

시스템다이내믹스를 활용한 도시공간구조에 따른 에너지 소비모형 구축에 관한 연구

Construction of the Energy Consumption Model according to Urban Spatial Structure using System Dynamics

구형수 서울대학교 환경대학원 환경계획학과 석사(제1저자)
Koo Hyeong Su Master's degree, Dept. of Environmental Planning,
Graduate School of Environmental Studies, Seoul National
Univ.(Primary Author)
(covo99@snu.ac.kr)

이희연 서울대학교 환경대학원 교수(교신저자)
Lee Hee Yeon Professor, Dept. of Environmental Planning, Graduate
School of Environmental Studies, Seoul National
Univ.(Corresponding Author)
(leehyn@snu.ac.kr)

목 차

- I. 서론
- II. 관련 이론 및 선행연구 고찰
 - 1. 도시공간구조와 에너지 소비와의 관계 연구
 - 2. 토지이용-교통 통합모형을 이용한 에너지 소비 변화 시뮬레이션 연구
 - 3. 시스템다이내믹스를 활용한 도시 연구
- III. 시스템다이내믹스를 활용한 에너지 소비모형 구축
 - 1. 도시공간구조에 따른 에너지 소비모형 개념도
 - 2. 에너지 소비모형의 인과지도와 흐름도
- IV. 에너지 소비모형의 작동성 검토와 시뮬레이션을 통한 에너지 소비 절감효과 비교
 - 1. 에너지 소비모형의 작동성 검토
 - 2. 시나리오별 시뮬레이션을 통한 에너지 절감효과 비교
- V. 결론

I. 서론

화석연료의 급격한 소비증가로 인한 유가 상승과 그에 따른 석유자원 고갈위기 및 기후변화에 대한 경각심이 높아지면서 에너지 문제에 대한 관심이 크게 증대되고 있다. 이에 따라 도시계획이나 도시개발정책 수립 시에도 에너지 효율적인 도시 구축을 위한 다각적인 노력이 시도되고 있다.

지속가능한 도시발전을 위해서 에너지 저소비형 도시를 만들어 가는 데 가장 큰 영향을 미치는 분야는 토지이용과 교통 부문이라고 볼 수 있다(Badeo and Miller, 2000; Bento, et al. 2004; Handy, 2005). 우리나라를 포함한 대다수의 나라들은 계속해서 늘어나는 자동차 보급으로 인해 급증하는 에너지 소비량과 그에 따른 환경오염이 매우 심각한 수준에 이르고 있다. 토지이용패턴은 통행발생을 유도할 뿐만 아니라 개인의 통행수단 선택에 영향을 미치거나 또는 중요한 제약요인으로 작용하는 것으로 알려져 있다(Boarnet and Crane, 2001; Cervero, 1996; Crane, 2000). 즉 통행수단을 선택함에 있어서 개인의 소득, 자동차 보유, 직업 등의 특성과 통행수단의 시간과 비용 등이 중요한 결정요인으로 작용하지만, 가고자 하는 목적지와 출발지의 토지이용 특성도 통행자가 통행수단을 선택하는데 고려되는 요인으로 작용한다는 것이다. 따라서 에너지 저소비형 도시로 지향해 나가기 위해 대중교통 수단분담률을 높여 에너지 소비량을 줄이는 것도 중요하지만, 통행수단의 제약요인으로서 토지이용 특성이 에너지 소비에 미치는 영향을 파악하는 것이 매우 중요하다.

우리나라뿐만 아니라 영국이나 미국의 주요 도시들의 총 에너지 소비량을 보면 교통 에너지 소비량에 비해 건물 에너지 소비량이 훨씬 더 많은 비중을 차지하는 것으로 나타나고 있다. 따라서 에너지

저소비형 도시를 구축하기 위해서는 총체적인 차원에서 도시공간구조에 따라 에너지 소비가 어떻게 달라지는가에 대한 분석이 필요하다. 이미 서구의 몇몇 국가에서는 토지이용계획이나 교통계획수립 시에 에너지 문제를 연계시킨 종합적인 대책을 마련하고 있으며, 이를 위해 도시성장시물레이션 모형을 활용하고 있다(이희연·김동완, 2007). 국내에서도 이와 같은 정책의 필요성에 대한 공감대가 형성되어 있으며, 도시공간구조 요소들과 교통에너지 소비의 관계를 분석한 연구도 이루어졌다(안건혁, 2000; 김선희 외, 2003). 그러나 보다 포괄적으로 에너지 저소비형 도시를 구축하기 위해 도시공간구조와 에너지 소비 간의 인과관계를 명확화하여 실증분석한 연구는 미미한 편이다. 대부분의 연구가 교통에너지 소비에 영향을 미치는 도시공간구조 요소들을 규명하는 데 치중하고 있으며, 도시개발정책을 시행하는 경우 어느 정도 에너지 절감 효과가 나타나는지 시물레이션하고, 이를 통해 정책 대안을 제시하는 연구는 거의 이루어지지 못하였다.

이러한 배경하에서 본 연구는 시스템다이내믹스 접근방법을 활용하여 도시공간구조에 따른 에너지 소비변화를 분석하는 모형을 구축하는 데 초점을 두었다. 또한 에너지 소비모형의 작동성을 검토한 후, 공간구조 변화를 가져오는 시나리오들을 설정하고 시물레이션을 통해 에너지 소비를 비교함으로써 에너지 저소비형 도시개발을 위한 정책적 함의를 도출하고자 하였다. 에너지 소비모형을 작동시키기 위한 사례도시로는 친환경에너지 선언을 발표하고 에너지 절감을 위해 노력하고 있는 서울시를 선정하였다. 모형을 작동시키는 데 필요한 각종 입력변수와 계수들은 통계청 및 서울시 통계연보와 각종 국내 연구기관에서 제공하는 자료를 이용하였다.

II. 관련 이론 및 선행연구 고찰

1. 도시공간구조와 에너지 소비와의 관계 연구

그동안 도시공간구조와 에너지 소비와의 관계를 밝히려는 많은 연구들이 이루어져 왔다. 대부분의 경우 토지이용과 통근에 따른 교통에너지 소비에 초점을 두었으며, 토지이용변수로는 인구밀도 및 고용밀도, 도심지 인구비율 등을 이용하고, 교통변수로는 통근통행거리, 통행수단 분담률, 도로 및 주차장 면적, 통행속도 등을 이용하고 있다. 일반적으로 도시공간구조 요소들을 독립변수로 하고, 에너지 소비를 나타내는 석유 판매량, 통행량, 차량통행거리 등을 종속변수로 하여 도시공간구조와 에너지 소비의 관계를 분석하였다.

도시공간구조와 에너지 소비의 관계를 분석한 대표적인 연구자인 Newman and Kenworthy (1989)는 세계 32개 주요 도시를 대상으로 하여 1인당 연간 석유 소비량과 토지이용 및 교통변수와의 관계를 분석하였다. 그 결과 도심의 인구밀도가 에너지 소비에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 나타났다. 전반적으로 인구밀도와 고용밀도가 높고 대중교통을 많이 이용하는 도시일수록 석유를 적게 소비하는 것으로 나타나, 석유가격 인상과 같은 경제적 정책을 통해서 석유 소비량을 줄이는 것보다는 토지이용과 교통수단을 변화시키는 정책이 에너지 소비를 줄이는 데 더 효과적일 수 있음을 시사해 주었다.

이후 Banister, et al.(1997)은 영국의 5개 도시와 네덜란드의 1개 도시를 대상으로 유사한 연구를 시도하였는데, 그 결과 도시규모, 밀도, 혼합토지 이용, 공공용지율 등의 도시공간구조 요소들이 에너지 소비에 영향을 미친다는 것을 입증하였다. 특히 공공용지의 비율이 높을수록 에너지 소비가 감

소한다는 새로운 사실도 밝혀냈으며, 고용자수, 자동차등록대수 등과 같은 사회·경제적 요인도 에너지 소비에 영향을 미치는 중요한 요인임을 규명하였다.

그러나 이러한 연구결과와는 상반된 주장을 펼친 연구들도 있다(Breheny, 1995; Gordon and Richardson, 1989). Breheny(1995)는 고밀압축형 도시구조에 따른 에너지 절감은 지극히 정책적이고 이론적인 것이며, 도시의 밀도를 높임으로써 가져올 수 있는 에너지 절감효과는 매우 미미하다고 보았다. 따라서 이들은 오히려 차량기술을 개선하거나, 연료 가격을 올리는 것이 더욱 효과적일 수도 있다고 보았다.

한편, 우리나라에서 도시공간구조와 에너지 소비 간의 관계를 분석한 연구들도 선진국의 사례와 유사한 결과를 보여주고 있다. 안건혁(2000)은 우리나라 22개 중소도시를 대상으로 교통에너지 소비량과 도시의 형태적 특성과의 관계를 분석하였다. 그 결과 밀도가 높고 도로가 확장될수록, 토지이용이 집중될수록 교통에너지 소비가 줄어든다는 사실을 밝혀냈다. 황금희(2001)도 수도권권을 대상으로 한 연구에서 인구밀도가 높은 지역일수록 교통에너지 소비가 적다는 결론을 내렸다. 한편, 김선희 외(2003)는 전국 77개 도시를 대상으로 교통에너지 소비에 미치는 영향력을 분석하였다. 그 결과 인구밀도, 면적, 1인당 지방세, 인구와 고용의 집중 등이 교통에너지 소비와는 정(+)의 관계를 가지는 것으로 나타났다. 최근 서울 대도시권을 대상으로 공간구조와 교통수단 분담의 변화에 따른 교통에너지 소비의 절감효과를 시뮬레이션을 통해 분석한 연구도 이루어졌다(이주일, 2007). 이 연구에서는 직주간의 공간적 재배치와 교통수단 분담이 변화되는 경우 상당한 교통에너지 소비 절감효과를 달성할 수 있음을 정책적 시사점으로 제시하였다.

지금까지의 연구들을 종합해보면 에너지 소비에 영향을 미치는 도시공간구조 요소들은 고밀도(인구밀도 또는 고용밀도) 개발, 혼합적 토지이용(직주비율 향상), 대중교통 지향정책(교통수단 분담률 향상) 등으로 나타나고 있다. 그러나 이들 연구들은 전체 에너지 사용량에서 교통과 관련된 에너지 사용에 초점을 두었을 뿐, 도시공간구조에 영향을 주는 인구와 경제활동의 변화가 어떻게 토지이용 및 교통에 영향을 주며, 더 나아가 에너지 소비에 영향을 미치는가에 대한 분석은 이루어지지 못하였다는 한계점을 갖고 있다.

2. 토지이용-교통 통합모형을 이용한 에너지 소비 변화 시뮬레이션 연구

앞에서 살펴 본 연구들은 에너지 소비를 유발하는 가장 중요한 요소인 토지이용과 교통 간의 상호작용을 고려하지 못하고 있다(Wegener, 1996). 그러나 최근 선진국에서는 토지이용과 교통 부문 간의 상호작용(Land Use and Transport Interaction: UTI)을 고려한 토지이용-교통 통합모형을 이용하여 도시성장에 따른 에너지 소비 변화를 시뮬레이션하는 연구들이 수행되고 있다. 이는 토지이용의 변화에 따라 통행수요가 유발되며, 이렇게 유발된 통행수요는 교통체계에 영향을 주고, 이는 다시 토지이용패턴에 영향을 미친다는 점을 고려한 것이다. 즉, 이렇게 긴밀한 상호 의존적 연계성을 갖고 있는 토지이용과 교통을 통합화한 모형을 활용하여 시뮬레이션을 통해 도시공간구조 변화에 따른 에너지 소비량을 추정하고 있다.

