

혼합 정수 계획 모형을 활용한 서울시 폐기물 관리 시스템 예비 분석 Preliminary Analysis of Solid Waste Management System for Seoul City by a Mixed Integer Programming Model

JaeHee Kim*, Sheung-Kown Kim*

*Department of Industrial Systems and Information Engineering, Korea University

Abstract

This paper presents a sophisticated mixed-integer linear programming model that may help regional decision-maker to develop long term plan of solid waste management. The model revises Ni-Bin Chang(1996)'s integrated waste management models to fit Korean solid waste management system. We apply this model to evaluate impact of facility sharing and coordinated operation among three self-governing districts in Seoul city. Our study results indicate that facility sharing and coordinated operation among districts eliminate unnecessary landfilling and facility expansion.

1. 서론

1960년대 이후 산업화를 통한 급속한 경제성장을 이룬 우리나라는 필연적으로 대량소비시대를 맞게 되었다. 그리고, 그 영향은 많은 양의 폐기물 발생을 수반하고 있다. 특히 발생하는 폐기물의 성장도 과거와는 달리 플라스틱이나 금속류, 섬유, 유리, 유기성 음식물 등 종류가 다양해지는 특성을 띠고 있다.

이와 같은 많은 양의 다양한 폐기물을 처리하기 위하여 우리나라에서는 여러 가지 폐기물 처리방법을 활용하기보다는 매립에 크게 의존해 왔다. 그러나 매립위주의 정책은 기존 매립지의 포화, 지역주민의 반발, 지가상승, 그리고 최근 관심이 집중되는 침출수에 의한 환경오염 등의 이유로 어려움을 겪고 있는 실정이다. 이에 대한 대안으로 적극적인 감량화와 재활용을 도모하거나, 폐기물을 소각 처리하고 유기성 폐기물의 퇴비사료화 등을 통한 자원화를 하는 등의 폐기물 처리방식의 다양화가 요구되고 있다.

보다 효과적인 폐기물 관리를 위해서는 새로운 폐기물 처리 공법을 개발하는 노력과 함께 시스템 관점에서 시설과 수거·운반 체계에 대한 개선이 필요하다. 즉 폐기물 수거 단계에서 요금체계나 분리 수거 체계, 폐기물 관리 시설의 건설·확장 문제, 또는 발생하는 폐기물의 처리 경로 설정 등의 문제를 분석하고 개선방안을 도출해 봄으로써 폐기물 처리 시스템 전반의 효율을 제고할 수 있을 것이다.

폐기물 관리 시스템을 분석하기 위하여 여러 최적화 기법들이 사용되어 왔다. 문제의 특성에 따라 선형계획법(Linear programming), 동적계획법(Dynamic programming), 혼합정수계획법(Mixed Integer programming), 다중목적계획법(Multiobjective programming) 등이 사용되어 왔는데, 설비의 입지와 용량을 결정하는 투자 계획 문제에는 정수 변수 제약을 추가해서 혼합정수계획법이 사용되어져 왔다. 폐기물 관리 시스템에 혼합 정수 계획법을 적

용한 사례를 아직 국내에서는 찾아볼 수 없는 실정이며, 외국의 경우로는 Marks et al.(1970)의 연구를 시작으로 1990년대 까지 여러 사례를 들 수 있다. 이중 Ni-Bin Chang(1996)은 폐기물 시설 투자 계획문제에 경제적인 관점 외에 대기 오염, 침출수, 소음, 교통 혼잡도 등의 환경요소까지 감안한 다중 혼합 정수 계획법을 적용하여, 여러 상충되는 목적들간의 상관 관계를 분석해 보는 성과를 보였다. 그러나 각 경로에 대해 폐기물 종류별로 구분된 흐름량을 파악하지 않고 있다는 점과 폐기물 종류를 나누는 과정에서 물리적인 성상을 기준으로 함으로써, 실제 폐기물 수송 경로가 물리적인 성상구분이 아닌 수집 단계에서의 분류 체계 방식을 따르는 현실을 정확히 표현할 수 없다는 문제를 가지고 있다. 이외에도 외국의 연구 결과는 우리와는 다소 다른 수거 처리 방식을 기준으로 하고 있어, 그들의 모형을 그대로 적용하기에는 무리가 있다.

