

공간계량모형에 의한 서울시 에너지 소비 분석과 정책과제*

- 전력과 도시가스 소비를 중심으로 -

강 창 덕**

Analysis on Energy Consumption and Its Policy Implication in Seoul with Spatial Econometrics*

- Focusing on Electricity and Gas Consumption -

Chang-Deok Kang**

요약 : 온실가스가 전 지구적으로 초미의 관심사가 되고 있다. 온실가스 배출이 지구온난화를 초래하는 지에 대해서는 논란이 있지만, 기후변화에 강한 영향을 준다는 점에서는 대체로 학계가 합의하고 있기 때문이다. 에너지 소비가 온실가스 배출에서 차지하는 비중이 높다는 점에서 에너지 소비 연구는 곧 온실가스 감축과 직결되어 있다. 이 연구는 2005년과 2006년 서울시 522개 동 전력과 도시가스 소비 자료를 이용하여 그 영향요인을 분석하고 정책과제를 제시하고자 한다. 이를 위해 우선 에너지 소비와 탄소배출에 관련된 국내외 문헌을 검토하였으며 분석틀과 분석을 위한 변수 선정에 활용하였다. 그다음 서울시에 서 발행한 보고서를 토대로 서울시 에너지 소비 현황과 원인을 간략하게 살펴보았다. 이 과정은 실증분석의 결과를 해석하고 의미 있는 결론을 도출하는 데 많은 시사점을 주었다. 2005년과 2006년 서울시 전력과 도시가스 소비 자료에 인구 및 고용 자료, 지가 자료, 건축물 자료를 결합하여 일반회귀모형, SAR, SEM모형을 적용하고 그 결과를 해석하였다. 끝으로, 연구결과를 요약하고 정책적 시사점을 제시하였다. 연구결과를 설정한 3개의 가설 측면에서 요약하면 먼저, 전력 소비모형에서 인구와 가구밀도가 증가할수록 전력 소비는 감소하는 반면 고용밀도와 기업밀도가 증가할수록 전력 소비는 상승하였다. 도시가스 소비모형에서 가구밀도가 증가할수록 도시가스 소비는 감소하였고, 기업밀도가 증가할수록 도시가스 소비가 늘었음을 확인하였다. 둘째, 소득 및 생산성 가설에서 보면, 전력 소비는 주거용 토지가격과 상업업무용 토지가격이 높아질수록 감소하는 반면 도시가스 소비는 대체로 상업업무용 토지가격이 오를수록 증가하였다. 셋째, 부동산개발 가설로 보면 동별 주거용, 상업업무용, 산업용 부동산 건물 연면적이 증가할수록 전력 소비도 늘어났다. 그러나 모형의 계수로 보면 상업업무용, 주거용, 산업용 순으로 효과가 크게 나타났다. 또한, 상업업무용과 주거용 부동산 건물 연면적이 커질수록 도시가스 소비도 증가했지만, 산업용 부동산 건물 연면적 효과는 통계적으로 유의미하지 않았다.

주제어 : 에너지 소비, 전력, 도시가스, 공간계량, 서울시

ABSTRACT : Greenhouse gases have been global concerns in that the excess emissions of the gases threaten the ecology and life of human-being. Although we face the debate whether greenhouse gas emissions cause global warming, academia has the scientific consensus that the emissions are strongly

* 이 논문은 2011년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것입니다.

** 중앙대학교 도시계획·부동산학과 조교수(Assistant Professor, Department of Urban Planning and Real Estate, Chung-Ang University), E-mail: cdkang@cau.ac.kr, Tel: 031-670-3056

associated with climate change. This study aims to test density, income and productivity, and real estate development hypotheses for identifying impacts of key factors on energy consumption with data in Seoul in 2005 and 2006 and then suggest the relevant policies. For analyzing the effects of the factors on electricity and gas consumption, this study applied Ordinary Least Square (OLS), Spatial Autoregressive Model (SAR), and Spatial Error Model (SEM). This study confirms that the higher density of population and household is associated with the lower electricity consumption while employment and firm density has the opposite effects. In the models for gas use, higher household density decreases the use while higher firm density tends to appreciate the gas consumption. Further, higher residential and commercial-office land prices, the proxy of income and productivity, decrease the electricity use. However, only commercial-office land prices raise the level of gas use. In electricity and gas use models, higher total floor areas of commercial-office and residential property tend to increase the energy and gas consumption. Based on the outputs from the models, this study suggests a few insightful policies. First, we need policies to control energy consumption based on the characteristics of households and firms. Second, the policies to reduce energy use and carbon emissions should consider the consumption behavior and income level of households and characteristics of urban spatial structure. Third, central and local governments need to provide information on energy consumption and carbon emission with Internet and other information technology. Finally, central and local governments should support constructing green building and energy-saving compact cities more actively.

Key Words : Energy Consumption, Electricity, Gas, Spatial Econometrics, Seoul

I. 서론

온실가스가 전 지구적으로 초미의 관심사가 되고 있다. 온실가스 배출이 지구온난화를 초래하는 지에 대해서는 논란이 있지만, 기후변화에 강한 영향을 준다는 점에서는 대체로 학계가 합의하고 있기 때문이다(Stern, 2008). 온실가스는 여섯 종류의 기체를 말하는데 이 가운데 절반이 이산화탄소로 알려져 있다. 이산화탄소는 기후변화를 일으키는 핵심요인이다. 기후의 급격한 변동이 생태계 파괴, 수자원 고갈, 가용식량 감소, 해수면 상승에 의한 육지 감소, 각종 질병의 창궐을 초래한다는 점에서 이산화탄소(이하 탄소라 칭함)를 줄여 기후변화에 대응하려는 노력을 전 세계가 함께 추진하고 있다.

기후변화의 주요인으로 지목되는 탄소는 주로

에너지 소비로 인해 증가한다. 따라서 대부분의 연구와 정책은 에너지 소비에 초점을 두고 있다. 특히, 전력, 도시가스 등 화석연료를 소비하는 주택과 상업용 건축물 등 부동산과 석유를 주로 사용하는 교통이 주된 탄소배출 부문이다. 때문에 건축물과 교통의 에너지 소비와 탄소배출에 대한 엄밀한 분석과 대안을 모색하는 것이 탄소감축을 통한 전 지구적 위기 극복을 위한 절실한 과제로 등장하고 있다.

우리나라는 다른 국가에 비해 에너지 소비와 이에 따른 탄소배출이 심각하다. 미국 에너지정보청(Energy Information Administration) 통계에 의하면, 2010년 우리나라 이산화탄소배출량은 5억 2,813만톤이며, 이는 세계 8위 수준이었다. 이는 1990년에 비해 118%가량 증가한 것으로 증가세가 세계에서 가장 높다(Energy Information

Administration, 2011). 1960년대 이후 급속한 경제성장과 도시화 과정으로 인해 우리나라 탄소배출의 절대량과 증가 속도는 매우 빠르다. 때문에 에너지 소비와 탄소배출에 대한 실증분석과 이를 토대로 한 대안의 모색이 시급한 사안이다.

이 연구는 2005년과 2006년 서울시 522개 동별 전력과 도시가스 소비에 영향을 주는 요인을 분석하고 정책과제를 제시하고자 한다. 이를 위해 우선 에너지 소비와 탄소배출에 관련된 국내외 문헌을 검토하였으며 분석틀과 분석을 위한 변수 선정에 활용하였다. 그다음 서울시에서 발행한 보고서를 토대로 서울시 에너지 소비와 탄소배출의 현황과 특성을 간략하게 살펴보았다. 이 과정은 실증분석의 결과를 해석하고 의미 있는 결론을 도출하는 데 많은 시사점을 주었다. 2005년과 2006년 서울시 에너지 소비 자료와 서울시 인구 및 가구 통계, 고용 및 사업체 통계, 지가 자료, 용도별 건축물 자료 등을 결합하여 자료를 만들고 이를 공간계량모형으로 분석한 후 해석하였다. 끝으로, 연구결과를 요약하고 그 정책적 시사점을 제시하였다.

이 연구가 기존 연구에 비해 갖는 차별성은 다음과 같다. 첫째, 탄소배출의 주요인으로 지목되는 에너지 소비를 전력과 도시가스로 나누고 상대적으로 미시적 수준인 서울시 522개 행정동을 대상으로 분석하였다. 이는 에너지 소비 특성이 탄소배출에 영향을 준다는 점에서 에너지 소비와 탄소배출 감축을 위한 정책 구상에 활용할 수 있다. 둘째, 전력, 도시가스 등 에너지 소비와 탄소배출에 영향을 미치는 요인에 대한 가설을 문헌연구를 통해 설정하고 일반회귀모형(Ordinary Least Square, 이하 OLS모형)과 공간계량모형을 통해 검증해 보았다. 끝으로, 실증모형의 결과와 기존의 에너지와 탄소배출 저감 대책을 함께 고려하여 향후 서울시의 정책과제를 제시하였다.

II. 관련 이론 검토

그동안 선진국을 중심으로 에너지 소비와 탄소배출에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 연구가설의 설정, 분석 변수의 선정, 향후 정책과제 등을 논의하기 위해 크게 에너지 소비와 탄소배출에 관한 현황, 영향요인, 정책적 대응과 효과를 중심으로 관련 연구를 검토하였다.

