

계량경제적 접근을 통한 도시림의 도시열섬 완화효과 분석

김동현¹ · 김의경^{2*} · 양준석¹ · 김현근³ · 신혜진¹

¹경상대학교 대학원 산림환경자원학과, ²경상대학교 환경산림과학부(농업생명과학연구원),
³국립산림과학원 녹색경제연구과

An Econometric Analysis of Mitigating Urban Heat Island Effect with Urban Forest

Dong-Hyeon Kim¹, Eui-Gyeong Kim^{2*}, Jun-Seok Yang,¹
Hyeon-Geun Kim³ and Hae-Jin Shin¹

¹Department of Forest Environmental Resources, Graduate School, Gyeongsang National University,
Jinju 600-701, Korea

²Division of Environmental Forest Science(Institute of Agriculture and Life Science),
Gyeongsang National University, Jinju 600-701, Korea

³Division of Forest Economics, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

요약: 이 연구는 도시 열섬현상과 산림과의 관계를 알아보기 위해 수행하였으며, 전력소비모형과 기온변화모형의 두 가지 모형을 이용하여 분석하였다. 전력소비모형은 전국적 차원에서 열섬현상 완화를 위한 산림의 역할을 찾아내는 것이고, 기온변화모형은 열섬현상이 나타나고 있는 대도시에서 이를 완화하기 위한 산림의 역할을 계량경제적 분석방법으로 찾아내는 데 있다. 분석 결과를 보면 도시 내의 산림이라 할 수 있는 생활권도시림면적과 열섬현상과는 부의 상관관계에 있다는 것을 두 모델에서 모두 확인할 수 있었다. 특히 1인당 생활권도시림이 1 m² 증가하면 전국 평균 소비전력량은 0.02MWh 감소하며, 특광역시 내의 여름철 한낮 온도를 1.15°C 감소시키는 것으로 나타났다.

Abstract: This study was conducted to identify the relationship between urban heat island effect and forest, analyzing electricity consumption model and temperature change model. Electricity consumption model was adopted to clarify a role of forests in alleviating the heat island effect at the national scale, while temperature change model was adopted to clarify a role of forests in mitigating urban heat island effect on metropolis with using econometric analysis. The analysis results from both models clearly show a negative correlation between the urban forests within living areas and heat island effect. In particular, when urban forests within living area per person increases by 1 m², the average municipal electricity consumption decreases by 0.02MWh and the summer daytime temperature for metropolitan cities decreases by 1.15°C.

Key words : heat island, urban forests within living area, econometric analysis

서 론

우리나라는 1960년대 1차 경제개발계획을 시작으로 ‘한강의 기적’이라 불리는 눈부신 경제성장을 이룩하였다. 이로 인해 삶의 질이 향상되었지만 문화, 정치, 경제가 서울과 같은 대도시에 집중되었다. 그로 인해 이촌향도와 같은 말로 대변되는 도시집중화 현상이 나타나게 되었다. 이로 인

해 집중화와 불균형의 부작용이 발생하였다(김영동, 1986).

인구집중화와 경제성장은 건물의 과밀화와 같은 도시 구조의 변화를 초래하였다. 또한 경제 성장은 필연적으로 에너지 소비량을 증가시킨다. 에너지의 과잉소비와 인구 과밀화로 인해 도시 내에서 열이 과도하게 발생하게 되었으며 그 결과, 열섬현상이라는 문제가 대두되었다.

이 연구의 주요 관점인 도시열섬 현상의 문제점은 두 가지로 대별되는데, 첫째, 도시열섬현상은 특수한 도시기후의 형성으로 에너지 균형을 왜곡시키고 에너지 균형을 유지하기 위한 에너지의 추가 소비의 유인이 된다(김운수, 2010). 둘째, 아파트 단지 내 열섬현상과 대기오염과의 관

이 논문은 2009년도 산림청 연구용역 “산림환경서비스 지불제 연계를 고려한 산림공익기능 평가기법 개발 연구”의 일부로 수행되었음.

*Corresponding author
E-mail: egkim@gnu.kr

계를 구명한 연구 결과, 저층의 대기온보다 고층의 온도가 더 높아 대기오염물질이 확산되지 않아서 저층에 장기간 체류하는 것으로 문제점이 있다(장은숙, 2005). 에너지 균형을 위한 에너지의 추가소비와 이로 인한 대기오염물질의 확산 저하로 인해 오염물질이 도심의 대기 중 체류한다는 것은 분명 문제라고 볼 수 있다.

Rosenzweig(2006) 등은 열섬현상이 지역적 규모에서 에너지 수요, 대기의 질 그리고 국민건강에 영향을 미친다고 언급하였다. 이를 구체적으로 설명하면 에너지 수요의 증대는 여름철 냉방을 위한 전력사용량의 증대로 볼 수 있으며, 국민건강의 영향은 도시 열대야 현상에 의한 수면장애 등으로 나타나는 스트레스로 설명할 수 있다. 그러면 이러한 열섬현상을 발생시키는 원인에 대한 구명과 함께 이를 완화하는 것이 중요하다.

열섬현상에 대한 기존 연구는 관점에 따라 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 그 중 하나는 열섬현상의 발생 원인에 대한 연구가 그것이다. 열섬현상의 원인을 분석한 논문은 주로 특정 대상지를 선정하여 열섬현상에 영향을 미칠 것으로 판단되는 변수에 대한 정량적 측정을 통해 열섬현상의 원인을 구명하고자 하는 노력이 주를 이루고 있다. 그리고 정성모(2008) 등은 청주시를 대상으로 모델에 사용될 변수를 실측하여 회귀분석을 이용하여 분석하였다. 이 이외에도 특정 지역에 한정하여 연구를 수행한 논문이 다수 존재하는 것으로 확인되었다.

