

# GIS에 의한 토지이용계획과 상수도계획의 동적인 연계

김 형 복

한국토지공사 연구개발처 기술연구1팀장

## 1. 서론

최근 도시성장관리(urban growth management)의 경향은 전통적인 토지이용 정책에서 간선시설(infrastructure) 통제방법으로 바뀌고 있다. 성장관리수단으로서의 간선시설은 간선시설이 토지이용에 영향을 미칠 수 있다는 사실을 뒷받침해주고 있다. 간선시설과 토지이용과의 관계의 중요성이 종종 강조되고 있지만 그들의 상관관계, 즉 간선시설이 토지이용에 얼마나 영향을 미치는지와 그 역으로 토지이용이 얼마나 간선시설에 영향을 미치는가에 관한 연구가 미진한 실정이다.

토지이용, 도시성장, 그리고 도시개발은 대표적인 간선시설인 상수도의 수요량을 창출하고 상수도 공급<sup>2)</sup>은 토지가 개발되는 방법과 범위에 영향을 미친다. 일례로 미개발지에 부설된 상수도관은 개발자에게 상수도관망 설치의 필요성을 감해주므로 개발자는 더 많은 이윤을 남길 수 있다. 즉 간선시설 설치가 도시성장을 유발하는 결과를 만든다. 상수도계획은 정도의 차이는 있지만 동적으로 토지이용계획과 상호 연관관계가 있다. 잘 계획된 기반시설은 건전한 도시개발을 유도할 수 있다 (Davidson, 1986). 그러나 상수도 계획가는 토지이용에 미치는 영향을 간과하여 무계획한 토지이용계획 변화(Council on Environmental Quality, 1976)와 계획도시 주변의 난개발(urban sprawl)을 초래하곤 한다.<sup>3)</sup>

이에 따라 본고에서는 토지이용계획에 의한 상수도계획의 동적인 연관관계 정립시의 문제점을 분석하고, 대안생성(alternative generation) 방안을 모색하며, 상수도계획 중에서 상수도관망계획을 선정하여 토지이용계획과 상수도관망계획의 동적인 관계를 GIS를 활용하여 모델링한다. 상수도계획이 토지이용계획에 미치는 영향은 향후 심도있는 연구와 실측이 필요하며 본고에서는 제외하기로 한다.

## 2. 토지이용계획과 상수도계획

토지이용계획에 의한 상수도계획의 영향을 통제하는 인자는 규모의 경제(economies of scale)와 단계별 개발(phased development) 등 2가지가 있다. 전자의 방법이 환경을 확대하거나 축소하는 반면에 후자의 방법은 한 개의 용량화

1) 상수도 관련 간선시설은 배수지와 상수도 관망으로 구분될 수 있다.

2) 요즘 문제가 되고있는 신도시 주위 지역에서의 난개발이 사례가 될 수 있다.

장사업을 여러 개발단계로 구분하는 것이다. 규모의 경제와 그리고 단계별 개발의 적절한 조화(trade-off)가 필요하다. 상수도계획에서 규모의 경제가 존재하는 2가지 이유가 있다 (Tabors 외, 1976). 첫 번째 이유는 상수도 수요가 아무리 작아도 최소 관경에 의한 일정한 량의 상수도량이 공급이 된다. 두 번째 이유는 관경과 용량의 물리적인 관계이다. 관경의 경우 용량은 단면적에 의하여 결정이 되고 비용은 관경의 원주에 의하여 결정이 된다. 그러므로 관경이 증가함에 따라 비용보다 용량이 더 급속하게 증가한다.