따라서 본 연구에서는 우리 현실에 부합되면서, 각 폐기물 종류별로 개별적인 흐름량을 추적할 수 있는 모형을 수립해 봄으로써, 폐기물 관리 시스템의 상세한 분석을 가능하도록 해 보았다. 실질적인 성과를 위해 서울시 북부지역 3개 구의 폐기물 관리 시스템을 대상으로 하여 모형을 수립하고 그 결과를 검증, 분석해 보았다.

2. 폐기물 관리 시스템의 모형화

2.1. 분석 대상 시스템 소개

폐기물 관리 시스템의 일반적인 구성요소를 모두 포함하여 정교한 모형 수립을 가능케 할 수 있으면서, 방대하고 반복적인 데이터 처리 과정에서 오는 불필요한 노력을 덜어줄 수 있는 지역을 분석 대상으로 정할 필요가 있었다. 그 결과 서울시의 25개 자치구 중 독립된 서브 시스템의 성격이 짙으면서, 우리나라 폐기물 관리 시스템의 일반적인 모습을 두루 갖춘 북부의 노원, 도봉, 강북, 이상 3개 자치구를 분석대상으로 정하였다. 다음의 <표 2.1>은 분석 대상 시스템이 포함하고 있는 주요 객체인 폐기물 처리 시설들을 보여주고 있다.

<표 2.1> 주요 시설 현황 (단위:개수)

시설종류	기호	노원구	도봉구	강북구
소각장	INC	1		
적환장	TRS		1	1
재활용품 선별 집하장	RCC	1	1	1
음식물 자원화 시설	OGF		2	

분석 대상 시스템에 대한 개략적인 소개를 목적으로 현재 시스템의 문제점과 앞으로의 주요 당면 과제들을 요약해 보았다.

(1) 폐기물 처리 시설의 광역화 문제

현재 분석 대상 3개의 자치구는 <표 2.1>의 자체 보유 시설을 서로 배타적으로 활용하고 있는 실정이다. 즉 각 자치구의 폐기물 처리시설에서 타 자치구의 폐기물 반입을 허용하지 않고 있다. 결과적으로 각 시설은 최초의 설계용량을 충분히 활용하지도 못하는 문제를 갖고 있다.

따라서 각 자치구의 시설을 용량의 여유가 있는 한도에서 서로 공유하여 활용하는 방안을 정책적으로 고려해 볼 수 있을 것이다. 폐기물 시설의 광역화를 검토해 본 결과, 노원구의 소각장과 도봉구의 음식물 자원화 시설을 나머지 2개 구와 공유하는 방안을 검토해 볼 수 있다.

(2) 적환장을 통한 폐기물 수송방식의 타당성 검토

적환장을 운영하는 목적은 크게 두 가지로 대변해 볼 수 있다. 첫째, 일반쓰레기, 음식물 쓰레기, 재활용품이 하나의 차량에서 같이 수거될 경우 이들의 분류 목적으로 중간 적환장이 활용될 수 있다. 두 번째는 수송비 절감 목적을 들 수 있다. 현재, 용이한 수집을 위해 수집단계에서는 2.5톤과 5톤의 중소형 트럭을 위주로 사용하고 있는데, 이들 중 소형 트럭을 매립지까지 운행하는 것 보다는 적환장에서 대형 트럭이나 트레일러에 옮겨 실은 후 대량 수송하는 편이 수송비 절감을 도모할 수 있기 때문이다. 또한 적환장의 압축 시설을 활용할 경우 발생원에서의 직접 수송하는 것에 비해 상대적 운송비를 절감시킬 수 있을 것이다. 그러나 이러한 가정은 적환장 운영에 따른 추가 비용보다 수송비 절감의 효과를 볼 경우에 가능한 이야기라 할 수 있다.

이상의 현실을 고려하여 분류작업이 반드시 필요한 폐기물은 반드시 적환장을 거치도록 해야 할 것이며, 나머지에 대해서는 적환장의 설치·운영비와의 trade-off 분석을 통해

발생원에서의 직접 수송량과 적환장을 통한 수송량을 결정해야 할 것이다.

(3) 폐기물 시설의 증장기 설비 확장 계획

기존의 시설을 어느 시점에 얼마만큼 확장 시키고, 필요하다면 어떤 신규 시설을 언제, 얼마의 용량으로 설치해야 할지 결정할 필요가 있다.

