

## GIS를 활용한 수질오염 관리

김계현 (인하대학교 지리정보공학과 교수)

### 1. 서론

GIS (Geographical Information System)란 지리정보시스템을 일컫는 말로서 컴퓨터를 이용하여 만들어진 수치지도(레이어, layer)를 이용하여 다양한 지리정보의 입력과 검색 및 관리·분석을 할 수 있도록 만들어진 시스템을 말한다. GIS에서 사용되는 지리정보는 도형정보와 속성정보의 두 가지로 나뉘어진다. 도형정보는 공간상에 존재하는 다양한 객체들의 형상을 XY나 XYZ 좌표값을 이용하여 나타내며 속성정보는 도형과 관련되는 문자위주의 정보이다.

도형정보는 영차원의 점(point), 일차원의 선(line), 이차원의 면(polygon)을 기본적인 구성요소로 하여 공간상에 존재하는 각종 객체의 형태를 나타낸다. 도형정보를 표현하는 표현방식으로는 현실세계와 유사한 형태를 가지는 벡터구조나 일정 크기의 격자로서 이루어진 격자구조가 사용된다. GIS에서 도형정보는 하천이나 도로, 등고선 등과 같이 각각의 주제별로 수치지도의 형태로 구축된다. 수치지도의 제작은 주로 종이지도를 디지털화하거나 스캐닝할 수 있으며 항공사진이나 위성영상을 이용하여 만들어지기도 한다. 공간상에서의 다양한 객체의 형상을 나타내는 도형정보는 점, 선, 면 각각의 구성요소에 대하여 고유 ID를 가지게 되며, 이러한 ID를 이용하여 관련되는 각종 속성정보들이 도형정보와 연결될 수 있다. 속성정보와 연계된 도형정보는 공간데이터베이스라 불리는 정보의 저장소에 보관되어 필요에 따라 검색되고 주기적으로 수정·관리된다.

GIS에서는 모든 자료가 언급된 바와 같이 지형상

의 위치를 기준으로 저장되고 분석이 가능하기 때문에 수질이나 수자원의 효율적 관리를 위한 데이터베이스의 구축이나 정보의 관리를 위하여 사용된다. 나아가, 유역별 혹은 지역별 수질이나 수자원의 예측을 위한 모델링에 있어서 입력자료의 제공이나 출력자료의 저장 및 다양한 분석을 위하여 효율적으로 사용될 수 있다(Harris et al., 1991).

GIS를 이용한 수질오염의 관리를 위하여는 일반적으로 세 단계의 작업 절차를 거치게 된다. 첫 번째의 단계로서 대상 수계내의 수질현황을 파악하기 위한 각종 자료를 수치지도의 형태로 구축하는 것이다. 가장 비용과 시간이 많이 소요되는 단계이며 구축되는 공간자료의 정확도에 따라 산출되는 정보의 정확도가 좌우되므로 대단히 중요한 단계이다. 또한, 기존에 사용이 가능한 종이지도나 항공사진, 필름, 위성 영상 등의 존재 유무나 보관 상태 등에 따라 여러 가지 입력 방식중에서 가장 효과적이고 경제적인 수치지도의 제작을 위한 입력 방식을 택하게 된다. 구축된 각종 수치지도는 공간데이터베이스내에 저장되어 통합관리되며 주기적인 데이터의 검색과 갱신 등이 이루어지게 된다.

구축되는 데이터의 유형은 도형정보로는 주로 지형도와 하천도, 토지이용도, 소유역도, 행정경계도, 토양도, 임야도, 도시계획도 등과 같이 오염원과 관련되는 도형정보를 들 수 있다. 속성정보로는 공장이나 인구, 가축 등과 같은 각종 점오염원에 관련된 정보를 비롯하여 비점오염원과 관련되는 세부 토지이용에 관한 정보 등을 포함하게 된다.

두 번째의 단계는 구축된 도형정보와 속성정보를

바탕으로 필요한 분석을 하는 과정이다. 이 과정에서 우선적으로 행하여 지는 작업은 지형도를 바탕으로 대상지역을 소유역으로 나누게 된다. 이러한 소유역의 분할은 기존의 대상유역 전체에 대한 lump-sum 위주의 오염원 산정보다는 전체 유역을 지형에 따른 소유역으로 분할하여 지형의 분포와 하천의 흐름에 따른 오염원의 집적 과정을 상세히 파악하기 위함이다 (De Roo et al., 1989). 나아가, 오염원의 발생량이 상대적으로 높은 지역을 파악하여 기존의 지형의 형태를 감안한 효과적인 수질개선의 대안을 제시하기 위함이다. 소유역으로 분할한 다음, 각각의 소유역에 대한 점오염원과 비점오염원을 산출하게 된다. 일정 수계내의 오염량을 계산하기 위하여 공간데이터베이스 내에서 구비된 각종 수치지도를 중첩하여 오염량을 계산하기 위한 각종 자료를 얻게 된다. 오염량의 산출을 위하여 적절한 경험식이나 모델의 적용도 가능하다.

