

GIS를 이용한 생활폐기물의 수거권역설정과 수거차량의 순회경로계획에 관한 연구

이희연 · 임은선

A Study on the Solid Waste Collection Districting and Vehicle Routing-Scheduling for Waste Collection Using GIS

Hee-Yeon Lec · Eun-Sun Im

요 약

본 연구는 공공성을 지닌 편의 서비스로 인식되고 있는 쓰레기 수거 서비스를 보다 효율적으로 공급하기 위해서 쓰레기 수거권역을 설정하고 설정된 권역내에서 수거차량의 순회경로계획을 분석하는데 목적을 두었다. 본 연구에서는 합리적이고 보다 과학적인 쓰레기의 수거체계를 수립하기 위해 가장 기본적인 자료가 되는 쓰레기 배출지점별 배출량을 추정하고, 쓰레기 수집구역을 구축하였다. 이를 토대로 하여 지역분할방법을 이용하여 수거권역을 설정하였고, 쓰레기를 수거하는 차량의 순회경로를 효율적으로 계획할 수 있는 경로선정 방법도 도입하였다. GIS를 기반으로 하는 수거권역의 설정은 행정동별로 이루어지고 있는 수거업무를 보다 효율적으로 수행할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 경로선정방법을 도입할 경우 공차회송비용을 줄이면서 최소의 비용으로 경로계획의 수립이 가능함을 보여주었다. 따라서 쓰레기 수거서비스 체계를 구축하는데 있어서 GIS를 기반으로 하는 지역분할방법과 경로선정방법을 도입한다면 보다 신속하고 효율적인 서비스를 제공하는데 필요한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

Abstract : Solid waste collection service is viewed as one of the most important public services in urban area. The purpose of this study is to apply the GIS based regional partitioning and arc routing methods for solid waste collection districting and vehicle routing-scheduling in order to provide waste collection service more efficiently. In this study, solid waste deposit sites are derived from the centroid of each building and the amount of solid waste is deduced based on the number of households and establishments. The regional partitioning procedure is performed based on waste collection zones which are constructed

from waste deposit sites.

The result of this study shows that solid waste collection districts which are delineated by regional partitioning method are able to increase efficiencies and cut costs in performing solid waste collection services. Also the output of vehicle-scheduling from the analysis of arc routing may provide more efficiently and quickly manage the scheduling of the residential solid waste collection routes, reducing costs with minimal deadheading costs. Therefore, the application of GIS based on regional partitioning and arc routing methods would be very useful to construct a solid waste management system by supplying the important and flexible informations for solid waste collection districts and vehicle routing-scheduling for waste collection.

1. 서 론

우리나라의 경우 생활폐기물(이하 쓰레기) 발생량은 총량제가 실시된 1995년 이후부터 점차 줄어들고 있지만, 아직도 쓰레기 처리 문제는 심각하게 부각되고 있다. 특히 경제성장을 통해 생활수준이 향상되고 삶의 질에 대한 의식수준이 높아지게 되면서 쓰레기 수거 서비스에 대한 욕구도 증대되었다. 쓰레기 수거서비스는 지역을 보다 청결하고 위생적으로 만들어 쾌적한 주거환경을 조성하는 공공성을 지닌 편익서비스라고 볼 수 있다. 즉, 지역주민의 생활환경과 매우 밀접한 관계를 갖고 있는 쓰레기 수거는 가능한한 신속하고 저렴한 비용으로 공급되어야 하는 서비스로 인식되고 있다.

전통적으로 관할지역내에서 발생하는 쓰레기에 대한 수거서비스는 주로 지방자치단체가 직접 수행하여왔으나, 최근에 들어와 지방자치단체별로 민간업체들에 의해 수거업무가 대행되는 경향이 높아지고 있

다. 효율적으로 쓰레기를 수거하고 운반하기 위해서는 해당지역에서 발생하는 쓰레기의 성상별 배출량에 대한 상세한 정보를 바탕으로 한 적정한 수거권역의 설정과 수거작업에 투입되는 장비 및 인력을 적절하게 배치하는 것이 중요하다. 이미 외국에서는 GIS를 기반으로 하여 관할지역의 쓰레기 배출특성과 도로상황과 관련된 정보를 수집하고 수거업무 관리를 위한 수거시스템에 관한 연구(Korfmacher, 1997; Lim, Lane & McMurtrie), 통합적 수거시스템개발에 관한 연구(Ossenbruggen, 1992; Wang, Richardson & Roddick, 1996) 및 생활폐기물 수거비용의 절감방안을 위한 연구들이 이루어지고 있다.

그러나 우리나라의 경우 쓰레기 수거업무 및 관리는 대부분 수작업에 의한 작업일지에 의존하고 있으며, 행정동 단위별로 수거권역을 구분함으로써 획일적인 수거작업이 이루어지고 있는 실정이다. 따라서 인접된 지역이라도 행정동이 다른 지구의 쓰레기는 수거되지 않는 경우라든가, 상대적으

로 행정동의 크기가 클 경우 수거서비스가 원활하게 제대로 공급되지 않아 위생상의 문제를 포함한 여러 환경문제들을 일으키기도 하는 등등 비효율적으로 수거서비스가 수행되고 있다.

본 논문의 연구목적은 효율적인 쓰레기 수거 서비스를 공급하기 위해서 쓰레기 수거권역을 설정하고 설정된 권역내에서 수거차량의 순회경로계획을 수립하는데 있어서 GIS의 공간분석기법을 활용하고자 하는 것이다. 즉, 합리적이고 보다 과학적인 쓰레기의 수거체계를 수립하기 위해 쓰레기 배출지점별 발생량 자료를 추정하고, 이를 토대로 하여 수거권역을 분할하고 수거차량의 순회경로를 수립하는데 있어서 GIS를 활용하여 보다 객관적이고 유연적인 정보를 도출할 수 있는 접근방법을 모색하고자 하는 것이다.

본 연구에서는 쓰레기 수거권역의 설정과 수거차량의 순회경로분석을 위해서 광진구를 사례지역으로 하였다. 광진구는 대부분이 일반 주거지역으로 구성되어 있으며, 아파트 단지, 신시가지, 구시가지들이 혼재되어 있어 일반화하여 쓰레기 수거권역을 설정하는데 적합한 사례지역이라고 볼 수 있으며, 또한 연구자의 대학이 광진구에 위치하고 있어서 자료를 수집하고 답사하기에 매우 편리하였기 때문에 사례지역으로 선정하였다. 현재 광진구의 쓰레기 수거업무는 직영 관할지역이 60%, 대행업체 관할구역이 40%로 분담하여 수행되고 있다. 쓰레기의 배출량이 많고 수거작업이 용이한 지역은 대행업체가 관할하고 있으며, 그 외에 쓰레기의 배출량도 적고 수거여건이 양호하지 못한 지역들은 구에서 직

영으로 관할하고 있다. 수거된 일반생활폐기물(음식물 쓰레기 제외)은 수거된 후 곧바로 적환장으로 수송된다. 광진구의 경우 지역 내에 적환장을 보유하고 있지 않으며, 성동구내에 위치한 3개 적환장을 이용하고 있어 쓰레기의 수송거리가 상대적으로 길다. 하지만 주민들의 혐오시설 기피현상으로 인해 광진구내에 적환장을 보유하려는 시도는 없으며, 소각장 건설계획도 수립되어 있었으나 주민들의 반대로 유보되어 있다. 따라서 배출된 생활폐기물 중 재활용되는 부분을 제외하고는 적환장을 거쳐서 수도권 매립지로 직접 보내지고 있다.