1. 에너지 소비와 탄소배출 현황 연구

탄소배출원은 국가별로 다를 수 있는데 여기서는 미국, 중국, 우리나라의 현황에 한정하여 그 특성을 살펴본다. 먼저, 에너지로 인한 탄소배출이 가장 많은 미국의 경우 2005년 탄소배출원은 건축물이 39%, 교통이 33%, 그리고 산업이 28%를 각각 차지하였다. 탄소를 전체의 39% 배출하는 건축물 가운데 주거용 건축물이 절반 이상 배출하고 나머지는 상업용 건물에서 나온다. 주거용 건축물 탄소배출의 50% 이상은 전기사용에서 나오고 가정용 전기의 주요 사용이유는 냉난방(42%)과 전등(12%)이다. 그밖에 텔레비전과 컴퓨터에 사용하는 전기량도 급속히 증가하는 추세이다(Energy Information Administration, 2007).

전 세계 국내총생산(GDP)의 5%를 차지하고 급격한 경제발전과 도시화 과정에 있는 중국이 새로운 에너지 소비 대국으로 자리 잡고 있다. 더구나 2005년 도시화율이 40%로 증가하면서 에너지 소비가 더욱 커지는 상황이다. 현재 중국의 경우 각 도시별 에너지 소비 통계가 없기 때문에 전체 도시를 대상으로 에너지 소비 패턴과 탄소배출간 관련성을 파악하기는 어려운 상황이다. 다만, 중국 전체의 에너지 소비 패턴을 보면 첫째, 전체 에너지 소비에서 도시가 차지하는 비중은 2006년에 84%이

다. 도시의 에너지 소비가 절대적 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다. 둘째, 도시와 농촌 간 에너지 소비 격차가 더욱 커지고 있다. 도시의 1인당 에너지 소비량은 농촌의 6.8배이다. 중국의 35개 도시가 중국 전체 에너지의 40%를 쓰고 있고 탄소배출 또한 같은 비중을 차지하고 있다(Dhakal, 2009).

우리나라의 에너지 소비구조를 미국과 비교하여 특성을 찾아보면 첫째, 이미 서론에서 지적한 바와 같이 우리나라 탄소배출 증가율은 경제성장률을 앞서고 있다. 에너지 가격이 낮아 과소비가 많기 때문이다. 둘째, 탄소배출에서 산업부문이 차지하는 비중이 55.2%로 미국(28%)보다 월등히 높다. 이는 에너지 소비와 탄소배출이 많은 에너지 소비형 산업구조에 머물고 있음을 보여준다. 특히, 가격이 싼 산업용 에너지 소비가 많아 탄소배출이 많은 실정이다. 그러나 에너지 소비구조와 원인은 한 국가 내 도시별로 크게 다르다. 이 연구는 서울시를 대상으로 에너지 소비에 영향을 주는 요인을 규명하고 정책대안을 모색하고자 한다.

2. 에너지 소비와 탄소배출 영향요인

에너지 소비와 탄소배출에 영향을 주는 요인에 대한 논의는 대체로 핵심요인을 찾아내는 데 주안점을 두고 있다. 그 이유는 첫째, 핵심요인에 대한 정책을 실행하는 것이 비용과 효과성 측면에서 유리하기 때문이다. 여러 요인에 동시다발적으로 정책을 사용하면 비용이 많이 들고 최종 효과도 크지 않을 가능성이 높다. 둘째, 에너지 소비와 탄소배출 관련 자료의 한계로 인해 다양한 변수의 영향력을 밝혀내기 쉽지 않은 상황이다. 그럼에도 불구하고 선진국을 중심으로 에너지 소비와 탄소배출에 영향을 주는 핵심변수를 찾아내고 이에 대한 대안을 만드는 일을 서두르고 있다. 기존의 논

의를 보면 크게 인구규모, 1인당 소득, 인구밀도와 집중도, 도시 밀도와 교통에너지 관계 등 사회경제적 요인에 관한 내용이 대부분이다. 또한 정책 측면에서 건축법규, 대중교통 정책, 탄소세, 에너지 소비 절감을 위한 가격 정책 등이 주요 주제이다.

〈표 1〉에서 기존 연구를 검토한 후 그 핵심 연구내용을 요약하고 이 연구가 설정한 3개의 핵심 가설(밀도가설, 소득 및 생산성 가설, 부동산개발 가설)에 따라 분류하였다. 아울러 이 연구의 초점은 아니지만 교통가설에 관련된 연구도 참고를 위해 포함하였다. 이 연구가 설정한 세 개의 가설은 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, 인구, 가구, 고용, 사업체의 밀도가 높을수록 전력과 도시가스 등 에너지 소비에 의한 탄소배출이 적다는 밀도가설이다. 둘째, 소득과 경제활동의 생산성에 따라 에너지 소비와 탄소배출량이 달라진다는 소득 및 생산성 가설이다. 여기서 생산성 가설은 이 연구에서 분석 가능한 상업업무용 토지가격이 상업업무활동의 총수익에서 이동요소 비용을 제외한 잔여가치라는 점에 착안하여 이 연구가 독자적으로 설정하고 검증하였다(Geltner and Miller, 2006). 생산성이 높은 활동은 보다 높은 토지가격을 지불할 능력을 갖는 것이다. 셋째, 부동산개발의 용도별 규모에 따라 에너지 소비와 탄소배출이 달라진다는 부동산개발 가설이다. 대체로 부동산개발 규모가 클수록 에너지 소비와 탄소배출도 크다는 것이 중론이다. 이와 별도로 이 연구의 초점은 아니지만 기존 연구를 검토해 보면 승용차 이용, 부동산개발의 다양성, 대중교통 접근성에 따라 에너지 소비와 탄소배출이 크게 영향을 받는다는 교통가설을 도출할 수 있다. 이 연구의 대상은 전력과 도시가스 소비이므로 교통가설은 차후 연구 주제로 남기고자 한다.

〈표 1〉 기존 연구의 출처, 연구결과, 해당 가설 요약

연구논문	핵심 연구내용	해당 가설
Golob and Brownstone(2009)	주거밀도가 낮을수록 연간 자동차 사용이 증가할 뿐만 아니라 연료 소비도 함께 증가함.	밀도가설
Dodman (2009)	인구와 경제활동이 집중된 도시의 에너지 소비 효율성이 높으며 탄소배출이 적은 에너지를 제공할 수 있고, 도시 토지이용과 교통체계를 통합적으로 개편할 수 있음.	밀도가설 교통가설
Altshuler (1979)	도시밀도가 높아지면 교통이용에 필요한 에너지 소비는 감소, 그러나 교통과 토지이용의 관계는 장단기적으로 교통에너지 소비에 미치는 영향이 다름.	밀도가설 교통가설
Mindali et al. (2004)	세계 31개 도시의 토지이용과 혼합도가 교통에너지 소비에 미친 영향을 분석한 결과, 도심의 고용밀도와 대중교통 이용률을 높이는 것이 교통에너지 소비 저감에 핵심적인 요소임을 밝힘.	밀도가설 교통가설
Sovacool and Brown (2010)	1) 소득이 낮으면 에너지 소비가 낮음. 2) 인구 및 고용 밀도, 토지이용의 혼합도가 높을수록 에너지 소비와 탄소배출이 낮음. 3) 승용차 이용보다 보행, 자전거, 대중교통 이용률이 높은 도시일수록 탄소배출이 적음. 4) 에너지 수요 특성뿐만 아니라 공급시스템에 따라 탄소배출량도 크게 달라짐. 5) 탄소배출 억제를 위한 정책이 반드시 효과적이지 않음.	밀도가설 소득가설 교통가설
Norman et al. (2006)	고밀 주거지와 저밀 주거지의 에너지 소비와 탄소배출을 비교한 결과, 저밀 주거지는 고밀 주거지에 비해 1인당 에너지 소비와 탄소배출이 2배 이상임을 밝힘.	밀도가설 부동산개발 가설
이정전 (2004)	1인당 소득이 올라가면 에너지 사용량이 많아지고 이로 인해 탄소배출량도 증가한다는 것이 경제학의 일반적인 견해. 그러나 환경 쿠즈네츠 커브 가설은 환경오염이 경제성장에 의해 증가하지만, 1인당 소득이 일정수준을 넘으면 감소한다고 봄.	소득가설
Ewing and Rong (2008)	오래된 주택이나 단독주택이 많은 지역일수록 다른 요인을 통제했을 때 에너지 소비가 더 많은 것으로 나타남. 또한 다양한 토지이용이 집적되어 있는 도시의 주택보다 도시 외곽의 주택일수록 에너지 소비가 많고 효율성이 떨어짐.	부동산개발 가설
Glaeser and Kahn (2010), Glaeser(2011)	지역 내 신규개발에 대한 규제가 강한 경우 이미 탄소배출이 집중된 지역에 더 많은 개발이 일어나고 에너지 소비도 증가함. 따라서 적정수준의 토지이용 규제와 개발에 의한 탄소배출을 내부화하는 탄소세의 도입을 통해 개발 이익과 탄소배출이라는 부정적 외부성을 줄이는 방안을 검토해야 함.	부동산개발 가설
Brown et al. (2009)	에너지 소비가 낮은 집을 짓도록 하는 건축 법규가 있는 경우 탄소배출이 적을 수 있음. 그러나 건축 법규는 통계적 설명력이 미미하게 나타나는 경우도 많음.	부동산개발 가설
남기찬 외 (2008)	인구 집중과 교통에너지 소비 간 관련성을 고찰한 결과 서울과 경기남부 지역을 중심으로 압축도시를 형성하고 있지만 직주 분리에 의한 교통통행으로 인해 에너지 소비가 증가하고 있음.	밀도가설 교통가설 부동산개발 가설
어재훈 외 (2010)	진주시를 대상으로 40년간 토지이용 변화와 탄소배출의 연관성을 분석한 결과 신주거지개발로 인해 인구집중이 일어나 탄소배출이 크게 증가했음.	부동산개발 가설 교통가설
남기찬 외 (2010)	서울시 관련 자료에 적용한 결과, 용적률과 혼합률에 의한 전체 토지면적에 대한 규제보다 주거용 토지면적에 대한 규제가 에너지 소비와 탄소배출을 감소시키는 데 효과적임을 밝힘.	부동산개발 가설 교통가설
반영식 외 (1990)	건축물 수준에서 에너지 소비 요인을 보면, 사무용 건물과 공동주택의 경우 연면적이 많을수록 에너지 소비가 많음.	부동산개발 가설

