

건물과 지역요인을 고려한 서울시 건물에너지 소비 실증분석*

An Empirical Analysis of Building Energy Consumption Considering Building and Local Factors in Seoul

이수진** · 김기중*** · 이승일****

Lee, Sujin · Kim, Kijung · Lee, Seungil

Abstract

This study aims to empirically examine the relationship between building energy consumption and building and local factors in Seoul. Building energy issue is an important topic for low carbon and eco-friendly city development. Building physical, socio-economic and environmental factors effect to increasing or decreasing energy consumption. However, there are different characteristic in each area, and this kind of variable has a hierarchical structure. The multi-level model was used to consider the hierarchical structure of the variables. In this study, a multi-level model was applied to confirm the difference between areas. Spatial area is Seoul, Korea and the temporal scope is August, summer season. As the result, in Model 1 (Null Model), ICC is 0.817. This shows that the energy consumption differs by 8.174% due to factors at the Dong level. Model 2 (Random Intercept Model) suggests that building's physical factors and Average age, Household size and Land price in Dong level have significant effects on Building energy consumption. In Model 3 (Random Coefficient Model), random effect variables have intercepts and slopes to vary across groups. This study provides a perspective for policy makers that the building energy reduction policies to be applied for buildings should be differently applied on area. Furthermore, not only physical factors but also socio-economic and environmental factors are important when making energy reduction policy.

키워드 건물에너지, 건물요인, 지역요인, 다층모형, 위계적 선형모형

Keywords Building Energy, Building Factors, Local Factors, Multi-Level Model, Hierarchical Linear Model

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

세계적으로 온실가스 배출과 화석에너지 사용에 관한 관심이 높아지면서, 에너지 소비를 저감시키기 위한 노력이 요구되고 있다. 전 세계 에너지 소비는 가정·상업 부분에서 36%, 운송부문에

서 28%를 차지하고 있으며, 서울시의 경우 에너지 소비는 가정·상업 54%, 운송 29%, 산업 11%, 공공·기타 6%이다(에너지경제연구원, 2015). 이중 가장 큰 비율을 차지하는 가정·상업 부분의 에너지는 건물 내 사람들의 활동이나 행동에 의한 건물에너지 소비로 판단하기도 한다(Estiri, 2015). 특히, 전력·도시가스를 포함하는 건물에너지는 도시에너지 소비에 가장 큰 비중을 차지하고 빠르게 증가하는 추세이다(한국에너지공단, 2016a).

* 이 논문은 이수진의 석사학위논문을 수정·보완하여 작성하였으며, 2019년 한국연구재단(NRF-2019R1F1A1057203)과 국토교통부 도시건축연구개발사업(19AUDP-B102406-05)의 지원을 받아 수행된 연구임

** Ph. D. Student, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University (sujan5@snu.ac.kr)

*** Ph. D. Candidate, Department of Urban Planning and Design, University of Seoul (kimkj87@uos.ac.kr)

**** Professor, Department of Urban Planning and Design, University of Seoul (Corresponding Author: silee@uos.ac.kr)

이에 따라 건물에너지 소비를 저감하기 위한 물리적 측면에서 건물의 단열처리, 지붕 유형, 창문 개폐여부 등에 주안점을 둔 연구가 있다(김동현·송슬기, 2016; Qin and Han, 2013; Yu et al., 2010). 그러나 건물의 물리적 개선에도 불구하고, 건물에너지 소비는 증가하고 있으며, 이는 물리적 개선뿐 아니라 도시계획 차원에서 지역의 인구 및 사회적 요인 등을 고려한 접근이 필요함을 제시한다(김선희, 2006; 이수진 외, 2019). 최근 도시 차원에서 건물에너지 연구는 주변 환경을 반영하기 위해 녹지 및 수계, 온도 등에 대한 중요성이 언급되고 있다(양혜미·송재민, 2017; 박종문, 2018; 김기중 외, 2017). 또한, 지역의 인구 및 사회·경제적 상황에 따라 건물에너지 소비량에 차이가 나타나는 경향이 있다(노승철·이희연, 2013). 주거에너지의 경우, 건물을 이용하는 사람들의 행위에 의해서 에너지 소비가 결정되는 비율이 높으므로(Yun and Steemers, 2011), 지역별 인구 특성과 사회·경제적 요인을 포함한 지역 및 주변 환경에 대한 고려가 필요하다.