세 번째의 단계는 예측된 오염량을 바탕으로 적정 오염원의 삭감대안을 제시하는 것이다. 오염원의 삭감대안을 제시하기 위하여는 오염원의 유형에 따라 다양한 삭감안의 적용이 가능하다. 따라서, 최적의 삭감안을 구현하기 위하여는 GIS의 공간분석 기법을 이용하여 지형도를 비롯한 다양한 수치지도를 이용한 적지분석을 통한 적정 삭감시설의 위치를 선정할 수 있다. 또한, 관련 시설이나 방안의 구현에 있어서 경제성의 평가 역시 관련 인자들을 수치지도의 형태로 저장하여 분석에 사용함으로써 용이하게 이루어 질 수 있다 (Prey et al., 1993). 최적 대안의 설정을 위한 각종 정보를 제공하는 단계인 만큼 다양한 조건하에서 운영될 수 있는 다양한 대안이 제시될 수 있어야 하며 각각의 대안에 대하여는 여러 측면에서 분석되어야 한다. 그러한 결과물이 그래픽으로 도식되게 함으로써 시각적인 효과와 함께 효과적인 대안의 분석이 가능하여 진다.

## 2. 해외의 GIS를 적용한 수질관리 사례

### 2.1 해외 시범연구 사례

미국의 Wisconsin주는 타 주에 비하여 월등히 많

은 낙농을 하는 관계로 가축의 사육과 관련된 점 및 비점오염원의 산출량이 많으며 그로 인한 인근 도심 지역의 비점오염원에 의한 수질오염이 심각한 실정이다. 따라서, Wisconsin DNR (Department of Natural Resources)에서는 GIS를 이용하여 위에서 언급된 세가지 단계를 거쳐 도심지역에 대한 적정한 수질오염 삭감대안을 마련하게 되었다. DNR에서는 Wisconsin주 전역의 도심지역에 대한 GIS를 적용한 수질개선을 위한 효율적 방안의 마련을 위하여 인구 약 3만의 Beaver Dam이라는 작은 도시를 대상으로 도심지 비점오염원에 관한 시범 사업을 실시하였다 (Kim and Ventura, 1993).

본 사업은 도시지를 대상으로 하는 만큼 정확한 토지이용현황을 바탕으로 관련 비점오염원의 발생량 파악 및 유입경로, 적정 오염원 삭감 대안의 마련 등을 사업의 목표로서 설정하였다. 비점오염원의 정확한 발생 위치와 발생량을 파악하기 위하여 기본적으로 1:50,000의 지도를 디지털화하여 세부적인 도로망을 수치지도의 형태로 구축하였다. 구축된 도로망 지도는 (그림 1) 약 5년전에 제작된 것임으로 현지 조사

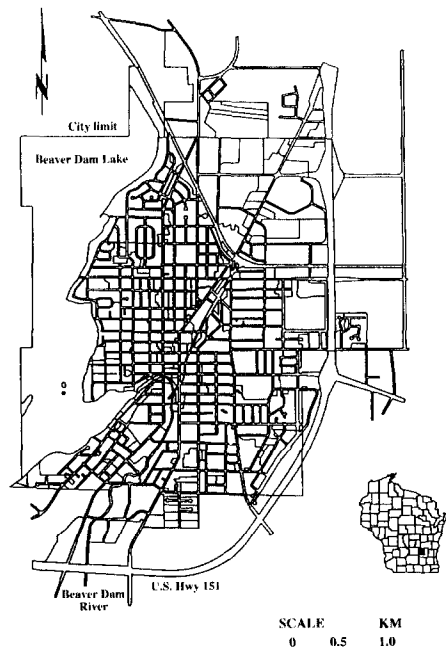


그림 1. Beaver Dam 지역의 도로망도

를 통하여 새로이 개발된 지역에 대한 도로망이 보완되었다. 보완된 수치지도는 기존에 제작된 토지이용도와 항공사진 등을 사용하여 가장 최근의 토지이용도를 제작하는데 사용되었다. 대부분의 도로구획내에서는 하나의 토지이용 형태가 존재하였으나 중앙의 도심지의 경우는 많은 경우에 하나의 도로 구획내에 여러 가지의 토지이용 형태가 존재하였다. 따라서, 대축척의 항공사진을 이용하여 하나의 도로구획내에서 서로 다른 토지 이용의 경계를 작성하였다. 구축된 토지이용도의 정확도를 높이기 위하여 샘플링에 의한 현지조사를 병행하여 수정·보완하였다.

도로 구획별 토지이용의 파악은 되도록 정확한 오염원의 산정을 위하여 주거지역(residential), 상업지역(commercial), 산업지역(industrial), 대규모 시설물지역(institute), 나대지(open space)의 다섯가지로 대분류되었다. 각각의 대분류 항목은 두개에서 네

개의 세부항목으로 나뉘어졌다. 분류의 정확도를 높이기 위하여 이중의 판독 작업을 거쳐 토지이용이 판별되도록 하였다.

대상지역내 대축척의 우수관망도를 디지털화하여 수치지도의 형태로 구축하였다. 우수관망도를 구축한 이유는 도심지에서의 물의 흐름은 지형에 의한 영향도 받으나 실제적으로 우수관망의 형태에 따라 배수구역이 나누어지는 관계로 우수관망도를 작성하여 지형도와 중첩시켜 되도록 도심지에서의 정확한 소유역도가 작성되도록 하였다. 그림 2는 작성된 소유역도를 보여준다. 대상지역을 흐르는 세 개의 하천을 중심으로 모두 11개의 소유역이 형성되었다.