열섬현상에 대한 다른 관점은 열섬현상에 대한 완화 방안에 관한 논의가 그것이다. 류을렬(2006) 등은 열섬현상을 완화시키기 위한 방법 중 하나로 녹지 피복률을 증가시키는 것이 그 대안이라고 주장하였으며, 이를 위한 정책적 노력이 중요하다고 언급하였다. 녹지 조성 이외에 열섬현상을 완화시킬 수 있는 대안으로 도시 구조물의 반사율을 높이는 방법(이태원, 2001)이 있으나, 도시 건축 구조물에 대한 논의는 이 연구의 주요 관점과 관련이 없기 때문에 논외로 한다.

외국의 경우, 미국은 이미 1960년대부터 열섬현상에 대한 활발한 연구가 진행되기 시작하였는데, Oke(1967)는 도시규모와 열섬과의 관계를 자동차를 이용하여 실측하여 수집된 통계 자료를 바탕으로 연구를 수행하였다. 그리고 Bornstein(1968)은 열섬현상이 발생하는 지역의 대기온도를 실측하여 분석하였다. 조사방법에 있어서 전자는 우리나라에서 일반적으로 사용되는 수평적 조사방법과 그 맥을 같이하나, 후자는 수직적 관점에서 열섬현상을 고도에 따라 기온을 관측하여 연구를 수행한 것이 흥미롭다.

이 연구의 목적은 기존의 특정지역에 국한하여 자료를 수집하는 방법에서 벗어나 우리나라 도시 열섬현상에 대한 계량적 접근방법을 이용하여 열섬현상과 도시 내 산림과의 관계를 구명하고자 한다.

연구내용 및 방법

1. 연구내용

1) 연구대상의 범위

연구범위는 크게 두 가지 관점에서 출발한다. 첫째, 우리나라 전체를 대상으로 대도시 및 중·소도시¹⁾를 대상으로 하였으며, 둘째, 특·광역시²⁾의 소행정구역 단위인 '구'를 대상으로 연구범위를 한정하였다. 위의 연구범위에 따라 두 가지 모형으로 나누어 분석하였다.

2) 변수선정 기준

우선 기존 연구에서 사용된 변수에 대하여 장은숙(2006)은 도시구조와 풍환경(風環景),²⁾ 박경훈(1999)은 녹지피복과 인공구조물, 조성모(2009)는 공업지역, 상업지역, 거주지역 등 도시 내 용도지역의 피복형태에 관하여 변수를 설정하였다. 앞서 언급한 연구논문 이외에 다양한 논문에서 다양한 변수를 활용하여 분석한 것을 확인할 수 있었다. 하지만 이들 변수들은 양적인 통계자료로 구축되어 있지 않았으며, 지역적인 한계로 인해 전국을 대상으로 하는 이 연구의 범위로 인해 변수로 채택하여 적용하기 까다로운 측면이 있다.

이와 같이, 기존 문헌에서 채택된 변수의 관측치는 측정 장비를 이용하여 일시적으로 실측한 자료를 바탕으로 분석이 이루어지고 있다. 이는 특정지역에 한정하여 열섬현상을 분석하는 데에는 문제가 없지만 우리나라 전체를 대상으로 하거나 서울을 포함한 6개 광역시와 같이 그 범위가 넓은 때는 자료수집의 한계에 직면하게 된다.

따라서 이 연구를 위한 변수선정 기준은 정부기관에서 관측한 통계 자료를 이용하여 분석하였다. 정부에서 제공하는 통계자료를 이용하면 서울을 포함한 특, 광역시뿐만 아니라 중소도시를 포함하기 때문에 지역별로 통계자료의 결측치가 적어 대상지역의 분석이 용이하다는 장점이 있다.

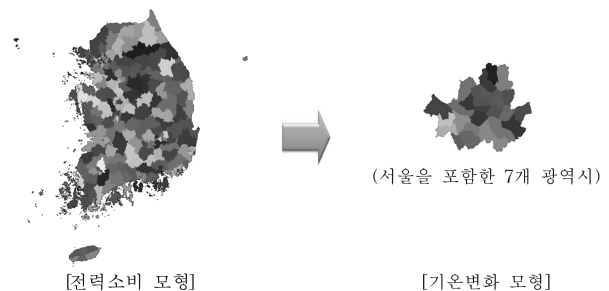


그림 1. 모형별 연구범위.

¹⁾ 도서지방은 제외하였다.

²⁾ 풍환경(風環景): 풍속, 풍향 등을 이룸

3) 모형 설정

(1) 전력소비 모형

가. 전력소비 모형의 의미

전력소비 모형의 연구범위는 7월~8월 여름철에 있어서 우리나라 전체 중소도시 및 서울을 포함한 특, 광역시이다. 모형에 대한 기본적 아이디어는 Rosenzweig(2006) 등이 이미 열섬현상의 발달에 전력수요와 관련이 있다는 점에 착안하여, 전력수요를 전력소비량으로 보았다. 이는 여름철이라는 환경적 상황을 고려하여, 열섬현상이 뚜렷하게 나타나는 대도시 지역이 중소도시 지역보다 전력소비량, 특히 냉방을 위한 전력소비량에서 그 차이를 보일 것으로 기대되었기 때문이다. 따라서 열섬현상을 전력소비량을 대리변수로 설정하는 것 또한 의미가 있을 것으로 판단되어 전력소비 모형으로 명명하였다.

나. 변수의 선정

종속변수인 전력소비량은 네 가지로 구분할 수 있는데, 가정용, 상업용, 공업용, 공공용이 있다. 전력사용량의 특성에 있어서 공업용과 공공용은 계절에 따라 소비량이 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났고, 상업용과 가정용이 계절의 변동을 지니는 것으로 나타났다.

상업용과 가정용 전력이 공업용과 공공용보다 냉방을 위한 전력사용이 더 많을 것으로 예상된다. 하지만 이 연구는 계절에 따른 전력소비의 변화를 보는 것이 아니기 때문에 종속변수로 사용된 전력소비량은 모든 용도를 포함하여 분석에 이용하였다.