3. 에너지 소비 및 탄소배출 저감정책과 효과 연구

도시형태, 에너지 소비, 환경의 관계에 대한 여러 논문은 도시의 맥락을 정확하게 이해하는 것이 효과적인 정책대안을 만드는 데 핵심임을 강조한다. 여기서 도시의 맥락은 가구와 기업의 입지 선택, 교통 이용 행태, 교통에 의해 발생하는 탄소의 공간적 분포를 모두 아우르는 개념이다. 기존의 연구들이 인구규모, 인구밀도, 소득의 규모, 교통 등에 따라 탄소배출이 달라진다는 점을 강조했지만, 인구, 소득 등 사회경제적 변수를 통제해보면, 토지이용 규제, 건축 규제, 대중교통 정책, 에너지 가격 정책 등 정책요인이 에너지 소비와 탄소배출량에 중대한 영향을 미친다.

현재 도시의 탄소배출과 관련하여 논의되고 있는 주요 쟁점은 첫째, 과연 토지이용 변화를 규제하는 정책이 에너지 소비와 탄소배출 감소에 효과적인가 하는 근본적인 질문이다. 현재 학계는 토지이용과 교통을 동시에 분석하고 대안을 마련하는 것이 효과적이라는 데 합의하고 있다. 둘째, 교통정책이 사라지면 탄소배출량이 낮아지는가 하는 점이다. 교통정책이 없어도 교통 통행량이 증가하면 탄소배출량은 오히려 늘어날 수 있다. 따라서 교통 통행의 절대적 감소책이 필요하다. 셋째, 대중교통을 확충하면 탄소배출량을 줄일 수 있는가 하는 것이다. 탄소배출이 낮은 탄소배출 기술개발과 승용차 이용의 감축을 위한 정책 마련이 동시에 필요하다(Anderson et al., 1996).

탄소배출 억제정책 가운데 에너지 소비를 억제하기 위해 가격을 실시간(real time)으로 달리 부과하는 방안도 실시하고 있다. 이 방안은 에너지 소비수요의 분산(variance)을 낮출 뿐만 아니라 궁극적으로 탄소배출을 줄이는 효과도 내는 것으로

밝혀졌다(Holland and Mansur, 2008). 또 다른 전략으로 에너지 소비현황을 쉽게 확인할 수 있는 Eco-Visualization 기법이 에너지 소비를 줄일 수 있는 전략이 되고 있다. 실증 연구에 의하면 에너지 소비 정보를 실시간으로 제공하는 시각기술(Visualization)은 소비자의 환경보호 행동을 촉진하고 환경친화의식을 높이는 것으로 나타났다(Holmes, 2007). 끝으로 탄소세에 대한 논의도 활발하게 진행되고 있다. 그 논의의 기본 골격은 탄소세 도입을 통해 에너지 비용을 높이면 에너지 가격이 상승하고 소비량은 감소하는 효과를 낸다는 것이다(O'Sullivan, 2009).

앞의 논의는 주로 에너지 소비와 탄소배출에 영향을 주는 사회경제적 변수와 정책 요인에 초점을 두었지만 민간 스스로 에너지 저감 기술을 적용하려는 움직임도 활발하게 나타나고 있다. 예를 들어, 에너지 절약과 이에 따른 탄소배출 감소는 부동산 가치를 높이기도 한다. 에너지를 적게 쓴다는 것은 곧 부동산 운용비용의 절감을 의미하기 때문이다. 그 증거로 미국의 그린빌딩 인증을 받은 건축물의 경우 다른 변수를 통제했을 때 임대료와 부동산 가격이 높은 것으로 나타났다(Eichholtz et al., 2010). 아울러 이러한 움직임에 정부의 적절한 유인책이 더해지면 그 효과는 더욱 커질 것이다.

이 연구는 앞에서 살펴본 논의를 통해 서울시 에너지 소비에 영향을 주는 핵심변수를 선정하고 설정한 밀도, 소득 및 생산성, 부동산개발 가설을 검증하고자 한다. 그다음 가설 검증의 결과를 토대로 향후 서울시 정책과제를 제시하고자 한다. 끝으로 본 연구의 한계와 향후 연구과제도 논의하려 한다. 미국 등 선진국의 유사 연구의 경우 자료의 한계에도 불구하고 주로 에너지 소비와 탄소배출을 좌우하는 핵심변수를 찾고 있다(Glaeser and Kahn, 2010). 향후 가구, 건축물, 자동차 이용자

〈표 2〉 전국과 서울시 에너지 소비 구조 비교

구분	전국(2005년 기준)	서울시(2005년 기준)
에너지별 소비 비중	석유 56.6% 전력 16.7% 도시가스 10.4% 석탄 13.1%	석유 39.8% 전력 23.0% 도시가스 32.4% 석탄 1.1%
부문별 에너지 소비 비중	산업부문 55.2% 가정상업부문 21.6% 수송부문 20.8% 공공부문 기타 2.4%	산업부문 10.1% 가정상업부문 57.8% 수송부문 28.3% 공공부문 기타 3.9%

자료: 서울시, 2008b, 기후 에너지지도(2차년도)

40%까지 차지하였다. 전력 소비에 의한 탄소배출 비중은 2006년 기준으로 종로구, 금천구, 성동구 순이며, 도시가스 소비에 의한 탄소배출은 같은 연도 기준으로 동작구, 관악구, 노원구 순이다.

이 연구의 대상인 서울시는 에너지 소비구조와 탄소배출 측면에서 우리나라 전체와 다른 특성이 있다. 이를 정리하면 〈표 2〉와 같다. 먼저, 에너지별 소비 비중으로 보면, 전국은 석유(56.6%), 전력(16.7%), 도시가스(10.4%) 순인 반면 서울은 석유 비중이 39.8%로 상대적으로 낮고 전력(23.0%)과 도시가스(32.4%)의 비중이 높다. 부문별 에너지 소비 비중에서도 서울과 전국은 다르다. 전국이 산업부문(55.2%), 가정상업부문(21.6%), 수송부문(20.8%) 순인 반면, 서울은 가정상업부문(57.8%)의 비중이 절대적으로 높고 그 다음으로 수송부문(28.3%), 산업부문(10.1%) 순이다. 에너지별 소비 비중과 부문별 에너지 소비 비중을 검토한 결과 서울시 에너지 소비 연구에서 석유뿐만 아니라 전력과 도시가스가 모두 중요함을 알 수 있다. 또한, 서울시 에너지 소비 특성을 가정상업부문의 특성과 연계하여야 정확한 에너지 소비 분석이 될 수 있음을 시사하고 있다.

IV. 서울시 에너지 소비 분석

1. 자료와 요약 통계량

이 연구에서 사용한 자료의 출처는 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 먼저, 에너지 소비 분석을 위해 2008년 서울시에서 발표한 기후 에너지지도(2차년도) 부록에 실린 2005년과 2006년 서울시 동별 전력 사용량과 도시가스 사용량 자료를 사용하였다. 그다음 에너지 소비에 영향을 줄 수 있는 독립변수는 2005년과 2006년 서울통계, 사업체 기초통계조사, 표준지 공시지가자료, 서울시 과세대장에서 얻었다. 서울통계에서 얻은 자료는 인구, 가구, 동별 면적 등이다. 그다음 사업체 기초 통계조사에서 동별 종사자 수와 사업체 수를 얻었다. 또한, 2005년과 2006년 표준지 공시지가 자료에서 동별 주거용 토지가격 중앙값과 상업업무용 토지가격 중앙값을 계산하였다. 주거용 토지가격의 중앙값은 동별 가구의 소득수준을 대변할 수 있으며, 상업업무용 토지가격 중앙값은 동별 경제활동의 생산성을 대리할 수 있는 변수로 가정하였다. 아울러 서울시 과세대장 자료상 동별 주거용, 상업업무용, 산업용 건물 연면적 자료도 이용하였다(〈표 3〉).