도로망도를 기반으로 작성된 토지이용도와 수질오염을 예측하기 위한 모델과의 연계가 이루어졌다. 즉, 각각의 도로구획이나 토지이용을 나타내는 폴리곤에 대하여 모델을 이용한 수질오염량이 예측되었다. 이 경우 토지이용에 관한 폴리곤의 수가 대단히 많은 관계로 C 언어를 이용한 각각의 토지이용 폴리곤과 수질 예측모델간의 데이터의 용이한 제공과 변환을 위한 프로그램이 개발되었다. 각각의 폴리곤에 대하여 계산된 수질오염량은 다시 각각의 폴리곤에 또 다른 속성값의 형태로 저장되어 이후 계속적으로 사용될 수 있도록 하였다.

이 연구에서 사용된 비점오염원 예측모델은 Wisconsin DNR에서 개발된 SLAMM(Source Loading and Management Model) (Pitt, 1988; Wisconsin DNR, 1991)로서 과거 오랜 동안의 현장 조사를 통한 계수조정이 이루어진 경험적 모델이다. 토지이용을 제외한 다른 입력데이터 (오염부하계수, 강우량, 토양 등)에 대하여는 연평균 값이 주어졌다. 결국 각각의 폴리곤에 대하여 토지이용의 유형과 폴리곤의 면적만이 독립된 변수로서 작용하였다.

각각의 토지이용 폴리곤에 대하여 계산된 오염량은 각각의 폴리곤에 대하여 속성 값으로 저장되었기 때문에 소유역의 경계를 나타내는 수치지도와 토지이용을 나타내는 수치지도를 중첩하여 소유역별 오염량의 합계가 산출되도록 하였다. 소유역별 계산된 오염량을 바탕으로 가장 오염이 심각한 소유역이 확인되었

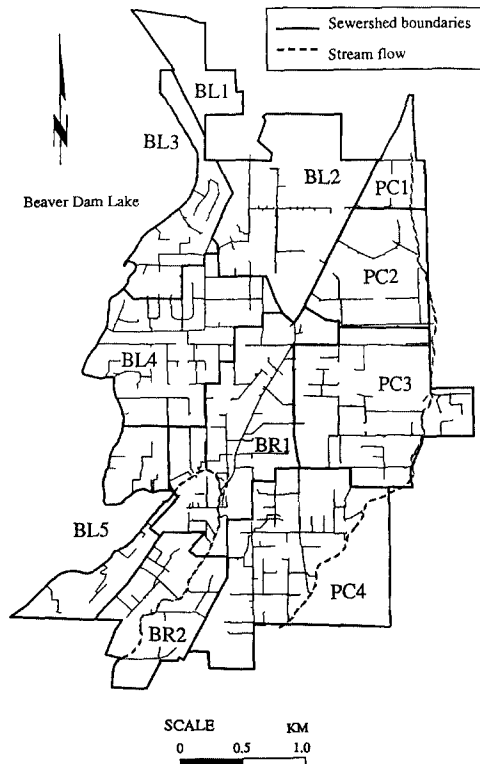


그림 2. Beaver Dam 지역의 소유역도

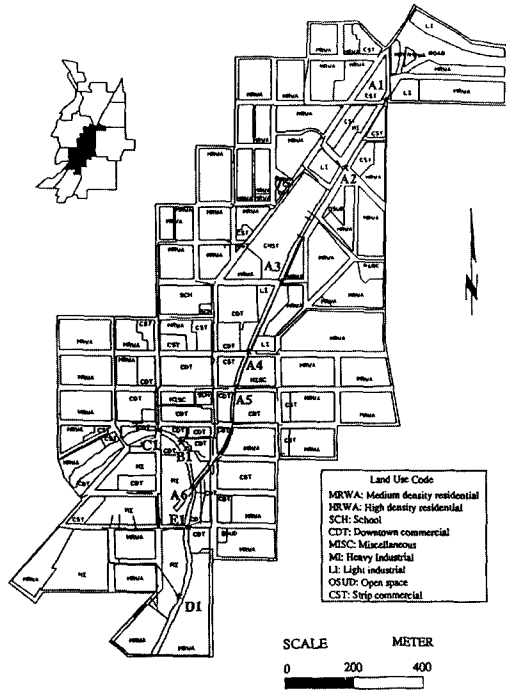


그림 3. 오염이 심각한 소유역에 대한 토지이용 및 우수관망의 분석

다. 해당 지역의 오염악감을 위하여 지역내 도로구획별 토지이용과 우수관망의 분포를 중첩시켜 각각의 우수관로에 집적되는 오염량을 계산하였다. 따라서, 오염량의 집적이 비교적 큰 관로의 접합부분이 확인되었으며 오염량이 하천으로 유입되는 주요 경로가 확인되었다. 아울러 그림 3에서 보여주는 것과 같이 해당 소유역내의 토지 이용을 상세히 분석함으로써 적정 삭감대안이 도출될 수 있도록 하였다.