본 연구는 크게 세 단계로 나누어 수행되었다. 첫번째 단계에서는 수거권역을 설정하는데 가장 기본이 되는 공간단위인 쓰레기 수집구역(waste collection zone)을 구축하였다. 쓰레기의 수거가 대부분 수거차량에 의해 이루어지기 때문에 도로망을 기준으로 하여 쓰레기 수집구역의 경계를 설정하였다. 차량진입이 가능한 도로망으로 둘러싸인 수집구역에 각 건물단위로 추정된 쓰레기 배출량 정보를 부여하여 단위구역별로 쓰레기 배출량을 쉽게 산출할 수 있도록 구축하였다. 두 번째 단계에서는 수거작업을 효율적으로 수행하기 위해서 쓰레기 수집구역 자료를 바탕으로 하여 쓰레기 수거권역을 설정하였다. 관할 청소구역의 작업여건과 쓰레기배출량을 고려하여 작업유형을 구분하고 작업량에 따라 작업권역을 분할하는 지역분할방법을 적용하였다. 마지막 단계에서는 분할된 권역내에서 수거차량들이 최소의 비용으로 쓰레기를 수거하는 순회경로를 계획하는 경로선정방법을 적용하고 그 결과를 가시화하여 나타내

었다.

본 연구에서 사용된 기본도는 연구지역의 행정구역도, 지형도, 도로망도, 토지이용도 등이며, 수치지도들은 Arc/Info, Arcview, Mapinfo 등을 이용하여 구축하였다. 또한 수거권역설정 및 순회경로 계획을 위해 사용된 지역분할방법과 경로선정방법은 GIS 소프트웨어의 하나인 TransCAD에 내장된 모듈을 이용하였다.

2. 쓰레기 배출지점의 배출량 추정과 쓰레기 수집구역의 구축

2.1 생활폐기물 배출특성을 고려한 지점별 배출량 추정

쓰레기 수거권역을 설정하고 순회경로계획을 수립하는데 있어서 가장 기본이 되는 자료는 배출지점별 쓰레기의 배출량 자료이다. 우선적으로는 각 가정과 사업장에서 배출되는 쓰레기의 배출량에 대한 자료가 필요하며, 가정과 사업장에서 배출되는 쓰레기의 위치를 공간상에서 나타낼 수 있는 쓰레기 배출지점에 대한 자료가 구축되어야 한다. 우리나라의 경우 각 행정동별로 집계된 쓰레기 배출량 자료는 있지만, 세부적인 배출지점별 쓰레기 배출량 자료는 없는 실정이다.

본 연구에서는 배출지점별 쓰레기 배출량을 추정하기 위해 각 건물단위별로 쓰레기가 배출된다고 간주하고 사례지역의 1:5000 수치지형도로부터 건물의 경계선을 추출한뒤, 추출된 건물의 중심점(centroid)을 배출지점으로 삼았다. 이렇게 배출지점을

지정한 후, 각 지점에서 발생하는 생활폐기물의 일일 배출량을 추정하기 위해 각 건물들을 가정과 사업체로 구분하여 주거지역의 경우 주택당 평균 가구수를, 사업체의 경우 건물당 평균 종사자수를 반영하여 건물당 가중치를 부여하였다. 주택에 대한 건물당 가중치는 단독, 연립, 아파트로 분류하여 광진구 통계연보와 인구주택 총조사 보고서를 참고로 평균가구수를 산출하여 이용하였으며, 사업체에 대한 건물당 가중치는 1:1000 토지이용도를 바탕으로 상업, 업무, 공업용도의 건물로 분류한 후에 광진구내 사업체별 종사자수 자료를 바탕으로 하여 산출하였다.

또한 배출지점별 일일 쓰레기배출량을 추정하기 위해 각각의 토지이용도별로 배출량원단위를 적용하였다. 배출량원단위는 각 배출원에서 일정기간동안 발생하는 쓰레기의 양을 기준지표를 활용하여 나타낸 척도로서, 이는 다양하게 측정될 수 있다. 본 연구에서는 서울시를 표본조사한 결과를 토대로 하여 배출량원단위를 가정쓰레기는 가구수(kg/가구/일)로, 사업체쓰레기의 경우 사업장의 종사자수(kg/종사자/일)로 산정한 유기영(1998)의 연구 결과를 적용하였다. 또한 재래시장, 대규모 쇼핑센터, 종합병원, 고등교육시설과 같은 쓰레기 다량배출시설들의 경우 배출량 자료를 별도로 수집하여 사례지역의 쓰레기 총배출량을 추정하였다 [그림 1 참조].

이와 같이 각 건물단위별로 토지이용상의 특성을 고려한 건물당 가중치와 배출량원단위를 적용하여 광진구의 생활폐기물을 일반쓰레기, 음식물 쓰레기, 재활용품 배출량을 추정하였다<표1 참조>. 이와 같은 방

<표 1> 생활폐기물 배출원단위와 지점배출량 (단위:kg/일)

토지이용	건물당 가중치	일반쓰레기		음식물쓰레기		분리재활용품	
		원단위	지점배출량	원단위	지점배출량	원단위	지점배출량
단독주택*	3.8	0.408	1.546	0.554	2.100	0.325	0.502
연립주택*	11.8	0.286	3.373	0.575	6.787	0.315	1.063
아파트*	137.0	0.521	71.332	0.606	83.067	0.398	28.390
상업용**	6.3	1.511	9.530	0.995	6.274	1.012	9.646
업무용**	42.2	0.503	21.260	0.141	5.948	0.177	3.754
공업용**	191.4	0.155	29.698	0.017	3.227	0.223	6.623
녹지*	3.8	0.408	1.546	0.554	2.100	0.325	0.502
공공기타**	3.7	1.774	6.540	0.078	0.286	1.295	8.470

*1건물당 평균가구수, **1건물당 평균종사자수를 적용

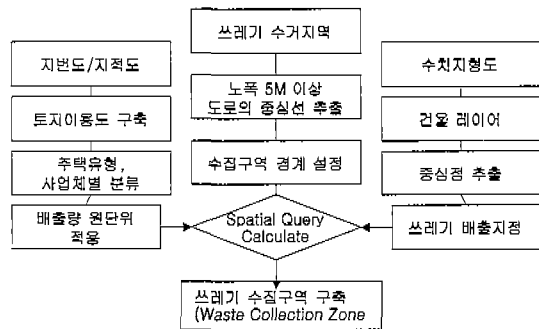
자료:쓰레기별 배출량원단위는 유기영(1998)에서 분석한 자료를 이용하였으며, 건물당 가중치는 광진구 통계연보 자료, 인구주택 총조사 보고서와 토지이용도를 토대로 하여 산출하였음.