<표 3> 연구자료 개요

종속변수	변수 이름	단위	출처
에너지 소비	전력 사용량	Gwh	서울시, 2008b, 서울시 기후 에너지지도(2차년도)
	도시가스 사용량	백만m ³	서울시, 2008b, 서울시 기후 에너지지도(2차년도)
독립변수			
인구 및 고용 특성	인구밀도	명/km ²	서울시, 2005~2006a, 서울통계연보
	가구밀도	호/km ²	서울시, 2005~2006a, 서울통계연보
	고용밀도	명/km ²	서울시, 2005~2006b, 사업체 기초통계조사
	기업밀도	개/km ²	서울시, 2005~2006b, 사업체 기초통계조사
소득 및 생산성 특성	주거용 토지가격 (중앙값)	평방미터당 원	국토해양부, 2005~2006, 표준지 공시지가
	상업업무용 토지가격 (중앙값)	평방미터당 원	국토해양부, 2005~2006, 표준지 공시지가
부동산개발 특성	주거용 건물 연면적	평방미터	서울시, 2008a, 서울시 과세대장
	상업업무용 건물 연면적	평방미터	서울시, 2008a, 서울시 과세대장
	산업용 건물 연면적	평방미터	서울시, 2008a, 서울시 과세대장

모형연구에서 사용한 자료의 전반적인 현황을 살펴보기 위해 2006년 자료 요약통계량(<표 4>)을 보면, 우선 각 변수의 사례 수는 서울시 행정동 522개이다.¹⁾ 전력 사용량은 최소 4.97Gwh이고 최대 785.56Gwh였다. 도시가스 사용량은 최소 0.14백만m³이고, 최대 100.12백만m³였다. 인구밀도는 최대 km²당 74,945명이고 가구밀도는 최대 km²당 79,643호로 나타났다. 최대치로 볼 때, 고용밀도는 km²당 29,000명이고 기업밀도는 km²당 21,335개이다. 동별 주거용 토지가격을 보면 m²당 최대 730만원이며 상업오피스용 토지가격은 m²당 최대 1,290만원이다. 주거용보다 상업업무용 토지가격이 높았다. 또한, 평균 연면적 기준으로 주거용, 상업업무용, 산업용 순으로 많았지만 표준편차는 상업업무

용, 주거용, 산업용 순으로 컸다.²⁾

2. 공간 자기상관성 진단과 공간회귀분석 개요

1) 공간 자기상관성 개요

연구의 분석방법은 자료의 특성에 따라 달라진다. 이미 밝힌 바와 같이 이 연구에서 사용하는 자료는 서울시 동별 2005년과 2006년 자료이다. 그 특성상 공간 자기상관성이 있을 것으로 판단되어 공간 자기상관성을 검증한 후 공간계량분석 가운데 공간회귀분석을 적용하였다. 분석방법을 선택하고 분석결과를 얻는 과정을 간략히 설명해 보면, 먼저 연구자료를 검토한 후 Getis-Ord G기법

1) 서울시 행정동 522개는 2006년 기준이며, 2010년 현재 행정동 수는 424개이다(서울시, 2011).

2) 주거용 토지가격은 단독주택, 연립주택, 다세대주택, 아파트에 한정하였고, 상업업무용 토지가격은 상업용과 업무용에 한정하여 동별 중앙값을 계산하였다. 따라서 여기에 나열한 용도를 포함하지 않는 동의 경우 각 토지가격의 중앙값이 0이다. 건물 연면적 계산에서도 해당 용도가 없는 경우 주거용과 산업용 건물 연면적이 0으로 계산되었다. 모형에서는 로그값을 구하기 위해 0의 값을 갖는 경우 최솟값인 1을 넣어 사용하였다.

〈표 4〉 자료의 요약 통계량 (2006년)

변수	사례 수	평균	표준편차	최솟값	최댓값
전력 소비량	522	77.55	83.82	4.97	785.56
도시가스 소비량	522	8.89	6.91	0.14	100.12
인구	522	19,839.47	8,126.74	1.00	50,831.00
인구밀도	522	26,350.24	13,597.52	1.20	74,945.00
가구	522	7,362.09	12,217.01	72.00	134,088.00
가구밀도	522	7,986.77	9,034.53	251.97	79,634.38
고용	522	7,622.49	2,988.68	1.00	19,768.00
고용밀도	522	10,206.19	5,232.00	1.20	29,000.00
기업 수	522	1,419.98	1,490.07	9.00	17,044.00
기업밀도	522	1,815.99	1,815.26	10.84	21,335.18
주거용 토지가격	522	1,085,096.00	874,391.20	0.00	7,300,000.00
상업오피스용 토지가격	522	3,897,194.00	1,724,277.00	0.00	12,900,000.00
주거용 건물 연면적	522	500,335.50	273,231.70	0.00	2,070,316.00
상업오피스용 건물 연면적	522	204,798.50	306,859.80	669.16	3,332,612.00
산업용 건물 연면적	522	48,019.55	145,035.00	0.00	2,348,807.00

으로 서울시 동별 전력 사용량과 도시가스 사용량의 공간 자기상관성을 측정하였다. 공간 자기상관성을 측정하는 대표적인 방법으로 Global Moran's I, Local Moran's I, Lagrange Multiplier(LM) 검정, Geary's의 Coefficient, Getis-Ord G기법이 있으나 이 연구는 Getis-Ord G기법을 적용하여 전력과 도시가스 사용량의 공간 자기상관성을 측정하고 이를 그림으로 표현하였다(Getis and Ord, 1995; Ord and Getis, 1995). 연구자료의 공간적 집중도를 지도로 표현해주는 장점이 있기 때문이다. 그다음 공간 자기상관성이 확인되어 공간회귀모형을 자료에 적용한 후 결과를 얻었다. 이 연구의 공간회귀모형은 크게 Spatial Autoregressive Model과 Spatial Error Model을 모두 채택하고 OLS모형과 함께 각각 분석결과를 해석하였다. 분석에 앞서 공간 자기상관 분석결과를 소개하고 공간회귀모형을 설명하고자 한다.

2) Getis-Ord G 통계기법에 의한 공간 자기상관성 분석결과

공간적 속성을 반영하는 자료의 경우 공간 자기상관성(Spatial Autocorrelation)이 있는지 사전에 검증하여야 한다. 이와 같은 자료에 OLS모형을 적용하게 되면 회귀분석의 전제조건을 위배하게 되어 통계적 추정 결과를 신뢰하기 어렵기 때문이다. 특히, 공간 속성을 반영하는 자료의 각 사례의 변수 값은 공간 자기상관성으로 인해 독립적이지 않다. 이 연구에서 적용한 Getis-Ord G기법에 의해 GiZScore (G_i^*)를 계산하는 수식은 다음 (1)과 같다.

$$G_i^* = \frac{\sum_j w_{ij}(d)x_j - W_i^* \bar{x}}{s \{ [nS_{1i}^* - W_i^{*2}] / (n-1) \}^{1/2}} \quad (1)$$

$$W_i^* = \sum_j w_{ij}(d)$$

$$S_{1i}^* = \sum_j w^2_{ij}$$

s = 표준편차
 x_i = i 동의 측정된 전력 또는 도시가스 소비량
 x_j = j 동의 측정된 전력 또는 도시가스 소비량
 $w(d)_{ij}$ = i 동에서 j 동까지의 거리공간 가중치

아래 <그림 4>는 서울시 522개 행정동별 2006년 전력과 도시가스 소비의 공간 자기상관성을 진단한 결과이다.³⁾ 통상 Getis-Ord-G기법은 GiZScore로 공간 자기상관성을 측정하는데 그 값이 1.96 이상이면 높은 값의 공간적 집중과 높은 상관성, -1.96 이하면 낮은 값의 공간적 집중과 높은 상관성, 1.96에서 -1.96 사이면 값의 공간 상관성이 없음을 의미한다. 아래 <그림 4>를 보면, 도심과 강남구, 서초구에서 많은 전력 소비가 공간적으로 집중되어 있고, 성북구, 동대문구, 중랑구, 동작구, 관악구 일부 지역은 적은 전력 소비가 집중되어 있음을 알 수 있다. 또한, 강북지역에서 노원구와 도봉구, 강남에서 강남구와 서초구 등에서 도시가

스 소비가 많았다. 이러한 분석을 통해 서울시 동별 전력과 도시가스 소비에서 공간 자기상관성을 확인하였고, 이는 공간회귀분석의 적용이 올바른 모형 선택임을 말해준다.

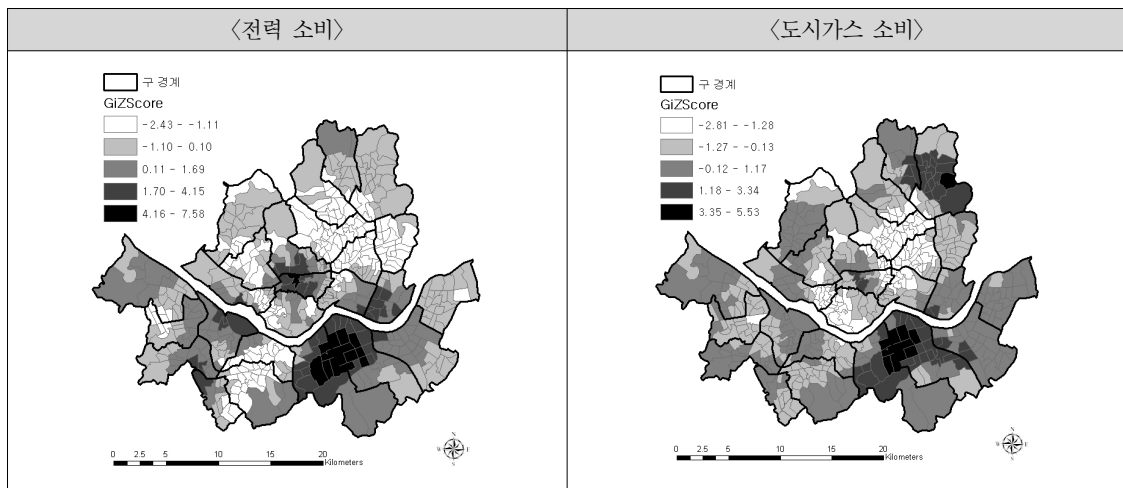
3) 공간회귀모형 개요

연구자료상 변수의 값이 서로 체계적인 상관성이 있는지 혹은 없는지에 따라 연구방법이 달라진다. 우선, 체계적인 상관성이 없는 경우 일반적으로 OLS모형을 사용한다. OLS모형을 표현하는 수식은 다음 식 (2)와 같다.

$$y = X\beta + \varepsilon \tag{2}$$

이 식에서 y 는 n 개 사례의 종속변수의 벡터이며, X 는 n 개 사례의 m 개 독립변수의 $n \times m$ 행렬을 의미한다. 또한, β 는 회귀분석에서 나오는 계수의 벡터이고, ε 는 독립적으로 분포한 잔차이다.