오염악감 대안으로는 인공호수를 이용한 오염물질의 침전을 통한 삭감방안이 제시되었다. 두 가지의 대안이 분석되었다. 하나의 적은 규모의 인공호를 여러 곳에 만들어 오염물질이 하류로 내려오는 과정에서 단계적으로 침전이 되도록 하는 방안과 비교적 규모가 큰 하나의 호수를 하류에 만들어 오염물질을 침전시키는 방안이 제시되었다. 전자의 장점은 여러곳에서 소규모의 나대지나 지방자치단체가 소유한 공유지나 사유지 등을 활용할 수 있다는 것을 들 수 있다. 그러나 그러한 공유지나 사유지의 확보가 불가능할 경

우 도심지의 비싼 토지구입 비용을 고려할 때 비용이 대단히 커질 수 있다는 단점이 문제시 되었다. 후자의 경우는 하나의 장소에 상대적으로 규모가 큰 호수를 조성할 경우 효율적이고 상대적으로 비용이 싸게 들 수 있다는 것과 시민의 휴식공간으로의 활용도 가능하다는 장점이 파악되었다. 그러나, 대상지역 확보의 어려움 및 별도의 관망 공사 비용이 크게 나타날 수 있다는 문제점 등이 단점으로 나타났다.

그림 4에 나타난 바와 같이 각각의 대안에 대하여 대상지역을 모색한 다음 토지구입 비용을 기준으로 소요 비용과 각각의 장소에 호수를 조성할 경우 우수의 집적관로 설치 비용, 기타 부대시설 설치 비용 등을 고려하여 전반적인 소요비용이 계산되었다. 비용 분석 결과 하나의 규모가 큰 인공호를 조성하는 것이 소규모의 여러개의 인공호를 조성하는 것보다 경제적으로 밝혀졌으며 그러한 호수의 조성을 위한 비용을 기준으로 각 오염원별 단위 무게의 삭감을 위한 소요 비용 역시 계산되었다.