이러한 연구의 선구자라고 볼 수 있는 Sharp (1980)는 TOPAZ를 이용하여 호주 멜버른시의 에너지 소비를 줄이기 위한 세 가지 정책에 따른 시나리오를 시뮬레이션하였다. 먼저 저밀확산형인 현

재의 도시상황이 2000년까지 그대로 유지된다는 가정하에서 시뮬레이션한 결과 1977년에 비해 평균통행거리가 2% 정도 증가하고 대중교통이용이 줄어드는 것으로 나타났으며, 총 교통에너지 소비량과 1인당 교통에너지 소비량은 각각 55%, 20% 정도 증가하였다. 한편, 도심의 주거밀도를 높여 중밀도의 도시로 전환시키는 가정하에서 시뮬레이션한 결과 외곽으로 빠져나갔던 인구의 도심회귀로 인해 직주균형이 달성되므로 평균통행거리는 감소하는 경향을 보여주었다. 그러나 도심에서의 통행속도 또한 감소하였기 때문에 평균통행시간은 변함이 없는 것으로 나타났다.

이후 Rickaby(1987, 1991)는 토지이용과 교통의 통합모형인 TRANUS를 이용하여 가상적인 도시모형을 구축하여 신시가지 개발에 대한 다양한 시나리오를 설정하고 이에 따른 에너지 효율성을 비교·평가하였다. 그는 신개발지의 입지를 토지이용의 집중·분산 정도와 도로망 패턴을 토대로 시나리오를 구상하였다. 특히 에너지 소비를 측정하기 위해 차량이용으로 인한 교통에너지와 건물의 난방에 이용되는 난방에너지로 구분하였다. 시뮬레이션 결과 신개발 수요를 모두 중심지에 집중하는 시나리오에서 9~14%의 가장 큰 교통에너지 절감 효과를 보였으며, 소규모로 분산집중하여 개발하는 시나리오에서도 2~5% 정도 에너지 절감 효과가 나타났다. 그러나 신개발 수요를 모두 중심지에 수용하는 경우 소모되는 비용이 분산집중개발에 비해 두 배 이상 크게 나타나, 앞으로 30년간 연료 가격이 급등하지 않는 한 분산집중형 개발이 바람직한 형태라고 보았다.

이렇게 Rickaby의 연구는 가상적인 도시를 대상으로 하였지만, Steadman. et al.(1998)는 실제로 영국의 Swindon시를 대상으로 하여 TRANUS를 활용하여 토지이용과 교통 부문의 변화가 에너

지 소비에 미치는 영향력을 시뮬레이션하였다. 이 연구에서는 네 개의 서로 다른 도시개발정책 시나리오를 구상하고, 각 시나리오에 따라 도시가 성장하는 경우 1991년을 기준으로 하여 2016년 시점에 도달하였을 때 고용성장, 주거입지, 건물 연면적의 증가, 토지개발 증가, 총 토지소비량, 건물의 총 에너지 사용량, 교통수단 배분, 자동차 연료사용 등의 결과를 시뮬레이션을 통해 도출하였다. 각 시나리오에 따라 예측된 건물의 총 에너지 사용량을 비교해보면 시나리오 1(집중된 도시내부 개발)이 에너지 절감효과가 가장 크게 나타났으며, 특히 시나리오 4(현재 추세를 그대로 반영)에 비해 8% 정도 에너지가 절약되는 것으로 분석되었다. 또한 자동차 연료사용의 경우 시나리오 4에 비하여 나머지 시나리오들의 경우 하루 평균 16만 리터의 연료가 절약된다는 결과도 도출되었다.

이전의 연구들이 대부분 도시공간구조에 따른 교통에너지 소비량에만 초점을 둔 데 비해 이 연구는 총 에너지 소비량 가운데 훨씬 더 많은 비중을 차지하고 있는 건물에너지 소비량을 추정하였다는 점이 가장 주목된다. 이 연구가 가능하였던 것은 Swindon 도시의 경우 건물 유형에 대한 정밀조사를 통해 데이터베이스가 구축되었기 때문에 다양한 유형의 건축물로부터 소비되는 에너지 사용량 추정이 가능하였다.

이와 유사한 연구가 국내에서도 이루어졌다. 이승일(1999)은 광주대도시권을 대상으로 현 추세의 연장, 단핵집중형, 분산집중형의 세 가지 시나리오를 설정하고 Wegner가 개발한 IRPUD 프로그램과 환경평가모형을 이용하여 통행발생 저감 효과 및 환경영향을 평가하였다. 그 결과 단핵집중형 공간구조는 총 승용차 통행거리를 상당히 줄였지만, 대중교통수단이 결여된 도시 외곽지역 또는 도시 주변부의 주민들이 주로 승용차를 이용하기 때문에

평균 승용차 통행거리는 외연적 확산(현 추세의 연장)에 따른 통행거리보다 오히려 긴 것으로 나타났다. 또한, 단핵집중형 공간구조보다 분산집중형 공간구조의 평균 총 승용차 통행거리가 월등히 짧은 것으로, 에너지 절감효과는 분산집중형, 단핵집중형, 외연적 확산형의 순위로 나타났다.

지금까지 살펴본 토지이용과 교통통합모형을 이용하여 에너지 소비변화를 시뮬레이션한 연구들의 거의 대부분은 외국을 사례로 하여 이루어졌으며, 사용된 소프트웨어도 상당히 한정되어 있다. TRANUS는 인터넷을 통해 다운받아 접근이 가능하지만, 모형을 작동시키기 위해 선결되어야 하는 데이터의 구축과 토지가격에 따른 수요 탄력성 계수의 정산 문제로 인해 실제로 모형 작동에 한계가 있다. 한편 IRPUD는 일반 사용자들에게는 공개되지 않아서 사용할 수 없으며, 프로그램을 작동시키기 매우 어려운 것으로 알려져 있다.

3. 시스템다이내믹스를 활용한 도시 연구

시스템다이내믹스(System Dynamics) 기법을 처음 개발한 Forrester는 1969년에 ‘도시동태학(Urban Dynamics)’이란 저서에서 도시란 인구, 산업, 주택, 토지이용 등의 하위부문으로 구성된 하나의 시스템이며, 각 하위부문들 간의 상호작용에 의하여 도시가 동태적으로 변화되어 간다고 보았다. 그가 제시한 도시동태모형은 Alfeld and Graham(1976)에 의해 URBAN 1 모형과 URBAN 2 모형으로 발전되었다. 특히 URBAN 1 모형을 확장한 URBAN 2 모형에서는 산업구조를 세분화하였으며, 소득계층별 주택유형도 고려하였다. 최근 Sanders and Sanders(2004)의 연구에서는 인구, 주택, 산업의 상호 인과관계에 따라서 도시공간이 확대되거나 축소된다는 점을 보여주었다.

우리나라에서도 도시분야에서 시스템다이내믹스 접근방법을 활용한 연구들이 활발하게 이루어졌다(문태훈, 1998; 문태훈·홍민선, 2001; 전유신·문태훈, 2003). 문태훈(1998)은 URBAN 1 모형에 이산화탄소 배출을 산출하는 환경부문을 추가하였으며, 후속연구(2001)에서는 환경부문을 이산화탄소가 아닌 이산화질소 중심으로 재구성하고 이동오염원으로 자동차등록대수를 추가한 모형을 제시하였다. 또한 전유신·문태훈(2003)은 URBAN 1 모형에 도로, 상수도, 하수도로 구성된 기반시설부문을 추가하였으며, 최남희(2003)는 지역 내 총생산액을 중심으로 하는 경제부문, 자동차등록대수와 교통량을 중심으로 하는 교통부문, 대기오염과 쓰레기 배출량을 중심으로 하는 환경부문을 추가하였다. 또한 이만형·최남희(2004)는 그린벨트 해제·조정이 서울과 수도권의 도시 동태성에 미치는 영향을 시뮬레이션하였다.

한편, URBAN 1 모형을 기반으로 하지 않은 시스템다이내믹스 모형도 구축되었다. 이재길 외(2001)는 토지이용부문과 교통부문만으로 구성된 시스템다이내믹스 모형을 구축하였으며, 최병남 외(2006)는 국토정책의 파급효과를 시뮬레이션하기 위해 인구부문, 주택부문, 산업부문, 토지이용부문, 교통부문, 지역경제부문, 환경부문으로 구성된 시스템다이내믹스 모형을 구축하였다. 또한 송재호 외(2006)는 탄소세 부과에 따른 에너지-경제-환경 변화를 위한 시스템다이내믹스 모형을 개발하였다.

그러나 이러한 모형들은 도시공간구조와 에너지 소비와의 인과관계에 초점을 둔 것은 아니었기 때문에 실제로 도시공간구조가 변화함에 따라서 에너지 소비량이 어떻게 달라지는가를 시뮬레이션하기에는 한계가 있다.