법에 의해 추정된 광진구의 쓰레기 총배출량은 약 336톤/일로 산출되었는데, 이는 1998년말 광진구에서 집계된 실제 발생량(339톤/일)과 비교해 볼 때 1%정도 과소추정된 결과로 나타났다. 따라서, 지점별 배출량의 추정방법과 배출량원단위, 그리고 건물당 가중치의 적용이 비교적 타당하였다고 볼 수 있다.

교차하면서 이루어지는 최소의 면적을 쓰레기가 수집되는 구역으로 정하였다. 따라서 수집구역 안에 포함되어 있는 각각의 건물들에서 배출되는 지점별 쓰레기 양의 합이 각 수집구역의 쓰레기 배출량이 된다. 쓰레기 수집구역을 구축하는 과정은 [그림 2]와 같다.

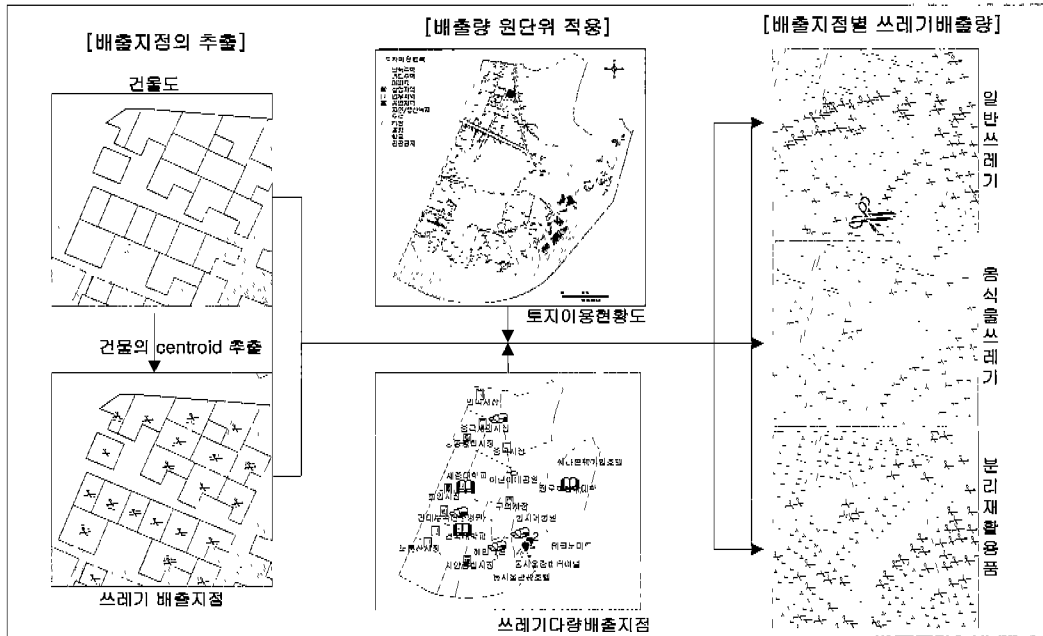
2.2 쓰레기 수집구역의 구축

쓰레기 수거권역을 설정하는데 있어서 가장 기본이 되는 것은 쓰레기가 수집되는 최소 공간단위인 수집구역(WCZ: waste collection zone)을 면(polygon)의 형태로 구축하는 작업이다. 본 연구에서는 먼저 대부분의 쓰레기 수거가 2.5톤 차량에 의하여 이루어지고 있다는 점을 감안하여 차량의 진입이 가능한 노폭 5m이상의 도로들의 중심선을 1/5,000 도로망도로부터 추출하였다. 그리고 이렇게 추출된 도로의 중심선들이

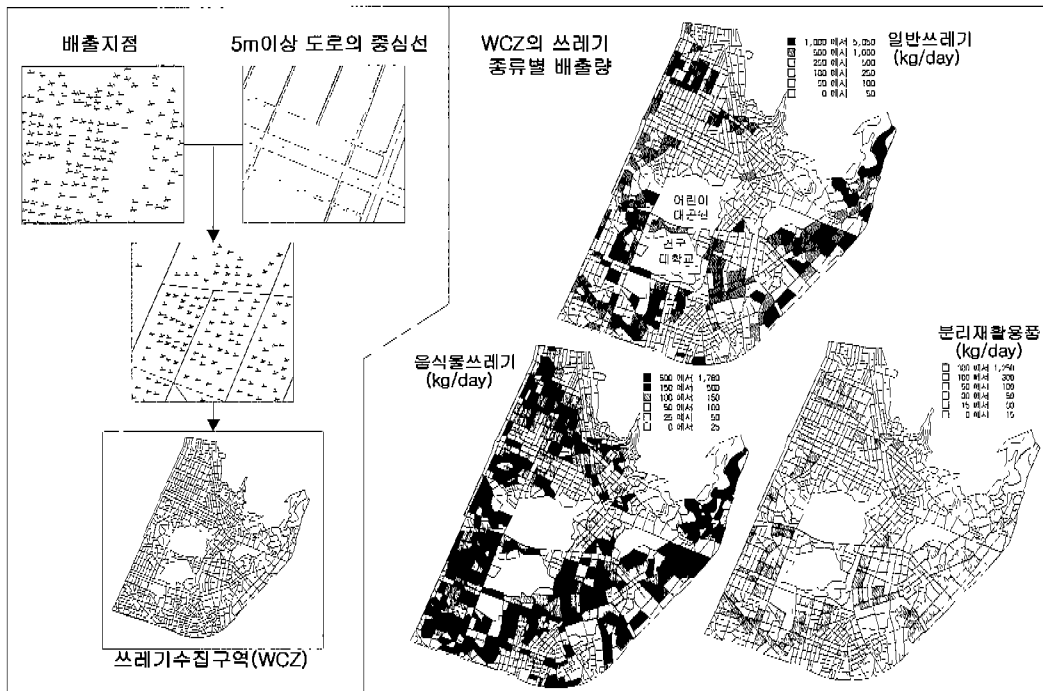


[그림 2] 쓰레기 수집구역의 구축과정

사레지역인 광진구를 쓰레기 수집구역으로 구축하여 수집구역별 쓰레기 배출량의



[그림 1] 배출지점별 생활폐기물 배출량 산출 과정



[그림 3] 쓰레기수집구역(WCZ:waste collection zone)별 배출량의 분포

분포를 보면 [그림 3]과 같다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 일반쓰레기의 경우나 음식물쓰레기의 경우 모두 쓰레기 다량 배출시설물들이 입지한 구역들과 아파트가 밀집한 구역들에서 배출되는 양이 상대적으로 매우 많음을 알 수 있다. 이와 같이 신속하면서도 저렴하게 효율적으로 쓰레기를 수거하기 위해서는 이와 같은 쓰레기 수집구역별 배출량 자료를 토대로 하여 적정하게 쓰레기 수거권역이 설정되어야 할 것이다.