자료상 변수 값의 공간적 의존성 혹은 공간 자기상관성이 있는 경우 잔차는 서로 독립적이지 않



<그림 4> 2006년 서울시 전력과 도시가스 소비의 공간 자기상관성 진단결과(Getis-Ord G)

3) 지면의 한계로 인해 2006년 공간 자기상관성 결과를 보여주었으나, 2005년 공간 자기상관성에서도 유사한 결과를 얻었다.

아 OLS모형을 사용하는 것은 적합하지 않다. 이 경우 Spatial Autoregressive Model 혹은 Spatial Lag Mode(이하 SAR)과 Spatial Error Model(이하 SEM)을 사용하여 보다 신뢰성 있는 통계적 추정 결과를 얻을 수 있다. 이 두 모형 모두 공간 가중행렬(Spatial Weight Matrix)을 사용하여 설명변수의 계수를 추정한다. 이 연구의 경우 서울시 522개 동이 대상이므로 522×522 행렬자료를 이용하였다.

먼저, SAR의 특징은 설명변수에 인근 지역의 종속변수 평균값(이를 Spatial Lag라고도 함)을 포함한다는 것이다. 이를 수식으로 표현하면 다음 식 (3)과 같다.

$$y = \rho Wy + X\beta + \varepsilon \quad (3)$$

이 식에서 y , X , β , ε 는 앞의 식 (2)와 같으며, W 는 공간 가중행렬, Wy 는 인근 지역의 종속변수 평균값이다. ρ 는 모형에 추가된 설명변수인 인근 지역의 종속변수 평균값이 갖는 계수이다.

앞에서 소개한 SAR이 종속변수의 공간 자기상관성을 처리하는 반면 두 번째 공간회귀모형인 SEM은 잔차의 공간 자기상관성을 공간 가중행렬로 처리한다. 그 수식은 다음 식 (4)와 (5)이다.

$$y = \beta X + \mu \quad (4)$$

$$\mu = \lambda W\mu + \varepsilon \quad (5)$$

먼저, 식 (4)에서 μ 는 잔차인데 이는 다시 식 (5)로 표현할 수 있다. 식 (5)에서 λ 는 공간 가중행렬로 처리한 잔차 μ 의 계수이고, ε 는 식 (5)의 잔차이다.

공간회귀모형의 통계적 신뢰성을 측정하는 방법은 크게 3가지로 볼 수 있다. 첫째, OLS모형과 완전히 동일한 의미는 아니지만 결정계수의 크

기를 보는 것이다. 둘째, 앞에서 설명한 종속변수와 잔차를 공간 가중행렬로 처리한 후 얻은 두 계수 ρ 와 λ 가 각각 통계적으로 유의미한지 살펴보는 것이다. 끝으로 OLS모형, SAR, SEM의 Log Likelihood 값을 비교하는 방법이다. 일반적으로 Log Likelihood 값이 낮을수록 더욱 개선된 모형으로 볼 수 있다(이성우 외, 2006; 김성우, 2010). 이 연구는 모형에서 사용하는 변수의 단위와 모형의 적합성을 고려하여 종속변수와 독립변수를 모두 Log로 바꾼 Log-Log모형을 채택하였다. 이 모형은 독립변수 1%의 변화가 독립변수의 계수 %만큼 종속변수를 증가 또는 감소시키는 탄력성 개념으로 해석할 수 있다(Gujarati and Porter, 2009). 다음 부분에서 2005년과 2006년 서울시 전력과 도시가스 소비량의 각 로그값을 종속변수로 하고 이 연구가 설정한 밀도가설, 소득 및 생산성 가설, 부동산개발 가설을 각각 검증하고자 한다. 모형의 각 변수에 대한 VIF(Variance Inflation Factor) 값은 모두 10 이하로 다중공선성은 없다.

3. 분석결과와 해석

이 연구의 모형에서 탄소배출에 영향을 미치는 요인은 각 에너지 소비의 특성을 감안하여 선정하였고, 각각 모형화하여 분석하였다.

1) 전력 소비모형

(1) 개요

서울시 동별 전력 소비모형은 2005년과 2006년으로 각기 나누어 분석하였다(<표 5>, <표 6>). 각 사례 수는 522개이며, 같은 설명변수를 넣어 OLS 모형, SAR, SEM의 결과를 얻었다. 먼저, 모형의 결정계수는 0.78에서 0.80이며 모형에 포함된 설명

변수의 설명력은 전반적으로 높은 편이다. SAR과 SEM의 ρ 와 λ 는 2005년 모형 1 SAR모형의 ρ 만 제외하고 각각 유의수준 10% 이내에서 통계적으로 유의미하였다. 아울러 Log Likelihood 값을 보면, SAR과 SEM에서 그 값이 OLS모형보다 낮아 공간회귀분석의 사용이 적합함을 보여주고 있다.

(2) 밀도가설

2005년과 2006년 서울시 동별 전력 소비모형에서 밀도가설을 검증하기 위해 인구밀도, 가구밀도, 고용밀도, 기업밀도를 설명변수로 하였다. 그러나 <표 5>와 <표 6>에서 보듯 밀도변수를 모두 한 모형에 넣지 않고 모형 1과 3에서 인구와 고용밀도, 모형 2와 4에서 가구밀도와 기업밀도를 쌍으로 포함하고 모형 결과를 얻었다. 인구와 고용은 사람 단위이고 가구나 기업은 집단단위임을 고려한 것이다. 모형 1부터 모형 4의 OLS, SAR, SEM에서 보듯 일관된 패턴으로 인구밀도의 증가는 전력 소비를 낮추는 반면 고용밀도는 그 소비를 높이는 것으로 나타났다. 즉, Log-Log 모형결과에 의하면, 인구밀도가 1% 증가할수록 전력 소비는 대체로 0.34%~0.37% 감소하는 것으로 나타났다. 또한 고용밀도가 1% 증가할수록 전력 소비는 0.16~0.20% 증가하였다. 한편, 가구밀도는 전력 소비를 낮추고 기업밀도는 전력 소비를 증가시키는 것으로 분석되었다. 즉, 가구밀도가 1% 증가할수록 전력 소비는 0.31~0.33% 감소한 반면 기업밀도가 1% 증가할수록 전력 소비는 0.10~0.12% 정도 높아졌다. 모형결과는 인구와 가구의 밀도 증가는 전력 소비를 낮추고 고용과 기업의 밀도 증가는 전력 소비를 높이는 관계를 일관되게 보여주고 있다.

(3) 소득 및 생산성 가설

이 연구는 서울시 동별 소득자료를 얻기 어려

워 소득을 대변할 수 있는 동별 주거용 토지가격을 설명변수로 하여 기존 연구가 논의하는 소득가설을 검증하였다. 아울러 경제활동의 생산성을 대리할 수 있는 상업업무용 토지가격을 통해 생산성 수준이 전력 소비에 미치는 효과를 측정하였다.

먼저, <표 5>와 <표 6>의 모형 1부터 4까지에서 보듯, 주거용과 상업업무용 토지가격이 높아질수록 전력 소비는 낮아졌다. 즉, 주거용 토지가격이 1% 상승할수록 전력 소비는 0.03~0.04% 감소하였고, 상업업무용 토지가격이 1% 높아질수록 전력 소비는 0.02~0.03% 하락하였다. 이러한 모형의 결과는 밀도와 부동산개발 규모의 효과를 통제했을 때 소득과 생산성을 대리할 수 있는 토지가격이 상승할수록 전력 소비는 감소하는 관계를 보인다고 해석할 수 있다. 다른 변수를 통제했을 때 주택 가격이 높거나 상업업무용 토지가격 지불 능력이 높은 활동이 많은 지역의 전력 소비가 낮음을 의미한다. 그러나 이 결과는 기존의 소득가설과 상반되기에 해석에 유의하여야 한다. 먼저, 서울시의 경우 토지가격의 효과보다 밀도와 뒤에서 살펴볼 부동산개발 규모의 효과가 전력 소비를 크게 좌우한다고 볼 수 있다. 또한, 주거용 토지가격이 소득을 완전하게 대체할 수 없다는 점과 상업업무용 토지가격과 생산성 간 차이가 있을 수 있다는 점을 고려하여 이 모형의 결과는 잠정적인 결과로 받아들여야 할 것이다.

