YRI_{jkt})}{2} - 0.5 \quad \text{for all } k \in INC,\ i, j \in SRC,\ t \in T \tag{16}$$

$$YR_{ijt} \geq \sum_k YRZ_{ijkt} \quad \text{for all } i, j \in SRC, t \in T \tag{17}$$

$$FL^m_{i'j't} \leq bigM \cdot YR_{ijt} \quad \text{for all } k \in INC,\ i' \in N_i, j' \in N_j,\ i, j \in SRC,\ m \in M, t \in T \tag{18}$$

식 (14)는 식 (10), 식 (11)과 함께 작용해서 발생원에서 배출된 가연분 폐기물 전량(M_1)을 자원 회수 시설(k)에서 처리할 수 있을 경우에만 반입을 검토할 수 있게 한다. 다시 말해, 식 (14)에서는 i 발생원에서 배출된 가연분 폐기물 전량을 k 자원 회수 시설로 보내는 것이 식 (10) 또는 식 (11)을 위반할 경우 $YRI_{ikt} = 0$, $FL^m_{ikt} = 0$, 으로 결정한다. 그리고, 식 (10), 식 (11)을 어기지 않으면서 k 자원 회수 시설에서 전량을 처리할 수가 있다면 YRI_{ikt}는 0 값으로 강제되지 않고, 광역화의 선호 형태에 따라 필요한 자치구끼리 묶여지게 된다.

식 (15), 식 (16)에 의하면 발생원 i와 j가 동시에 k자원 회수 시설을 이용할 수 있을 때 (YRI_{ikt}, $YRI_{jkt} = 1$) YRZ_{ijkt}는 1이 된다. 그러면, 식 (16)에 의해 $YR_{ijt} = 1$이 될 것이고 이 경우에 한해, 식 (18)의 결과로 i, j 발생원이 포함된 자치구의 모든 노드(발생원, 처리 시설)끼리 폐기물이 이동될 수 있게 된다. 한편, 이때 사용된 변수 YRZ_{ijkt}은 결정 변수 YRI_{ikt}에 종속되어 정해져서 이진 변수의 수는 많지만 실제로는 쉽게 풀릴 수 있는 구조를 갖고 있다.

(6) 이진 변수 제약

이진 변수 제약식은 시설 건설 여부와 광역화 지역 선정에 관련된 변수들이 0 과 1 중 한 가지 값만을 갖도록 하는 제약식이다.

$$Y_{kt} \in \{0,1\} \quad \text{for all } k \in FAC_N,\ t \in T \tag{19}$$

$$YRI_{ikt} \in \{0,1\} \quad \text{for all } k \in INC, i \in SRC, t \in T \tag{20}$$

$$YRZ_{ijkt} \in \{0,1\} \quad \text{for all } k \in INC,\ i, j \in SRC, t \in T \tag{21}$$

$$YR_{ijt} \in \{0,1\} \quad \text{for all } i, j \in SRC, t \in T \tag{22}$$

3. 서울시 폐기물 관리 시스템을 위한 모형 적용

3.1 수행 시나리오 구성

동적 용량 확장 모형을 현재의 서울시 폐기물 관리 시스템에 적용해 보았다. 폐기물 관리 정책 변경의 효과를 파악하기 위해, 처리 시설 운영 방식의 변경과 재활용률 제고(提高)에 따라 고려할 수 있는 다양한 시나리오를 구성했다. <표 1>은 수행 시나리오를 정리한 것이다.

〈표 1〉 수행 시나리오

	① 자치구별 단독운영 (현재 방식)	② 광역화 운영 (정책적가능안)	③ 서울시 통합운영 (이론적 최적안)
A. 현 재활용 정책 유지	Case A-①	Case A-②	Case A-③
B. 재활용 정책 반영	Case B-①	Case B-②	Case B-③