이러한 연구 관점에 근거하여 종속변수와 관계를 가지는 독립변수의 탐색이 필요한데, 전력수요량을 감소시키는 변수로는 2007년 산림청에서 관측한 도시 내 도시립 즉, ‘생활권도시립’이라는 변수에 주목하였다. ‘생활권도시립’은 도시 내에서 자주 접할 수 있는 산림, 예를 들어, ‘가로수’, ‘옥상녹화’, ‘담장녹화’, ‘사면녹화’ 등이 있으며, 기존 연구는 도시 내에서 수목이 주변의 온도를 낮추어 주는 효과가 있다고 보고하고 있다(Robinette, 1972).

그리고 전력소비량의 증가에 영향을 미칠 것으로 예상되는 변수는 기상과 관련된 기상변수, 도시 구조와 관련된 도시 변수, 끝으로 에너지 소비량에 직접적인 연관성을 가지는 경제 변수가 그것이다.

기상변수에서 냉방도일은 조금 특이한 개념인데, 냉방도일은 기준온도보다 높은 날에는 사람들이 냉방전력을

표 1. 전력소비 모형에 사용된 변수.

구분	변수	단위	
종속변수	전력사용량	MWh	
	기상변수	- 평균기온	°C
		- 월별 최고극값 기온	°C
		- 강수량	mm
		- 평균풍속	m/s
		- 평균상대습도	%
- 냉방도일		도일	
독립변수	- 불쾌지수	%	
	- 1인당 생활권도시립 면적	m ²	
	- 공장 면적율	m ²	
도시변수	- 주차장 면적율	m ²	
	- 1인당 도로 면적	m ²	
	- 1인당 자동차등록대수	대	
경제변수	- 인구비율	인	
	- 산업용 전력소비율	MWh	
	- 에어컨 보급율	%	
	- 지역 내 1인당 GDP(GRDP)	백만 원	

주 - GRDP(Gross Regional Domestic Product): 지역내 총생산
 - 종속변수와 기상변수의 관측기간: 7월~8월
 자료출처: 산림청(2007), 시군통계연보(2007), 통계청(2007)

사용하는 것으로 보고, $\sum_{t_0 \geq t_c} Q = 2HD_c$ 와 같이 계산할 수 있는데 여기서 D_c^3 를 냉방도일이라고 하며(김해동 등 2004), H는 실내외 간의 온도차이로 유발되는 열량이다. 이러한 개념을 이 연구에서 적용하기 위해 온도의 차이를 1년間に 걸쳐서 합산한 것이 아니라, 7~8월 동안 기준 온도인 26°C이상인 날의 평균온도의 차이를 합한 것을 냉방도일이라고 보았다. 그리고 불쾌지수는 기상청에서는 이에 대한 통계자료를 구축하고 있지 않기 때문에 기존 문헌의 계산식⁴⁾을 이용하여 계산하였다.

2) 기온변화 모형

가. 기온변화 모형의 의미

열섬현상을 연구한 기존의 많은 논문에서 종속변수로 사용한 변수는 평균기온이다. 이 연구는 기존의 연구방법론을 따르되, 종속변수의 선정에 좀 더 신중히 접근하였다. 모형에 사용된 종속변수는 후술할 예정이지만 이해를 돕기 위해 간략한 개념에 대한 설명은 필요할 것으로 판단된다.

분석에 사용된 변수의 특징은 특정 지역, 특정 시간, 특정 관측지점을 가지고 있으며, 이들은 모두 자동기상측정장치⁵⁾(AWS: Auto Wether System)에 의해 관측되었다.

³⁾ DC: $D_c = \sum_{t_0 \geq t_c} (t_0 - t_c)$ 과 같으며, 이는 평균기온이 기준온도보다 높은 날에 대한 온도간의 차이를 1년간에 걸쳐서 높은 날에

대해서 온도의 차이를 1년간에 걸쳐서 합한 값을 말한다.

⁴⁾ 불쾌지수= $1.8 \times Ta - 0.55(1 - RH)(1.8 \times Ta - 26) + 32$, (Ta: 건구온도로서 건조한 정도를 의미함, RH: 상대습도)

⁵⁾ AWS는 전국적으로 분포해 있다. 하지만 기온변화 모형에 적용하기 위해 수집된 관측치의 대상이 특, 광역시로 한정된 이유는 자료를 수집할 수 있는 유일한 방법은 해당기관(기상청)에 요청해야만 얻을 수 있는데, 우리나라 전체라는 점을 감안하여 구와 비슷한 행정 구역인 ‘읍, 면’ 단위의 관측치를 요구한다면 해당 기관의 업무에 지장을 준다는 현실적인 문제에 부딪혔기 때문이다.

표 2. 기온변화 모형에 사용된 변수.

변수	변수내용	단위	
종속변수	- 평균기온(7월~8월, 11:00-15:00, AWS 관측자료)	°C	
기상변수	- 풍속	m/s	
	- 강수량	mm	
독립변수	- 고도	m	
	도시변수	- 도로면적 대비 자동차 등록대수	대/km ²
		- 1인당 도시면적 대비 도로면적	km ² /ha
		- 지역 내 1인당 GDP(1인당 GRDP)	백만 원
		- 1인당 전기사용량(가정용, 상업용)	MWh
		- 1인당 도시면적 대비 전기사용량	MWh/ha/인
		- 인구비율	%
- 해안 접근성	'접함(1)', '접하지 않음(0)'		
산림변수	- 1인당 생활권도시림 면적	ha	
	- 1인당 도시공원 면적	ha	

자료출처: 기상청(2008), 시군통계연보(2007), 통계청(2007)

AWS로 관측된다는 것은 고정된 표본점을 가지며, 기계에 의해 관측되어 측정의 오차를 비교적 줄일 수 있다. 이러한 특징과 함께 종속변수가 평균기온임을 감안하여 이를 기온변화 모형으로 명명하였다.