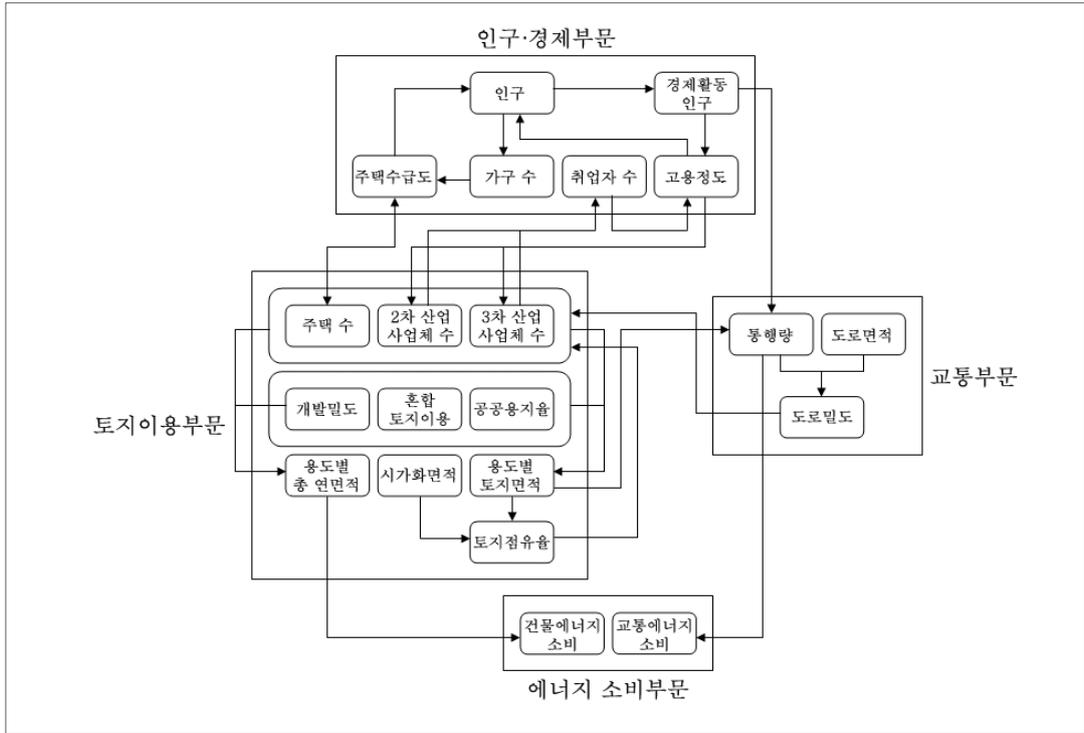
III. 시스템다이내믹스를 활용한 에너지 소비모형 구축

1. 도시공간구조에 따른 에너지 소비모형 개념도

본 연구는 에너지 소비에 영향을 미치는 토지이용과 교통 부문 간의 상호작용을 고려한 에너지 소비모형을 구축하는 데 초점을 두었다. 도시 내에서 소비되는 에너지량은 도시를 구성하는 요소들과 복잡한 상호작용을 통해 발생될 뿐만 아니라 각 요인들의 연합효과에 의해서도 발생된다. 따라서 도시 공간구조를 구성하는 요소들 간의 상호관계를 어떻게 규정하느냐는 매우 중요하다. 이런 점에서 볼 때 Mindali, et al.(2004)의 토지이용과 에너지 소비와의 관계를 보여준 개념적 모형(conceptual model)은 매우 시사성이 크다. 이 모형은 토지이용, 인구·사회적 요인이 교통에너지 소비와 어떻게 상호 연관성을 갖고 있는가를 보여주고 있다. 주어진 토지의 밀도나 혼합적 이용과 관련된 토지 이용정책은 교통효율성을 결정하거나 교통수단 선택의 변화를 유도한다. 특히 고밀개발이나 직주근접에 대한 사람들의 인식에 따라 교통수단의 선택이 달라지는 복합적인 작용에 의해 에너지 소비가 결정된다는 것이다. 그러나 이 모형은 교통 부문에서의 변화(예: 접근성)가 토지이용에 미치는 영향을 고려하지 않았으며, 에너지 소비 부문 가운데 교통에너지 소비만 고려했다는 점에서 한계점을 지니고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 Mindali, et al.(2004)의 모형과 URBAN 1 모형을 토대로 하면서 도시공간구조와 에너지 소비와 연관된 부분들 간의 인과모형을 구축하였다. 본 연구에서 구축한 모형과 기존 연구들에서 사용된 모형과의 차이점은 다음과 같다.

그림 1_ 도시공간구조에 따른 에너지 소비모형 개념도



첫째, URBAN 1 모형에서 제시한 산업부문과 주택부문 모형을 기초로 하되 토지이용 부문을 세분화하였다. 즉, 주거용, 상업용, 공업용, 녹지의 네 개 부문으로 세분화하여 용도별 토지면적을 고려하였으며, 각 용도별로 에너지 소비에 영향을 주는 도시공간구조 요소들(혼합적 토지이용, 개발밀도, 공공용지율)에 따라 동태적으로 변화하도록 구축하였다.

둘째, 교통부문을 하위부문으로 추가하면서 기존의 연구들이 사용한 변수(자동차 등록대수나 도로면적)들과는 달리 통행량, 도로밀도 등의 변수를 고려하였으며, 특히 이렇게 구축한 교통부문이 토지이용부문과 순환적 상호관계를 갖도록 구축하였다.

셋째, 에너지 소비부문을 하위부문으로 추가하였다. 현재까지 시스템다이나믹스 모형을 이용한 연구에서 도시공간구조와 에너지 소비 간의 관계를

연계시킨 연구는 이루어지지 못하였다. 본 연구에서는 토지이용과 교통부문에서의 변화가 건물에너지와 교통에너지에 어떻게 영향을 미치는 가를 파악하기 위해 에너지, 토지이용, 교통부문 간의 상호관계를 고려하였다. 즉, 토지이용부문, 교통부문, 인구·경제부문 간의 상호 작용을 통해 에너지 소비가 산출되도록 구축하였다. 도시공간구조에 따른 에너지 소비모형의 개념도는 <그림 1>과 같다.

2. 에너지 소비모형의 인과지도와 모형의 흐름도

앞에서 구축한 도시공간구조에 따른 에너지 소비모형 개념도를 바탕으로 하여 하위부문 내에서의 변수들 간 인과관계 및 하위부문들 간 관계를 연계한 인과지도를 작성하였다(<그림 2> 참조). 그리고 작성된 인과지도가 컴퓨터상에서 시뮬레이션될 수

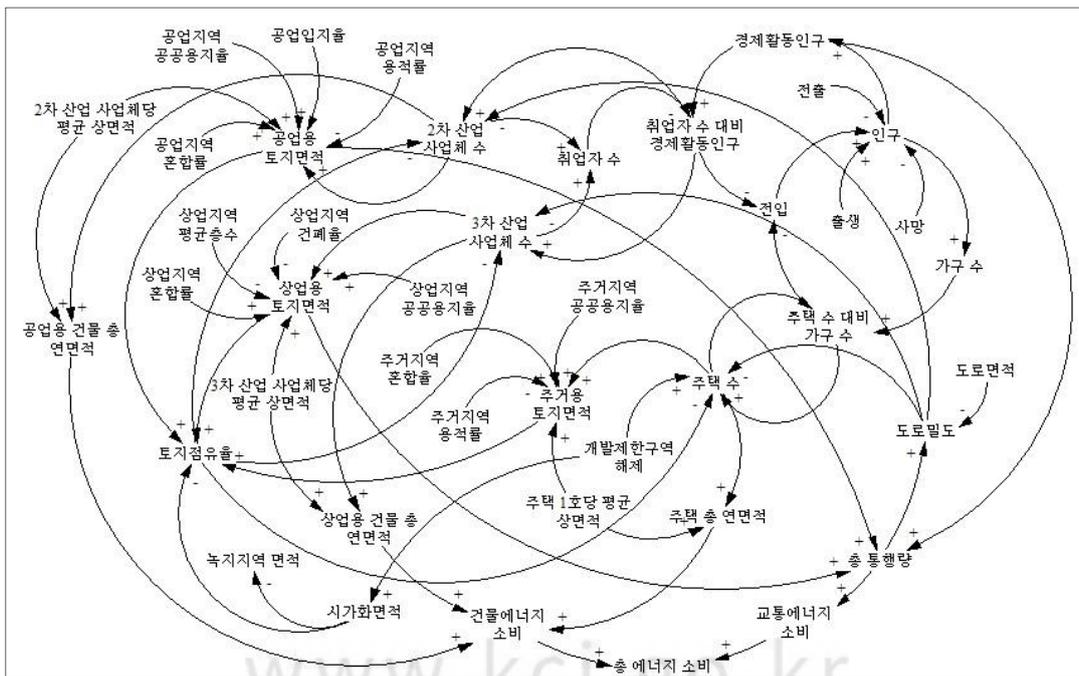
있도록 에너지 소비모형의 흐름도를 구축하였다 (<그림 3> 참조). 각 하위부문에서 각 변수들 간의 관계들을 자세히 기술하면 다음과 같다.

1) 인구·경제부문

도시공간구조에 가장 직접적인 영향을 미치는 것은 인구·경제부문이라고 볼 수 있다. 인구규모(POPN)에 따라서 경제활동인구(LAFC)가 내생적으로 결정되는데, 인구규모의 동태적 변화는 자연적 증가와 사회적 증가에 따라 이루어진다. 자연적 증가는 연평균 출생률(BRTR)과 연평균 사망률(DATR)에 의한 출생자수(BRTH)와 사망자수(DATH)에 의해 결정되고, 사회적 증가는 연평균 전입률(INMR)과 연평균 전출률(OURM)에 따른 전입자(INMG)와 전출자(OURG)에 의해 결정된다. 본 연구에서는 전입자의 경우 전입률 외에도

인구이동승수(MGMT)의 영향을 받도록 하였다. 인구이동승수는 직업매력도승수(AJMT)와 주택매력도승수(AHMT)로 구성된 콥-더글러스형의 함수로 구축하였다. 여기서 직업매력도승수는 취업자 대비 경제활동인구 비율(LTER)로 산출되는데, 이는 그 도시의 경제활동인구에 비해 일자리가 얼마나 풍부한지를 말해준다. 또한 주택수 대비 가구수 비율(HTHR)로 산출되는 주택매력도승수는 가구수 대비 주택의 공급수준을 말해준다. 따라서 직업매력도승수와 주택매력도승수의 값이 작을수록 인구유입이 감소하게 된다. 경제활동인구는 인구규모와 경제활동참가율(EMPR)에 의해 결정되며, 가구수(HOHD)는 인구규모와 평균 가구원수(PPHD)에 의해 결정된다. 한편, 취업자수(TEMP)는 2차산업 사업체수(IDST)와 사업체당 종사자수(EMPI), 그리고 3차산업 사업체수(CMRC)와 사업체당 종사자수(EMPC)에 의해 결정된다.

그림 2_ 도시공간구조에 따른 에너지 소비모형의 인과지도



2) 토지이용부문

한정된 토지를 용도별로 적절히 배분하여 토지이용의 효율성을 높이고 그에 따른 에너지 소비를 줄이는 것은 지속가능한 도시로 나가는 데 있어 매우 중요하다. 본 연구에서는 토지를 용도별(주거, 상업, 공업, 녹지)로 구분하고, 주거용 토지면적은 주택수에 의해서, 공업용과 상업용 토지면적은 2차산업과 3차산업 사업체수에 의해서 산정될 수 있게 하였다. 그리고 각 용도별 토지면적은 혼합토지이용, 개발밀도, 공공용지율 등에 따라 동태적으로 변화하도록 하였다.