3. 지역분할 방법을 이용한 수거권역의 설정

쓰레기 수거작업은 주거형태와 사무, 상업기능의 분포, 그리고 지역의 도로여건에 따라서 수집장비 및 수거수단이 달라지게 된다. 일반적으로 수거작업의 방법은 문전수거와 아파트식 거점수거 형태로 크게 나누어지나, 수거차량의 진입이 불가능한 지역의 경우 마대나 손수레 등을 이용하여 수거되기도 한다. 또한 쓰레기 배출원의 특성에 따라 처리과정이 다르기 때문에 쓰레기 종류별로 일반쓰레기와 음식물쓰레기,

분리재활용품을 구분하여 수거되고 있다. 광진구의 경우 자치구 조례의 작업지침에 따라 일불 후 배출, 일출 전 수거를 원칙으로 하여, 1일 3회 수거작업이 이루어지고 있다. 오후 6:00-8:00에는 재활용품 수거, 오후8:00-12:00에는 일반쓰레기 수거, 새벽오전 3:00에는 음식물 쓰레기가 수거되고 있다.

현재 광진구내 직영관할지역의 쓰레기 수거는 행정동 단위로 수거차량과 미화원이 배치되어 수행되고 있다. 일반쓰레기 수거에 투입되는 차량은 전체 2.5톤 덤프트럭 21대와 2.0톤 압축차량 1대이다. 각 수거차량이 관할지구를 순회하고 적환장에 쓰레기를 반입할 때마다 작업일지를 작성하게 되는데, 작업지역과 반입시간, 차량번호, 운전자 성명 등을 수작업으로 기록한다. 이 작업일지를 통해 행정동별 차량의 운행횟수, 작업량, 동원된 차량수 등 개략적인 수거작업 현황을 파악할 수 있다. 일례로 일주일동안 요일별로 행정동별 쓰레기 수거를 위한 차량의 순회횟수를 보면, 작업량이 가장 많은 월요일에 순회횟수가 가장 많으며, 동별 평균 순회횟수는 4회에서 8회까지로 동의 면적에 따라 2배정도 차이가 나고 있다<표2 참조>. 이러한 차이는 수거권역

<표 2> 수거차량 요일별 순회횟수(2000년 9월 4일-9일)

행정동	종곡1	종곡2	종곡3	종곡4	자양1	자양2	노유2	군자	합계
월요일	5	6	4	10	10	7	6	10	58
화요일	5	7	4	7	8	4	3	5	43
수요일	4	6	4	6	9	4	4	5	42
목요일	4	5	5	7	8	4	4	5	42
금요일	5	6	5	7	9	4	4	5	45
토요일	5	6	5	6	9	4	4	6	45
평균횟수	4.7	6.0	4.5	7.2	8.8	4.5	4.2	6.0	45.8

자료: 광진구내의 직영관할지역의 실제 수거현황에 대한 내부자료임

이 비효율적으로 분할되어 있기 때문이라고 볼 수 있다. 또한 어떤 동의 경우 수거하는데 동원된 차량이 2-4대/일로 차량이 교대로 투입되고 있는 반면에, 어떤 동의 1대의 차량이 계속적으로 순회하면서 운행하고 있어 차량별 작업량에서도 상당한 차이가 나고 있는 실정이다.

본 연구에서는 광진구 관할내에서 발생되는 쓰레기를 보다 효율적으로 수거할 수 있는 방안을 모색하기 위해 지역분할(regional partitioning)방법을 활용하여 수거 권역을 설정하였다. 일반적으로 수거시에 이용되는 수송차량이 2.5톤으로 정해져 있으므로 사실상 수거권역의 설정은 쓰레기의 종류에 따른 배출량과 수거횟수에 따라서 달라질 수 있다. 수거권역을 설정하는데 있어서 GIS의 분석기법을 활용하는 경우 쓰레기 배출량과 수거회수가 변동되면 이에 따라 수거권역을 조정할 수 있는 보다 유연성을 갖는 정보를 도출할 수 있다.

지역분할방법은 판매 및 마케팅 관리나 서비스권역의 설정, 행정관리구역, 학군 설정 등 여러 분야에서 도입되고 있으며, 특히 형평성이 있는 선거구를 설정하는데 지역분할방법론이 많이 활용된다(Dixon, 1982; Fleischmann & Paraschis, 1988; Horn, 1990; Zoltners & Sinha, 1983). 또한 각 학교의 학생수용능력과 등교하는 학생들의 통학거리를 고려하여 적정한 학생의 배분이 이루어지도록 권역을 분할하거나(Lemberg & Church, 2000), 행정업무 분야에서도 지역내에서 업무 분량의 균형화가 이루어지도록 업무의 경계를 설정하는 재구획화하는 경우에도 자주 이용된다(Lolonis & Armstrong, 1993).

지역(region)을 여러 개의 권역(district)로 분할하는 지역분할문제의 기본 원리는 다음과 같다. 지역은 구역(zone)이라고 불리우는 최소 공간단위의 집합으로 이루어진다는 것을 전제로 하고 있으며, 각 구역은 속성값(예: 인구수, 쓰레기 배출량 등)을 갖고 있다. 각 구역은 인접해있는 구역들과 공통의 변(edge)을 공유하게 되며, 각 구역은 공유된 변과 공유되지 않은 변들에 대한 비중값(edge weight)을 갖게 된다. 권역은 인접해있는 구역들로 이루어지며, 이 권역들이 모여서 전체 지역을 이루게 되는 것이다. 지역분할방법이란 대상지역을 요구되는 권역의 수로 분할하되, 인접성과 각 권역크기의 한계(상·하한계) 조건을 만족시키면서 각 권역들의 밀집성(compactness)를 최대화시킬 수 있는 해법을 찾아내는 것이다¹⁾.

지역분할방법에서 목적함수인 밀집성을 최대화하는 해법을 찾아내는데 방법은 엄청난 시간과 계산을 필요로 하며, 최적해(optimal solution)를 도출해내는 것은 거의 불가능하다. 따라서 지역분할 문제를 푸는데 있어서 일반적으로 발견적 방법(heuristic method) 알고리즘을 이용한다. Horn(1995)은 등산하는 원리에 비유될 수 있는 MARCHES 알고리즘을 제안하였다. 이 방법은 두 단계로 진행된다. 첫 단계에서는 분할기준구역(seed zone)을 설정한 후 요구되는 권역의 수로 지역을 분할하는데, 이 분할기준구역으로부터 시작하여 인접성 조건을 만족시키면서 모든 구역들이 권역으로 할당될 때까지 진행된다. 이 단계에서는 권역의 밀집성이나 권역 크기의 균등화는 고려되지 않는다.