나. 변수의 선정

기온변화 모형은 전력소비모형에서 서울지역이 이상치로 작용한 것을 거울로 삼아 기존의 대도시와 중소도시를 모두 연구대상으로 포함한 것에 반해 7개 특, 광역시로 한정하였으며, 관측치는 하부 행정구역인 '구'를 기준으로 표본의 규모를 증대시켰다.

한편 기온변화 모형에 종속변수로 사용된 평균기온의 특성은 7월부터 8월까지 오전 11시부터 오후 3시까지 가장 더운 시간대에 관측된 기온 자료이다. AWS는 특정한 위치에 고정되어 측정되며, 일반적으로 도심에서 벗어난 기상대나 관측소에서 측정하는 것이 아닌 도시 내에서 실시간으로 관측되어 기록된다는 장점을 지니고 있다. 종속변수를 위와 같이 특수한 형태의 평균기온으로 설정한 이유는 열섬현상이 '도시 내 온도가 도시 밖의 온도보다 높게 유지되는 현상'이라는 정의에 따른 것이다. 만약 종속변수로 사용된 평균기온이 이러한 특수성을 가지지 않았다면 기존의 전력소비 모형의 종속변수를 기온으로 두는 것이 더 바람직하다고 생각할 수도 있을 것이다. 그러나 원론적인 관점에서 대리변수를 사용하지 않고 정의에 따른 직접적인 변수를 종속변수로 사용한 것 또한 충분한 의미가 있을 것으로 판단된다.

독립변수는 종속변수로 사용된 평균 기온을 고정하기 위해 풍속, 강수량, 고도 등으로 설정하였다. 이는 '다른 조건이 일정하다면'이라는 가정을 충족시켜주기 위한 것이다. 기온과 정의 상관관계를 가지는 인자로 자동차등록대수, 지역 내 GDP(GRDP: Gross Regional Domestic Product) 도시면적, 도로면적, 전력소비량, 인구수 등으로 설정하였다.

이 외에 건물면적 또한 열섬현상과 정의 상관관계를 가

진다고 판단되어 데이터를 탐색해 보았으나, 건물면적을 통계자료로 구축한 기관이 없어 변수로 채택할 수 없었다. 대신에 건축허가가 난 건물의 연면적은 구할 수 있었는데, 일정기간 동안 누적된 자료가 아니었으며, 논리적으로 볼 때, 열섬현상이 일어나고 있는 곳은 대도시의 도심이다. 이러한 도심은 이미 기존에 건축된 건물로 인해 더 이상 신규 건물의 성립이 쉽지 않으며, 있다 하더라도 도심 주변 개발지역 보다 그 변화가 낫다. 따라서 이 변수는 건물의 면적을 반영하지 못하고 있으며, 도시열섬 현상을 구명하기 위한 변수로서 사용하기에 논리적인 오류를 포함한다고 판단되어 제외하였다.

부의 상관관계를 가질 것으로 예상되는 변수는 산림과 관계된 변수를 중심으로 채택하였는데, 생활권도시림 면적, 도시공원 등으로 변수를 설정하였다. 생활권도시림은 앞서 언급한 내용과 같기 때문에 자세한 설명은 생략하기로 한다. 다만, 도시공원이 새롭게 설정하였는데 그 이유는 도시공원의 공간적 측면에서 볼 때, 도시 내에 존재하는 녹지이며, 생활권도시림과 비슷한 성격을 지니나, 일정 규모로 도시 내에 자리하고 있으며, 근린공원과는 다른 개념인 놀이공원과 비슷한 성격을 지니는 변수이기 때문이다. 따라서 생활권도시림 이외에 도시공원 또한 도시열섬현상을 완화할 수 있는 변수로 적절하다고 판단되어 변수로 설정하였다.

그리고 기온변화 모형만 사용된 변수가 있는데, 해안접근성이 그것이다. 해안접근성은 바람과 관련된 변수라 볼 수 있는데, 해안과 접한 지역은 해풍에 의해 열섬현상이 완화될 것으로 예상되었기 때문이다. 이 변수는 7개 특, 광역시 중 해안과 접한 지역을 GIS를 이용하여 선택하였으며, 해안과 접해있지 않은 지역을 베이스라인으로 두어 그 한계효과를 분석하였다.

2. 연구방법

열섬현상에 대한 산림의 기여를 계량적으로 분석하기

위해 회귀분석을 이용하여 분석하였으며, 회귀분석의 불편추정량을 구하기 위해 다음의 과정에 따라 데이터 구조와 회귀모형의 안정성을 검정하였다.

이미 회귀분석에 대한 이론적 방법은 널리 알려져 있어 모형에 대한 세부적인 설명은 생략한다. 다만, 이 연구에서 사용되는 변수를 이용하여 추정할 회귀식에 대하여 불편추정을 확보하기 위한 회귀식의 중요한 가정을 어떤 방법으로 검정하였는지 대한 설명은 필요할 것으로 사료된다.

추정된 회귀식이 불편추정(Unbiased estimation)이 되기 위해서는 다음의 네 가지 항목에 대한 검정이 필요하다. 첫째, 각 변수는 정규성을 가정한다. 정규성을 가정하기 위해서는 표본집단의 규모가 중요한데 적어도 30개 관측치 이상을 가지는 표본을 대표본이라고 하며, 중심극한의 정리에 의해 정규성이 가정된다.

둘째, 동분산(Homoskedasticity) 가정이다. 회귀식이 안정되기 위해서는 각 변수는 분산이 같아야 한다. 그 이유는 회귀선의 분산이 '1'이고 평균이 '0'인 정규분포에서 평균이 '0'인 지점을 관통하여 지나가기 때문이다. 하지만 동분산 만약 가정이 충족되지 못한다면, 평균이 '0'인 지점을 통과할 확률이 낮아지며, 추정된 회귀모형이 불안정하게 된다. 따라서 추정된 회귀식이 불편추정이 되기 위해서는 동분산 가정이 필요하다.