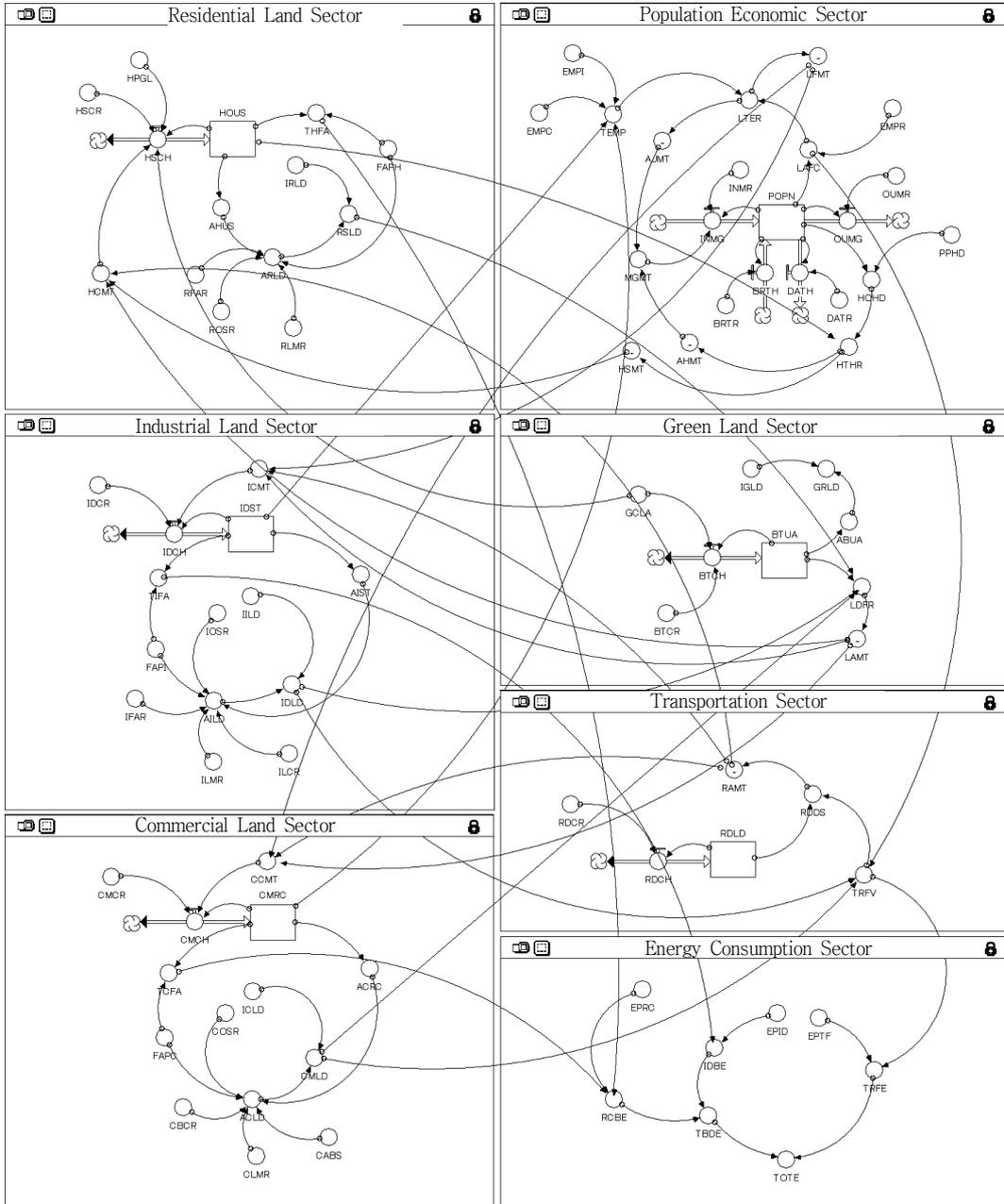
주택수에 의해 결정되는 주거용 토지면적의 산정과정을 간략히 설명하면 다음과 같다. 주어진 미래 시점의 추가 주거용지(ARLD)는 예상되는 증가주택수(AHUS)와 주택 1호당 연면적(FAPH), 용적률(RFAR), 혼합률(RLMR), 공공용지율(ROSR)에 의해 산정된다. 본 연구에서 주택수의 변화량은 지난 10년 동안 주택의 연평균 증가율(HSCR), 주택건설승수(HCMT)에 의해서, 그리고 개발제한구역 해제 시 증가하는 용지면적(GCLA), 개발제한구역 해제면적당 평균 주택호수(HPGL)에 따라 내생적으로 결정된다고 보았다. 이는 도시의 가용토지면적이 한정되어 있고, 도로와 같은 기반시설도, 용량도 한계가 있다는 점을 반영하여 주택건설승수가 주택증가를 제어하도록 한 것이다. 여기서 주택건설승수는 토지가용승수(LAMT), 도로가용승수(RAMT), 주택공급승수(HSMT)로 구성된 콥-더글라스형의 함수에 의해 산출된다. 본 연구에서는 주택을 건설할 수 있는 가용토지면적은 개발제한구역 해제 등의 정책을 통해 확대될 수 있으므로 개발제한구역 해제면적도 고려하였다. 이와 같은 과정을 거쳐 미래 시점의 주거용 토지면적(RSLD)이 산정되는데, 이는 현재 시점의 주거용 토지면적

(IRLD)과 추가로 발생하는 주거용 토지면적의 합이 된다. 최종적으로 미래 시점의 주택수(HOUS)와 2005년 현재 주택 1호당 평균 연면적을 곱하면, 주택 총 연면적(THFA)을 구할 수 있으며, 이는 에너지 소비부문에서 건물에너지 소비를 산정하는데 이용된다.

한편, 주어진 미래시점까지 추가로 발생하는 상업용 토지면적(ACLD)은 3차산업 사업체수 증가(ACRC)와 사업체당 평균 연면적(FAPC), 건폐율(CBCR), 평균층수(CABS), 혼합률(CLMR), 공공용지율(COSR)에 의해 산정된다. 3차산업 사업체수 증가는 지난 10년 동안 연평균 사업체 증가율(CMCR)과 3차산업의 사업체건설승수(CCMT)에 따라 내생적으로 결정된다. 또한 도시의 가용토지면적은 한정되어 있고 도로와 같은 기반시설의 용량에도 한계가 있으므로 3차산업 사업체수도 무한히 증가할 수는 없다. 이에 따라 노동력승수(LFMT), 토지가용승수, 도로가용승수로 구성된 콥-더글라스형의 함수에 의해 결정되는 3차산업의 사업체건설승수가 3차산업 사업체수의 증가를 제어하도록 하였다. 이와 같은 과정을 거쳐 미래 시점의 상업용 토지면적(CMLD)이 산정되는데, 이는 현재시점의 상업용 토지면적(ICLD)과 추가로 발생하는 상업용 토지면적의 합이 된다. 최종적으로 미래시점의 3차산업 사업체수(CMRC)와 3차산업 사업체당 평균 연면적을 곱하면 상업용 건물 총 연면적(TCFA)이 산출되며, 이는 에너지 소비부문에서 건물에너지 소비를 산정하는데 이용된다.

마찬가지로 주어진 시점까지 추가로 발생하는 공업용 토지면적(AILD)도 2차산업 사업체수 증가(AIST)와 2차산업 사업체당 평균 연면적(FAPI), 용적률(IFAR), 공업입지율(ILCR), 혼합률(ILMR), 공공용지율(IOSR)에 의해 결정된다. 2차산업 사업체수의 증가는 지난 10년 동안의 연평균 사업체 증가율

그림 3_에너지 소비모형의 흐름도



(IDCR)과 2차 산업의 사업체건설승수(ICMT)에 따라 내생적으로 결정된다. 그러나 도시의 가용토지면적의 한계와 도로기반시설의 용량 제한으로 인해 2차 산업 사업체수도 무한히 증가할 수는 없다. 이에

따라 노동력승수, 토지가용승수, 도로가용승수로 구성된 콥-더글러스형의 함수에 의해 결정되는 2차 산업의 사업체건설승수가 2차 산업 사업체수의 증가를 제어하도록 하였다. 이와 같은 과정을 거쳐 미

래 시점의 공업용 토지면적(IDLD)이 산정되는데, 이는 현재의 공업용 토지면적(IIILD)과 추가로 발생하는 공업용 토지면적의 합이 된다. 최종적으로 미래시점의 2차 산업 사업체수(IDST)와 2차 산업 사업체당 평균 연면적을 곱하면 공업용 건물 총 연면적(TIFA)이 산출되며, 이는 에너지 소비부문에서 건물 에너지 소비를 산정하는 데 이용된다.

마지막으로 녹지부문은 기존의 연구들이 도시 공원에 초점을 맞추었던 것과는 달리 계획구역 내의 녹지지역을 대상으로 하였다. 행정구역의 확대가 이루어지지 않는다는 전제하에서 각종 개발계획으로 인해 시가화면적(BTUA)이 확대되면 이에 따라 녹지면적이 감소된다. 미래 시점의 녹지면적(GRLD)은 현재의 녹지면적(IGLD)에서 미래 시점의 증가된 시가화면적(ABUA)을 빼면 구할 수 있다. 이때 시가화면적은 지난 10년 동안 시가화면적의 연평균 증가율(BTCR)과 개발제한구역 해제면적에 따라 동태적으로 변화한다. 그리고 시가화면적에 대한 주거용 토지면적, 상업용 토지면적, 공업용 토지면적의 비로 산출되는 토지점유율(LDFR)에 따라 토지가용승수가 동태적으로 변화하도록 설정하였다. 즉, 토지점유율이 높아질수록 토지가용승수가 감소하게 되며, 토지가용승수 값이 작아지면 주거용 토지부문의 주택건설승수, 공업용 토지부문의 2차산업 사업체건설승수, 상업용 토지부문의 3차산업 사업체건설승수의 값이 작아지게 되고, 이는 각각 주택수, 2차산업 사업체수, 3차산업 사업체수의 증가를 제어하도록 하였다.

3) 교통부문

교통부문은 토지이용부문과 매우 밀접한 관련을 맺고 있다. 토지이용이 변화하면 그에 따른 통행발생량이 증가하고, 이는 교통시설에 대한 수요를 유발

한다. 이러한 교통시설의 공급은 다시 접근성을 변화시키고, 이는 지가에 영향을 미치게 된다. 지가는 토지이용을 결정하는 중요한 요소로서 이는 다시 토지이용의 변화를 가져오고 더 나아가 교통수요에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 토지이용의 변화가 통행발생량과 교통시설에 대한 수요를 증가시키지만, 도로의 공급에는 한계가 있으므로 교통혼잡을 심화시키고 이는 다시 토지이용에 제약을 가하게 되는 상호 순환적 관계로 구축하였다.

기존 연구들에서는 통행발생량의 대리변수로 자동차 등록대수를 주로 많이 이용하였으나, 본 연구에서는 해당지역 내에서 단위시간 동안 발생하는 총 통행량을 추정하려고 시도하였다. 총 통행량을 정확하게 추정하는 것은 상당히 어렵는데, 이는 통행량 발생에 영향을 주는 요인들이 상당히 복잡적이기 때문이다. 본 연구에서는 1986~2005년 총 통행량 자료를 토대로 하여 통행량 발생에 영향을 주는 변수들과의 상관관계를 산출하고 그 가운데 공선성을 유발하지 않는 변수만을 최종적으로 선정하여 다중회귀모형을 구축하였다. 그 결과 종속변수인 총 통행량(TRFV)에 영향을 미치는 독립변수로는 경제활동인구와 비주거용 토지면적(공업용지와 상업용지) 변수가 추출되었으며, 결정계수는 0.92로 산출되어 두 변수에 의해 총 통행량 변이의 약 92%가 설명된다고 풀이할 수 있다.

$$TRFV = -1314638 + 0.065 LAFc + 0.021(IDLD+CMLD) (R^2 = 0.92)$$

이렇게 추정된 총 통행량과 도로면적(RDLD)의 비율을 통해 도로밀도(RDDS)가 산정된다. 또한 미래 시점까지의 도로면적 변화량은 지난 10년 동안의 도로면적 연평균 증가율(RDCR)에 의해 결정된다. 본 연구에서는 현 시점에 비해 미래시점의 도

로밀도가 높으면 도로가용승수가 감소하도록 설정하였다. 따라서 도로가용승수의 값이 작아지면 주거용 토지부문의 주택건설승수, 공업용 토지부문의 2차 산업 사업체건설승수, 상업용 토지부문의 3차 산업 사업체건설승수의 값이 작아지게 되며, 이는 주택수, 2차 산업 사업체수, 3차 산업 사업체수의 증가를 억제하게 된다.

4) 에너지 소비부문

에너지 소비의 동태적인 변화는 다른 하위부문 간의 상호작용에 의해 수동적으로 결정되기 때문에 다른 하위부문에 비해 요소들 간의 상호관계가 복잡하지 않다. 도시의 총 에너지 소비(TOTE)는 공업부문, 가정·상업부문, 수송부문, 공공·기타부문의 네 가지 부문으로 나누어 집계되지만, 본 연구에서는 공공·기타부문의 경우 에너지 소비 비중이 매우 작기 때문에 고려하지 않았다.

건물에너지 소비(TBDE)는 가정·상업부문의 에너지 소비(RCBE)와 공업부문의 에너지 소비(IDBE)를 합산하여 산출된다. 건물에너지 소비에 영향을 주는 요인에 대한 선행연구들을 보면 건물의 용적률이 증가되면 에너지 소비가 많아지고, 자연 채광을 줄이게 되므로 더 많은 에너지를 소비하는 것으로 나타나고 있다. 또한 건물 간의 공간에 따라 에너지 소비량이 달라지는 것으로 나타나고 있는데, 건물 간의 공간이 줄어들수록 에너지 소비량이 줄어들고, 아파트가 단독주택에 비해 에너지 소비면에서 효율적인 것으로 알려져 있다 (Shorrock and Utley, 2003; Steemers, 2003). 따라서 건물에너지 소비량을 추정하기 위해서는 건물에너지 발생에 영향을 미치는 건물의 용도(주거, 상업, 공업)와 점유 행태, 건물의 디자인과 건물의 배열(향) 및 건축자재, 내부의 냉난방 시스템

등의 요인들을 고려하여야 한다.