건물에너지 소비 연구에 대한 기존 방법론들은 자료의 위계적 구조(그림 1 참조) 및 지역에 따른 공간적 종속성에 대한 특성을 고려하지 못한 한계를 가지고 있다. 위계적 특성을 가진 데이터는 주변 지역에 서로 동질성이 나타나 집단의 독립성을 간과하여 모형에 대한 가정에 반하게 된다(이희연·노승철, 2013). 단일 구조에서는 지역 간 자기 상관성이 존재하고, 주변 지역이 영향을 준다고 밝혔으나, 실질적으로 지역별 차이가 건물에너지 소비에 영향을 미치는 것을 밝히지 못하고 있다. 반면에 단일구조의 모형 대신 다층모형(Multi-Level Model) 혹은 위계적 선형 모형(Hierarchical Linear Model: HLM)을 이용할 경우, 건물에너지 소비 저감에 대해 지역적 차원을 고려한 영향관계를 파악하는 것이 가능하다.

이 연구에서는 데이터의 위계적 구조를 고려할 수 있는 방법론을 기반으로 건물과 지역 및 주변 환경 요인을 고려하여 건물에너지 소비량에 영향을 미치는 요인을 규명하고자 한다. 연구의 공간적 범위는 현재 에너지 소비저감을 위한 정책을 시행하고 있는 지역들 중 데이터 구축이 용이한 서울을 대상으로 하였으며, 건물에너지의 개별 및 지역특성인 필지와 행정동을 기준으로 설정하였고, 시간적 범위는 2016년을 기준으로 하였다. 연구의 구성으로 2장에서는 국내·외 선행연구를 통해 건물에너지의 건물 및 지역 요소를 파악하였고, 3장에서는 분석 요인과 분석 모형을 제시하였다. 4장에서 분석된 결과를 기반으로 해석하였으며, 5장에서 결론 및 시사점을 제시하였다.



Fig. 1. Example of hierarchical structure in urban study

II. 이론 및 선행연구 고찰

건물에너지 소비에 영향을 미치는 건물 특성을 분석한 선행연구에서는 주로 건물의 물리적 요인의 중요성을 제기하였다. 건물 자체 특성에 대해 건물구조, 건물 나이, 건물밀도, 건물면적 등을 건물에너지 소비에 영향을 미치는 요인으로 도출하였으며, 특히 건물의 밀도가 높은 지역일수록 건물 면적당 에너지 소비량이 감소함을 밝혔다(김기중 외, 2017; Qin and Han, 2013). Quan (2017)과 Li et al.(2018)은 도시의 건물밀도를 대변하는 변수인 Floor Area Ratio(FAR)가 건물에너지 소비에 영향을 미치는 것을 밝혔다. Tereci et al.(2013)는 건물밀도를 30% 증가시켰을 때 냉방에너지가 약 45%까지 저감된다는 것을 밝혔으며, 이러한 고밀도 도시형태는 자연광, 바람 환기, 일사량 증가 등으로 에너지 효율이 높은 것으로 나타났다(Steadman, 1979). 건물용도에 따른 에너지 소비량 차이에 대한 연구도 진행되었다. 이수진 외(2019)에서는 주거용도 건물이 상업용도인 건물에 비해 에너지 소비량이 적은 것으로 나타났으며, 안영수 외(2014)는 주택규모, 주택종류별로 에너지 소비량에 차이가 나타나며, 공동주택인 경우, 에너지 소비량이 다른 주택 유형에 비해 낮음을 제시했다.