본 사례에서는 적은 도심지를 대상으로 GIS를 이용하여 오염원 산정에 필요한 각종 데이터를 구축하

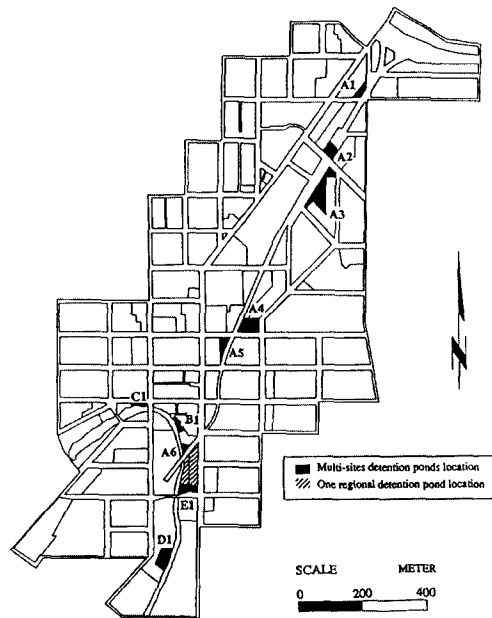


그림 4. 오염이 심각한 BR1 소유역에 대한 인공호 조성을 위한 적지 분석

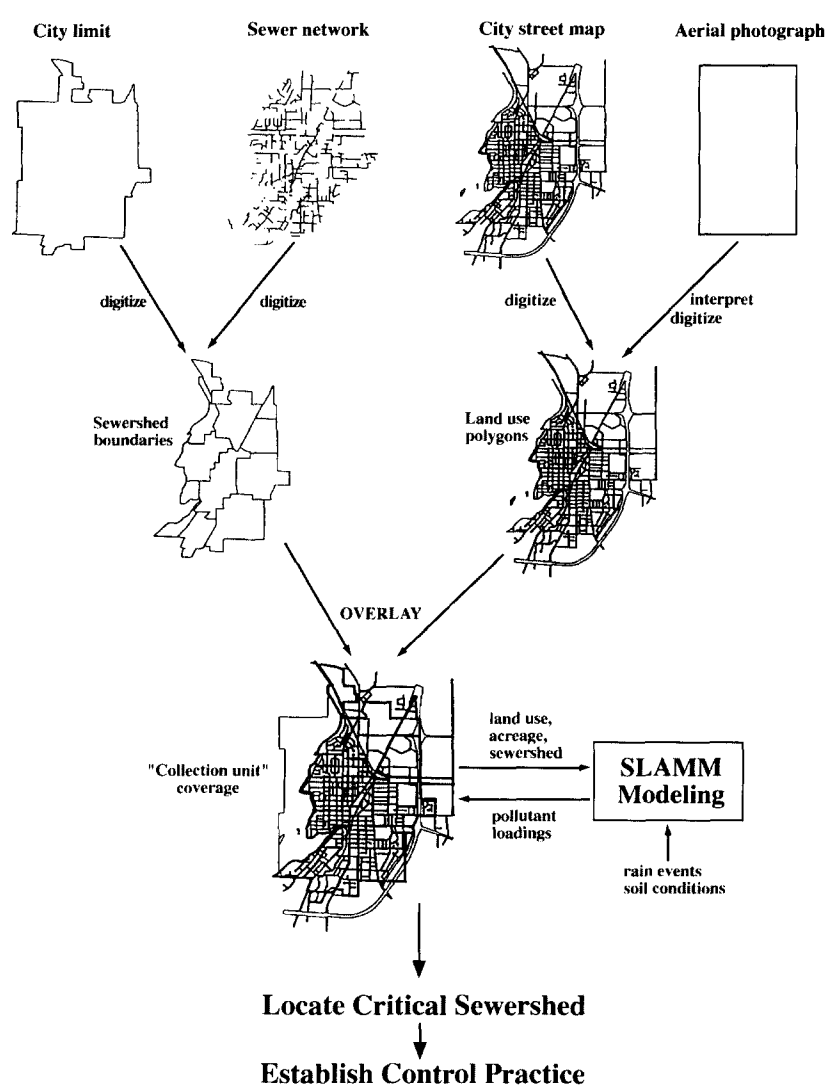


그림 5. 전반적인 GIS를 이용한 시범지역에서의 수질관리 절차.

발달과정을 가진 도시일수록 상대적으로 오염원의 예측을 위한 공간데이터베이스의 구축에 문제점이 많으리라 예측된다. 특히나 관련 수치지도를 만들기 위한 종이지도의 확보 하수관망이나 기타 오염원 관련 데이터의 확보에 많은 어려움이 예상되며 적절한 데이터의 확보방안이 중요시 된다. 또한, 효율적인 도심지의 토지이용에 관한 수치지도를 구축하기 위한 방법에 관하여는 지도와 항공사진, 대축척의 위성 영상 등 다양한 데이터를 이용한 경제적인 구축 방법론에 관한 연구가 계속적으로 필요시 된다. 반면, 언급된 사례에서 보여주는 것과 같이 최근에 개발된 도시이거나 규모가 적은 도시일수록 데이터의 확보나 수치지도의 작성상에 나타나는 문제점이 적다고 판단된다.

## 2.2 해외 대도시 적용 사례

고 모델과의 연계를 통한 매우 적은 수집단위 (개개의 토지이용 폴리곤)를 바탕으로 오염원을 계산하였다. 소유역별 오염원의 합산을 통하여 문제지역이 파악되었으며, 적정 삭감 대안의 확보에 이르기까지 전 분야에 걸쳐서 GIS기법을 활용한 사례이다 (그림 5).

본 연구는 대상지역의 면적과 인구가 적은 만큼, 여러 가지 측면에서 상대적으로 용이하게 GIS의 적용이 이루어졌다고 판단된다. 결과적으로, 오래된 도시의

앞의 시범연구에서 많은 문제점의 보완과 보다 경제적인 토지이용 데이터의 구축 방안, 레이어의 관리 등 효율적인 수질관리를 위한 GIS 활용방안이 보완되었다. 이를 바탕으로 Wisconsin DNR에서는 보다 대도시를 대상지역으로 GIS를 이용한 수질관리를 위한 분석을 하였다 (Ventura and Kim, 1993).

Milwaukee는 Wisconsin주에서 가장 규모가 큰 도시로 항만과 국제 공항, 복잡한 고속도로망 등 앞의

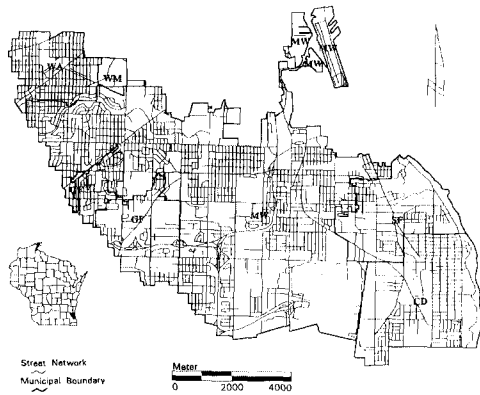


그림 6. 대상지역의 도로망도

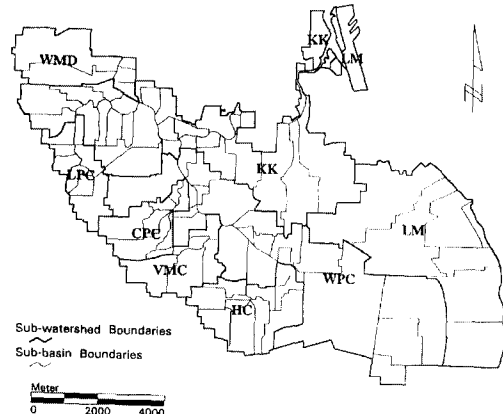


그림 8. 대상지역의 소유역도

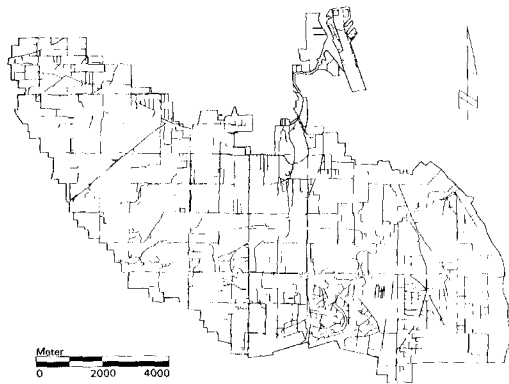
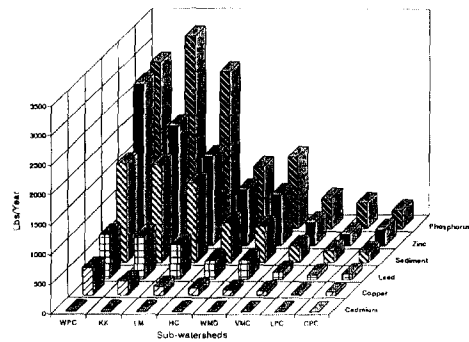