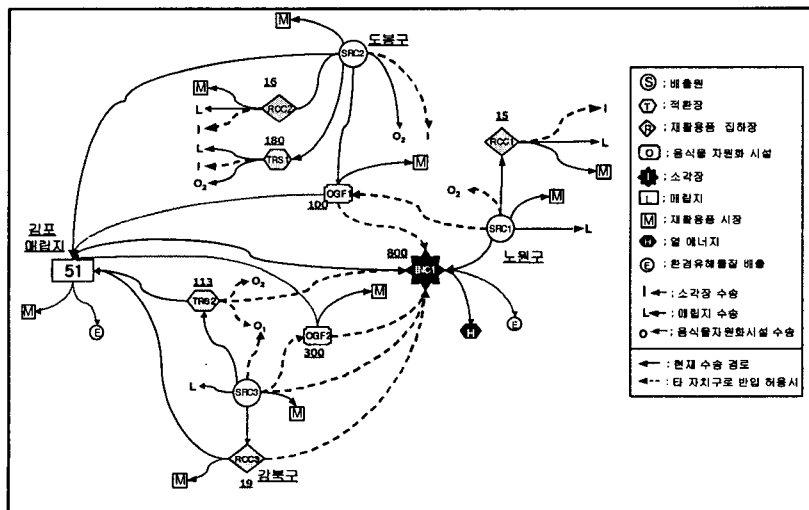
이상의 세가지 당면 과제를 고려하여 분석 대상 시스템을 <그림 2.1>과 같이 표현해 보았다. 그림에서 실선으로 표시된 부분은 현재의 운영방식을 의미하며, 점선으로 표시된 부분을 포함할 경우 타 자치구로의 반입이 가능한 상황이 된다.

본 연구는 3개 자치구의 연계 운영이 가능하다는 전제하에 폐기물의 수송 경로와 시설의 확장 계획을 수립하는 것을 목적으로 한다. 참고로, 도봉구에 건설 중인 음식물 자원화 시설(OGF2)을 기존 시설이 아닌 신규 시설로 보고 모형을 수행한 후 그 결과를 분석하여, 이 시설의 건설 타당성을 사후 검토해 보았다.

2.2. 혼합 정수 계획 모형 수립

수학적 모형은 다수 기간의 투자 계획을 고려하므로 단일 기간의 폐기물 유통과 설비 투자 계획 문제를 복수 기간으로 늘린 동적 모형으로 구성하였다. 이를 위해 Ni-Bin Chang(1996)이 제안한 혼합정수모형을 근간으로, 서울시 폐기물 관리 시스템에 맞도록 다음과 같은 내용을 중심으로 수정 보완해 보았다.

첫째, Ni-Bin Chang(1996)이 물리적인 성상별로 폐기물 종류를 분류했던 것과 달리, 수집단계에서 분리 수거 체계가 완비되지 않은 상태에서 용기(예:쓰레기 봉투) 분류방식에 따라 폐기물 종류를 구분해 보았다. 즉 종이, 플라스틱, 유리, 금속, 음식물 등과 같은 물리적인 성상에 따른 분류 대신 수집 용기의 분류 방식에 따라 가연성, 비가연성, 혼합 폐기물 등이 폐기물 종류의 하나로 추가될 수 있도록 했다. 왜냐하면, 폐기물의 처리 경로는 그것의 물리적인 성상



<그림 2.1> 서울시 북부 3개 자치구의 폐기물 관리 시스템 현황

구분으로 결정된다기 보다는 수집단계의 분류 방식을 따른다고 보는 게 타당하기 때문이다. 실제로 여러 성상으로 구성된 혼합 폐기물이 일단의 분류 작업을 위해 적환장으로 수송되어야 한다는 점을 보면 잘 알 수 있다. 이것은 폐기물 수집 단계에서 정확한 분리 수거 체계를 갖추지 못한 우리의 현실과, 그 결과 폐기물 수집 방식 변경이 시스템 전체에 어떤 영향을 미치는지 분석할 필요가 있다는 점에서 적절한 선택이라고 할 수 있다. 참고로 본 모형에서는 가연성 폐기물, 비가연성 폐기물, 혼합 폐기물, 종이, 유리, 음식물 이상 6가지 종류만을 고려해 보았다.

둘째, 기본적으로 모든 수송 경로의 흐름량을 폐기물 종류별로 구분해서 파악할 수 있도록 흐름량 변수를 정의했다.