두 번째 단계는 분할된 권역들을 토대로

하여 권역들의 밀집성을 최대화하고 권역 크기의 균등화를 충족시킬 수 있는 해법을 도출해내는 단계이다. 이 단계에서 권역간에 크기의 변이를 줄여서 보다 균등화하면서도, 권역들간의 밀집성을 높이는 양호한 해법을 도출하는 것이다. 이 알고리즘은 권역들간에서 구역들을 추가, 또는 제거하면서 총 비중(total weight: 면적에 대한 무게)과 크기 비율(권역의 최대 크기와 최소 크기의 차이)를 산출하여 총 비중이 줄어들어서 밀집성이 최대화되거나 또는 권역들의 크기가 보다 균등화될 수 있는 해법을 마치 행진하듯이 계속적인 반복과정을 통해 찾아내는 방법이다[그림 4가 참조].

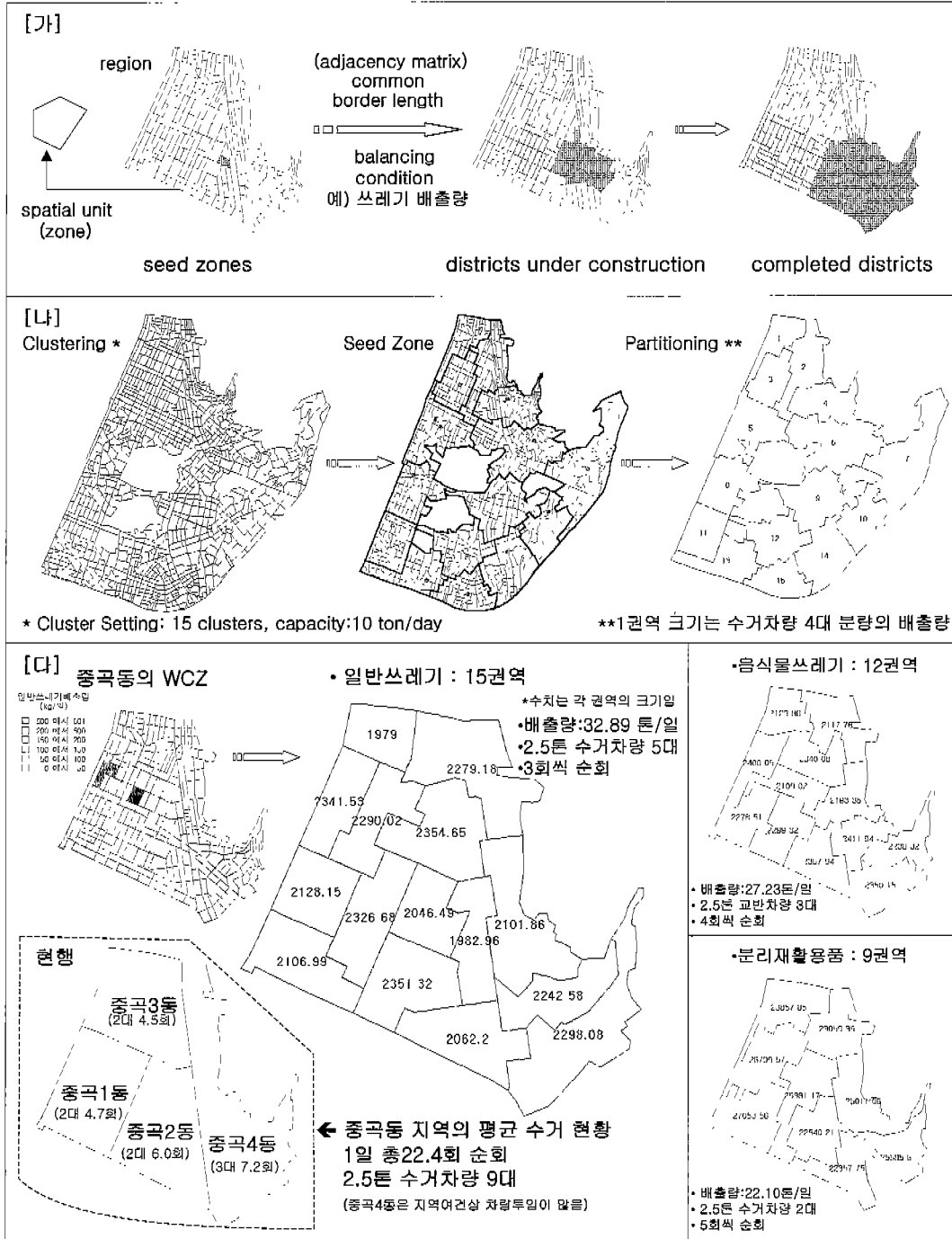
TransCAD에서 구현되는 지역분할방법은 Horn(1995)의 알고리즘을 바탕으로 하고 있다. 지역분할방법을 적용할 때 가장 중요한 점은 초기의 분할기준구역의 지정이다. 이는 최종적으로 분할되는 권역들은 초기 분할기준구역의 위치에 영향을 받기 때문이다. 지역분할방법을 활용할 때 필요한 데이터베이스는 각 구역의 인접성 매트릭스와 공유하는 공통변의 길이로, 이는 이미 구축된 도형자료인 쓰레기 수집구역(폴리곤)을 통해 자동적으로 구축된다. 본 연구에서는 분할기준지점의 위치를 선정하기 위해 먼저 균집분석을 수행하여 산출된 결과를 토대로 하여 분할기준구역을 정한 후에 권역을 설정하였다. [그림 4-나]는 광진구의 일반쓰레기의 수거를 위해 15개의 권역으로 분할하는 경우 산출된 결과이다. 일반쓰레기 배출량을 감안하여 2.5톤의 차량이 4회 순회하여 수거할 수 있도록 각 권역의 크기를 10톤으로 정할 경우 15개 권역으로 분할할 수 있다. 현재 광진구의 15개 행정

동 경계로 분할된 수거권역과 비교해보면 권역들이 보다 밀집된 형상을 보이고 있어 수거작업이 보다 효율적으로 이루어질 수 있음을 엿볼 수 있다.

본 연구에서는 지역분할방법을 통해 설정된 권역을 토대로 하여 수거하는 경우와 실제 행정동별로 이루어지고 있는 수거업무를 비교하여 GIS를 기반으로 한 지역분할방법의 효율성을 검증해보았다. 사례지역은 광진구에서 직영으로 쓰레기 수거가 이루어지고 있는 중곡 1동에서 중곡 4동의 행정동을 대상으로 하였다. 중곡동 지역에서 배출되는 일반쓰레기를 수거하는 실제 횟수를 보면, 각 동별로 일 평균 순회횟수가 4.7, 6.0, 4.5, 7.2로 1일총 22.3회의 수거가 이루어지고 있다.

