

GIS를 활용한 생활폐기물 수거권역 설정과 수거차량의 순회경로계획 연구

이희연 · 임은선

건국대학교 지리학과 교수 · 건국대학교 지리학과 대학원

1. 서 론

우리나라의 경우 생활폐기물(이하 쓰레기) 발생량이 종량제가 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. 지역주민의 생활환경과 매우 밀접한 관계를 갖고 있는 쓰레기 수거는 가능한한 신속하고 저렴한 비용으로 공급되어야 하는 서비스로 인식되고 있다.

우리나라의 경우 쓰레기 수거업무 및 관리는 수작업에 의한 작업일지에 의존하고 있으며, 행정동 단위별로 수거권역을 구분함으로 획일적인 수거작업이 이루어지고 있는 실정이다. 따라서 인접하여 있지만 행정동이 다른 지구의 쓰레기는 수거되지 않는 경우라든가, 상대적으로 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 사례지역으로 광진구를 대상으로 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.

본 연구는 크게 세 단계로 나누어 수행되었다. 첫번째 단계에서는 수거권역을 설정하는데 가장 기본이 되는 공간단위인 쓰레기 수집구역(waste collection zone)을 구축하였다. 두 번째 단계에서는 수거작업을 효율적으로 수행하기 위해서 쓰레기 수집구역 자료를 바탕으로 하여 쓰레기 수거권역을 설정하였다. 관할 청소구역의 작업여건과 쓰레기 배출량을 고려하여 작업유형을 구분하고 작업량에 따라 작업권역을 분할하는 지역분할 방법을 적용하였다. 마지막 단계에서는 분할된 권역내에서 수거차량들이 최소의 비용으

로 쓰레기를 수거하는 순회경로를 계획하는 경로선정방법을 적용하고 그 결과를 가시화하여 나타내었다.

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

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 없다.

본 연구에서는 배출지점별 쓰레기 배출량을 추정하기 위해 각 건물단위별로 쓰레기가 배출된다고 간주하고 사례지역의 1:5000 수치지형도로부터 건물의 경계선을 추출하고, 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 평균가구수를, 사업체의 경우 건물당 평균 종사자수를 반영하여 건물당 가중치를 부여하였다.

또한 배출지점별 일일 쓰레기배출량을 추정하기 위해 각각의 토지용도별로 배출량원단위를 적용하였다. 배출량원단위는 각 배출원에서 일정기간동안 발생하는 쓰레기의 양을 기준지표를 활용하여 나타낸 척도로써, 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, 고등교육 시설과 같은 쓰레기 다량배출시설들의 경우 배출량 자료를 별도로 수집하여 사례지역의 쓰레기 총배출량을 추정하였다.

이와 같이 각 건물단위별로 토지이용상의 특성을 고려한 건물당 가중치와 배출량원단위를 적용하여 광진구의 생활폐기물을 일반쓰레기, 음식물 쓰레기, 재활용품 배출량을 추정하였다 그 결과 광진구의 쓰레기 총배출량은 약 336톤/일로 추정되었는데, 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.

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.

현재 광진구내 직영관할지역의 쓰레기 수거는 행정동 단위로 수거차량과 미화원이 배치되어 수행되고 있다. 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 2배 정도 차이가 나고 있다. 이러한 차이는 수거권역이 비효율적으로 분할되어 있기 때문이라고 볼 수 있다. 또한 어떤 동의 경우 수거하는데 동원된 차량이 2-4대/일로 차량이 교대로 투입되고 있는 반면에, 어떤 동은 1대의 차량이 계속적으로 순회하면서 운행하고 있어 차량별 작업량에서도 상당한 차이가 나고 있는 실정이다.

본 연구에서는 광진구 관할내에서 발생하는 쓰레기를 보다 효율적으로 수거할 수 있는 방안을 모색하기 위해 지역분할(regional partitioning)방법을 활용하여 수거권역을 설정하였다. 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 지역분할 방법론이 많이 활용된다. 또한 각 학교의 학생수용능력과 등교하는 학생들의 통학거리를 고려하여 적절한 학생의 배분이 이루어지도록 권역을 분할하거나, 행정업무 분야에서도 지역내에서 업무 분량의 균형화가 이루어지도록 업무의 경계를 설정하는 재구획화하는 경우에도 자주 이용된다.

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. 지역분할방법이란 대상지역을 요구되는 권역의 수로 분할하되, 인접성과 각 권역크기의 한계(상·하한계) 조건을 만족시키면서 각 권역들의 밀집성(compactness)를 최대화시킬 수 있는 해법을 찾아내는 것이다.

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 알고

리즘을 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 둘레)과 크기 비율(권역의 최대 크기와 최소 크기의 차이)을 산출하여 총 비중이 줄어들어서 밀집성이 최대화되거나 또는 권역들의 크기가 보다 균등화될 수 있는 해법을 마치 행진하듯이 계속적인 반복과정을 통해 찾아내는 방법이다. TransCAD에서 구현되는 지역분할방법은 Horn의 알고리즘을 바탕으로 하고 있다. 지역분할방법을 적용할 때 가장 중요한 점은 초기의 분할기준구역의 지정이다. 본 연구에서는 분할기준지점의 위치를 선정하기 위해 먼저 군집분석을 수행하여 산출된 결과를 토대로 하여 분할기준구역을 정한 후에 권역을 설정하였다. 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 행정동 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. 현재 광진구에서 중곡동의 4개 동에서 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. 이는 확일적으로 행정동 단위로 수거하는 경우 시간과 비용상에서 훨씬 비효율적임을 말해준다.

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 최단경로의 계획이나 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

이러한 알고리즘 중에서 쓰레기 수거차량의 운행이나 제설작업차량의 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.

쓰레기 수거시에 순회경로 선정 문제는 MCPP를 활용하여 주어진 지점(depot)에서 시작하여 쓰레기 수거 서비스가 요구되는 모든 링크를 적어도 한번은 거치면서 다시 시작 지점으로 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.

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 입력되어야 한다. 노드 레이어의 경우 노드 번호와 교차점명, 노드 종류와 같은 기본 정보와 함께 출발지점(depot)을 인식할 수 있는 속성정보가 주어져야 한다.

본 연구에서는 경로선정 분석을 위한 도로네트워크를 구축한 후 MCPP 문제를 해결하는데 이용되는 알고리즘을 내장한 TransCAD 소프트웨어를 이용하여 사례지역에 대한 경로계획을 수립하여 보았다. 중곡동 일대에서 발생하는 음식물 쓰레기를 2.5톤의 교반차 4대가 순회하는 경로계획을 구축하여 보았다. 각각의 수거차량들이 출발지점에서 부터 출발하여 공차회송비용을 최소화하면서 할당된 링크들을 모두 순회하는 경로계획을 보여주고 있다. TransCAD의 경로선정방법을 활용하면 결과물로 각각의 차량들이 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 효율적으로 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 권역내에서 수거차량의 순회경로계획을 분석하였다.

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 비교하여 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 순회경로 계획을 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 배출량 원단위가 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 과학적인 정보들을 도출할 수 있으며, 이러한 정보들은 효율적인 수거서비스 체계시스템을 구축하는데 큰 도움이 될 수 있을 것이다.