건물에너지 소비량에 영향을 미치는 인구·사회적 요인에 대한 국내 연구에서는 대부분 행정동 단위로 연구가 진행되었다. 행정동에 따라 인구, 사회·경제, 환경요인의 차이가 나타나며(이희연·노승철, 2013), 인구변수는 건물에너지 소비에 밀접한 관련이 있음이 나타났다(정창현 외, 2009). 주거에너지 소비는 건물을 이용하는 사람의 생활 특성, 성별 등과 관계가 있으며, 특히 가구크기는 건물에너지 소비에 중요 변수이며, 가구크기의 감소는 건물에너지 소비량을 증가시키는 것으로 나타났다(Estiri, 2015; 정재원 외, 2015; 서현철 외, 2012). 평균나이의 경우는 임기추 외(2004) 연구에서는 정의 영향, 정재원 외(2015)에서는 부의 영향으로 같은 회귀모형을 구축하였음에도 영향력이 다르게 나타남을 확인하였다. 또한, 에너지소비와 관련해서 소득은 중요한 요인임을 확인하였다. 가계 소득은 에너지소비에서 큰 역할을 하며(Dillman et al., 1983), Calya et al.(2011)은 소득이 높을수록 에너지 소비가 높다고 밝혔다. 김기중 외(2017) 연구에서도 공시지가를 활용하여 고소득과 저소득 간 건물에너지 소비량 차이를 확인하였다.

최근에는 건물에너지 소비에 대한 지역 및 주변 환경에 관한 논의가 진행되고 있다. 주변 환경요인으로는 온도와 자연환경에 주안점을 두고 있다. 도시 온도는 주거에너지에 영향을 미치는 요인으로, 도시열섬의 높은 기온은 건물의 냉방에너지 사용을 증가시키고 있다. 반면, 녹지와 수계는 에너지 소비량을 저감시키는 요인이라고 규명하였다(Ewing and Rong, 2008; Rosenfeld et al., 1995). 한편, 주변 환경과 더불어 지역별 차이에 따라 건물에너지 소비에 차이가 있음을 제시한 연구도 있다. 건물에너지 소

비량에 영향을 미치는 주변 환경에 대한 연구는 필지단위로 미시적으로 진행된 반면, 지역별 차이에 대한 연구는 단일구조로 이루어졌으며, 시군구, 행정동 등 필지단위보다 거시적으로 진행되었다. 강창덕(2011)은 공간회귀모형을 이용해 서울시 행정구별 특성에 따라 에너지 소비가 다르고, 에너지 소비 특성에 적합한 저감대책에 대한 필요성을 제시하였다. 또한, 김민경(2013)의 연구에서는 선형회귀모형을 사용하여 서울시 생활권별 전력에너지 소비가 다르게 나타나며, 지역유형 변수에 대한 고려가 필요하다고 시사했다. 이는 지역에 따라 건물에너지 소비량에 차이가 있음을 의미하지만, 단일구조 모형으로 인해 데이터의 계층성을 무시하고, 데이터 구득의 어려움으로 인하여 거시적으로 연구를 진행한 것으로 판단된다.

최근 건물에너지 연구에서는 데이터의 위계적 특성을 고려하기 위해 다층모형을 이용하여 연구를 진행하고 있다. 다층모형은 데이터의 하위수준 요인과 상위수준 요인의 구조를 고려하여 종속변수에 미치는 영향 관계를 실증할 수 있는 모형으로, 1980년대 개발되어 교육, 사회, 경제 등 사회과학분야에서 사용된다(이순아, 2015). 다층모형을 이용한 건물에너지 연구로 Tso and Guan(2014)은 미국을 대상으로 하위수준인 가구 특성과 상위수준인 지역환경 특성이 주거에너지 소비에 미치는 영향을 실증분석하였다. 이를 통해 건물면적, 가구크기 등 건물에너지 소비량과 관계가 있는 영향요인을 파악하였지만, 상위수준인 지역환경 요인을 다양하게 고려하지 못하고 경제적 요인인 소득, 에너지 사용가격만 적용하였다. Li et al.(2018)은 중국을 대상으로 하위수준인 건물 및 가구 특성과 상위수준인 도시형태에 따라 건물에너지 소비량에 미치는 영향관계를 실증하였으며, 지역별 도시형태에 따라 건물에너지 소비가 차이가 날 수 있음을 밝혔다.