본 연구에서는 중곡동 일대의 일반쓰레기 총 배출량을 수거구역의 자료로부터 추정해 본 결과 32.89톤/일로 나타났다. 이는 2.5톤의 차량으로 수거하는 경우 약 14번의 순회가 요구되는 분량이다. 이 배출량 자료를 감안하여 본 연구에서는 지역분할방법을 이용하여 15개의 권역으로 분할하였으며, 그 결과는 [그림 4-다]와 같다. 이렇게 15개 권역으로 지역을 분할해 본 결과 권역간의 밀집성 정도를 나타내는 총비중(무게/면적)은 2.1이었으며, 권역간의 균등화 정도는 15.95%²⁾로 나타나 매우 밀집성이 높으면서도 권역간의 크기가 비교적 균등화되어 있음을 알 수 있다. 이는 각 권역에서 수거되어야 하는 배출량이 균등화되어 있으므로 차량의 적재량을 감안해볼 때 매우 효율적으로 수거가 이루어질 수 있음을 시사해준다.

현재 광진구에서 중곡동의 4개 동에서



[그림 4] 지역분할방법을 이용한 쓰레기 수거권역의 설정

배출되는 쓰레기를 수거하는데 차량이 22회를 순회하고 있으며, 쓰레기를 수거하기 위해 9대의 차량이 동원되고 있다. 각 동별로 볼 때 중곡 1동과 2동은 5회 정도 순회하는데 비해 중곡 4동은 동원된 차량도 상대적으로 많고 순회횟수도 7회에 이르고 있다. 이는 중곡 4동의 면적이 넓고 가로망이 좁고 수거작업 환경이 좋지 않기 때문이라고 풀이할 수 있다. 만일 중곡동 일대의 쓰레기 수거를 위해 지역분할방법을 통해 설정된 권역으로 나누어 수거한다면 15회의 순회로 수거업무를 충분히 수행할 수 있다. 그러나 4개 동의 쓰레기를 효율적으로 수거하기 위해서는 5대의 차량이 3회씩 순회하여 수거하거나 3대의 차량이 5회씩 운행하는 방법 등등 차량여건에 따라서 유연적으로 차량을 투입할 수 있다. 획일적인 행정동 단위의 수거시스템의 경우 시간과 비용상에서 훨씬 비효율적임을 말해준다.

본 연구에서는 쓰레기 종류별(일반쓰레기, 음식물 쓰레기, 분리 재활용품)로 배출량이 다르므로, 중곡동을 대상으로 하여 쓰레기 종류별로 수거권역과 수거회수를 달리하여 수거권역을 설정하였다. 매일 매일 모든 쓰레기를 수거하는 경우 음식물 쓰레기는 약 28톤/일이 배출되므로 12 권역으로 분할하여 음식물을 운반하는 2.5톤의 교반차량 3대로 4회씩 순회하는 것이 효율적이며, 상대적으로 배출량이 적은 분리재활용품의 경우 22.1톤/일이 배출되므로 9개의 권역으로 나누어 2대의 수거차량으로 5회를 순회하면 보다 신속하게 효율적으로 수거업무가 이루어질 수 있을 것이다[그림 4-다 참조].

4. 경로선정방법을 이용한 수거차량의 순회경로계획

경로선정 문제는 네트워크 모형으로 구축되는 도로망상에서 주어진 일련의 도로를 따라 배열되어 있는 여러 지점들을 방문해야 하는 경우 가장 효율적인 경로를 찾아내는 것이다. 이러한 경로계획 수립은 특정 권역 내에서 신문을 구독하는 가정들에 신문이나 우편물을 배달하기 위한 최단 경로의 계획, 학교나 회사의 출퇴근 버스의 최단거리 운전계획 등을 수립할 때 많이 적용되고 있다.

여러 분야에서 다양하게 응용되고 있는 경로선정 문제는 적용범위에 따라 다소 차이가 있을 수 있으나 대부분 매우 복잡하고 방대한 양의 계산이 요구된다. 경로선정 문제들은 상황들이 요구하는 조건에 따라 Traveling Salesman Problem(TSP)이나 Chinese Postman Problem(CPP), Vehicle Routing Problem(VRP), 그리고 Rural Postman Problem (RPP)등을 적용하여 해법을 찾는 경우가 많다(Laporte, 1997; Solomon, 1987; Tung & Pinnoi, 2000).

이러한 알고리즘 중에서 쓰레기 수거차량의 운행이나 건설작업차량의 운행 등과 같이 최소의 비용으로 도로상에 모든 지점들을 다 한번씩은 거쳐야 하는 경로선정의 경우 CPP로 해법을 찾고 있다. 특히 도로들이 일반도로와 일방통행도로가 혼재되어 있는 경우에는 Mixed Chinese Postman Problem(MCPP)을 활용한다. MCPP를 해결하기 위해서 이용되는 알고리즘으로는 Branch & Bound기법을 이용한 정수계획법

이나, Cutting Plane기법을 이용한 선형계획법, 혼합 네트워크를 Symmetric 네트워크로 변환한 후 Marching기법이 있다(Eiselt, Gendreau & Laprote, 1995).

쓰레기 수거시에 순회경로 선정 문제는 MCPP를 활용하여 주어진 지점(depot)에서 시작하여 쓰레기 수거 서비스가 요구되는 모든 링크를 적어도 한번은 거치면서 다시 시작지점으로 되돌아오는 경로를 최소의 비용으로 찾는 것이 목적이다. 경로선정 분석을 위해 도로망을 구축하는 경우 쓰레기 수거서비스와 관련된 정보와 도로망과 교통상황에 대한 각종 데이터베이스를 구축하는 것이 필수적이다. 일반적으로 경로 선정문제에서 네트워크를 구성할 때 가장 기본적인 데이터베이스는 서비스가 필요한 링크(link)와 서비스가 필요없는 링크(deadheading)의 구분이다. 또한 도로를 따라서 양쪽 모두 서비스가 필요한 링크인지 또는 도로를 따라 어느 한쪽만이 서비스가 필요한가를 명시하여야 한다. 서비스지역을 모두 순회하는 경로는 여러 가지로 계획할 수 있지만, 서비스가 필요한 모든 링크를 지나면서도 총순회거리에 따른 비용을 최소화시키는 경로가 최적의 경로가 되는 것이다. 따라서 경로선정 문제에서의 목적함수는 서비스를 필요로 하지 않는 링크를 통과하는 비용을 최소화하는 해법을 찾는 것이라고 볼 수 있다[그림 5-가 참조].