그러나 이와 같은 건축물에 대한 상세한 데이터베이스 구축이 어렵다는 현실적인 한계를 감안하여 본 연구에서는 건물의 총 연면적과 연면적당 건물에너지 소비에 따라 건물에너지 소비가 산정되도록 하였다. 따라서 공업부문의 에너지 소비는 2차 산업 건물 총 연면적과 연면적당 건물에너지 소비(EPID)를, 가정·상업부문의 에너지 소비는 주택 총 연면적과 상업용 건물 총 연면적에 연면적당 건물에너지 소비(EPRC)를 곱하여 산출하였다.

또한 교통에너지 소비(TRFE)는 총 통행량에 통행량당 교통에너지 소비(EPTF)를 곱하여 산출된다. 향후 건물의 에너지 효율성이 향상될 수 있고 자동차의 연비가 개선될 수 있어 연면적당 건물에너지 소비와 통행량당 교통에너지 소비 원단위도 변화할 수 있다. 하지만, 효율성을 추정하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 건물의 에너지 효율성과 자동차의 연비는 일정하다고 전제하여 시뮬레이션을 시행하였다.

IV. 에너지 소비모형의 작동성 검토와 시뮬레이션을 통한 에너지 소비 절감효과 비교

이 장에서는 앞에서 구축한 도시공간구조에 따른 에너지 소비모형의 작동성을 검토한 후, 도시공간구조의 변화를 가져오는 세 가지 시나리오를 설정하고 이를 시뮬레이션하여 각 시나리오별 에너지 소비 절감효과를 비교하였다.

1. 에너지 소비모형의 작동성 검토

에너지 소비모형의 작동성을 검토하기 위해 본 연구에서는 서울시를 대상으로 하여 2005년 시점에

서의 데이터를 구축하고, 현재의 추세가 계속 유지 된다는 가정하에서 2006년부터 2020년까지의 에너지 소비변화를 시뮬레이션하였다. 서울시를 대상으로 한 것은 2007년 서울시가 석유자원 고갈 및 기후변화 문제에 대한 도시차원의 대응이 필요하다는 인식하에서 2020년까지 에너지 이용량 15% 줄이기(2000년 기준), 신재생에너지 이용률 10% 늘리기, 온실가스 배출량 25% 줄이기(1990년 기준)를 목표로 하는 ‘친환경에너지 선언’을 발표하는 등 에너지 절감을 위한 다각적인 노력을 기울이고 있기 때문이다.

시뮬레이션에 앞서 지난 5년 동안 서울시 총 에너지 소비추세를 살펴보았다. 서울시의 경우 총 에너지 소비량은 2000년 1,645만 toe에서 2005년 1,558만 toe로 5.3% 감소하였다. 특히 석유 소비는 2000년 891만 toe에서 2005년 604만 toe로 감소하면서 전체 에너지 소비에서 차지하는 비중도 54.2%에서 39.8%로 낮아졌다. 반면, 도시가스과 전력 소비는 같은 기간 동안 16.2%와 29.1%씩 증가하면서 전체 에너지 소비에서 차지하는 비중도 도시가스는 32.4%, 전력은 23%로 각각 증가하였다. 이러한 에너지 소비를 부문별로 보면 가정·상업에서의 에너지 소비량이 878만 toe로 전체의 57.8%를 차지하고 있으며, 수송부문(28.3%), 공업 부문(10.1%), 공공·기타부문(3.9%) 순으로 나타나고 있다. 지난 5년 동안 가정·상업부문의 에너지 소비는 연평균 1.3%씩 꾸준히 증가하는 반면에 다른 부문은 약간 감소하는 경향을 보이고 있다 (<그림 4> 참조).

에너지 소비모형을 작동시키기 위해서는 먼저

필요한 입력변수들에 대한 계수를 산정하여야 한다. 토지이용부문과 교통부문에 영향을 미치는 가장 핵심변수인 서울시의 인구변화는 2005년 인구와 주어진 시점까지의 인구변화(자연적 증가와 사회적 증가)의 합으로 산출된다. 자연적 증가는 출생률과 사망률이 집계되어 있기 때문에 쉽게 산출되지만, 사회적 증가의 경우 인구의 전출입에 영향을 미치는 요인에 따라 달라진다. 본 연구에서 인구이동량은 1995~2005년 동안 서울시 평균 전입률(20.6%)과 인구이동승수에 의해 산출되도록 하였다. 인구이동승수는 직업매력도승수와 주택매력도승수에 따라 변화되는데, t시점의 직업매력도승수(취업자수/경제활동인구)가 2005년 시점의 승수(1.38)보다 커질수록, t시점의 주택매력도승수(주택수/가구수)가 2005년 시점의 승수(1.587)보다 커질수록 인구이동승수값이 감소하는 비선형의 그래프함수(Graph Function)¹⁾로 설정하였다.

주거용 토지부문은 2005년 서울의 주택수와 t시점의 주택변화량에 따라 산출된다. t시점까지의 주택변화량은 1995~2005년 서울의 연평균 주택증가율(3.36%), t시점 주택건설승수, t시점의 개발제한구역 해제면적과 t시점의 개발제한구역 해제면적당 평균 주택호수를 토대로 산출하였다. t시점의 주택건설승수는 t시점의 주택공급승수, 토지가용승수, 도로가용승수의 변화에 따라 결정된다. t시점의 주택공급승수는 2005년 주택수 대비 가구수 비율(1.587)보다 커지면 증가하도록 설정하여 주택에 대한 수요가 늘어나면 주택건설이 활발해지게 된다. 개발제한구역 해제면적당 평균 주택호수는 수도권 내 개발제한구역 해제지역에 조성된

1) 본 연구에서는 시뮬레이션 모형에 의한 장래인구추계 결과가 통계청의 「시도별 장래인구추계 결과(2007.5)」와 최대한 유사한 값을 가지도록 그래프함수의 형태와 계수를 바꿔가면서 반복적인 시뮬레이션을 수행하였음. 이러한 보정 작업을 거쳐 추정된 2020년 서울시 인구는 989만 6,503명으로 추정되었는데, 통계청의 추계 결과(989만 6천 명)와 비교하면 오차율이 0.005%에 불과하므로 비교적 신뢰할 수 있는 그래프함수가 도출되었다고 볼 수 있음.

국민임대주택단지 주택호수의 평균값을 적용하였다. 따라서 t시점에 추가로 발생하는 주거용 토지 소요면적은 t시점까지의 주택 변화량, 2005년 주택 1호당 평균 연면적, 용적률, 혼합률, 공공용지율에 의해 산정될 수 있다. 본 연구에서는 2005년 서울시 주택 1호당 연면적(약 91.4m²/호)을 적용하였고 용적률, 혼합률, 공공용지율은 '2020년 서울시 시기본계획'에서 주거용 토지수요 산정 시 사용한 190%, 30%, 40%를 각각 적용하였다. 이렇게 t시점의 주택 수와 2005년 주택 1호당 평균 연면적을 곱하면 t시점의 주택 총 연면적이 산출되며, 이를 통해 주거용 건물에너지 소비량이 산출된다.

유사한 방법으로 공업용 토지부문과 상업용 토지부문의 면적과 건물 총 연면적을 산출하였다. 본 연구에서는 제조업, 건설업, 전기·가스 및 수도사업을 2차산업 범주에 포함시켰는데, 이는 토지소비의 유사성을 감안하여 분류한 것이다. 서울시의 2차산업 사업체수의 증가는 1995~2005년 동안 연평균 증가율과 2차산업 사업체당 평균 연면적(160.7m²)을 적용하였다. 또한 '서울시 도시계획조례'의 준공업지역 용적률인 400%를 적용하였으며, 공업입지율 80%, 혼합률 10%, 공공용지율 30%를 적용하였다. 한편 상업용 토지면적도 3차산업 사업체 증가에 따라 달라지는데, 3차산업 사업체수의 증가는 1995~2005년 동안 연평균 증가율과 3차산업 사업체당 평균 연면적(225.3m²)을 적용하였다. 또한 건폐율, 용적률, 공공용지율, 혼합률은 각각 60%, 700%, 40%, 10%를 적용하여 상업용 토지면적을 산출하였다. 또한 녹지면적은 각종 개발로 인한 시가화면적의 확대에 의해 녹지면적이 감소된다는 전제하에 t시점의 시가화면적은 2005년 서울시 시가화면적(355.6km²)과 t시점까지의 시가화면적 변화량의 합으로 산출하였다. t시점의 시가화면적 변화량은 1995~2005년 시가화면적 연평

균증가율(0.073%)과 t시점의 개발제한구역 해제 면적에 따라 산출하였다.

교통부문의 경우 추정된 t시점의 총 통행량과 t시점의 도로면적에 의해 t시점의 도로밀도가 산정된다. 만일 2005년 시점의 도로밀도(0.001450259 대/시·m²)보다 t시점의 도로밀도가 높으면 t시점의 도로이용승수가 감소하도록 비선형의 그래프함수를 이용하였다.

마지막으로 t시점의 총 에너지 소비는 t시점의 건물에너지 소비와 교통에너지 소비의 합으로 산출되는데, 본 연구에서 건물에너지 소비는 가정·상업부문과 공업부문의 에너지 소비를 건물에너지 소비에 포함시켰다. t시점의 가정·상업용 건물에너지 소비는 t시점의 주택 및 상업용 건물 총 연면적과 2005년 서울시 주택 및 상업용 건물 연면적당 에너지 소비량(0.023768 toe/m²)을 곱하여 산출하였다. 또한 t시점의 공업용 건물에너지 소비는 t시점의 공업용 건물 총 연면적과 2005년 서울시 공업용 건물 연면적당 에너지 소비량(0.105473 toe/m²)을 곱하여 산출하였다. 교통에너지 소비의 경우 서울시 수송부문 에너지 소비 중에서 석유가 차지하는 비중이 95%에 달하고, 도시개발로 인한 도시공간구조의 변화가 철도·해상·항공부문의 에너지 소비에 미치는 영향은 미미하다는 전제하에 수송부문 중에서 육상부문의 석유 소비만을 고려하였다. 따라서 t시점의 교통에너지 소비는 단위환산계수(0.132), t시점의 총 통행량, 2005년 서울시 통행량당 교통에너지 소비(231.6806973bb1·시/대)를 곱하여 산출하였다.