이분산(Heteroskedasticity) 현상은 주로 횡단면 자료(Cross-sectional data)에서 주로 발생된다. 그리고 이 연구의 데이터 구조는 횡단면 자료이므로 이에 대한 검정이 필요하다고 판단된다. 이에 이분산을 가질 것으로 예측되는 변수로는 소득을 대변하는 'GRDP'와 '인구수'라고 예상된다. 그 이유는 소득이 높을수록 냉방비 지출 등 전력 소비량이 증가할 가능성이 크며, 인구 또한 같은 역할을 할 것으로 사료되기 때문이다. 따라서 이 변수에 대한 이분산 검정이 필요하다고 판단된다.

이분산 검정법은 Park's test와 Glejser's test, Goldfeld-Quandt's test 등이 있는데, 이 연구에서는 Park's test를 이용하여 검정하였다. Park's test는 계산과정이 간편하며, 이분산을 가지는 변수를 탐지해줄 수 있는 장점이 있기 때문이다. Park's test의 계산과정은 다음과 같다.

$$\sigma_i^2 = \sigma^2 X_i^2 e^{v_i} \quad (e = \text{자연대수의 밑수})$$

이를 양변에 자연대수를 취하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\ln(\sigma^2) = \ln \sigma^2 + \beta \ln X_i + v_i$$

일반적으로 σ^2 는 알려지지 않았기 때문에 대용변수로 잔차(e_i^2)를 사용하면 다음과 같다.

$$\ln e_i^2 = \ln \sigma^2 + \beta \ln X_i + v_i = \alpha + \beta \ln X_i + v_i$$

만약 β 가 통계적으로 유의하다면 이분산으로 판단한다(송일호와 정우수, 2002).

끝으로, 다중공선성이 있다. 회귀식은 독립변수 간의 독립성을 요구한다. 하지만 사회현상을 다루는 모든 변수는 인위적 가공⁶⁾을 거치지 않는 이상 서로 독립적일 수 없다. 따라서 모형을 크게 불안정하게 만들지 않는 범위 내에서 일정 부분 다중공선성은 인정하기로 한다. 이러한 내용은 SPSS 12.0을 이용하여 분석하였으며 변수의 진출입 방법은 '입력'으로 모형을 구축하였다.

결과 및 고찰

1. 전력소비 모형

분석에 사용된 관측치의 수는 72개로 중심극한 정리에 의해 대표본으로 인정된다. 따라서 정규성이 가정되었다고 볼 수 있다. 그리고 시군에 존재하는 생활권도시립 면적은 12.8 m²/인으로 나타났다. 이는 전국 평균수준인 7.0 m²/인 보다 크게 나타났다.

1) 추정 결과

전력소비 모형에서 제외된 변수는 기상변수가 전체가 제외되었다. 이는 기상변수가 전력소비량과는 무관하다는 것으로 해석된다. 그리고 경제변수는 지역 내 GDP(GRDP)를 제외한 나머지 변수들이 모형에서 제외되었다. 도시변수는 생활권도시립 면적, 자동차등록대수 이외에 나머지 변수들이 제외되어 모형이 구성되었다.

전력소비 모형에 있어서 모형의 안정성을 의미하는 F-

표 3. 전력소비 모형의 기초통계량.

변수명	단위	평균	표준편차	최대	최소	N	
종속변수	7~8월 전력사용량	MWh/인	1.4	1.0	9.28	0.24	72
독립변수	생활권도시립 면적	m ² /인	12.8	13.6	101.87	0.46	72
	7~8월 산업용 전력 비율	%	43.2	24.1	91	3	72
	자동차등록대수	대/인	0.7	0.6	4.70	0.007	72
	GRDP	백만 원/인	33.8	61.6	249.14	0.015	72

⁶⁾ 예를 들어, 직교회전을 이용한 독립성의 유지 등

표 4. 전력소비 모형의 추정결과.

구분	비표준화 계수		t-value	p-value
	B	표준오차		
(상수)	0.13	0.20	0.64	0.52
1인당 생활권도시립 면적	-0.02	0.01	-3.29	0.00
7~8월 산업용 전력 비율	0.03	0.00	9.09	0.00
1인당 자동차등록 대수	0.25	0.13	1.92	0.06
1인당 GRDP	0.00	0.00	1.79	0.08

주 - $F_{(4,67)} \sim 25.12(0.00)$
 - $R^2: 0.60(\text{Adj. } R^2: 0.58)$
 - Durbin-Watson's test: 1.73

test 결과는 유의수준 5%에서 유의한 것으로 나타나, 모형은 안정하다고 할 수 있다. Park's test를 이용하여 이분산을 검정한 결과, 이분산이 발생될 것으로 예상된 지역 내 GDP(GRDP)는 유의수준 5%에서 이분산이 없는 것으로 나타났다. 그리고 모형의 설명력을 의미하는 R^2 는 0.6(Adj. $R^2: 0.58$)으로 일반적인 모형 설명력인 0.8에 미치지 못하는 것으로 나타났다.

전력소비량에 양의 상관관계를 가지는 인자로는 산업용 전력 비율, 1인당 자동차등록대수와 1인당 GRDP 등으로 나타났으며, 1인당 생활권도시립면적은 부의 상관관계를 가지며, 모형으로 구축된 이들 변수 모두는 유의수준 10%에서 통계적 유의성이 인정된다. 모형에 채택된 변수의 부호는 현실에 비추어 볼 때 적절하다고 판단된다.