한계비용은 증가되는 시설용량에 따라 감소한다는 규모의 경제는 미래사용량에 대응하여 초과용량(excess capacity)을 생산하는데 적절한 논리를 제공해주고 있다. 필요용량을 초과해 설치된 시설물용량은 도시성장에 의한 지방세의 증가를 선호하는 지방자치단체장에 의하여 선호되고 있다. 비록 규모의 경제가 대형사업이 한계비용을 감소시킨다는 정당성이 있지만 할인율(discount rate)이 높을 때에는 단계별 개발이 더 바람직하다. 상수도계획가는 초기의 대규모 초과용량을 회피하기 위하여 단계별 개발을 선호할 수 있다. 용량확장에서의 일반적인 문제는 장래토지이용에 의하여 유발되는 상수도수요량을 만족시키는 용량확장의 크기를 동적으로 결정하기 위하여 순현가의 기준에 의하여 기존 시설물에 시설용량을 추가로 설치하기 위한 사회적 그리고 경제적인 최적안을 선정하는 것이다 (Tabors 외, 1976).

문제점은 적은 수의 초기의 대규모 용량 혹은 여러 단계의 소규모 용량 중 어느 것을 선정하느냐이다. 초기의 대규모 용량은 규모의 경제의 이점을 보여주고 있는 반면에 단계별 시설은 적은 초기 지출을 요구한다. 규모의 경제와 단계 개발이 조화를 이룬다는 것은 수요량을 충족하는데 최소의 현가를 소요하는 일련의 확장 계획을 선정하는 것을 의미한다.

### 3. 토지이용계획에 따른 상수도관망계획의 동적인 연계시의 대안생성 방안

본고의 토지이용계획에 따른 상수도관망계획의 동적인 연계는 토지이용과 개발은 상수도의 수요를 유발한다는 전제하에 시작된다. 장래를 목표로 수립이 되는 토지이용계획에 따른 상수도 계획은 일반적으로 규모의 경제가 최선의 방안이라는 전제하에 결정이 되는데 할인율 등 여러 가지 여건의 변화에 따라 단계별 개발이 최선의 방안이 될 수도 있다. 의사결정자가 고려치 못한 요소에 의하여 최적 대안을 작성하기가 곤란하므로 목적에 부합하면서 다양한 대안을 작성해야 한다.

상수도관망계획에서 VE와 LCC의 검토가 없어 초기공사비는 저렴하나 유지/관리비용이 높아 장기적으로 볼 때 경제성이 없는 대안이 결정될 수 있으므로

경제적인 대안 생성을 위해서는 VE와 LCC분석 절차 그리고 대안생성기법의 개발이 필요하다. 일반적으로 VE는 상수도관망 대안생성의 단계에서 활용되며 LCC는 다음 단계인 경제성 분석단계에서 활용된다 (Kirk와 Dellisola, 1995). 이와 마찬가지로 우리 나라에서도 일부 시행이 되고있는 설계VE에서도 VE에 의하여 대안을 생성한 후에 대안비교단계에서 LCC를 고려하거나 VE에 의하여 대안을 결정하는데 그치고 있다. 이와 같이 VE와 LCC의 단계는 분리되어 대안결정에 생애주기비용이 고려될 수 없어 최선의 대안이 결정되지 못함에 따라 VE에 의한 대안 결정시 LCC가 고려될 수 있는 방안을 수립하여야 한다.

#### 4. 토지이용계획에 따른 상수도관망계획 모델링

토지이용계획을 고려한 상수도관망 계획의 동적연계에 관한 모델링은 시간에 따라 변화하는 수요량을 충족하기 위하여 상수도관망을 어떻게 확장할 지에 관한 정보를 제공해준다. 이 정보에는 확장크기(sizing), 확장시기(timing), 확장장소(location), 그리고 확장종류(types)가 포함된다 (Luss, 1982).

토지이용계획에 따른 상수도관망의 용량확장문제는 두 가지 방법에 의하여 해결될 수 있다: 1) 최적통제이론(optimal control theory) (Wymer, 1994); 2) 혼합정수비선형프로그래밍(mixed integer nonlinear programming: MINLP) (Brooke 외, 1992). 첫 번째 방법은 수요에 대한 가격의 영향을 고려할 수 있으나 사전 정의된 환경에 의하여 결정이 된다. 두 번째 방법은 용량 확장 크기와 시간을 동시에 결정할 수 있으나 수요에 대한 가격의 영향을 포함할 수 없다.