처리 시설 운영 방안으로 ① 자치구 단독 운영(현재 운영 방식), ② 광역화 운영(정책적 가능안), 그리고 ③ 서울시 통합 운영(이론적 최적안)을 상정했다. 첫 번째, 자치구 단독 운영은 현재의 운영 방식으로, 각 자치구의 시설을 해당 자치구에서만 이용하는 운영 방식이다. 즉 다른 자치구의 시설을 전혀 활용할 수 없다. 두 번째, 광역화 운영은 인접 구에 한해 시설을 서로 공동 이용하는 안으로서 각 자치구가 한가지 정도의 처리 시설만을 보유하고 시설을 상호 공유함으로써 시너지(Synergy) 효과를 얻어 낼 수 있다. 서울 북부의 경우를 예로 들면, 노원구는 자원회수 시설, 도봉구는 음식물 처리 시설, 강북구는 재활용품 처리장을 갖고, 이들 자치구들이 보유 시설을 공동으로 활용하는 경우를 의미한다. 세 번째, 서울시 통합 운영 안은 서울시 전체 자치구를 통합하여 광역화 운영하는 것으로서 현실적으로는 실현 가능성이 희박한 것으로 알려져 있다. 하지만 광역화의 이론적 효과가 어디까지 나타날 수 있는 지를 보여주는 중요한 기준을 제시 할 수 있다는 점에서 포함시켜 보았다.

한편 효과적인 폐기물 관리 계획을 수립하기 위해서는 앞서 고려한 시설 운영방안과 함께, 재활용 정책이 미치는 효과를 분석하는 것이 매우 중요하다. 그래서 A. 현재의 재활용 정책(재활용률)을 유지하는 경우와 B. 새로운 재활용 정책을 반영한 경우를 상정해 보았다. 재활용 정책 반영 여부는 일반 폐기물과 재활용품의 배출량에 영향을 주게 된다. 현재의 재활용 정책을 유지하면 전체 폐기물 배출량은 현재와 비슷한 성상으로 배출되지만, 새로운 재활용 정책을 반영하면 일반 폐기물의 양은 줄게 되고, 재활용품 배출량은 늘게 된다. 본 연구에서는 새로운 재활용 정책을 반영할 경우 재활용률이 2002년 기준 50%에서 2011년 60%로 증가할 것이라고 추정하여 분석하였다[2].

준비된 시나리오들은 모형 상에 쉽게 반영될 수 있었다. 처리 시설 운영 방식의 경우 ①안(자치구 단독 운영)과 ③안(서울시 통합 운영)은 폐기물의 경로 정보 즉, AI^m와 AO^m을 통해 반영할 수 있다. 그리고, ②안(광역화 운영방안)은 2.3.5절의 광역화 지역 선정을 위한 제약식을 포함시킴으로써 반영될 수 있다. 한편, 재활용 정책의 반영 여부는 단순히 폐기물의 성상비 상수 Mr_{it}^m를 수정하면 된다.

3.2 모형 입력 자료

폐기물 처리 시설의 용량 확장 계획과 폐기물의 처리 경로 설정을 위해서는 처리 과정의 경제적인 요소와 함께 환경 요소에 대한 정확한 산정이 필요하다. 특히, 자원 회수 시설의 건설 계획은 매립이 미치는 환경적 요인과 매립지의 경제적 가치, 그리고 소각이 미치는 경제적/환경적 요인을 정확히 산정 하였을 때 가능하다. 그러나, 본 연구에서는 환경 영향의 평가 방식에 대한 논란을 고려하여 정확한 비용 산정은 생략하고, 현재 환경부[3]에서 추진 중인 매립 억제 정책을 반영시켜 매립에 따른 목적함수 계수를 big-M으로 할당했다. 그리고 소각에 대해서는 따로 환경 비용을 부과하지 않고 경제적 요소만을 고려하여 목적함수 계수를 설정했다. 다만, 자원 회수 시설의 경우 소각에 따른 환경오염을 염려한 지역 주민의 반대에 부딪혀 더 이상의 신설이나 증설이 어려운 현실을 감안하여, 이미 계획된 마포 자원 회수 시설 750톤의 건설만을 허용하고, 나머지 시설에 대해서는 제약식을 통해 현재 용량을 초과할 수 없도록 했다.

나머지 음식물 자원화 · 재활용과 관련해서도 경제적인 요소만을 고려하여 목적함수 계수를 설정했다. 그리고 비교적 추정이 용이한 건설 비용과

폐기물의 운송·처리 비용은 과거 실적자료를 바탕으로 구성했다.

할인율은 2002년 현재 이자율, 물가 상승률 등을 반영하여 5%를 적용했다. 한편, 폐기물 발생량은 서울시[2]에서 예측한 향후 10개년간의 폐기물 발생량 추정치를 사용했다.