그림 7. 대상지역의 우수관망도

시범연구지역과는 많은 차이점을 가진 지역이다. 따라서, Milwaukee의 경우는 토지이용도를 비롯한 오염원 관련 데이터의 수집과 입력에 대단히 많은 시간과 비용이 소요되었으며 우수관망의 확보에 대단한 어려움이 있었다. 또한, 우수와 오수가 함께 처리되는 합류식 관거가 사용되는 지역이 적지않게 존재하는 관계로 이러한 합류식 관거 지역의 경계 설정에도 많은 어려움이 있었다. 특히 정확한 토지이용의 구축을 위하여 샘플링 작업과 항공사진의 활용에 많은 비용이 소요되었다.

그림 6은 대상지역의 도로망이며, 그림 7은 대상지역의 우수관거를, 그림 8은 우수관거를 기준으로 나뉘어진 소유역도이다. 그림 9는 각각의 도로 구획별 토지이용도를 작성하여 모델과 연계하여 도로구획별 오

Yearly Pollutant Loadings



Unit Pollutant Loadings

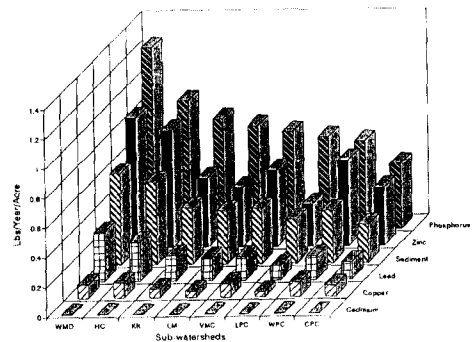


그림 9. 소유역별 연간 오염발생량 및 단위 면적당 오염발생량

염발생량을 계산하고 이를 바탕으로 소유역별 연간 오염원의 발생량을 보여준다.

그림 10은 GIS에서 여러 수치지도의 중첩을 통한 수질모델을 운용하기 위한 데이터를 만든 후, 이를 모델과 연계하여 각각의 도로 구획별 오염량을 산정한 다음, 다시 행정구역이나, 소유역의 경계를 나타내는 수치지도와 중첩하여 행정구역이나 소유역에 대하여 발생하는 오염량의 산정과정을 보여주는 그림이다. 그림 11은 소유역중에서 가장 오염이 심한 소유역에 대하여 오염량의 삭감을 위한 인공호를 조성하기 위

한 적지선정 및 필요한 관거의 구성을 보여주고 있다.

### 3. 국내 사례 : G-7 환경공학 기술개발 연구사업

국내에서는 GIS 기술이 도입된 역사가 짧은 만큼 환경이나 수질분야에서 그다지 활발한 응용은 이루어지지 못하는 실정이다. 대표적인 사례로는 1992년부터 1995년까지 수행된 G-7 환경공학 기술개발 사업 중 수질정보종합관리시스템 중과제의 결과물을 들 수 있다 (김계현, 1997).

G-7 연구사업의 대상지역은 남한강 유역 총 12,000 km<sup>2</sup>이며 대상유역은 수도권 약 13백만 인구의 용수를 제공하는 대단히 중요한 용수원이다. 본 연구의 주요 목적은 대상 유역의 오염원 데이터베이스를 구축하여 향후 오염원관련 정보의 입력, 검색, 수정, 삭제, 관리 등을 위한 수질정보종합관리시스템 (ISWQM: Integrated System of Water Quality

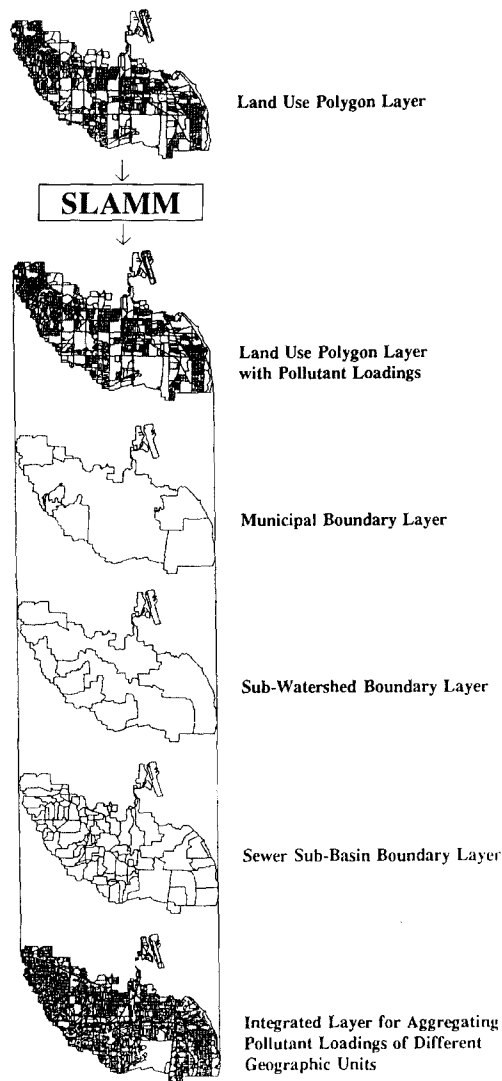


그림 10. 도로 구획별로 계산된 오염량을 이용한 행정경계 및 소유역별 오염량의 산출.