이와 같이 필요한 계수값들을 산정하여 입력한 후 Stella 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과는 <표 1>과 <그림 4>와 같다. 시뮬레이션을 통해 산출된 변수들의 동태적인 변화와 그 추정치가 얼마나 정확한가는 모형의 타당

성과 직결된다. 일반적으로 모형의 타당성은 각 변수들의 추정치를 실측치와 비교함으로써 판단 가능하지만, 2020년 시점에서의 실측치란 존재하지 않는다. 이런 경우 모형의 타당성을 검증하는 방법의 하나는 기준연도(Base Year)를 과거 시점(예를 들면 1990년)으로 하여 15년 기간(1990~2005년)을 시뮬레이션한 후 산출된 추정치를 2005년 시점의 실측치와 비교하는 것이다. 그러나 1990년 시점에서의 에너지 소비모형을 실행시키는 데 필요한 데이터의 부족 및 필요한 원단위 계수값의 부재로 인해 이 방법을 적용할 수 없었다. 또한 시뮬레이션의 목적이 정확한 수치를 예측하는 데 있기보다는(수치의 예측은 많은 시간과 노력을 투입하여도 항상 큰 오차를 가짐), 복잡한 인과관계 속에 있는 주요 변수들의 행태 변화를 추정하는 데 있다는 점을 고려하여 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 산

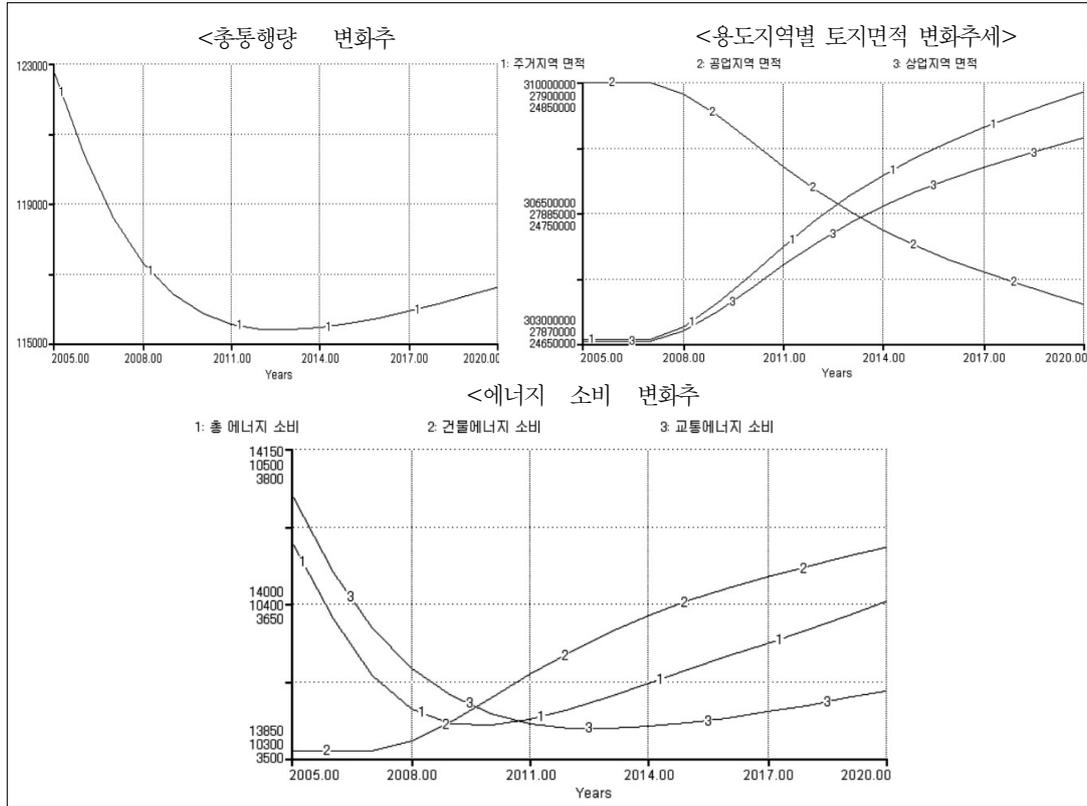
출된 주요 변수들의 변화추세가 과거 기간의 추세와 어느 정도 유사한 행태를 보이는가를 비교하는데 초점을 두었다. 즉, 2006~2020년 시뮬레이션을 통해 산출된 인구, 시가화면적(주거, 상업, 공업, 녹지), 총 에너지 소비 변수들의 추정치를 1995~2005년도 기간의 데이터와 비교하여 보았다. 그 결과 과거 10년 동안 각 변수들의 변화행태(증감률)가 시뮬레이션을 통해 산출된 2006~2020년 각 변수들의 추정치에서 나타나고 있는 변화행태들과 대체로 유사하게 나타나고 있으며, 방향성도 일관성을 보이고 있었다.

이에 따라 본 연구에서는 도시공간구조를 구성하는 각 변수들의 동태적 변화에 따라서 건물에너지와 교통에너지 소비가 어떻게 변화하는가에 초점을 두고 분석하였다. 현재 상태가 그대로 유지되는 경우 2020년까지 인구의 동태적 변화를 보면

표 1_ 시뮬레이션을 통해 산출된 주요 변수들의 변화 추세

연도	인구 (천 명)	총 통행량 (천 대/시)	주거면적 (km ²)	공업면적 (km ²)	상업면적 (km ²)	총 에너지소비 (천 toe)	건물에너지 (천 toe)	교통에너지 (천 toe)
2005	10,167	123	303.1	27.90	24.65	14,057	10,304	3,753
2006	10,096	120	303.1	27.90	24.65	13,985	10,304	3,681
2007	10,041	119	303.1	27.90	24.65	13,930	10,304	3,626
2008	9,997	117	303.4	27.90	24.66	13,897	10,311	3,586
2009	9,963	116	304.1	27.90	24.67	13,883	10,323	3,560
2010	9,936	116	304.8	27.89	24.69	13,881	10,339	3,543
2011	9,917	116	305.6	27.89	24.71	13,887	10,354	3,533
2012	9,904	115	306.3	27.89	24.73	13,897	10,368	3,529
2013	9,895	115	307.0	27.89	24.74	13,909	10,381	3,528
2014	9,890	115	307.5	27.88	24.76	13,922	10,392	3,530
2015	9,887	116	308.0	27.88	24.77	13,935	10,401	3,534
2016	9,887	116	308.4	27.88	24.78	13,948	10,410	3,538
2017	9,888	116	308.8	27.88	24.78	13,961	10,417	3,544
2018	9,890	116	309.1	27.88	24.79	13,974	10,424	3,551
2019	9,893	116	309.4	27.88	24.80	13,988	10,430	3,558
2020	9,897	117	309.7	27.87	24.81	14,001	10,436	3,565

그림 4_현 상태가 그대로 유지될 경우 주요 변수들의 동태적 변화(2005-2020)



2005년 1,016.7만 명이던 서울시 인구는 꾸준히 감소추세를 보이면서 2020년에는 약 989.6만 명에 이르는 것으로 추정되었다. 이렇게 인구는 점차 감소하지만, 1인 가구의 증가에 따른 평균 가구원수의 증가로 인해 주택수가 증가하면서 주거면적은 증가추세를 보이고 있다. 이에 따라 상업용 토지면적도 약간의 증가추세를 보이는 반면에 공업용 토지면적은 감소하는 추세를 보인다. 이는 2차산업의 사업체수가 감소추세를 보이기 때문으로 풀이된다. 한편, 총 통행량은 인구 감소로 인한 경제활동인구 감소로 점차 감소하는 추세를 보이고 있지만, 2015년 이후부터 약간 증가하는 추세를 보인다. 이러한 토지이용과 교통부문에서의 변화에 따른 에너지 소비를 보면 총 에너지 소비의 경우

2010년까지는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 최근 유가상승으로 인한 총 에너지 소비의 감소 추세가 반영된 것으로 보인다. 하지만, 2010년 이후부터는 다시 증가추세로 전환되는 것으로 나타나고 있어 에너지 감소 추세현상이 지속적이지 않을 수 있음을 시사해준다. 따라서 단기간의 총 에너지 소비감소 추세만을 보고 에너지 소비정책을 수립하기 보다는 장기적인 관점에서 접근해야 할 것이다.

부문별로 에너지 소비추세를 보면, 교통에너지 소비는 총 통행량의 변화추세를 그대로 반영하여 2015년까지는 지속적으로 감소하다가 그 이후에는 미미하게 증가하는 것으로 나타났다. 반면, 건물에너지 소비는 지속적인 증가추세를 보이고 있으며, 이에 따라 총 에너지 소비에서 차지하는 비중도

2005년 73.31%에서 2020년 74.54%로 늘어나고 있다. 따라서 에너지 절감을 위한 노력이 교통부문 뿐만 아니라 건물에너지 절감을 위한 다각적인 방안이 검토되어야 할 것이다.

2. 시나리오별 시뮬레이션을 통한 에너지 절감효과 비교

에너지 소비모형을 통해 2020년 시점까지 산출된 에너지 소비 변화추세를 보면 인구와 고용변화에 따른 토지면적 변화와 통행량의 변화추세를 반영해 주고 있음을 엿볼 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 도시공간구조에 변화를 가져오는 도시개발 정책에 따라서 에너지 소비 절감이 어느 정도 이루어지는가를 시뮬레이션을 통해 비교·분석하였다. 앞에서 살펴본 선행연구를 통해 알려진 에너지 소비에 영향을 미치는 요소들을 토대로 하여 본 연구에서는 다음과 같은 세 가지 시나리오를 구축하였다.

1) 시나리오 1

도시의 밀도는 에너지 소비와 밀접한 관계가 있으며, 고밀개발은 에너지 저소비형 도시를 지향해 나가는 데 있어 중요한 전략으로 알려져 있다. 본 연구에서는 고밀개발에 따른 에너지 절감효과를 비교하기 위해 고밀개발 효과가 잘 나타날 것으로 기대되는 상업지역을 고밀개발하는 시나리오를 설정하였다. 고밀개발 정책을 추진하는 경우 가장 중요하게 고려해야 할 점은 고밀개발을 추진하는 대상 입지이지만, 시스템다이내믹스 방법을 활용하는 경우 도시 전체를 대상으로 하기 때문에 특정한 입지만을 선택할 수 없다는 한계를 갖고 있다. 상업지역의 고밀개발을 위한 시나리오는 향후 15년 동안 상업지역에 들어서는 모든 건물의 건폐율은 그

대로 유지한 채 용적률을 상향시킨다(평균층수를 19층으로 함)는 가정하에서 2020년 시점까지 에너지 소비의 변화추세를 시뮬레이션을 통해 산출하였다.

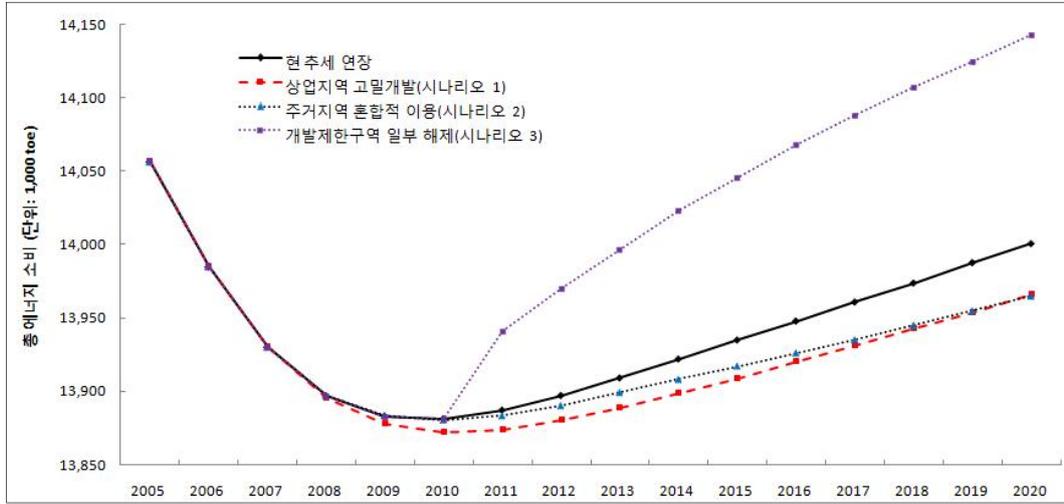
2) 시나리오 2

도시의 에너지 소비는 밀도뿐만 아니라 토지이용의 혼합 정도에 따라 서로 달라지며, 혼합적 토지이용 비율이 증가하면 에너지 소비가 절감된다는 연구결과들도 있다. 이는 혼합적 이용이 직주근접을 유도하여 교통에너지 소비를 절감시키기 때문으로 여겨지고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 직주근접 효과를 가장 크게 가져올 것이라고 예상되는 주거지역을 대상으로 혼합용도 개발에 대한 시나리오를 설정하였다. 즉, 향후 15년간 추가적으로 발생하는 주거용 토지수요 면적의 산정 시에 혼합률을 40%(현재 추세를 연장하는 경우 30%였음)로 상향할 경우 에너지 소비의 변화추세를 시뮬레이션을 통해 산출하였다.