앞으로 가구별 소득과 기업별 생산성 자료를 이용해 소득과 생산성이 전력 소비에 미치는 효과를 엄밀하게 분석할 필요가 있다.

(4) 부동산개발 가설

<표 5>와 <표 6>의 부동산개발 특성에서 주거용, 상업업무용, 산업용 건물 연면적 변수를 통해 부동산개발 가설을 검증하였다. 부동산 유형별 개

발 비중이 전력 소비에 영향을 줄 수 있다는 주장이다. <표 5>와 <표 6>의 2005년과 2006년 모형 1, 2, 3, 4에서 볼 수 있듯이 주거용, 상업업무용, 산업용 건물 연면적이 증가하면 전력 소비 또한 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 각 용도별로 효과의 강도는 달랐다. 상업업무용 건물 연면적의 증가로 인해 전력 소비가 가장 크게 늘어났으며 그 다음이 주거용이며, 산업용 부동산의 효과는 상대적으로 작았다. 즉, 상업업무용 건물 연면적이 1% 증가할수록 전력 소비는 0.37~0.48% 증가한 반면 주거용 건물 연면적이 1% 높아질수록 전

력 소비는 0.24~0.31% 상승하였다. 산업용 건물 연면적이 1% 증가할수록 전력 소비는 0.04~0.06% 상승하는 데 그쳤다. 이는 서울시 부동산개발의 유형 가운데 상업업무용과 주거용 부동산개발이 늘어나면 전력 소비가 증가할 것임을 시사한다.

2) 도시가스 소비모형

(1) 개요

서울시 동별 도시가스 소비모형은 앞의 전력 소비모형과 마찬가지로 2005년과 2006년으로 각

<표 5> 2005년 서울시 전력 소비모형

구분	모형 1			모형 2		
	OLS	SAR	SEM	OLS	SAR	SEM
인구 및 고용특성						
log(인구밀도)	-0.35***	-0.34***	-0.35***			
log(가구밀도)				-0.32***	-0.31***	-0.32***
log(고용밀도)	0.17***	0.16***	0.17***			
log(기업밀도)				0.10**	0.10**	0.10**
소득 및 생산성 특성						
log(주거용 토지가격)	-0.04***	-0.04***	-0.04***	-0.03***	-0.03***	-0.04***
log(상업업무용 토지가격)	-0.02***	-0.02***	-0.02***	-0.03***	-0.03***	-0.03***
부동산개발 특성						
log(주거용 건물 연면적)	0.30***	0.29***	0.31***	0.25***	0.25***	0.26***
log(상업업무용 건물 연면적)	0.40***	0.39***	0.39***	0.48***	0.46***	0.47***
log(산업용 건물 연면적)	0.04***	0.05***	0.05***	0.05***	0.05***	0.06***
Spatial Lag와 Error						
Spatial Lag (ρ)		0.06			0.08**	
Spatial Error (λ)			0.22***			0.22***
상수	11.78***	10.88***	11.8***	11.51***	10.31***	11.56
사례 수	522					
결정계수	0.79	0.79	0.80	0.78	0.79	0.79
Log Likelihood	-180.26	-179.18	-175.26	-184.94	-182.91	-180.10

* p < 0.10, ** p < 0.05, *** p < 0.01

<표 6> 2006년 서울시 전력 소비모형

구분	모형 3			모형 4		
	OLS	SAR	SEM	OLS	SAR	SEM
인구 및 고용특성						
log(인구밀도)	-0.36***	-0.35***	-0.37***			
log(가구밀도)				-0.33***	-0.32***	-0.33***
log(고용밀도)	0.20***	0.19***	0.20***			
log(기업밀도)				0.11***	0.12***	0.12***
소득 및 생산성 특성						
log(주거용 토지가격)	-0.03***	-0.03***	-0.03***	-0.03***	-0.03***	-0.03***
log(상업업무용 토지가격)	-0.03***	-0.03***	-0.03***	-0.03***	-0.03***	-0.03***
부동산개발 특성						
log(주거용 건물 연면적)	0.31***	0.30***	0.31***	0.24***	0.24***	0.24***
log(상업업무용 건물 연면적)	0.38***	0.37***	0.37***	0.48***	0.46***	0.47***
log(산업용 건물 연면적)	0.04**	0.04***	0.04***	0.05***	0.05***	0.05***
Spatial Lag와 Error						
Spatial Lag (ρ)		0.06*			0.09*	
Spatial Error (λ)			0.20***			0.2***
상수	11.81***	10.82***	11.83***	11.67***	10.26***	11.73***
사례 수	522					
결정계수	0.79	0.79	0.79	0.78	0.79	0.79
Log Likelihood	-163.78	-162.37	-159.49	-172.80	-169.94	-168.58

* $p < 0.10$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$

기 나누어 분석하였다(<표 7>, <표 8>). 각 사례수는 522개이며, 같은 설명변수를 넣어 OLS모형, SAR, SEM의 결과를 얻었다. 먼저, 모형의 결정계수는 0.44에서 0.49 사이로 전력 소비모형과 비교해 보면 상대적으로 낮은 편이다. 자료의 한계로 인해 도시가스 소비를 좌우하는 다른 변수를 모형에 포함하지 못했기 때문으로 보인다. 예를 들어 도시가스는 난방용으로 사용되는 비중이 높기 때문에 계절별 소비량이 있다면 보다 설명력이 높은 모형을 얻을 수 있을 것이다. 모형 결과를 보면, SAR과 SEM의 ρ 와 λ 는 각각 유의수준 5% 이내에서 모두 통계적으로 유의미하였다. 아울러

SAR과 SEM의 Log Likelihood 값이 OLS보다 낮아 앞으로 전력 소비모형과 마찬가지로 공간회귀 분석의 사용이 적합함을 보여주고 있다.

(2) 밀도가설

2005년과 2006년 서울시 동별 도시가스 소비 모형에서 밀도가설을 검증하기 위해 앞의 전력 소비모형과 마찬가지로 인구밀도, 가구밀도, 고용밀도, 기업밀도를 설명변수로 채택하였다. 또한, <표 7>과 <표 8>의 모형 1과 3에서 인구와 고용밀도, 모형 2와 4에서 가구밀도와 기업밀도를 쌍으로 각각 포함한 후 분석하였다. <표 7> 모형 1의 SEM

에서만 유의수준 5%에서 인구밀도의 증가는 도시가스 소비를 낮추는 반면 <표 8> 모형 3에서 세 모형 모두 인구밀도의 증가가 도시가스 소비를 감소시키는 것으로 나타났다. 특히, 모형 3 SEM에서 보듯 인구밀도가 1% 증가할수록 도시가스 소비는 0.17% 낮아졌다. 고용밀도는 모형 3의 SEM에서만 5% 유의수준에서 통계적으로 유의미했는데 그 결과는 고용밀도가 1% 증가할수록 도시가스 소비는 0.13% 증가함을 보여주고 있다. 모형 2와 4는 가구밀도와 기업밀도 효과를 보여준다. 결과에 따르면, 가구밀도는 일관되게 도시가스 소비를 낮추지만 기업밀도는 도시가스 소비를 증가시키는 것으로 분석되었다. 즉, 가구밀도가 1% 증가할수록 도시가스 소비는 0.19~0.26% 감소하고 기업밀도가 1% 높아질수록 도시가스 소비는 0.14~0.19% 상승하였다. 요약하자면, 가구밀도 증가는 도시가스 소비를 낮추는 반면 기업밀도 증가는 도시가스 소비를 높이는 것으로 나타났다.

(3) 소득 및 생산성 가설

도시가스 소비모형에서 소득 및 생산성 특성은 전력 소비모형과 크게 다른 결과를 보여주고 있다. 먼저, 소득 대리변수인 주거용 토지가격은 <표 7> 모형 1의 SEM을 제외하고 통계적 유의미성이 없었다. 그 결과를 보면 밀도와 부동산개발 특성을 통제했을 때 주거용 토지가격이 1% 높아질수록 도시가스 소비는 0.02% 감소하였다. 반면, 2006년 SEM에서 통계적 유의미성이 없었지만 모형 1에서 4까지 상업업무용 토지가격이 1% 상승할수록 도시가스 소비는 0.02~0.03% 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 2005년 모형에서 더욱 안정적인 통계적 유의미성을 보였다. 모형 결과를 보면, 다른 변수를 통제했을 때 주거용 토지가격은 도시가스 소비에 거의 영향을 주지 않는

반면, 상업업무용 토지가격이 높을수록 도시가스 소비가 증가하는 패턴을 보여주고 있다. 이러한 결과는 이미 전력 소비모형에서 언급한 바와 같이 완전하게 소득과 생산성을 대변하지 못할 수 있다는 점에서 제한적으로 해석하는 것이 바람직할 것이다. 향후 가구 소득과 개별 기업의 생산성을 측정할 수 있는 변수를 통해 보다 엄밀한 연구가 필요한 영역이다.