2) 한계효과 분석

열섬현상 완화에 대하여 '1인당 생활권도시립 면적'이 한 단위 증가할 때 전력소비량은 0.02 MWh 감소하는 것으로 나타났다. 이는 1인당 생활권면적이 증가할수록 전력소비량은 줄어들게 되며, 전력소비량이 줄어들게 된다는 것은 열섬현상의 원인 중 하나인 도시 내 고온현상이 줄어들어 냉방을 위한 전력소비량의 감소로 귀결된다.

산업용 전력 비율이 한 단위 증가할 때, 전력소비량은 0.03 MWh 정도 증가하는 것으로 나타났는데 산업용 전력 비율은 전체 전력 소비량에 비해 산업용 전력소비량은

계절의 변동을 받지 않으며, 경기변동과 같은 경제적 상황에 영향을 받는 변수로 설정하였다. 즉 경기가 좋으면 경제적 여유가 늘어나게 될 것이며, 경제적 여유가 늘어나면, 더 나은 삶의 질을 찾게 될 것이다. 이로 인해, 냉방 전력사용량이 늘어나게 될 것이라는 가정에서 설정된 변수이다. 그리고 이 변수는 종속변수와 정의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다.

자동차등록대수는 인구집중에 대한 대리변수로 활용되었는데, 자동차등록대수가 증가할수록 인구수는 증가한다는 가정에 의한 것이다. 그리고 모형 속에 1인당의 형태로 대부분의 변수에서 사용되었기 때문에 인구수를 직접적으로 반영하기에 무리가 따르는 것을 예방하기 위한 것이다.

1인당 GRDP는 연구범위가 서울을 포함한 특, 광역시뿐만 아니라 일반 시군을 포함하기 때문에 지역적 차이에 따라 전력소비량의 차이가 존재할 것이라고 예상되어 변수로서 채택하였다. 이에 지역별 GRDP는 통계적 유의성이 존재하는 것으로 나타났으며, 그 부호 또한 전력소비량의 증가와 정의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다.

전력소비 모형이 가지는 한계는 관측치의 문제에 있다. 그 이유는 우리나라 도시가 가진 구조적 문제점에 기인하는데, 서울의 경우, 우리나라 전체 인구수의 약 40% 이상이 거주하고 있으며, 이를 위한 사회기반 시설(Infra structure), 소득 등이 타 지역에 비해 압도적으로 높게 나타났다. 그 결과, 서울지역의 관측치가 모형 내부에서 이상치로 작용하여 모형의 안정성에 문제를 발생시켰다. 이러한 문제점이 있음에도 불구하고 우리나라 전체라는 시각적 측면에서 전력소비 모형이 가진 논리적인 장점이 모형의 구조적인 단점보다 크다고 판단되기 때문에 모형의 안정성 문제로 인해 그 의미가 퇴색된다고 볼 수 없다.

2. 기온변화 추정 모형

1) 기온변화 모형 기초 통계량

기온변화 모형에서의 생활권도시립 면적은 0.4 m²/인으로 전국 평균수준인 7.0 m²/인 보다 적게 나타났으며, 세계보건기구에서 권장하는 수준인 9 m²/인에 미치는 못하

표 5. 기온변화 모형의 기초통계량.

	변수명	단위	평균	표준편차	최대	최소	N
종속변수	평균기온 (7월~8월, 11:00A.M~15:00P.M)	°C	27.2	1.2	28.92	24.24	35
	풍속	m/s	2.4	0.8	4.82	0.90	35
	강수량	mm	0.7	0.3	1.26	0.12	35
	생활권도시립 면적	m ² /인	0.4	0.3	1.18E-04	0	35
독립변수	도시면적 대비 자동차등록대수	대/km ²	36.9	21.1	83.18	3.03	35
	해안접근성	-	0.3	0.4	1	0	35
	도시면적 대비 전기사용량	ha/인	921.3	834.2	2,683.63	11.69	35
	도시면적 대비 도로면적	km ² /ha/인	23.0	19.9	6.72E-03	4.41E-05	35

는 수준으로 나타났다(산림청, 2008). 수집된 관측치의 수는 총 54개이었으나 분석에 사용된 관측치의 수는 35개로 19개 ‘구’가 분석에서 제외되었다. 하지만 분석에 사용된 관측치의 수는 이론적으로 정규성이 가정된다고 인정된다.

2) 추정 모형

기온변화 모형은 전력소비 모형보다 비교적 엄밀하게 모형을 설정하였다. 그 이유는 우리나라 전체 시군의 경향을 보는 것이 아니라, 범위가 대도시로 한정되어 있으며, 각 구별로 세분화되었기 때문이다.

기온변화 모형의 종속변수는 AWS에 의해 관측된 7월~8월, 11시부터 15시까지의 평균기온이며, 종속변수에 영향을 미치는 인자를 탐색하는 데 있다. 종속변수가 기상인자이므로 독립변수는 기존의 사회경제적 변수 이외에 종속변수를 설명할 수 있는 기상인자의 진입이 반드시 필요하다. 이들 변수가 모형 내에 진입하지 않으면 ‘다른 조건이 일정하다면’이라는 가정을 충족시킬 수 없게 된다. 평균기온에 영향을 줄 수 있는 변수는 강우량⁷⁾, 풍속 등이 있으며, 측정 장치의 위치를 대변하는 고도를 고려하였다. 기온변화 모형은 앞서 제시한 전력소비 모형과는 달리, 독립변수를 그대로 사용하지 않고, 논리적 흐름에 근거하여 가공하였다.

분석결과, 기상변수에서는 고도가 모형에서 제외되었으며, 도시변수는 GRDP를 제외한 나머지 변수가 모형에 진입되었다. 그리고 산림변수에서는 도시공원이 제외되었다. 이분산이 발생될 것으로 예상된 인구수, GRDP는 유의수준 5%에서 유의성이 기각되었다. 따라서 이들 변수에서 이분산은 고려할 필요가 없는 것으로 판단된다.