표 2_ 각 시나리오에 따른 에너지 소비추세 비교
(단위: 1,000toe)

구분	시나리오	2010년	2015년	2020년
총 에너지	현 추세 연장	13,881	13,935	14,001
	시나리오 1	13,872	13,909	13,966
	시나리오 2	13,880	13,917	13,965
	시나리오 3	13,936	14,053	14,145
건물 에너지	현 추세 연장	10,339	10,401	10,436
	시나리오 1	10,339	10,403	10,438
	시나리오 2	10,338	10,392	10,420
	시나리오 3	10,393	10,472	10,511
교통 에너지	현 추세 연장	3,543	3,534	3,565
	시나리오 1	3,533	3,506	3,528
	시나리오 2	3,542	3,525	3,546
	시나리오 3	3,543	3,581	3,635

그림 5_ 시나리오별 시뮬레이션 결과 에너지 절감효과 비교



3) 시나리오 3

고밀개발이나 혼합적 토지이용 개발은 도시내부의 공간구조에 변화를 가져오는 개발정책이므로, 이러한 정책실행에 따른 에너지 절감효과는 시가지의 외연적 확대를 억제하는 정책이 동시에 적용될 때 더 효과적일 수 있다. 그러나 최근 개발제한구역의 일부를 해제하여 임대주택단지를 포함한 서민주택을 공급하려는 계획이 시행되고 있다. ‘개발제한구역 조정 및 관리계획(2008.9)에 따른 경우 2020년까지 개발제한구역 해제예정 총량의 10~30%를 추가 해제할 수 있다. 서울시의 경우 이러한 기준을 적용한다면 최대 3.93km까지 개발제한구역이 해제될 수 있다. 본 연구에서는 개발제한구역의 일부를 해제시키는 경우의 시나리오를 설정하였다. 즉, 2009년에 개발제한구역 3.93km를 해제시킴으로써 시가화면적이 확대된다고 가정할 경우 에너지 소비의 변화추세를 시뮬레이션을 통해 산출하였다.

이렇게 도시공간구조에 영향을 미칠 수 있는 세 개의 시나리오에 따라 2020년 시점까지 에너지 소

비가 어떻게 동태적으로 변화하는가를 시뮬레이션을 통해 산출한 결과를 보면 <표 2>, <그림 5>와 같다. 상업지역을 고밀개발하는 시나리오 1의 경우 총 에너지 소비량을 보면 현 추세를 그대로 연장하는 경우에 비해 3만 5천 toe가 적게 소비되어 절감효과는 0.25%로 나타나고 있다. 고밀개발로 인한 상업용 건물의 연면적 증가에 비해 건물에너지 소비의 증가폭은 매우 미미하게 나타났는데, 이는 건물의 양적 증가가 아닌 평균층수만을 상향 조정하는 고밀개발에 따른 효과라고 볼 수 있다. 한편, 교통에너지 소비량은 현 추세 연장에 따른 소비량에 비해 약 3만 7천 toe가 적어 약 1.04%의 에너지 절감효과를 보이고 있다. 서울시의 상업지역이 도심에 집중되어 있는 것을 고려하면, 이는 도심의 고밀화가 교통에너지 소비를 절감시키는 데 큰 영향을 미친다는 선행연구의 결과와도 일치한다.

한편 주거지역의 혼합용도 비율을 높이는 시나리오 2의 경우 2020년 총 에너지 소비량은 현 추세 연장에 따른 소비량에 비해 0.26% 낮게 나타났다. 이를 부문별로 보면 건물에너지 소비에서는 0.15%의 절감 효과가 나타났으며, 교통에너지 소비에서

는 0.53%의 절감 효과가 나타났다. 이렇게 시가화 면적의 약 85%를 차지하는 주거지역을 혼합적으로 이용하는 비율을 높이는 경우 직주근접으로 인한 교통에너지 절감효과뿐만 아니라 건물에너지 절감 효과까지 가져올 수 있음을 시사해주고 있다.

그러나 개발제한구역 일부를 해제하는 시나리오 3의 경우 시가지 확대에 의해 총 에너지 소비는 현 추세를 연장한 경우의 에너지 소비에 비해 1.03% 더 많이 사용되는 것으로 나타났다. 이를 부문별로 보면 건물에너지 소비는 0.72%, 교통에너지 소비는 1.96% 더 많이 소비되는 것으로 나타났는데, 이는 시가화면적의 확대에 따라 이동거리가 늘어났기 때문으로 풀이할 수 있다.

이렇게 볼 때 서울시가 에너지 저소비형 도시로 지향해 나가기 위해서는 상업지역의 고밀개발과 주거지역의 혼합 용도비율을 높이는 전략이 효과적일 수 있다. 시기별 에너지 소비 행태변화를 살펴보면 2014년 시점까지는 상업지역 고밀개발에 따른 에너지 절감 효과가 가장 크게 나타나고 있지만, 2015년 이후부터는 점차 주거지역의 혼합적 이용에 따른 에너지 절감효과가 더 커지는 것으로 나타나고 있다. 이는 주거지역의 혼합적 토지이용 개발에 따른 효과는 단기적인 관점보다는 장기적인 관점에서 더 크게 나타남을 시사해준다.

서울시의 경우 상업지역은 고용 중심으로 고밀 개발하고, 주거지역은 복합적 용도비율을 높여서 용도혼합을 꾀한다면 에너지 절감효과는 상승될 수 있을 것이다. 반면에 개발제한구역의 일부 해제가 이루어지는 경우 에너지 절감효과를 상쇄시키고 오히려 에너지 소비의 순증가를 유발할 수 있다. 따라서 서울시의 에너지 소비 절감효과를 극대화시키기 위해서는 현재의 개발제한구역을 그대로 유지시킬 필요가 있다.

본 연구에서 시나리오에 따른 에너지 절감효과

가 매우 적게 산출되었는데, 이는 설정한 시나리오 자체가 공간구조 변화에 미치는 영향력이 워낙 작기 때문으로 풀이될 수 있다. 상업지역의 경우 단지 향후 추가적인 상업용 건물 수요 시에만 용적률 상향기준을 적용하였고, 주거지역의 혼합률도 향후 건축되는 주거면적 산정 시에 10%를 상향하도록 하였기 때문에 그에 따른 에너지 절감효과는 상대적으로 작게 산출되었다고 볼 수 있다. 또한 개발제한구역의 해제면적에 따른 에너지 소비 증가 추세는 상당히 크게 나타나고 있는데, 이는 개발제한구역이 해제되는 지역의 입지가 고려되지 못한 채 해제면적에 대한 주택수요가 추정되었기 때문이며, 따라서 해제지역 거주자들의 통행패턴이 고려되지 못하였다는 문제점을 안고 있다.

V. 결론

화석연료의 급격한 소비증가로 인한 유가 상승과 그에 따른 석유자원 고갈위기 및 기후변화에 대한 경각심이 높아지면서 에너지 문제에 대한 관심이 크게 증대되고 있다. 본 연구는 도시공간구조에 따른 에너지 소비모형을 구축하고, 이 모형의 작동성을 검토한 후에 시나리오별 시뮬레이션을 통해 에너지 절감효과를 비교하는 데 초점을 두었다.

시스템다이내믹스를 활용한 에너지 소비모형은 인구·경제, 토지이용, 교통, 에너지 소비 등 네 개의 하위부문으로 구성하였으며, 각 하위부문의 변수들 간의 인과지도와 흐름도로 구축하였다. 이 모형의 흐름도를 간략히 요약하면 다음과 같다. 가장 기본이 되는 인구·경제부문에서는 인구성장에 초점을 두고, 인구성장이 고용과 주택수요에 영향을 주도록 하였다. 인구와 고용의 변화는 토지이용부문에 영향을 미치게 되는데, 토지이용부문은 주거용, 상업용, 공업용, 녹지부문으로 세분화하였으

며, 에너지 소비와 밀접한 관련을 맺고 있는 밀도, 혼합율, 공공용지율 등의 요소에 의해 용도별 토지면적이 산정되도록 하였다. 한편 교통부문에서는 토지이용변화에 의해 통행량이 유발되도록 하였으며, 이렇게 유발된 통행량과 도로면적에 의해 도로 밀도가 산정되도록 하였다. 그리고 도로밀도의 변화가 다시 토지이용부문에 영향을 주는 상호작용을 고려하였다. 에너지 소비부문에서는 인구·경제부문, 토지이용부문, 교통부문 간의 상호작용으로 인해 건물에너지 소비와 교통에너지 소비가 이루어지며, 건물에너지 소비는 각 용도별 건물 총연면적에 의해서, 그리고 교통에너지 소비는 교통부문의 총 통행량에 의해 산출되도록 하였다.

서울시를 대상으로 하여 2020년까지 각 변수들의 동태적 변화를 시뮬레이션해 본 결과 인구는 꾸준히 감소추세를 보이지만, 평균 가구원수의 감소로 인해 주택수가 증가하면서 주거면적은 증가추세를 보이고 있다. 이에 따라 상업용 토지면적도 약간의 증가추세를 보이는 반면에 공업용 토지면적은 감소하는 추세를 보인다. 한편 총 통행량은 인구감소로 인한 경제활동인구 감소로 점차 감소하는 추세를 보이고 있지만, 2015년 이후에는 약간 증가하는 추세를 보인다. 이러한 토지이용과 교통부문에서의 변화에 따른 에너지 소비를 보면 총 에너지 소비의 경우 2010년까지는 감소하지만, 2010년 이후 다시 증가세로 전환되는 것으로 보아, 에너지 감소 추세가 지속적이지 않을 수 있음을 시사해준다. 교통에너지 소비는 2015년까지 지속적으로 감소하는 것으로 나타났으나, 그 이후에는 총 에너지 소비와 마찬가지로 미미하게 증가하는 것으로 나타났다. 반면, 건물에너지 소비는 지속적인 증가추세를 보이는 것으로 나타났다.

이렇게 에너지 소비모형의 작동성을 검토한 후, 도시공간구조에 변화를 가져올 수 있는 세 가지 시

나리오를 설정하고 각 시나리오별 시뮬레이션을 통해 에너지 절감효과를 비교하였다. 그 결과 상업용지를 고밀개발(시나리오 1)하는 경우 가장 에너지 절감효과가 큰 것으로 나타났으며, 주거지역의 혼합적 이용(시나리오 2)에 따른 에너지 절감효과는 시간이 지날수록 더 크게 나타났다. 그러나 개발제한구역의 일부 해제(시나리오 3)를 통해 시가화면적이 확대되는 경우 에너지 소비량은 현 추세를 연장한 경우에 비해 더 많게 나타났다. 이러한 결과에 비추어볼 때 서울시가 에너지 저소비형 도시로 나아가기 위해서는 상업지역은 고용 중심으로 고밀개발하고, 주거지역은 용도혼합을 높이는 개발전략이 효과적일 수 있다. 그러나 이러한 에너지 절감효과를 극대화하기 위해서는 개발제한구역 해제를 통한 시가지 확대 정책은 재고할 필요가 있다.