(4) 부동산개발 가설

앞의 전력 소비모형과 마찬가지로 <표 7>과 <표 8>의 부동산개발 특성에서 주거용, 상업업무용, 산업용 건물 연면적 변수를 통해 부동산개발 가설을 검증하였다. 부동산개발의 유형별 연면적 규모가 얼마나 도시가스의 소비를 좌우하는지 규명하는 것이다. 2005년과 2006년의 모형 1, 2, 3, 4에서 볼 수 있듯이 주거용, 상업업무용 건물 연면적이 많아질수록 도시가스 소비는 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 주거용 연면적과 상업업무용 건물 연면적이 1% 증가할수록 도시가스 소비는 각각 0.21~0.30%, 0.30~0.44% 상승하였다. 주거용보다 상업업무용 건물 연면적 증가 효과가 컸다. 상업업무용 건물 연면적의 증가로 인해 도시가스 소비가 늘어났지만 그 효과는 2006년보다 2005년에 강하였다. 한편, 산업용 건물 연면적 변수는 모형 1의 OLS모형만 제외하고 나머지 모형에서 산업용 건물 연면적 증감으로 인한 도시가스 소비 변화는 통계적으로 유의미하지 않았다.

V. 결론 및 정책제안

이 연구는 기존 연구를 검토한 후 2005년과 2006년 서울시 전력과 도시가스 에너지 소비 자료에 공간계량모형을 적용하여 밀도가설, 소득 및

<표 7> 2005년 서울시 도시가스 소비모형

구분	모형 1			모형 2		
	OLS	SAR	SEM	OLS	SAR	SEM
인구 및 고용특성						
log(인구밀도)	-0.08	-0.08	-0.14**			
log(가구밀도)				-0.23***	-0.23***	-0.26***
log(고용밀도)	-0.01	-0.004	0.07			
log(기업밀도)				0.16**	0.17**	0.19***
소득 및 생산성 특성						
log(주거용 토지가격)	-0.02	-0.02	-0.02*	-0.02	-0.02	-0.02
log(상업업무용 토지가격)	0.03**	0.02**	0.02*	0.03***	0.02**	0.02*
부동산개발 특성						
log(주거용 건물 연면적)	0.22***	0.21***	0.25***	0.29***	0.29***	0.30***
log(상업업무용 건물 연면적)	0.44***	0.42***	0.38***	0.34***	0.32***	0.32***
log(산업용 건물 연면적)	-0.04*	-0.04	-0.02	-0.04	-0.03	-0.01
Spatial Lag와 Error						
Spatial Lag (ρ)		0.12**			0.13**	
Spatial Error (λ)			0.03***			0.3***
상수	9.10***	7.37***	9.19***	9.19***	7.36***	9.27***
사례 수	522					
결정계수	0.46	0.47	0.49	0.47	0.47	0.49
Log Likelihood	-423.54	-421.31	-415.26	-421.68	-419.14	-412.81

* p < 0.10, ** p < 0.05, *** p < 0.01

<표 8> 2006년 서울시 도시가스 소비모형

구분	모형 3			모형 4		
	OLS	SAR	SEM	OLS	SAR	SEM
인구 및 고용특성						
log(인구밀도)	-0.10*	-0.10*	-0.17***			
log(가구밀도)				-0.19***	-0.20***	-0.22***
log(고용밀도)	0.04	0.04	0.13**			
log(기업밀도)				0.14**	0.15***	0.17***
소득 및 생산성 특성						
log(주거용 토지가격)	-0.01	-0.01	-0.01	-0.004	-0.004	-0.01
log(상업업무용 토지가격)	0.02*	0.02*	0.01	0.02*	0.02*	0.01
부동산개발 특성						
log(주거용 건물 연면적)	0.22***	0.21***	0.25***	0.26***	0.25***	0.26***
log(상업업무용 건물 연면적)	0.37***	0.35***	0.31***	0.32***	0.30***	0.31***
log(산업용 건물 연면적)	-0.03	-0.03	-0.01	-0.03	-0.02	-0.001
Spatial Lag와 Error						
Spatial Lag (ρ)		0.16***			0.17***	
Spatial Error (λ)			0.36***			0.34***
상수	9.42***	7.18***	9.53***	9.50***	7.18***	9.64***
사례 수	522					
결정계수	0.44	0.45	0.48	0.45	0.46	0.48
Log Likelihood	-393.98	-390.26	-381.47	-392.57	-388.55	-380.80

* p < 0.10, ** p < 0.05, *** p < 0.01

생산성 가설, 부동산개발 가설 등 3개의 주요 가설을 검증해 보았다. 그 연구결과를 3개의 가설 측면에서 요약하면, 먼저, 전력 소비모형에서 인구와 가구밀도가 증가할수록 전력 소비는 감소하는 반면 고용밀도와 기업밀도가 증가할수록 전력 소비는 상승하였다. 그러나 인구와 가구밀도의 전력 소비 감소효과가 고용과 기업밀도의 전력 소비 증가효과보다 큰 것으로 나타났다. 도시가스 소비모형에서 인구밀도보다 가구밀도의 증가가 통계적 유의성 측면에서 안정적으로 도시가스 소비 감소 효과를 보였으며 고용밀도보다 기업밀도의 증가가 도시가스 소비를 높이는 것을 확인하였다. 이러한 결과에서 보듯 밀도 측면에서 보면 전력과 도시가스의 소비에 영향을 주는 요인이 달랐다. 둘째, 소득 및 생산성 가설에서 보면, 전력 소비는 주거용 토지가격과 상업업무용 토지가격이 높아질수록 감소하는 반면 도시가스 소비는 대체로 상업업무용 토지가격이 오를수록 증가하였다. 이러한 결과는 서울시의 밀도와 부동산개발 변수를 통제했을 때 지가의 변화와 에너지 소비 간 관련성을 보여주고 있다. 또한 연구 결과에 의하면, 서울시의 경우 2005년과 2006년 에너지 소비 변화에 있어 밀도와 부동산개발 효과가 소득이나 생산성 효과보다 크다. 그러나 지가가 소득과 생산성을 완전히 대변하지 못한다는 점을 감안하여 제한적으로 결과를 받아들이고 향후 가구와 기업 수준의 소득과 생산성이 에너지 소비와 탄소배출에 영향을 미치는 효과를 엄밀하게 논의할 필요가 있다. 끝으로, 부동산개발 가설로 보면 동별 주거용, 상업업무용, 산업용 부동산 건물 연면적이 증가할수록 전력소비도 늘어났다. 그러나 모형의 계수로 보면 상업업무용, 주거용, 산업용 순으로 효과가 크게 나타났음을 알 수 있다. 도시가스 소비에도 상업업무용과 주거용 부동산 건물 연면적의 효과

가 크지만, 산업용 부동산 건물 연면적 효과는 통계적으로 유의미하지 않았다.

실증연구의 결과는 효과적인 대응책을 구상하는 데 토대가 된다. 연구결과를 바탕으로 다음과 같이 향후 중앙정부와 서울시의 정책과제를 제시하고자 한다. 첫째, 에너지 소비 특성에 맞는 정책 개발이 시급하다. 분석모형 결과에서 보듯, 에너지별 소비량과 탄소배출에 영향을 미치는 요인과 각 요인의 효과 정도가 각기 다르다. 인구, 가구, 고용, 기업 밀도와 부동산 유형별 건축물 연면적은 공통의 영향요인이지만 소득과 생산성을 대리하는 지가 변수의 효과는 전력과 도시가스 소비에 각기 다른 효과를 주고 있다. 따라서 에너지 소비 특성을 보다 면밀하게 검토하고 각 특성에 적합한 맞춤형 에너지 소비 저감대책을 구상하여야 한다.

둘째, 이 연구에서 확인한 바와 같이 에너지 소비구조에서 가구밀도 효과가 일관되게 중요한 것으로 나타났다. 또한 기존 연구에 의하면 에너지 소비구조에서 가구특성 변수의 영향이 크다고 한다. 따라서 정책당국은 가구의 입지, 통근통행행태, 가구의 에너지 소비 스타일에 대한 면밀한 분석과 대응이 필요하다. 특히, 연령구조, 가구원 수, 소득수준 등 가구 특성에 의한 에너지 소비와 교통 이용에 의한 에너지 소비를 구분하여 각기 다른 전략을 실행해야 한다. 가구 특성을 고려한 대응책으로 에너지 저감형 주택 공급, 에너지 가격에 대한 부담 차등화, 대체에너지 개발과 공급, 에너지 저소비 홍보 강화 등의 방안을 생각해 볼 수 있다. 반면, 통근통행이나 기타 통행에 의한 에너지 소비의 경우 도시공간구조와 교통체계의 개편으로 접근해야 한다. 이를 구체적으로 보면, 토지이용의 혼합, 대중교통 서비스 개선, 친환경 교통수단의 확충 등이다.

셋째, 소득별로 에너지 비용 부담을 달리하는

방안도 검토해야 한다. 이 연구모형 결과에서 확인했듯이 소득과 생산성이 에너지별 소비에 주는 효과는 다르다. 따라서 소득과 생산성, 라이프스타일, 에너지 소비를 서로 연계한 대책 마련이 시급하다. 정부는 이미 소득 및 생산성 관련 자료, 가구와 기업 특성 자료, 에너지 소비량에 대한 정보를 갖고 있기 때문에 소득과 생산성 수준별로 에너지 비용 부담을 다르게 책정할 수 있다. 이는 궁극적으로 탄소세 부과로 확장하여 적용할 수 있을 것이다. 결국 에너지 소비자의 특성에 기반하여 보다 효과적인 대안의 모색을 추진해야 한다.