4. 모형 수행 및 결과

4.1 ILOG Concert Technology를 이용한 수학 모형화

수립된 혼합 정수 계획 모형은 매우 복잡한 모형과 방대한 자료로 구성된다. 이와 같은 대형 수학 모형을 효과적으로 다루기 위해, 모형의 입·출력 정보를 ILOG Concert Technology를 활용하여 제어해 보았다. 즉, 간단한 사용자 인터페이스를 통해 주요 수행 옵션 및 매개변수를 입력받아 모형의 입력 정보를 자동으로 생성한 후, ILOG CPLEX의 최적화 루틴을 원격으로 호출하여 해를 구하고, 그 결과를 사용자에게 보여줄 수 있는 사용자 프로그램을 구현했다[11, 12].

여기서 ILOG Concert Technology는 수학 모형의 변수, 상수, 목적 함수 그리고 제약식 등을 자연스런 대수학 기수법을 통해 정의하는 프로그램 라이브러리(Library)로서 매우 복잡한 수학식을 비교적 간단한 프로그램으로 구현 할 수 있도록 지원한다. 또한 수학식을 Model과 Data 부분으로 나누어 표시함으로써, Model의 구조가 확정되면 데이터만 반복적으로 수정해서 적용하는 경우에 매우 적합하다고 할 수 있다. 또한 그 형태가 C++ Class Library로 제공되어 데이터베이스와 연계가 용이한 장점이 있어, 모형의 입·출력 자료를 상용 데이터베이스 관리 시스템(DBMS)을 통해 관리할 수 있게 한다[11].

간단한 사용자 프로그램을 개발하기 위해 개발 언어로 MS Visual C++ 6.0을 사용하였고, DBMS는 Oracle 8.0을 사용하였다.

4.2 최적화 수행 결과

수학 모형은 25개 자치구에 대해 향후 10개년의 기간을 반영할 경우 (2,000×100,000) Node-Arc Incidence Matrix가 되며, ②안(광역화 운영 방안)까지 표현할 경우 1만 5천여 개의 이진 변수로 구성되는 방대한 문제가 된다. 하지만 이 중 500여 개의 YRI_{ikt} 변수만이 광역화 운영과 관련해서 실질적인 의사결정 역할을 수행하며, 나머지 이진정수 변수들은 YRI_{ikt}에 종속적으로 결정되는 특성을 갖고 있어, 실질적으로 수행시간에 영향을 미치는 정수변수의 수는 많지 않은 편이다. 실제로 ILOG CPLEX 7.0의 Branch & Bound와 Branch & Cut 알고리듬을 적용할 경우, Windows 2000을 기반으로 하고, Intel Pentium 4 1.7 GHz, 256MB RAM을 장착한 PC에서 소요 시간이 약 2분 정도로 양호한 수준이었다.

최적화 모형의 수행 결과를 바탕으로 시나리오 ② 의 광역화 대상지역을 선정한 결과는 <표 2>와 같다. 여기서, 광역화 대상 지역은 자원회수시설을 중심으로 시설 용량과 거리 비용 등을 고려하여 모형을 통해 결정된 것이다. 하지만, 광역화 지역 선정 문제는 지역 주민의 반대 등 여러 현실적인 어려움이 따르는 민감한 사항일 수 있으므로 광역화 대상 지역의 수만을 표시하였다.

〈표 2〉 광역화 대상지역 선정 결과

자원회수시설	광역화 대상
노 원	노원구 외 4개구
양 천	양천구 외 1개구
강 남	강남구 외 4개구
마 포	마포구 외 4개구
구로(광명)	구로구 외 1개구

<표 3>은 시설 용량 확장 계획이 반영된 2011년 기준 모형 수행 결과를 보여주고 있다. 광역화 정책의 변화에 따른 결과를 살펴보면, 매립량의 경우 시나리오 ② 또는 ③과 같이 광역화 운영 또는

통합 운영한 경우가 시나리오 ①과 같이 단독 운영한 경우보다 20~30%정도 감소함을 알 수 있다. 또한 자원 회수 시설의 활용률을 두 배 이상 높일 수 있었다. 이 결과는 설계 단계에서 이미 어떤 형태로든 광역화 운영을 염두에 두고, 자원회수시설의 시설용량이 정해진 때문으로 판단된다. 그러므로 광역화 운영을 통해 공동 활용하는 것이 시설 이용효율을 높일 수 있다는 것은 시스템 분석 측면에서 보면 아주 당연한 귀결이다. 음식물 처리 시설과 재활용품 처리 시설의 경우도 시설 활용률이 증가할 수 있음을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 광역화 운영을 통하여 불필요한 시설의 추가 건설을 줄일 수 있음을 보여주며, 광역화 운영이 타당한 것임은 물론 그 구체적인 광역화 연계 방안을 알려준다는 점에서 본 모형 분석의 의의를 알 수 있다.