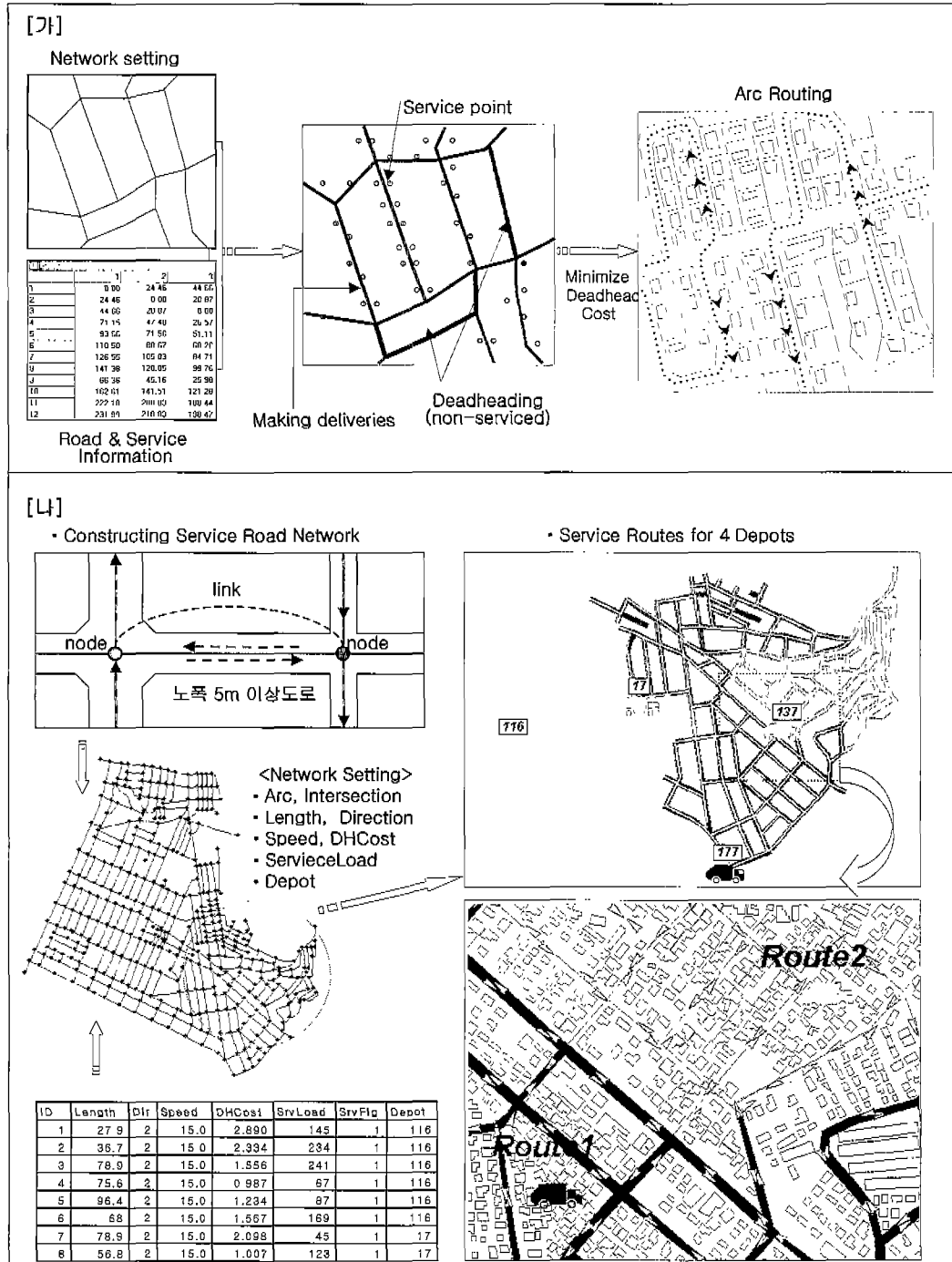
도로망에 대한 도형자료는 위상관계가 구축된 링크레이어와 노드 레이어가 구축되어야 하며, 속성자료로는 링크 레이어의 경우 각 링크의 번호와 링크의 길이, 통행규제 여부, 통행속도 등과 같은 기본적인 정보와 함께 서비스에 관련된 정보가 입력

되어야 한다. 쓰레기 순회경로 선정을 위해서는 서비스가 필요한 링크에 할당되어 있는 쓰레기 배출량과 쓰레기 수거서비스를 수행하지 않으면서 그 구간을 통과하는데 드는 공차회송비용(deadhead cost)에 관한 자료들이 포함되어야 한다. 한편 노드 레이어의 경우 노드 번호와 교차점명, 노드 종류와 같은 기본 정보와 함께 출발지점(depot)을 인식할 수 있는 속성정보가 주어 져야 한다.

본 연구에서는 경로선정 분석을 위한 도로네트워크를 구축한 후 MCPP 문제를 해결하는데 이용되는 알고리즘을 내장한 TransCAD 소프트웨어를 이용하여 사례지역에 대한 경로계획을 수립하여 보았다. [그림 5-나]는 중곡동 일대에서 발생하는 음식물 쓰레기를 2.5톤의 교반차 4대가 순회하는 경로계획을 나타낸 지도이다. 각각의 수거차량들이 출발지점에서부터 출발하여 공차회송비용을 최소화하면서 할당된 링크들을 모두 순회하는 경로계획을 보여 주고 있다. TransCAD의 경로선정방법을 활용하면 각각의 수거차량들이 순회하는 경로의 방향을 지도로 가시화하여 표현할 수 있을 뿐만 아니라 수거차량이 순회경로를 따라 운행할 때 적재되는 양과 차량의 이동시간, 그리고 수거서비스가 이루어지고 있는 지점들에 대한 세부적인 정보를 보고서의 형태로도 만들어낼 수 있는 장점이 있다.

5. 결 론

본 연구는 GIS 기법을 활용하여 효율적



[그림 5] 경로선정방법을 이용한 수거차량의 순회경로

으로 생활폐기물의 수거 서비스를 공급하는데 필요한 정보를 도출하는 접근방법을 모색하는데 초점을 두었다. 먼저 생활폐기물의 배출특성과 실제 수거서비스 공급현황을 파악한 후, 배출지점별 쓰레기 배출량을 추정하고 이를 바탕으로 하여 쓰레기 수집구역을 구축하였다. 이러한 데이터베이스를 토대로 사례지역인 광진구를 대상으로 하여 수거권역을 설정하고 설정된 권역 내에서 수거차량의 순회경로계획을 분석하였다.

본 연구에서는 가정과 사업장에서 배출되는 생활폐기물을 배출지점별로 주택유형과 사업체 특성을 반영하여 배출량원단위를 적용하고 건물당 가중치를 부여하여 지점별 배출량을 추정하였다. 이러한 방법으로 사례지역인 광진구를 대상으로 쓰레기 총배출량을 추정한 결과 추정오차가 1%정도로 나타나, 비교적 신뢰성이 있는 추정방법이라고 판정할 수 있었다.