모형의 안정성을 의미하는 F값은 유의수준 5%에서 유

의한 것으로 나타나 모형은 안정적이라고 할 수 있다. 모형의 설명력은 0.85로 나타났으며, 이는 일반적으로 설명력이 있다고 인정하는 0.8 이상의 높은 설명력이라 할 수 있다(서의훈, 2009).

도시면적 대비 전기사용량은 유의수준이 나타나지 않았음에도 모형에 포함된 이유는 이 변수가 제외됨으로 인해 모형의 안정성이 크게 떨어지는 것으로 나타났기 때문이다. 또한 강수량에서도 유의성이 나타나지 않았음에도 모형에 진입시킨 이유는 ‘다른 조건이 일정하다’는 가정을 충족시켜주기 위함이다. 같은 맥락에서 고도 또한 모형 내에 진입시켜야 마땅하나 고도가 모형에 진입되었을 때, 모형의 안정성이 크게 떨어졌기 때문에 제외시킬 수밖에 없었다.

3) 한계효과 분석

종속변수에 대하여 풍속과 해안접근성은 부의 상관관계를 가지는 데, 풍속이 한 단위 증가하면 평균기온은 0.7°C 가량 낮아지는 것으로 나타났다. 1인당 생활권도시립 1평방미터 증가 시 평균기온은 1.15°C 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고 해안접근성은 바다와 접한 지역에 대하여 접하면 ‘1’ 접하지 않으면 ‘0’으로 설정한 가변수인데, 분석결과 해안지역에 접근한 지역일수록 온도가 감소하는 경향이 나타났다. 이를 해석하면, 내륙지역에 비해 해안지역은 해풍의 영향을 받기 때문으로 풀이된다. 그리고 해안에 접한 지역은 그렇지 않은 지역에 비해 평균온도가 0.61°C 감소하는 것으로 나타났다. 이들 변수는 열섬현상을 완화시키는 변수로 그 의미를 가지며, 생활권도시립의 면적이 증가할수록 평균기온이 감소한다는 것은 기존의 연구와 부합하며, 의미 있는 결과라고 사료된다.

반면, 종속변수와 정의 상관관계를 가지는 변수는 자동차등록대수를 도시면적으로 나눈 변수인데, 도시면적 ha 당 자동차의 수로 표준화하였다. 단위 도시면적당 자동차 수 한 단위 증가할 때, 평균기온이 약 0.02°C 증가하는 것으로 분석되었으며, 단위 도시면적당 도로면적에 인구수로 표준화시킨 변수 또한 0.02°C 가량 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 이들 변수는 모두 유의수준 5%에서 통계적 유의성이 나타났다.

이 연구가 주는 함의는 열섬현황 완화에 생활권도시립이 일정 부분 기여할 수 있다는 것과 열섬현상이 도시화와 인구집중으로 발생된다는 것을 다시 한 번 확인하였다는 것이다. 그러나 중요한 점은 생활권도시립과 도시의 규모와 도로의 확충이 양립할 수 없다는 점에 있다. 이 말은 서로 간에 상충관계(Trade-off)로 설명할 수 있다. 즉, 생활권도시립을 증가시키기 위해서는 생활권도시립 도시 내

표 6. 기온변화 모형의 추정 결과.

모형	비표준화 계수		t-value	p-value
	B	표준오차		
(상수)	28.77	0.47	60.97	0.00
풍속	-0.70	0.13	-5.23	0.00
1인당 생활권도시립 면적	-1.15	0.29	-3.98	0.00
도시면적 대비 자동차등록대수	0.02	0.01	2.45	0.02
1인당 도시면적 대비 도로 면적	0.02	0.00	2.63	0.01
해안 접근성	-0.61	0.24	-2.50	0.02
도시면적 대비 전기 사용량	0.00	0.00	-0.92	0.37
강수량	-0.31	0.44	-0.70	0.49

주 - F_(7,27)~24.47(0.00)
 - R²: 0.85(Adj. R²: 0.81)
 - Durbin-Watson: 1.81

⁷⁾ 강우량: 여름에는 눈이 오지 않기 때문에 강우량으로 자료를 구축하였다.

면적을 적절히 사용해야하는데, 기존의 도시의 토지용도는 여러 용도로 이미 활용되기 때문에 신규로 생활권도시립을 조성하기에 너무 많은 비용이 투입되어야 한다. 이는 비용-효율의 측면에서 비효율이 발생할 소지가 높기 때문에 도시계획 수립단계에서 열섬현상을 고려한 녹지용지의 확보가 필요하며, 이미 서울과 같은 대도시에서는 집중된 인구를 적절히 분산시킬 수 있는 정책적 대안이 필요하다.

결론

인구집중화와 경제성장은 도시의 구조를 변화시켰고, 건물의 과밀화를 초래하였다. 그리고 경제가 성장할수록 필연적으로 에너지 소비량은 증가한다. 인구집중화와 에너지의 과잉소비는 도시 내에서 열이 발생하게 되었으며, 열섬현상이라는 문제가 대두되었다.

이 연구의 범위는 크게 두 가지 관점을 가지고 있다. 첫째, 우리나라 전체를 대상으로 대도시 및 중소도시를 대상으로 분석하였는데, 이를 전력소비 모형으로 명명하였다. 전력소비 모형은 7월~8월 여름철에 있어서 우리나라 전체 중소도시 및 서울을 포함한 특,광역시가 연구의 범위이다. 전력소비 모형에 대한 기본적 아이디어는 Rosenzweig(2006) 등은 이미 열섬현상의 발달에 전력수요와 관련이 있다는 점에 착안하여, 전력수요를 전력소비량으로 보았다. 이는 여름철이라는 환경적 상황을 고려하여, 열섬현상이 뚜렷하게 나타나는 대도시 지역이 중소도시 지역보다 전력소비량, 특히 냉방을 위한 전력소비량에서 그 차이를 보일 것으로 기대되었기 때문이다. 따라서 열섬현상을 전력소비량을 대리변수로 설정하는 것 또한 의미가 있을 것으로 판단되었기 때문이다.