셋째, 적환장으로의 의무 반입량을 고려했다. 수집된 폐기물 중 분류 작업이 필요한 분량은 반드시 적환장을 거쳐야 할 것이다. 또한 일부 자치구의 경우 수집차량의 진입이 어려운 경우 소형 오토바이를 이용해서 폐기물을 수송하는데, 이 분량은 제약식을 통해 반드시 적환장을 거치도록 표현해 보았다. 이것은 오토바이를 이용해서 매립지까지 수송한다는 것이 수송비 문제와 이동시간, 그리고 폐기물 운송에 따른 악취 등의 영향을 고려해 볼 때 실질적으로 불가능하기 때문이다.

넷째, 폐기물 중간 처리 시설을 거치면서 폐기물 분류체계에 따른 종류의 변화를 표현할 수 있도록 했다. 예를 들어 적환장으로 반입된 혼합폐기물은 분류 작업을 거쳐 일반 폐기물, 종이, 유리, 음식물 등으로 반출되는데 이것을 폐기물 종류의 변화로 보고 각 시설에서의 변환 비율에 따라 새로운 반출량을 산정해 보았다.

지면 관계상 모형에 대한 상세한 설명 대신, 중요한 내용에 대해서만 설명해 보았다.

(1) 집합 정의

AI^m = 폐기물 m의 경로 중 입력 아크 집합
 AO^m = 폐기물 m의 경로 중 출력 아크 집합

ST_N = 새로운 노드(site) 집합
 ST_O = 기존 노드(site) 집합
 $ST = ST_N \cup ST_O$

SRC_N = 신규 배출원(Waste Source) 집합
 SRC_O = 기존 배출원(Waste Source) 집합
 $SRC = SRC_N \cup SRC_O$
 (*다음 시설에 대한 집합 정의는 SRC의 규칙을 따름)

TRS : 적환장(Transfer Station)
 MTF = 재활용품 선별 집하장 & 음식물 자원화 시설
 M = 전체 폐기물 종류 집합
 MC_k^m = 시설 k에서 폐기물 m을 유발하는 폐기물 집합
 T = 기간 집합

(2) 상수 정의

c_{jt} : t시점에 노드 j에서 폐기물 m의 단위당 비용
 c_{kt} : t시점에 노드 k에서 폐기물 m의 단위당 비용
 c_{kt}^m : 시설 k에서 폐기물 m을 처리하는 데 드는 단위당 비용
 c_{kt}^m : 적환장 k에서 폐기물 m을 처리하는 데 드는 단위당 비용

Wmx_k = 적환장 k에서 분리작업이 필요한 폐기물량

(3) 변수 정의

C_t, B_t = t시점의 총 비용(C_t)과 이익(B_t)
 FL_{jt}^m = t시점에 노드 j에서 k로 수송된 폐기물 m의 총량
 Y_{kt} = t시점에 시설 k의 건설유무를 나타내는 이진변수
 DC_{kt} = t시점에 시설 k의 설계 용량
 $NEXP_{ykt}$ = y시점에 건설한 시설 k의 t시점에서의 확장량
 $TEXP_{kt}$ = t시점에 시설 k의 총 확장량

(4) 목적 함수

목적함수는 경제적인 관점의 혜택(Benefit)과 비용(Cost)로 구성하여 다음 식과 같이 표현된다.

$$\text{Minimize } \sum_t \beta_t \left(\begin{aligned} & \sum_{m \in M} \sum_{(j,k) \in A^m} [CT_{jt}^m FL_{jt}^m] + \sum_{k \in (ST_N \setminus SRC_N)} (cc_k DC_{kt} + fc_{kt} Y_{kt}) \\ & + \sum_{k \in (ST \setminus SRC)} \sum_{m \in M} \left[CO_{kt}^m \sum_{(j,k) \in AI^m} FL_{jt}^m \right] \\ & + \sum_{k \in (ST \setminus SRC)} [CE_k TEXP_{kt}] \\ & - \sum_{i \in SRC} \sum_{m \in M} IRS_i^m Mr_i^m Sr_i^m G_i \\ & - \sum_{m \in M} \sum_{j \in (ST \setminus SRC)} \sum_{k \in MRK} IRF_{jk} FL_{jt}^m \end{aligned} \right) \quad (1)$$