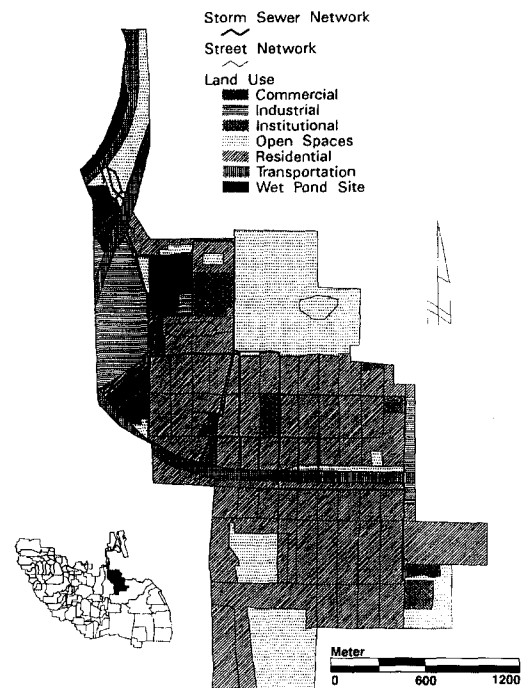


그림 11. 오염이 심각한 소유역에 대한 인공호 조성을 위한 적지 선정

표 1. 남한강 유역 수질정보 종합관리를 위하여 구축된 수치지도의 유형

주 제도	축 척	데이터 획득원	제작년도	Coverage 유형
도로망	1:250K	국립지리원	1983	Line
수계	1:50K	국립지리원	1983	Line
행정경계	1:50K	시·군	1993	Polygon (city/county/ municipality) Line (village)
소유역	1:50K	환경부	1993	Polygon
DEM	100×100M	(주) 캐드랜드	1980	DTED
토지이용	1:25K	국립지리원	1978	Polygon
산업시설	1:50K	환경부	1993	Point
수질측정소	1:50K	환경부	1993	Point

Management)의 개발과 소유역별 오염량의 산정과 유역 오염원 확산과정을 파악하기 위한 모델과의 연계이다. 본 연구에서 구축된 오염원 데이터베이스는 표 1에 나타난 것과 같이 미국의 Wisconsin 사례보다 다양한 수치지도의 구축을 포함하였다. 그림 12는 대상지역의 도로망을, 그림 13은 수치로서 지형의 상태를 보여주는 DEM(Digital Elevation Model)을 이

용하여 만들어진 소유역의 경계를 보여 주고 있다.

본 연구에서는 오염원 데이터베이스의 효율적 관리를 위하여 MS사의 데이터베이스관련 도구인 Access를 이용한 관계형 데이터베이스를 기반으로 각각의 도형자료와 연관되는 오염원 속성자료를 상세히 구축하였다. 오염원의 계산 결과 나타난 소유역별 일별 BOD와 TN의 산출량은 그림 14, 15와 같다. G-7의 연구에서는 연구의 기간이 짧은 관계

로 공간데이터베이스와 수질모델간의 연계는 이루어지지 못하였다. 그러나 추후 보안을 통한 모델을 운용하기 위한 데이터베이스는 구축되어 있으며 사용자의 편의성을 제공하기 위한 GUI (Graphic User Interface)역시 완성되어 있는 실정이다.

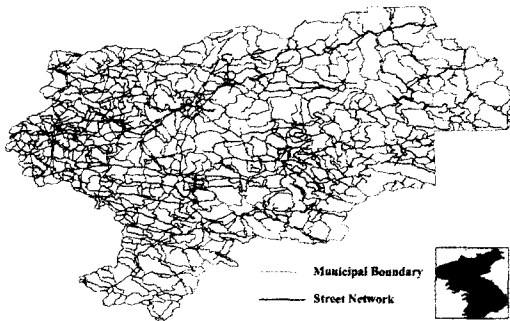


그림 12. 남한강 유역의 도로망 분포

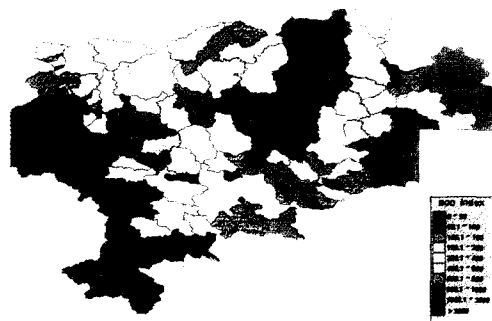


그림 14. 소유역별 BOD 산출량 (unit: kg/day)