##### 4.1 최적통제이론에 의한 모델링

최적통제이론에 의한 모델링은 사용자에게 상수도계획수립시 여러 가지 수단을 제공하여준다: 1) GIS에 의한 노드별 사용수량 산정 및 가상상수관망 생성; 2) 사용자, 최적화모델, 혹은 MGA에 의한 대안의 작성; 3) 관망해석모델에 의한 상수관망의 분석; 4) 용량확장모델에 의한 용량확장의 순서와 시기결정; 5) GIS에 의한 결과 표시.

잘 정의되어있는 이론적인 배경을 가진 최적통제이론 최적화의 수단으로서 1개 혹은 그 이상의 통제변수를 사용한다. 최적통제이론의 목적은 통제변수의 최적시간 경로를 결정하는 것이다. 특히 최적통제이론은 비용, 가격, 그리고 수요량간의 동적 관계를 사용자가 파악할 수 있게 해준다. 이러한 장점에도 불구하고 몇 가지 한계가 있다: 1) 용량확장모델과 관망해석모델간의 빈번한 자료교환; 2) 상태변수의 시뮬레이션, 공급량의 사전정의, 그리고 용량확장모델에서의 많은 가정; 3) 상수도관망에서 각개의 관로의 크기를 결정하는데 있어서의 한계; 4) 상태변수에서의 도약(jump)을 요하는 용량확장에 최적통제이론을 적용하는데

있어서의 한계점 (Brooke와 Meeraus, 1985), 그리고 5) 궁극적으로 용량확장모델에서 오직 용량확장시기 밖에는 결정할 수 없는 한계점.

#### 4.2 MINLP에 의한 모델링

MINLP에 의한 상수도관망 계획의 모델링에서는 상수도 수요량은 외생적으로 그리고 용량확장과는 별개로 증가된다고 가정하였다. 특히 가격의 수요량에 대한 영향(pricing effects)은 고려되지 않고 있다. MINLP에 의한 모델링은 최적통제이론에 의한 모델링에 비하여 네 가지 이점을 가지고 있다. 1) 장래용량확장시기, 크기, 장소, 그리고 관종류를 포함하는 확장대안이 결정이 된다; 2) 각 링크의 용량확장이 시간적으로 가능하다; 3) 최적통제이론에 의한 모델링과는 달리 모델간 자료의 교환이 적어진다; 4) VE와 LCC 개념이 모델링에 포함되어 LCC에 포함되는 모든 비용을 대안 생성시 고려할 수 있다.

MINLP방법은 앞에서 언급한 최적통제이론의 한계를 극복할 수 있다. MINLP방법이 선택되는 다른 중요한 이유는 상태변수(state variable)가 외생변수(exogenous variable)인 인구증가추세에 의하여 영향을 받아 최적통제이론의 필요성이 감소되고 상수도 가격은 행정적으로 결정되기 때문이다. MINLP방법이 상태변수를 통제하고 수요, 비용, 그리고 가격의 상관관계를 다룰 수 없지만 용량확장의 크기와 시기를 결정할 수 있다. 각 방법의 장단점은 최적통제이론과 MINLP방법을 연계하면 상수관망의 각 링크별로 시설의 크기, 시기와 수요량을 조정할 수 있다는 사실을 우리에게 시사해주고 있다.

#### 5. 결론 및 향후 연구계획

GIS는 최적통제이론과 MINLP에 의한 모델링내에서 노드별 사용수량 산정 및 상수관망 대안 생성과 대안생성 결과 표시에 사용될 수 있다. 잘 정의되어 있는 이론적인 배경을 가진 최적통제이론은 최적화의 수단으로서 1개 혹은 그 이상의 통제변수를 사용한다. 최적통제이론의 목적은 통제변수의 최적시간 경로를 결정하는 것이다. 특히 최적통제이론은 비용, 가격, 그리고 수요량간의 동적 관계를 사용자가 파악할 수 있게 해준다. 이러한 장점에도 불구하고 용량확장 크기, 시기, 장소, 종류를 동시에 결정하는데 한계가 있다.