지금까지 선행연구의 고찰을 통해 건물에너지 소비량의 지역별 차이를 고려하는 것이 중요함을 확인하였다. 건물에너지 소비의 지역별 차이를 확인하기 위해 단일구조 모형으로 진행된 선행 연구에서는 각 요인별로 건물에너지 소비에 미치는 영향을 밝혔다. 건물밀도, 건물용도, 건물층수 등 물리적 특성 또한 건물에너지 소비에 영향관계가 있음이 밝혀졌으며, 지역의 인구·사회학적 변수는 건물에너지 소비를 결정하는 중요 요인으로 작용하였다. 이는 건물을 이용하는 사람이 건물에너지 소비량 증감에 영향을 미치므로, 인구밀도, 나이, 가구크기 등 인구의 특성을 파악하는 것이 중요하다. 특히, 경제적 요인인 소득은 건물에너지 소비 증감에 중요 요인임을 확인하였다. 그러나, 단일구조 모형으로는 하위 분석 단위가 상위 분석 단위에 포함되어 있는 위계구조를 고려하지 못한 한계를 가졌다. 이를 극복하기 위해 다층모형을 사용해 진행한 연구에서는 건물에너지 소비 증감에 중요 요인인 온도, 녹지와 같은 환경적 요인 및 하위수준인 건물 내 활동을 제외하고 지역에 따라 차이가 나타나는 인구·사회학적 고려가 부족하다고 판단하였다. 따라서 이 연구에서는 건물과 지역 및 주변환

경 요인의 위계적 구조를 고려하여 건물에너지 소비량에 미치는 영향요인을 실증분석하여 시사점을 도출하고자 한다.

III. 변수설정과 분석방법

1. 변수설정

이 연구에서는 여름철 전력에너지 소비가 가장 많은 시점(한국에너지공단, 2016b)의 건물에너지 소비량을 종속변수로 삼았다. 건축데이터 민간개방 시스템에서 제공하는 2016년 8월 필지별 전기에너지를 건물의 단위 면적당 전기에너지 소비량으로 산출하고, 건물 데이터가 존재하는 필지를 우선 추출하였다. 데이터의 이상치를 제거하기 위해 IQR(Inter Quartile Range) 검사¹⁾를 진행하였으며, 정규화를 위해 자연로그(ln)를 취하였다.

건물에너지 소비량에 영향을 미치는 요인은 선행연구의 고찰을 통해 도출하였다. 이 연구에서는 필지단위 건물에너지 소비량이 상위 단위인 행정동의 인구·사회학적 요인에 따라 차이가 있음을 실증하고자 한다. 이에 독립변수는 제1수준인 필지단위와 제2수준인 행정동 단위로 구분하여 변수를 설정하였다. 제1수준의 변수는 건물의 물리적 요인에 초점을 맞추어 건물 자체 특성이 건물에너지 소비량에 미치는 영향을 확인하고자 하였다. 물리적 요인으로는 건물나이, FAR, 건물바닥면적비율, 건물층수, 건물구조, 건물용도가 해당한다. FAR은 건물밀도를 대표하는 변수로 건물에너지 관련 연구에서 널리 사용되는 요인이다. 건물구조는 철근콘크리트 구조를 더미변수로 설정하여 구축하였으며, 건물용도는 건축법에 따른 주거업무시설군에서 주거용도를 더미변수화시켜 진행하였다. 제1수준인 필지 내 주변 환경 요인으로 Landset 8 데이터에서 추출한 지표온도²⁾를 이용하였다.

제2수준은 행정동 지역 요인이 미치는 영향을 확인하고자 인구, 사회·경제, 그리고 자연환경에 초점을 맞추었다. 인구특성으로는 인구밀도, 65세 이상 인구 수, 평균나이, 가구크기를 적용하였으며, 이는 서울시에서 제공하는 데이터에서 추출하였다. 경제적 특성으로는 서울시에서 제공하는 공시지가 데이터를 이용하여 행정동 평균 단위면적당 가격으로 산출하였다. 이는 데이터 구득이 어려운 소득을 대신하며 지역의 경제적 상황에 따른 영향을 확인하고자 하였다. 주변 환경 특성으로는 녹지율과 수계율을 적용하였다. 행정동 내 녹지 면적과 수계 면적을 동 면적으로 나누어 백분율로 산출하였다. 연구에서 채택한 각 변수는 <표 1>과 같다.