목적 함수의 수식은 비용에서 이득을 뺀 형태로 표현되었다. 순서대로 비용부분은 폐기물 종류별 총 수송비의 합, 설비의 고정·변동 건설비의 합, 폐기물 처리 시설의 운영비, 폐기물 처리 시설의 확장비용으로 구성되어 있으며, 이득부분은 발생원에서의 재활용품 판매 이익과 폐기물 처리시설에서 재활용품의 판매이익으로 구성되었다. 여기서 발생원의 재활용품 판매이익은 종류별 구성비(Mr)와 판매율(Sr)이 입력되면 확정적으로 결정되는 부분으로, 고정값이라고 생각할 수 있다. 그러나, 폐기물 발생량과 판매단가는 정책의 변화에 따라 달라질 수 있는 매개변수로 볼 수 있으므로 추후의 분석과정에서 매개변수 조정에 따른 영향을 분석해 볼 수 있도록 목적함수 부분에 포함시켰다.

(3) 제약식

가) 흐름량 보존 제약(Mass balance constraints)

◆ 발생원(가정)에서 발생/반출량의 관계

$$\sum_{k \in MRK} FI_{ik}^m = Mr_i^m \cdot G_i \cdot Sr_i^m \quad \text{for } m \in M, i \in SRC, t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{k \in (ST \setminus (SRC \cup MRK))} FI_{ik}^m = Mr_i^m \cdot G_i \cdot (1 - Sr_i^m) \quad \text{for } m \in M, i \in SRC, t \in T \quad (3)$$

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

◆ 폐기물 중간 처리 시설에서의 반입/반출량 관계

$$\sum_{i \in SRC} \sum_{k \in MTF} FI_{ik}^m \cdot CR_{ik}^m = \sum_{i \in SRC} \sum_{k \in MTF} FL_{ik}^m \quad \text{for } m \in M, k \in MTF, t \in T \quad (5)$$

나) 설비 건설·확장의 용량 제약

◆ 신규 시설의 용량 제약

$$\sum_{y=1}^T DC_{ky} \geq \text{MIN}_k \sum_{y=1}^T Y_{ky} \quad \text{for all } k \in (ST_N \setminus SRC_N) \quad (6)$$

$$DC_{ky} + \sum_{i=y+1}^T NEXP_{ky} \leq MAX_k Y_{ky} \text{ for } k \in (ST_n \setminus SRC_n), y \in (1, \dots, T-1) \quad (7)$$

$$\sum_{y=2}^T NEXP_{ky} = TEXP_{ki} \text{ for all } k \in (ST_n \setminus SRC_n), t \in T \quad (8)$$

◆ 기존 시설의 용량 제약

$$DC_k + \sum_{t=1}^T TEXP_{kt} \leq MAX_k \text{ for } k \in (ST_n \setminus SRC_n) \quad (9)$$

다) 설비 운영의 용량 제약

◆ 신규 시설의 용량 제약

$$TL \left[\sum_{y=1}^t \left(DC_{ky} + \sum_{i=y+1}^t NEXP_{ky} \right) \right] \geq \sum_{m \in M(j, k) \in AI} FL_{jm}^m \text{ for } k \in (ST_n \setminus SRC_n), t \in T \quad (10)$$

◆ 기존 시설의 용량 제약

$$TL \left(DC_k + \sum_{t=1}^t TEXP_{kt} \right) \geq \sum_{m \in M(j, k) \in AI} FL_{jm}^m \text{ for } k \in (ST_o \setminus SRC_o), t \in T \quad (11)$$

◆ 적환장으로의 의무반입 제약

$$\sum_{m \in M(j, k) \in AI} FL_{jm}^m \geq TL(SCar_k + Wmx_k) \text{ for } k \in TRS \quad (12)$$

라) 신규 건설 제약

$$\sum_{i=1}^T Y_{ki} \leq 1 \text{ for } k \in MRF \quad (13)$$

4. 실험 결과

수립된 혼합 정수 계획 모형의 해를 구하는 방법은 기본적인 분지한계법(Branch-and-Bound)을 사용하였으며, 컴퓨터 패키지로 ILOG OPL과 ILOG CPLEX를 이용하였다.