다음으로, 현재의 재활용 정책을 유지한 경우와 새로운 재활용 정책을 반영한 경우를 비교해 보면 매립량은 일반 폐기물 배출량이 줄어듦에 따라 10% 이상 감소할 것으로 예상된다. 소각량과 자원회수시설 활용율도 가연성 폐기물 감소로 인해 줄어듦을 알 수 있다. 그리고, 재활용량은 135톤/일 증가할 것으로 분석되었다.

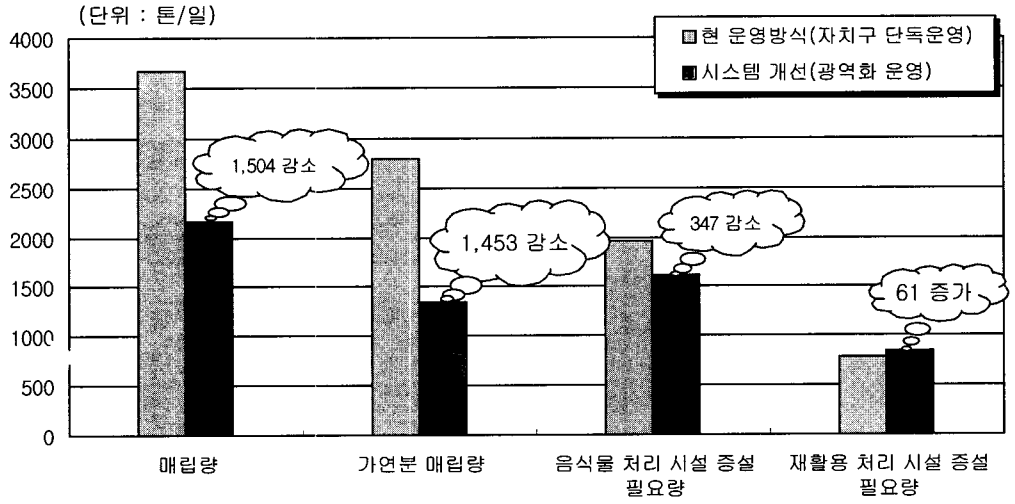
〈표 3〉 모형 수행 결과 종합(2011년 기준)

구 분		현 재활용률 적용			재활용 정책 반영		
		A-①	A-②	A-③	B-①	B-②	B-③
매립	매립량	4,042	2,753	2,725	3,730	2,329	2,301
	2000년 대비	71%	49%	48%	66%	41%	41%
자원회수시설	소각량	970	2,490	2,490	841	2,490	2,490
	시설활용률	32%	83%	83%	28%	83%	83%
음식물	음식물 처리량	1,973	1,973	1,973	1,973	1,973	1,973
	시설활용률	72%	81%	83%	72%	81%	83%
재활용	재활용량	1,043	1,043	1,043	1,178	1,178	1,178
	시설활용률	91%	92%	93%	97%	100%	100%