넷째, 이 연구의 모형에서 밝힌 바와 같이 주거, 상업업무, 산업 등 부동산 유형별 비중이 에너지 소비에 미치는 영향이 크다는 점을 감안하여 그린빌딩제도의 본격적인 도입이 시급하다. 현재 일부 친환경건물에 대한 제도를 시행하고 있으나 그 호응도는 아직 미진한 상황이다. 앞으로 그린빌딩 제도는 친환경기술을 적용하여 에너지 소비가 적은 건축물에 대한 인증, 에너지 저감 건축기술 개발에 대한 지원, 친환경 건축물에 대한 유인 제공 등 다양한 정책을 구상할 수 있다. 특히, 에너지 저감형 건축물의 경우 초기 투자비용이 많고 회수 기간이 길어 민간 개발이 저조하였으나 정부의 유인 제공과 더불어 친환경 건축물에 대한 가구와 기업의 선호가 증가하면서 최근 선진국을 중심으로 많은 관심을 얻고 있다. 에너지 소비가 적은 건축물 정책에서 핵심 쟁점은 어떻게 이 건축물이 기여하는 사회적 이익을 사적 이익으로 돌려주는 유인 구조를 만들 것인가이다. 그러나 그린빌딩을 건설하는 것이 반드시 에너지 절약으로 이어지지 않는다는 반론도 있다. 즉, 그린빌딩을 지어도 에너지 소비의 절대량이 증가하면 결국 탄소배출량

도 상승한다는 것이다.

끝으로, 일반 시민에게 개별 에너지 소비 현황, 탄소배출량, 기후변화에 미치는 영향에 대한 정보를 제공하는 방안도 필요하다. 이미 선진국의 경우 인터넷의 특정 홈페이지에 개인의 소비정보를 입력하면 즉시 탄소배출량에 대한 정보를 보여준다. 예를 들어, 영국의 Carbon Footprint Calculator 홈페이지⁴⁾는 개인이나 가구 특성에 따른 탄소배출 변화에 대한 정보를 제공한다. 우리의 경우 인터넷 홈페이지나 스마트폰용 애플리케이션을 통해 이러한 정보를 전달하여 에너지 소비 억제를 유도할 수 있다.

향후 연구과제는 크게 네 개의 방향으로 생각해 볼 수 있다. 첫째, 전력과 도시가스 소비는 계절별로 달라질 수 있으나 이 연구는 자료의 한계로 인해 이에 대한 분석을 하지 못했다. 앞으로 계절별 에너지 소비 자료를 얻을 수 있다면 계절효과도 포착할 수 있을 것이다. 둘째, 주거, 상업업무용, 공업용 등 건축물과 교통부문의 탄소배출량을 각각 구분해 내는 것이다. 아울러 건축물과 교통 특성이 탄소배출량 변화에 미치는 영향도 미시 자료를 통해 규명되어야 한다. 셋째, 에너지 소비와 탄소배출량에 영향을 주는 요인은 국지적으로 크게 다를 수 있어 이에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 따라서 앞으로 지역별 인구 및 가구, 교통통행, 소득수준, 산업구조 등을 엄밀하게 포착하고 그 특성에 따라 에너지 소비와 탄소배출량이 어떻게 달라지는지 규명하는 연구가 절실하다. 끝으로, 탄소배출을 실질적으로 감소시킬 수 있는 정책의 모색과 정책 간 조율문제이다. 현재까지 다양한 정책을 실행해 보았으나 기대보다 효과가 크지 않은 상황이다. 따라서 탄소배출 특성에 적

4) www.carbonfootprint.com 참조

합한 정책 마련과 동시에 각 정책 간 중복이나 충돌을 피할 수 있도록 어떻게 조율할 것인가가 주요 쟁점이 될 전망이다.

이 연구는 서울시 522개 행정동의 전력과 도시가스 에너지 소비량, 인구 및 고용 특성, 소득 및 생산성(토지가격) 특성, 부동산개발 특성에 대한 자료를 이용하여 각 에너지 소비에 영향을 미치는 핵심요인의 영향력을 규명하고자 하였다. 그러나 적절한 정책을 모색하기 위한 연구라고 하기에 미진한 부분이 여전히 많다. 이미 여러 차례 언급한 바와 같이 자료의 한계로 인해 좀 더 다양한 변수를 이용하여 미시적 수준의 관련성을 연구하지 못했다. 향후 장기 시계열 미시단위의 자료를 확보할 경우 보다 풍부한 분석과 적절한 대안의 모색이 가능할 것으로 기대한다.

참고문헌

- 국토해양부, 2005~2006, 『표준지 공시지가』.
- 김성우, 2010. “공간계량모형에 따른 주택 가격 추정에 관한 연구: 부산시 아파트 실거래가를 중심으로”, 『한국공공관리학보』, 24(3): 119~137.
- 남기찬·김홍석·손민수, 2008, “인구압축도와 교통에너지와의 관계 연구”, 『국토계획』, 43(2): 155~168.
- 남기찬·임업·김홍석·이제선, 2010, “서울시 도시구조 변화에 따른 탄소배출모형구축과 성장관리”, 『지역연구』, 26(3): 99~114.
- 반영식·이영재·이건영, 1990, “건축물의 에너지 소비량에 관한 연구: 사무소용 건물과 공동주택을 중심으로”, 『대한건축학회논문집』, 6(3): 171~179.
- 서울시, 2005~2006a, 『서울통계연보』.
- _____, 2005~2006b, 『사업체 기초통계조사』.
- _____, 2008a, 『서울시 과세대장』.
- _____, 2008b, 『기후 에너지지도』(2차년도).
- _____, 2011, 『서울통계연보』.
- 어재훈·김기태·정길섭·유환희, 2010, “저탄소 도시관리를 위한 탄소배출과 토지이용변화 분석”, 『한국지형공간정보학회지』, 18(1): 129~134.
- 이성우·윤성도·박지영·민성희, 2006, 『공간계량모형응용』, 박영사.
- 이정진, 2004, 『환경경제학』, 박영사.
- Altshuler, A., 1979, *The Urban Transportation System*, MIT Press.
- Anderson, W., Kanaroglou, S., and Miller, E., 1996, “Urban Form, Energy and the Environment: A Review of Issues, Evidence and Policy”, *Urban Studies*, 33: 7~35.
- Brown, M., Southworth, F. and Sarzynski, A., 2009, “The Geography of Metropolitan Carbon Footprints”, *Policy and Society*, 27: 285~304.
- Dhakal, S., 2009, “Urban Energy Use and Carbon Emissions from Cities in China and Policy Implications”, *Energy Policy*, 37: 4208~4219.
- Dodman, D., 2009, “Blaming cities for climate change? An analysis of urban greenhouse gas emissions inventories”, *Environment and Urbanization*, 21(1): 185~201.
- Eichholtz, P., Kok, N. and Quigley, J., 2010, “Doing Well by Doing Good? Green Office Buildings”, *American Economic Review*, 100(6): 2494~2511.
- Energy, Information Administration, 2007, *Annual Energy Review 2007*.
- _____, 2011, *International Energy Outlook 2010*.
- Ewing, R. and Rong, F., 2008, “The Impacts of Urban Form on US Residential Energy Use”, *Housing Policy Debate*, 19: 1~30.
- Geltner, D. and Miller, N., 2006, *Commercial Real Estate Analysis and Investments*, South-Western.
- Getis, A. and Ord, J., 1995, “The Analysis of spatial Association by Use of Distance Statistics”, *Geographical Analysis*, 24: 189~206.
- Glaeser, E., 2011, *Triumph of The City*, The Penguin Press.
- Glaeser, E. and Kahn, M., 2010, “The Greenness of Cities: Carbon Dioxide Emission and Urban Development”, *Journal of Urban Economics*, 67: 404~418.
- Golob, T. and Brownstone, D., 2009, “The Impacts of Residential Density on Vehicle Usage and Energy Consumption”, *Journal of Urban Economics*, 65: 91~98.
- Gujarati, D. and Porter, D., 2009, *Basic Econometrics*,

- McGraw-Hill.
- Holland, S. and Mansur E., 2008, "Is Real-Time Pricing Green? The Environmental Impacts of Electricity Demand Variance", *Review of Economics and Statistics*, 90(3): 550~561.
- Holmes, T., 2007, "Eco-visualization: Combining Art and Technology to Reduce Energy Consumption", *Proceedings of the 6th ACM SIGCHI conference on Creativity & Cognition*, 153~162.
- Mindali, O., Raveh, A. and Salomon, I., 2004, "Urban Density and Energy Consumption: A New Look at Old Statistics", *Transportation Research Part A*, 38: 143~162.
- Norman, J., Heather L. MacLean, Asce, M. and Kennedy, C., 2006, "Comparing High and Low Residential Density: Life-Cycle Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions", *Journal of Urban Planning and Development*, 132(1): 10-21.
- Ord, J. and Getis, A., 1995, "Local spatial auto-correlation statistics: Distributional Issues and an Application", *Geographical Analysis*, 27: 286~306.
- O'Sullivan, A., 2009, *Urban Economics*, McGraw-Hill.
- Sovacool, B. and Brown, M., 2010, "Twelve Metropolitan Carbon Footprints: A Preliminary Comparative Global Assessment", *Energy Policy*, 38: 4856~4869.
- Stern, N., 2008, "The Economics of Climate Change", *American Economic Review*, 98: 1~38.
- www.carbonfootprint.com

원 고 접 수 일 : 2011년 7월 4일
1차심사완료일 : 2011년 8월 31일
2차심사완료일 : 2011년 9월 26일
최종원고채택일 : 2011년 11월 3일