쓰레기의 수거권역을 설정하는데 필요한 최소공간단위인 쓰레기 수집구역(waste collection zone)을 구축하는 방법으로 노폭 5m이상의 도로중심선들을 추출하여, 이 중심선들을 교차시켜 폴리곤을 형성하도록 하였다. 본 연구에서는 지역분할방법을 이용하여 수거권역을 설정하되, 생활폐기물의 종류와 수거횟수 등의 작업여건을 고려하여 수거권역을 달리 설정하였다. 또한 설정된 각 권역내에서 효율적인 수거차량의 순회경로를 계획하기 위해 경로선정방법을 활용하였다.

또한 지역분할방법을 통해 설정된 권역별로 쓰레기를 수거하는 경우와 실제 행정동별로 이루어지고 있는 수거업무를 비교

하여 보았다. 그 결과 GIS를 기반으로 하여 설정된 수거권역에 따라서 수거작업을 수행하는 것이 보다 순회횟수를 줄이면서도 효율적으로 수거서비스를 공급할 수 있는 것으로 분석되었다. 이는 지역분할방법을 통한 수거권역의 설정이 매우 효율적임을 말해준다.

한편 본 연구에서는 지금까지 수작업에 의해 수거차량의 순회경로를 기록하고 임의적으로 경로를 선정하여 수거해왔던 작업을 경로선정방법을 도입할 경우 공차회송비용을 줄이면서 최소의 비용으로 경로계획의 수립이 가능함을 보여주었다. 따라서 GIS를 기반으로 하여 수거차량의 순회경로를 계획한다면 상황에 적합하게 수거차량을 투입하고 작업인원을 배치하며, 작업시간을 산정하는데 따르는 어려움을 해결하면서 보다 효율적으로 수거작업을 수행할 수 있을 것이다.

이상에서 살펴본 바와 같이 GIS를 기반으로 하여 수거권역을 설정하고 순회경로계획을 수립하는 경우 보다 신속하고 효율적으로 쓰레기 수거 서비스를 공급할 수 있을 것이다. 뿐만 아니라 지역여건이나 생활환경의 변화에 따라 생활폐기물 배출량이 변화될 경우 이에 대처하여 유연적으로 수거업무를 수행할 수도 있을 것이다. 특히 배출량원단위가 달라지거나 수거작업의 여건과 수거차량의 변화 및 수거시스템이 달라지게 될 경우 이러한 변화에 대응하는 수거권역의 크기를 조정할 수 있으며, 설정된 권역내에서 최소한의 경비로 순회경로를 계획할 수 있다. 이와 같이 GIS의 다양한 분석기법을 활용한다면 수거서비스 체계를 구축하는데 필요한 객관적이고 과학

적인 정보들을 도출할 수 있으며, 이러한 정보들은 효율적인 수거서비스 체계시스템을 구축하는데 큰 도움이 될 수 있을 것이다.

(주)

1) MCPP문제의 목적함수는 다음과 같다.

$G=(V, A \cup E)$ 상에서

Minimize

$$C = \sum_{(i,j) \in E} d(i,j) x_{ij} + \sum_{(i,j) \in A} c(i,j) y_{ij}$$

여기서, G = multigraph

$V = \{v_1, \dots, v_n\}$ vertices의 집합

A = directed arcs $a_{ij} (i \neq j)$ 의 집합

E = undirected edges $e_{ij}(i < j)$ 의 집합

A', E' 는 필요한 arcs나 edges의 부분집합.

$d(i, j)$ = edge (i, j) 의 거리(≥ 0)

$c(i, j)$ = arc (i, j) 의 거리(> 0)

x_{ij} = edge (i, j) 를 지나는 최적 횟수(> 1)

y_{ij} = arc (i, j) 를 지나는 최적 횟수(≥ 1)

2) 권역간의 균등화 지수=(최대권역 크기

- 최소권역 크기)/최대권역 크기이므로,

$(2354.65-1979.0)/2354.65 \times 100$

$=15.95 \%$

참 고 문 헌

유기영, 서울시 생활계폐기물 발생 및 처리 경로 분석 연구. 서울시정개발연구원, 1998
환경부, 국가폐기물관리종합계획, 1996

Dixon, R.C., "Fair criteria and procedures for establishing legislative districts", In Grofman et al., *Representation and Redistricting Issues*, Lexington: Lexington

Press, 1982

Eiselt, H.A., Gendreau, M. and Laporte, G., "Arc routing problem, Part 1: The chinese postman problem", *Operational Research*, 43(2), 231-242, 1995

Fleischmann, B. and Paraschis, J., "Solving a large-scale districting problem: A case report", *Computers and Operational Research*, 15, 521-533, 1988

Horn, M. E. T., "Regional partitioning by implicitly exhaustive search", *CSIRO Division of Information Technology*, Technical Report TR-HB-90-04, 1990

Horn, M. E. T., "Solution techniques for large regional partitioning problems", *Geographical Analysis*, 27(3), 230-248, 1995

Korfmaier, K. S., "Solid waste collection systems in developing urban areas of South Africa: An overview and case study", *Waste Management & Research*, 15, 477-494, 1997

Laporte, G., "Modeling and solving several class of arc routing problems as traveling salesman problems", *Computers Operation Researches*, 24(11), 1057-1061, 1997

Lemberg, D.S. and Church, R. L., "The school boundary stability problem over time", *Socio-economic Planning Sciences*, 34, 159-176, 2000

Lim J., Lane, S. and McMurtrie, T., "ArcView application for solid waste collection districting", Proceedings of ESRI User Conference, 1996

Lolonis, P. and Armstrong, M.P., "Location-allocation models as decision aids in

- delineating administrative regions", *Computers, Environment and Urban Systems*, 17, 153-174.
- Ossenbruggen, P. J. and Ossenbruggen, P. C., "SWAP: A computer package for solid waste management", *Computers, Environment and Urban System*, 16, 83-100, 1992
- Petts, J, and Eduljee, G., *Environmental Impact Assessment for Waste Treatment and Disposal Facilities*, New York : John Wiley & Sons, 1994
- Solomon, M.M., "Algorithms for the vehicle routing and scheduling problem with time windows constraints", *Operational Research*, 35, 254-262.
- Vu Tung, Dang, and Pinnoi, A., "Vehicle routing-scheduling for waste collection in Hanoi", *European Journal of operational Research*, 125, 449-468, 2000
- Wang, F. S. and Richardson, A. J. and Roddick, F. A., "SWIM-A computer model for solid waste integrated management", *Computers, Environment and Urban System*, 20, 233-246, 1996
- Zoltners, A.A. and Sinha, P., "Sales territory alignment: A review and model", *Management Science*, 29, 1237-1256.