둘째, 대도시 내에서 각 행정구역을 대상으로 연구범위를 한정하였다. 이를 기온변화 모형으로 명명하였으며, 그 이유는 종속변수가 평균기온이기 때문이다. 기온변화 모형은 전력소비 모형의 구조적 문제점에 대한 해결하기 위한 하나의 대안이다. 전력소비 모형이 가지는 한계는 관측치의 문제에 있다. 그 이유는 우리나라 도시가 가진 구조적 문제점에 기인하는데, 서울의 경우, 우리나라 전체 인구수의 약 40%이상이 거주하고 있으며, 이를 위한 사회기반 시설(Infra structure), 소득 등이 타 지역에 비해 압도적으로 높게 나타났다. 따라서 서울지역의 관측치가 모형 내부에서 이상치로 작용하여 모형의 안정성에 문제를 발생시켰다.

이를 해결하기 위해 관측치는 행정구역의 하부 단위인 '구'를 대상으로 하였으며, 특광역시에 한정하였기 때문에 다양한 관측치를 확보할 수 있었으며, 전력소비 모형이 가진 구조적 한계를 극복할 수 있다.

분석 결과, 전력소비 모형에서는 1인당 생활권도시립 면적, 7월~8월 산업용 전력, 자동차등록대수, 1인당 GRDP 등이 통계적 유의성이 존재하는 것으로 나타났으며, 모형의 설명력은 0.60으로 나타났다. 한편 기온변화 모형에서는 풍속, 1인당 생활권도시립 면적, 도시면적 대비 자동차등록대수, 1인당 도시면적 대비 도로면적, 해안 접근성 등에서 통계적 유의성이 존재하였으며, 모형의 설명력은 0.85로 나타났다. 그리고 두 모형 모두 생활권도시립이 전력소비량과 평균기온을 감소시키는 것으로 나타났다.

이 연구의 함의는 생활권도시립의 면적이 증가할수록 온도가 감소하는 것으로 미루어 생활권 내 존재하는 도시립면적을 증가시킴으로서 열섬현상의 완화에 일정부분 기여한다는 데 있다. 하지만 현재 열섬현상이 존재하는 도시에 있어서 생활권도시립의 면적을 증대시키기에는 무리가 따른다. 그 이유는 이미 도시가 형성되어 높아진 지가를 가진 토지를 매입하여 생활권도시립을 조성한다는 것은 비용-효율의 측면에서 비효율이 발생할 것으로 예상되기 때문이다. 따라서 도시계획 시 녹지의 충분한 조성을 위한 용지의 마련과 집중화된 인구를 분산시킬 수 있는 적절한 정책적 대안이 절실하다고 사료된다.

끝으로 이 연구를 통해 열섬현상을 완화할 수 있는 가장 효율적인 대안을 찾을 수 있게 되기를 기대한다.

인용문헌

1. 김영동. 1986. 우리나라 도시화의 재조명 - 과잉 집중화의 쟁점. 대한지방행정공제회 21(1): 23-25.
2. 김운수. 2010. 특집: 도시의 열섬현상: 우리나라 도시의 열섬현상 완화 대책. 대한지방행정공제회. 45(500): 27-33.
3. 김종선. 2007. 비선형모형을 이용한 냉방전력 수요형태 분석. 자원환경경제연구 16(4): 901-922.
4. 김해동, 박명희, 송경숙. 2004. 냉난방도일을 이용한 우리나라 주요도시의 도시승온화 현상 특성분석. 한국환경과학회지 13(3): 189-196.
5. 류을릴, 윤용한. 2006. 충북 주요도시 열섬현상 저감대책. 충북개발연구원 2006(10): pp. 140.
6. 박경훈, 정성관. 1999. 광역적 녹지계획 수립을 위한 도시열섬효과 분석. 한국지리정보학회지 2(3): 35-45.
7. 서의훈. 2009. SPSS 14.0과 12.0 한글판을 이용한 SPSS 통계분석. 자유아카데미. pp. 500.
8. 송일우, 정우수. 2002. SAS와 EVIEWS를 이용한 계량경제 실증분석. 서울 삼영사 pp. 391.
9. 이태원. 2001. 도시의 열섬현상과 건물에너지 소비. 대한설비공학회 30(9): 80-82.
10. 임상수. 2009. 주요 도시별 전기소비 특성에 관한 연구. 서울도시연구 10(2): 87-100.
11. 장은숙. 2005. 아파트 단지내의 열섬효과가 대기오염물질 확산에 미치는 영향 해석을 위한 열유동장 수치모의. 한국환경과학회지 14(6): 577-582.

12. 정성모. 2009. 도시내 용도지역의 토지피복형태가 열섬 현상에 미치는 영향. 한국환경과학회지 18(2): 169-176.
13. 조성모, 윤용환, 류을렬, 박봉주, 김원태. 2009. 도시내 용도지역의 토지피복형태가 열섬현상에 미치는 영향. 한국환경과학회지 185(2): 169-176.
14. Bornstein, Robert D. 1968. Observations of the Urban Heat Island Effect in New York City. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 7(4): 575-582.
15. Oke, T.R. 1967. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* 7(8): 769-779.
16. Rosenzweig, Cynthia., Solecki, William., Parshall, Lily., Gaffin, Stuart., Lynn, Barry. 2006. Mitigating New York City's heat island with urban forestry, living roofs, and light surfaces. *Sixth Symposium on the Urban Environment*.
17. Robinette, Gary O. 1972. Plant/People/and Environmental Quality. American Society of Landscape Architects Foundation. pp. 136.
18. 산림청. 2008. 시도별 도시림 및 1인당 생활권도시림 현황. <http://www.forest.go.kr>(2008. 10.16).

(2010년 11월 1일 접수; 2011년 2월 21일 채택)