2. 분석방법과 모형

단일구조의 분석을 실행한 기존 연구에서는 위계적 변수의 특성을 반영하지 못하였다(강명구, 2007; 김소연, 2012; 이희연·노

Table 1. The variables for the analysis

Division	Variables	Content	Source
Dependent variable	Electricity consumption [Ln(wh/m ²)]	August Electricity consumption within plot on 2016	MOLIT*
	Surface temperature [°C]	Average of surface temperature	USGS
	Building age [year]	Average of building age within plot	
	Floor area ratio	(Building foot-print area × floor)/plot area	
	Cover ratio [%]	Building foot-print area/plot area	
	Building floor	Building floor within plot	
	Building structure	Dummy, RC=1, Others=0	
	Building use	Dummy, Residential house=1, Others=0	
Independent variable	Population characteristics	Population density	Population density within Dong
		Population over 65	Number of population over 65 within Dong
		Average age	Average age within Dong
		Household size	Average household size within Dong
	Economic characteristics	Land price [1000 Won/m ²]	Land price/m ²
		Ratio of green space [%]	(Green space area/Dong area) × 100
	Environment characteristics	Ratio of water [%]	(Water area/Dong area) × 100

* MOLIT: Ministry of Land, Infrastructure and Transport

승철, 2013). 단일구조 모형일 경우, 변수들에 대해 각각 독립성을 가지며, 잔차들도 독립적이라고 가정되지만, 위계적 구조를 가진 데이터의 경우 서로 동질적이며 의존성을 가진다. 이는 각 수준 간 상호작용이 나타날 수 있으며, 집단을 구분하지 않고 모든 변수가 동일하게 적용되기 때문에 종속변수와 독립변수 간 관계가 다르게 나타날 수 있음을 의미한다. <그림 2>는 데이터의 그룹에 따라 그래프 1은 그룹별 절편과 기울기가 동일함을 나타내며, 그래프 2는 기울기는 동일하지만 절편이 다르고, 그래프 3은 절편은 동일하지만 기울기가 다름을 나타낸다. 마지막으로 그래프 4는 그룹별로 절편과 기울기에 차이가 나타남을 보여준다(유정진, 2006). 실제 도시에서 그래프 1과 같은 형태는 나타나기 어

려우며, 이를 통해 데이터의 위계적 구조를 파악해 상위단계인 지역별 차이를 고려하는 것이 필요하다고 판단된다.

이 연구에서는 이를 실증하기 위해 다층모형(Multi-Level Model)을 사용하였다. 건물에너지 요인이 위계구조를 갖는지 파악하여, 지역 간 수준에 따라 건물에너지 소비에 영향을 미치는 요인을 확인하고자 하였다. 다층모형은 위계적 데이터를 분석할 수 있는 모형으로, 서로 다른 수준의 분석 단위를 하나의 모형으로 통합하여 동시에 추정할 수 있어 기존 회귀식보다 모수 추정을 효과적으로 할 수 있다(Ker, 2014). 또한, 각 수준별로 제공되는 데이터를 다른 단위로 변환하지 않고 이용할 수 있는 이점이 있다. 다층모형은 크게 무제약모형(Null Model), 임의절편모형(Random Intercept Model), 그리고 임의계수모형(Random Coefficient Model)으로 구분된다. 무제약모형은 설명변수를 포함하지 않고 절편만 있는 모델로 1수준과 2수준의 오차항을 가지고 각 수준의 크기를 알 수 있으며, 이를 통해 다층모형 사용의 적절성을 평가한다(식 (1) 참조).

$$Y_{ij} = \gamma_{00} + u_{0j} + e_{ij} \quad (1)$$

Y_{ij} : 종속변수

γ_{00} : 표본전체 평균

u_{0j} : 2수준의 집단 간 평균 차이

e_{ij} : 1수준의 개인 간 차이

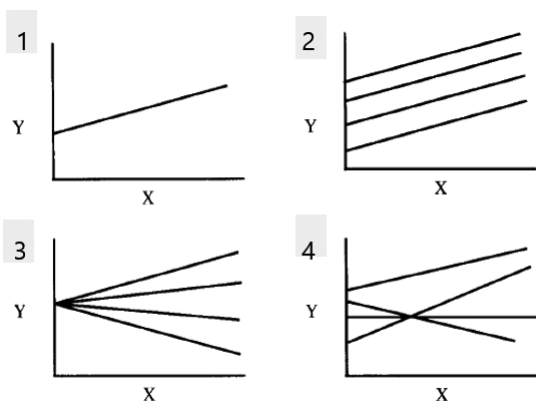


Fig. 2. Grape type (Yu, 2006)

임의절편모형은 집단에 따라 절편이 서로 다르게 추정되는 모형이다(식 (2) 참조).