그림 13. DEM을 이용하여 생성된 소유역도

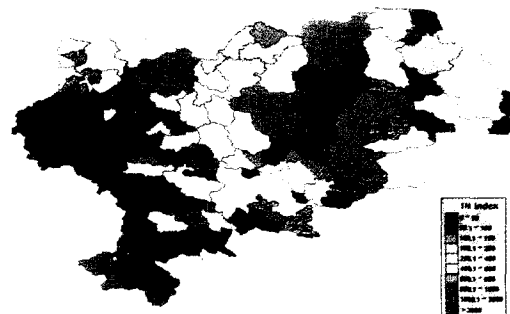


그림 15. 소유역별 TN 산출량 (unit: kg/day)



#### 4. 맺음말

언급된 G-7 연구사례는 국내에서는 GIS를 이용한 수질관리 분야의 첫 본격적 연구로서 넓은 수계에 대한 비교적 정확도 높은 오염원 데이터베이스가 구축되었다. 이는 향후 주기적인 공간데이터베이스의 보완을 통한 보다 현실적인 오염원 삭감대책의 마련을 위한 도구로서 활용될 수 있는 기반을 마련하였다고 사려된다.

GIS에서 가장 기본적이면서도 중요한 동시에 대부분의 비용을 차지하는 것은 수치지도의 구축이다. 이러한 수치지도의 구축은 지난 95년도부터 시작되어 현재 건설교통부를 중심으로 추진되고 있는 국가지리정보시스템 구축사업(NGIS)의 결과물을 활용함으로써 관련되는 비용을 최소화 할 수 있다. 현재 NGIS사업에서는 국립지리원을 사업주체로 하여 전 국토에 대하여 1:5,000과 1:25,000, 1:50,000의 세가지 축척으로 수치 지형도가 구축되고 있으며 98년도까지는 사업이 완료됨에 따라 지형도와 관련된 수치지도를 국민에게 공급할 예정이다. 따라서, 향후 수질을 포함

한 수자원 분야에서 GIS의 활용을 위한 기반이 되는 수치지도를 국가에서 제공하여 주는 만큼 보다 경제적인 GIS 활용이 가능하여 졌다고 볼 수 있다.

또한, 현재 NGIS사업의 일환으로 국립지리원을 중심으로 도심지의 안전하고 효율적인 시설물관리를 위하여 전국의 78개 시가지 지역을 대상으로 연차적으로 1:1,000의 대축척 수치지도 제작사업이 진행되고 있으며 99년 초까지는 완료될 예정이다. 이러한 대축척 수치지도에서는 보다 정확한 수치지형 데이터가 제공될 수 있는 까닭에 보다 미시적이고 정확한 수질이나 수문 예측 모델링을 위한 데이터가 제공될 수 있다.

아울러, 이러한 대축척 수치지도를 활용한 향후 수질이나 수문 및 수자원 분야에서의 GIS활용을 극대화하기 위한 시범 연구 사업의 추진도 시급한 실정이다. 이러한 시범연구의 추진을 통하여 수자원 분야의 GIS 활용을 위한 수치지도의 효율적 확보 방안과 함께 활용에 따른 수치지도의 정확도 검증 및 향상 방안, 문제점의 파악과 해결방안, 효율적인 수문·수질 예측 모델과의 연계방안 등이 확보될 수 있으리라 사려된다. ●

#### (참고문헌)

- 김계현 (1995). "수질정보종합관리시스템 개발." G-7환경공학기술개발과제 3차년도 연구보고서, 시스템공학연구소.
- 김계현, 정동일, 김주완, 최정단, 성만규, 하성룡 (1997). "Identifying critical areas of urban water pollution using a GIS." 대한환경공학회지 영문판, Vol. 2, No. 2, pp. 73-81.
- De Roo, A.P.J., L. Hazelhoff, and P.A. Borrough (1989). "Soil erosion modeling using 'Answers' and Geographical Information Systems." Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 14, pp. 517-532.
- Harris, P.M., Kim, K., Ventura, S.J., Thum, P.G., and Prey, J. (1991). "Linking a GIS with an urban nonpoint source pollution model." GIS/LIS '91. Atlanta, Georgia, Vol. 2, pp. 606-615.
- Kim, K., and Ventura, S.J. (1993). "Large-scale modeling of urban nonpoint source pollution using a Geographical Information System." Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 59, No. 10, pp.1539-1544.
- Pitt, R. (1988). "SLAMM 5. Source Loading and Management Model: An urban nonpoint source quality model." Ph.D. dissertation, University of Wisconsin-madison, Madison, Wisconsin.
- Prey, J.P., Ventura, S.J., and Kim, K. (1993) "Stormwater pollution control practice siting and retrofitting within the context of a GIS." Proceeding GIS '93, Vancouver, BC.
- Ventura, S.J., and Kim, K. (1993). "Modeling urban nonpoint source pollution with a Geographical Information System." Water Resources Bulletin, Vol. 29, No. 2, pp. 189-198.
- Wisconsin Department of Natural Resources (WDNR) (1991). "SLAMM model calibration and example application project. Phase 1, Technical memorandum data review and verification." Prepare by Warzyn Inc., 38 pp. 5 appendices.