현 상태와 같이 3개 자치구가 독립적인 운영을 할 경우를 시나리오 A, 이를 개선하여 3개 자치구가 폐기물 처리 시설을 공동 활용하는 경우를 시나리오 B라고 하여, 최적화 결과를 비교해 보았다. 입력자료로는 1997년 폐기물 발생 실적과 당시의 설비 용량을 사용하였으며, 1년 후 10%의 폐기물 발생량의 증가를 가정하고, 분석 기간을 2년으로 하여 모형을 수행해 보았다. 연구 수행의 편의상 매립에 따른 경제, 사회, 환경 비용이 다른 비용에 비해 상당히 크다는 가정 하에, 매립비용을 큰 수치로 설정해 보았다.

수송 경로 변화가 가져오는 각 시설 처리량의 변화와 시설 확장 계획, 그리고 그에 따른 시설 가동률을 <표 4.1-1>과 <표 4.1-2>에 기간의 순서대로 정리해 보았다. 결과가 보여주는 주요 시사점을 추려보면 다음과 같다. 첫째, 소각장과 음식물 자원화 시설을 충분히 활용한다면 매립량을 76%(376+418->88+101)정도 줄일 수 있을 것이다. 둘째, 현재의 운영 방식이라면 도봉구에 더 이상의 음식물 자원화 시설이 필요 없는 실정이나, 시설 광역화가 전제된다면 도봉구에 향후 2년간 234톤(203+31)의 추가 시설이 필요하다. 이것은 현재 도봉구에 건설중인 300톤의 추가 시설이 타당하다는 의미로 해석할 수 있다. 셋째, 매립지로 수송되는 폐기물은 적환장을 거쳐 대량 수송하는 것이 유리하다. 이것은 최적화 결과 매립지로 수송되는 경로를 파악해 본 결과 확인할 수 있었다.

<표 4.1-1> 각 시설별 설비 확장 계획(t=1 시점)

		시나리오 A			시나리오 B		
구분	시설명	사용량(톤)	추가된 확장량(톤)	가동률(%)	사용량(톤)	추가된 확장량(톤)	가동률(%)
적환장	도봉	116	0	64	10	0	6
	강북	121	8	100	15	0	13
재활용 시설	노원	40	25	100	40	25	100
	도봉	25	9	100	25	9	100
	강북	27	8	100	27	8	100
	음식물 시설	도봉1	84	0	84	100	0
	도봉2	0	-	-	203	203	100
소각장	노원	311	-	39	417	-	52
매립지	시계의	376	-	-	88	-	-

<표 4.1-2> 각 시설별 설비 확장 계획(t=2 시점)

		시나리오 A			시나리오 B		
구분	시설명	사용량(톤)	추가된 확장량(톤)	가동률(%)	사용량(톤)	추가된 확장량(톤)	가동률(%)
적환장	도봉	128	0	71	10	0	6
	강북	133	12	100	15	0	13
재활용 시설	노원	44	4	100	44	4	100
	도봉	28	3	100	28	3	100
	강북	29	3	100	29	3	100
	음식물 시설	도봉1	93	0	93	100	0
	도봉2	0	0	-	233	31	100
소각장	노원	343	0	43	459	0	57
매립지	시계의	418	-	-	101	-	-

5. 결론 및 향후 연구과제

수립된 모형을 활용하여 서울시 3개 자치구를 대상으로 경제적 측면에서 최적의 폐기물 수송 경로와 시설확장 계획을 수립할 수 있었다. 그러나, 본 연구에서는 경제성만을 목적함수로 고려하여 각 폐기물 수송 및 처리 과정에서의 환경적인 요인과 같은 다른 목적을 고려하지 못하고 있다. 향후 연구를 통해, 본 연구에서 수립된 모형에 다른 목적함수를 추가하고 다중목적계획법을 적용한다면, 보다 나은 폐기물 관리 정책 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. C. Bergerl, F. Chauny, et al. EUGENE: An Optimization-based Decision Support System for Long Term Integrated Regional Solid Waste Management Planning, International workshop of "Systems engineering models for waste management", Sweden, 1998
2. Ni-Bin Chang and S.F. Wang, Solid Waste Management System Analysis by Multiobjective Mixed Integer Programming, Journal of Environmental Management, Vol. 48, pp17-43, 1996,
3. ILOG CPLEX 6.5 User's Manual, 2000
4. ILOG OPL Studio Manual, ILOG Corporation, 2000
5. 서울시 생활계 폐기물 발생 및 처리 경로 분석 연구 보고서, 서울 시정 개발 연구원, 1998
6. 서울시 생활폐기물 청소원가 분석연구 보고서, 서울특별시, 2001.1