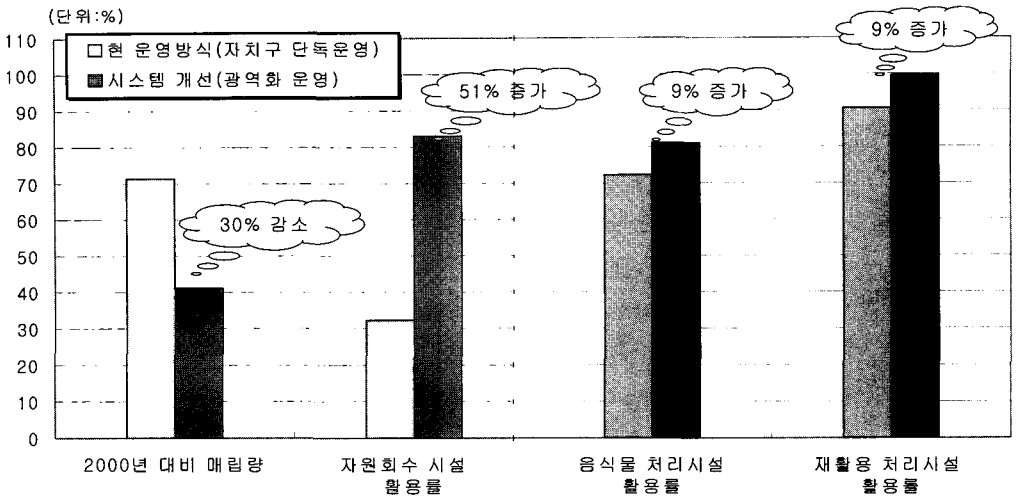
주) 자원회수시설의 최대 활용률은 보수 기간 및 계절 요인 등을 반영하여 83%로 설정하였다.

이상의 분석 결과는 적극적인 재활용 정책을 수립하고 집행하는 것이 필요하며, 자원 회수 시설을 중심으로 처리시설의 광역화 운영이 어떤 형태로 이루어지는 것이 바람직한 것인지를 보여준다.

현재의 운영 방식 Case A-①과 현실적으로 취할 수 있는 최선의 운영 정책인 Case B-② 의 운영 결과를 시설 처리량과 시설 활용률 관점에서 비교해 보면 <그림 2>, <그림 3>과 같다.



〈그림 2〉 단독운영과 광역화 운영 시설 처리량 결과 비교(2011년 기준)



〈그림 3〉 단독운영과 광역화 운영의 시설 활용률 비교(2011년 기준)

<그림 2>는 용량 확장 결과를 반영한 2011년도 기준 시설 처리량을 비교한 결과다. 이 결과를 보면 재활용 정책을 반영하여 광역화 운영을 수행했을 경우의 Case B-②가 현재의 Case A-①보다 매립량이 1,713톤/일 감소하고, 그 중 가연분 1,982톤/일이 자원회수 시설 처리량 증가를 통해 감소할 수 있음을 알 수 있다. 또한 음식물 처리 시설을 공유함에 따라 음식물 처리 시설 필요 용량도 268톤/일 줄일 수 있다. 하지만 재활용 처리 시설은 재활용량 증가로 32톤/일 더 필요하다. 이 결과는 더 많은 양의 폐기물이 재활용됨을 의미하므로 환경적으로도 바람직한 결과라 할 수 있다.

<그림 3>은 시설 활용율을 비교한 결과이다. 이 결과에서는 매립량의 경우 광역화 운영한 Case B-②의 결과가 현재의 Case A-① 보다 30% 감소함을 보여준다. 또한 광역화 효과에 따라 자원회수시설 활용율이 51% 증가하고, 음식물 처리 시설 활용율은 9%, 재활용 처리 시설 활용율은 9% 증가할 수 있음을 알 수 있다.

결국 적극적인 재활용 정책과 광역화 운영 방안 적용이 폐기물의 환경 피해를 최소화하며, 비용 측면에서도 상당한 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 대도시 폐기물 관리 경로와 처리 시설의 증설 계획 및 광역화 방안을 도출할 수 있는 수학 모형을 수립하여 서울시의 폐기물 관리 문제에 적용해 보았다. 이 모형은 용량 확장 모형을 기반으로 하여, 서울시 폐기물 관리 체계의 광역화 과정에서 대두되는 현실 조건을 정교하게 표현할 수 있도록 이진 정수 변수가 추가된 혼합 정수 계획 모형으로 구성되었다. 즉, 각 자치구마다 배출된 가연분 폐기물을 전량 처리할 수 있는 자원회수 시설로만 반입을 허용했으며, 자원회수 시설을 중심으로 몇 개 자치구를 묶은 후, 자원회수 시설, 음식물 처리 시설, 그리고 재활용품 처리 시설을 서로 연계해 공동으로 사용하도록 했다.