MINLP에 의한 모델링은 이러한 한계를 극복할 수 있으며 MINLP방법이 선택되는 다른 중요한 이유는 상태변수가 외생변수인 인구증가추세에 의하여 영향을 받아 최적통제이론의 필요성이 감소되고 VE 및 LCC 개념을 대안생성에 동시에 고려할 수 있다는 점이다.

GIS를 기반으로 하는 토지이용계획과 상수도계획의 동적관계 정립에서 향후 연구과제는 다음과 같다.

1) 최적통제이론과 MINLP의 연계에 의한 새로운 상수도관망의 모델링은 비용, 가격, 수요의 관계를 다룰 뿐만 아니라 상수도관망의 용량확장 크기, 시기, 장소, 종류를 동시에 결정할 수 있을 것으로 예상된다.

2) 상수도관망계획이 토지이용계획에 미치는 영향은 모델링과 아울러 현장조사에 의한 실측에 의하여 모델링의 결과를 확인하여야 한다.

3) 상수도관망계획과 하수도관망계획은 직접적인 연관관계가 있기 때문에 상수도관망계획과 하수도관망계획을 포함하는 모델링이 연구되어야 한다.

4) 도시성장규제의 수단으로서 상수도관망 뿐만 아니라 상수도 배수지, 하·폐수처리장 등의 간선시설이 토지이용에 미치는 영향도 연구되어 도시성장관리의 수단으로서 간선시설의 가능성에 대한 연구가 수행이 되어야 한다.

5) 상수도관망의 대안 생성에 GIS의 기본적인 공간분석기능인 중첩, 최단거리 노드 결정, 속성정보 관리기능 등이 사용되었는데, 위상(topology)에 의한 작성된 도형정보와 속성정보 테이블 또는 추가 모형을 사용시 상하수도관망의 대안 작성과 같은 특수한 네트워크문제의 해결에 고차원의 공간분석이 예상되어 추후 심도있는 연구가 필요하다.

6) 하수도관망의 대안 생성 시에는 상수도관망과는 달리 관로가 하수맨홀에 의하여 분리되는 경우가 많기 때문에 위상에 의한 테이블 구성이 곤란한 경우가 많이 발생하여 이를 해결하기 위한 연구의 필요성이 제기된다.

## 참고문헌

Binkley, Clark et al, *Interceptor Sewers and Urban Sprawl*, Lexington Books, Lexington, MA., 1995.

Brooke, Anthony, David Kendrick, and Alexander Meeraus, *GAMS, Release 2.25*. Eloyd & Fraser Publishing Company, Danvers, MA., 1992.

Brooke, A., A. Drud, and Alexander Meeraus, "Modeling Systems and Nonlinear Programming in a Research Environment," *Computer in Engineering*, 1985.

Council on Environmental Quality, *The Growth Shapers: The Land Use Impacts of Infrastructure Investments*, Prepared by Urban Systems Research & Engineering, Inc., 1976.

Davidson, Jonathan M., "Plan-based Land Development and Infrastructure Controls: New Directives for Growth Management," *Journal of Land Use & Environmental Law*, 2(2), pp.151-175, 1986.

Kirk, Stephen J. & Alphonse J. Dellisola, *Life Cycle Costing for Design Professionals*, McGraw-Hill, Inc., New York, 1995.

Luss, Hanan, "Operations Research and Capacity Expansion Problems: A Survey." *Operations Research*, 30(5), pp.907-947, 1982.

Tabors, D. R., M. H. Shapiro, and P. P. Rogers, *Land Use and the Pipe*, Lexington Books, Lexington, MA., p.48, 1976.

Wymer, C. R, *APREDIC Computer Program, Manual, and Supplements*, 1994.