본 연구에서 구축한 시스템다이나믹스에 기반한 에너지 소비모형은 에너지 소비에 영향을 주는 변수들 간의 순환적 인과관계 설명이 가능하고 변수들의 장기적·동태적인 변화를 예측할 수 있다는 점에서 정책을 진단하고 전략을 제안하는 데 매우 유용하게 활용될 수 있다. 즉, 시스템다이나믹스를 활용한 에너지 소비모형은 도시공간구조에 영향을 주는 각종 도시개발정책에 따라 에너지 소비가 어떻게 변화되는가를 시뮬레이션을 통해 추정할 수 있기 때문에 에너지 저소비형 도시를 지향해나가기 위해 보다 효과적인 정책을 수립하는 데 필요한 정보를 제공해줄 수 있다. 그러나 에너지 소비모형이 에너지 소비에 영향을 미치는 모든 변수들을 포함시키지 못하였으며, 서울시 전체 용도지역별 면적만을 고려하였을 뿐, 동 단위나 필지 단위와 같은 미시적인 공간 단위로 토지면적과 용도를 세분하지 못하였다는 문제점을 갖고 있다. 따라서 서울시 내 특정지역에만 해당되는 도시개발 정책에 따라 에너지 소비가 어떻게 변화하는가를

추정하는 데 활용되기는 어렵다. 이는 시스템다이내믹스를 활용한 모형 자체가 지니는 한계점이라고도 볼 수 있다. 향후 이러한 한계를 극복하기 위해 GIS를 기반으로 한 필지 정보와 인구와 고용의 센서스 조사구를 대상으로 한 데이터베이스를 기반으로 하는 시뮬레이션 모형을 구축한다면 보다 미시적인 차원에서 시행되는 도시개발에 정책에 따라 변화하는 공간구조 요소들이 에너지 소비에 미치는 변화추세를 추정할 수 있을 것이다.

참고문헌

김선희 · 정일호 · 김성수 · 정진규. 2003. 자원절약적 국토발전 방안 연구: 국토 · 도시 공간구조와 교통에너지 소비와의 관계를 중심으로. 경기 : 국토연구원.

문태훈. 1998. "지속가능한 성장을 위한 환경용량의 산정과 환경 지표 개발에 관한 연구". 한국정책학회보 제7권 제1호. 서울 : 한국정책학회. pp123-148.

문태훈. 2002. "시스템다이내믹스의 발전과 방법론적 위상". 한국 시스템다이내믹스연구 제3권 제1호. 충북 : 한국시스템다이내믹스학회. pp61-77.

문태훈 · 홍민선. 2001. "지탱가능한 발전을 위한 서울시 환경용량의 산정과 정책적 함의". 국토계획 제36권 제4호. 서울 : 대한국토 · 도시계획학회. pp245-266.

송재호 · 정석재 · 김경섭 · 박진원. 2006. "탄소세 부과에 따른 국내 에너지-경제-환경(3E) 변화 분석 및 예측을 위한 시스템다이내믹스 모형 개발". 한국시스템다이내믹스연구 제7권 제2호. 충북 : 한국시스템다이내믹스학회. pp149-170.

안건혁. 2000. "도시형태와 에너지 활용과의 관계 연구". 국토계획 제35권 제2호. 서울 : 대한국토 · 도시계획학회. pp9-17.

이승일. 1999. "환경친화적 도시공간구조 분석을 위한 방법론". 국토연구 제28권. 경기 : 국토연구원. pp45-60.

이만형 · 최남희. 2004. "대안적 Urban Dynamics에 기초한 그린 벨트 정책의 분석". 국토계획 제39권 제3호. 서울 : 대한국토 · 도시계획학회. pp7-21.

이재길 · 김영우. 2001. "토지이용과 교통수요의 동태적 상호작용에 관한 연구 - 대전시를 사례로". 지역사회개발연구 제26권 제2호. 서울 : 한국지역사회개발학회. pp83-98.

이주일. 2007. 공간구조 및 교통수단의 변화가 교통에너지 소비에 미치는 영향. 서울 : 서울시정개발연구원.

이희연 · 김동완. 2007. "토지이용-교통 통합모형의 이론적 토대와 운용 매커니즘에 관한 소고". 환경논총 제44권. 경기 : 한국환경교육학회. pp47-75.

전유신 · 문태훈. 2003. "도시성장관리를 위한 개발밀도관리모형 수립에 관한 연구". 국토연구 제38권. 경기 : 국토연구원. pp41-61.

최남희. 2003. "시스템 다이내믹스 기법을 이용한 서울시 도시형태성 분석과 정책지렛대 탐색: 인과순환구조와 시스템 행태 분석을 중심으로". 한국행정학보 제37권 제4호. 서울 : 한국정책학회. pp329-358.

최병남 · 임은선 · 이동우. 2006. 시공간통합 국토시뮬레이션모형 개발 연구(II). 경기 : 국토연구원.

황금희. 2001. 교통에너지절약형 도시성장 패턴구축을 위한 토지 이용 전략. 경기 : 경기개발연구원.

Alfeld, L. and Graham, A. 1976. *Introduction to Urban Dynamics*. M.A. : Wright-Allen Press, Inc.

Badoo, D. and Miller, E. 2000. "Transportation-land Use Interaction - Empirical Findings in North America, and Their Implications for Modeling". *Transportation Research D* vol.5. U.S. : Transportation Research Board. pp235-263.

Banister, D., Watson, S. and Wood, C. 1997. "Sustainable Cities - Transport, Energy, and Urban Form". *Environment and Planning B* vol.24. U.S. : Pion publication. pp125-143.

Bento. et al. 2004. *The Impact of Urban Spatial Structure on Travel Demand in the United States*. Working Paper EB2004- 0004. U.S. : Institute of Behavioral Science.

Boarnet, M. and Crane, R.. 2001. "The Influence of Land Use on Travel Behavior - Specification and Estimation Strategies". *Transportation Research A* vol.35, no.9. U.S. : Transportation Research Board. pp823-845.

Breheny, M.. 1995. "The compact city and transportation energy consumption". *Transactions of the Institute of British Geographers* vol.20, no.1. U.K : Blackwell Publishing. pp81-101.

- Cervero, R. 1996. "Mixed Land Uses and Commuting: Evidence from the American Housing Survey". *Transportation Research A* vol.30. U.S. : Elsevier Science. pp361-377.
- Crane, R.I. 2000. "The Influence of Urban form on Travel: an Interpretative Review". *Journal of Planning Literature* vol.15. Thousand Oaks, C.A. : Sage Publications. pp3-23.
- Forrester, J. 1969. *Urban Dynamics*. Cambridge : MIT Press.
- Gordon, P. and Richardson, H. 1989. "Gasoline Consumption and Cities - a Reply". *Journal of American Planning Association* vol.55. U.S. : American Planning Association. pp342-346.
- Handy, S. 2005. "Smart Growth and the Transportation-land Use Connection-what does the Research Tell Us?". *International Regional Science Review* vol.28, no.2. Thousand Oaks, C.A. : Sage Publications. pp146-167.
- Mindali, O., Raveh, A. and Salomon, I. 2004. "Urban Density and Energy Consumption - a New Look at Old Statistics". *Transportation Research Part A* vol.38. U.S. : Transportation Research Board. pp143-162.
- Newman, P. and Kenworthy, J. 1989. "Gasoline Consumption and Cities - a Comparison of US Cities with a Global Survey". *Journal of American Planning Association* vol.55. no.1. U.S. : American Planning Association. pp24-37.
- Rickaby, P. 1987. "Six Settlement Patterns Compared". *Environment and Planning B* vol.14. U.S. : Pion publication. pp193-223.
- _____. 1991. "Energy and Urban Development in an Archetypal English Town". *Environment and Planning B* vol.18. U.S. : Pion publication. pp153-175.
- Sanders, P. and Sanders, F. 2004.7.25-29. "Spatial Urban Dynamics and a Vision of the Future of Urban Dynamics". *The 22nd International Conference of the System Dynamics Society*. England : Oxford.
- Sharpe, R. 1980. "Improving Energy Efficiency in Community Land Use - Transportation Systems". *Environment and Planning A* vol.12. U.S. : Pion publication. pp203-216.
- Shorrock, L. D. and Utley, J. L. 2003. *Domestic Energy Fact File*. U.S. : BRE Housing Center.
- Steadman, J. et al. 1998. *An Integrated Building Stock, Transport and Energy Model of a Medium Sized City*. Report to the EPSRC.
- Steeemers, K.. 2003. "Energy and the City: Density, Buildings and Transport". *Energy and Buildings* vol.35. U.S : Elsevier Science B.V. pp3-14.
- Wegener, M.. 1996. "Reduction of CO Emissions of Transport by Reorganization of Urban Activities". eds. Hayashi. Y. and Roy. J. *Transport, Landuse and the Environment*. London : Kluwer.

-
- 논문 접수일: 2009. 4. 3
 - 심사 시작일: 2009. 4. 7
 - 심사 완료일: 2009. 5.20

ABSTRACT

Construction of the Energy Consumption Model according to Urban Spatial Structure using System Dynamics

Keywords: Spatial Structure, Energy Consumption, System Dynamics, Simulation Model

In recent years there has been a growing concern about climate change and Korea will be under the compulsory reduction duty of greenhouse gas after 2013. Accordingly, more efforts to reduce energy consumption are required than ever before. In particular, it is necessary to implement energy saving urban spatial structure strategies. The purpose of this study is to develop a model which can simulate dynamic changes of energy consumption according to changes of the urban spatial structure. This study attempts to construct the conceptual model which shows the complex interaction among four sectors such as population-economics, land use, transportation and energy consumption sector. To develop the energy consumption model, system dynamics approach was used. The model was applied to Seoul city to testify the operational validity and to compare the energy saving effects according to 3 different scenarios. The result of computer simulation shows that total energy consumption changes dynamically until 2020 according to the changes in land use and traffic volume which are caused by changes from the population and employment. Simulation result of three scenarios shows that high density development in the commercial zone and mixed use development in the residential zone can reduce energy consumption. In addition, the current regulations on greenbelt should be maintained to maximize energy saving effects of high density and mixed use development.

시스템다이나믹스를 활용한 도시공간구조에 따른 에너지 소비모형 구축에 관한 연구

주제어: 공간구조, 에너지 소비, 시스템다이나믹스, 시뮬레이션 모형

최근 기후변화문제에 대한 관심이 고조되고 있으며, 우리나라도 2013년 이후에는 온실가스 감축의무국으로 분류될 것으로 전망되고 있다. 이에 따라 그 어느 때보다 에너지 소비절감에 대한 노력이 요구되며, 특히 에너지를 절감하기 위한 도시공간구조 전략 수립이 시급하다. 본 연구는 도시공간구조에 따른 에너지 소비변화를 분석하기 위해 인구·경제, 토지이용, 교통, 에너지 소비부문 간의 상호작용과 각 하위부문을 구성하고 있는 요소들 간의 인과관계를 보여주는 개념적 모형을 구축한 후, 이 모형을 시뮬레이션할 수 있도록 시스템다이나믹스 접근방법을 활용하였다. 본 연구에서는 구축한 모형의 작동성을 검토하고 세 가지 시나리오에 따른 에너지 절감효과를 비교하기 위하여 서울시를 대상으로 하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 2020년까지 인구와 고용 변화에 따른 토지이용과 교통부문에서의 변화로 인해 에너지 소비가 동태적으로 변화하는 것으로 나타났다. 시나리오에 따른 에너지 절감효과를 보면 상업지역의 고밀개발과 주거지역의 혼합적 이용은 에너지를 절감시키는 것으로 나타났으며, 이러한 에너지 절감효과를 높이기 위해서는 현재의 개발제한구역 규제를 그대로 유지하는 것이 필요하다고 볼 수 있다.