현재 운영 방안과 광역화 운영 방안의 비교 결과를 통해 광역화 운영이 불필요한 시설의 추가 건설을 줄일 수 있음을 확인할 수 있었으며, 광역화 운영이 타당한 것임은 물론 그 구체적인 광역화 연계방안을 알려준다는 점에서 본 모형 분석의 의의를 찾을 수 있다.

한편, 정확한 환경 비용을 산정하지는 않았지만 '매립 억제'라는 환경 정책의 목표를 달성할 수 있

는 모형을 수립함으로써 경제성 외에 환경 요소까지 어느 정도 반영할 수 있었다. 각 시설이 미치는 환경적인 요소 등을 정확히 반영하는데는 부족함이 있지만, 모형을 좀 더 확장한다면 각 시설이 토양 오염, 대기 오염, 수질 오염에 미치는 영향과 수송 과정의 소음 및 환경 오염 등의 요소를 반영 할 수 있을 것이다.

향후 연구를 통해 각 처리 시설이 미치는 환경 영향과 주민 피해 등을 고려한 다중목적 계획법을 적용한다면 좀 더 나은 운영 대안을 도출 할 수 있을 것으로 기대된다. 그리고, 수립한 수학 모형은 시설 확장 모형의 일반적인 형태를 잘 반영하고 있어, 자료 입출력 과정만 좀 더 일반화된 프로그램으로 개발한다면 다른 분야의 용량 확장 문제에도 다양하게 적용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] 김재희, 김승권, "혼합 정수 계획 모형을 활용한 서울시 폐기물 관리 시스템 예비 분석", 「한국경영과학회 추계 학술대회 발표논문집」, (2001), pp.72-75.

[2] 서울특별시, 「『자원이 순환되는 도시』를 만들기 위한 폐기물관리 종합 계획 (2002~2011)」, 2002.

[3] 환경부, 「국가폐기물 관리 종합계획 시안 마련을 위한 연구」, 2001.

[4] Baetz, B.W., "Optimization/Simulation Modelling for Waste Management Capacity Planning," *Journal of Urban Planning and Development*, Vol.116(1990), pp.59-76.

[5] Chang, N.B. and Y.T. Lin, "Economic Evaluation of a Regionalization Program for Solid Waste Management in a Metropolitan Region," *Journal of Environmental Management*, Vol.51, No.3(1997), pp.241-274.

[6] Chang, N.B., Y.C. Yang, and S.F. Wang, "Solid Waste Management System Analysis with Noise Control and Traffic Congestion Limitations," *Journal of Environmental Engineering*, Vol.122, No.2(1996), pp.122-131.

[7] Chang, N.B. and S.F. Wang, "Solid Waste Management System Analysis by Multiobjective Mixed Integer Programming," *Journal of Environmental Management*, Vol. 48(1996), pp.17-43.

[8] EPA, *Decision-Maker's Guide to Solid Waste Management, Volume II*, U.S. EPA, 1995.

[9] Gottinger, H.W., "A Computational Model for Solid Waste Management with Application," *European Journal of Operational Research*, Vol.35(1988), pp.350-364.

[10] Hsieh, H.N. and K.H. Ho, "Optimization of Solid Waste Disposal System by Linear Programming Technique," *Journal of Resource Management and Technology*, Vol.21 (1993), pp.194-201.

[11] ILOG, *ILOG Concert Technology 1.1 : Reference Manual*, ILOG Corporation, 2001.

[12] ILOG, *ILOG CPLEX 7.0 User's Manual*, 2001.

[13] Jenkins, L., "Parametric Mixed Integer Programming : An Application to Solid Waste Management," *Management Science*, Vol. 28(1982), pp.1271-1284.

[14] Kirca, O. and N. Erkip, "Selecting Transfer Station Locations for Large Solid Waste Systems," *European Journal of Operational Research*, Vol.38(1988), pp.339-349.

[15] Kulcar, T, "Optimizing Solid Waste Collection in Brussels," *European Journal of Operational Research*, Vol.90, No.1(1996), pp. 71-77.

[16] Lund, J.R. and G. Tchobanoglous, R.P. Anex, and R.A. Lawver, "Linear Programming for Analysis of Material Recovery Facilities," *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 120, No.5(1994), pp.1082-1094.

[17] Marks, D.H., C.S. ReVelle, and J.C. Liebman, "Mathematical Models of Location : A Review," *Journal of Urban Planning and Development*, Vol.96, No.1(1970), pp.81-93.