$$Y_{ij} = r_{00} + r_{p0}X_{pij} + r_{0q}Z_{qj} + u_{0j} + e_{ij} \quad (2)$$

X_{pij} : Level 1 설명변수

Z_{qj} : Level 2 설명변수

임의계수모형은 집단별로 절편과 기울기가 모두 다르게 추정되는 식으로 다층모형에서 가장 복잡한 모형이다(식 (3) 참조).

$$Y_{ij} = r_{00} + r_{p0}X_{pij} + r_{0q}Z_{qj} + u_{pj}X_{pij} + u_{0j} + e_{ij} \quad (3)$$

u_{pj} : Level 1 설명변수 기울기에 대한 집단 수준에서의 잔차

이 연구에서는 가장 단순한 모델인 무제약모형으로 시작해서 모수를 추가해 적합한 모형을 구축하는 Bottom-up방식(Hox, 2002)을 채택하였으며, HLM을 이용해 분석을 진행하였다.

IV. 실증분석 결과

1. 기초통계량

종속변수인 건물에너지 소비량과 제1수준인 건물 특성 요인과 제2수준인 지역 및 주변 환경 요인으로 선정한 변수들을 대상으로 기초통계량을 실시하였다. 기초통계량은 <표 2>와 같다.

종속변수인 단위면적당 에너지 소비량은 최대가 13.81, 최소가 0.85로 차이가 나는 것으로 보아, 각 필지별 건물에너지 소비량 차이가 상이한 것을 알 수 있다.

제1수준은 112,040개 필지이며, 제2수준은 서울시 424개 행정동을 대상으로 하였으며 <그림 3>과 같다. 제1수준의 건물의 물리적 특성에 관한 변수에 있어 필지 내 평균 건물나이는 26년이며, FAR은 평균 2.38로 나타났다. 건물바닥면적비율은 평균 35%이며 건물 층수는 최소 1층, 최대 60층이고 평균 3.93층이다. 철근콘크리트 구조건물은 약 73%, 주거용 건물은 약 15%를 차지하는 것으로 나타났다. 지표온도는 가장 낮은 온도가 23.11℃이며, 최고 온도는 39.70℃로 필지별로 상이하게 나타나는 것을 알 수 있다.

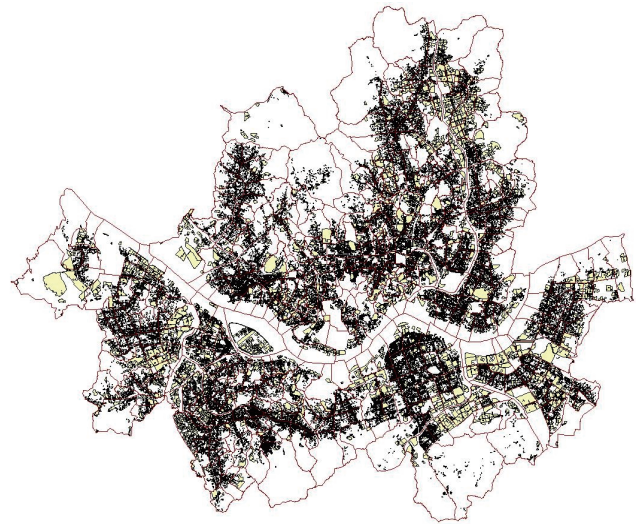


Fig. 3. Research spatial area (Plot and Dong)

Table 2. The Descriptive Statistics

Division	Variables	N	Mean	SD	Min	Max
L1	Electricity consumption	112,040	9.06	1.10	0.85	13.81
	Surface temperature	112,040	32.33	1.29	23.11	39.70
	Building age	112,040	26.44	13.49	0	106
	Floor area ratio	112,040	2.38	1.85	0.00	100.96
	Cover ratio	112,040	35.06	22.29	1.67	100
	Building floor	112,040	3.93	2.58	1	60
	Building structure	112,040	0.73	0.44	0	1
	Building use	112,040	0.15	0.35	0	1
L2	Population density	424	0.0245	0.0123	0.001	0.063
	Population over 65	424	3050.32	1194.839	108	6725
	Average age	424	41.397	2.2342	34.7	52.2
	Household size	424	2.482	0.333	1.461	3.356
	Land price	424	103.136	174.2906	1.6030	1671.647
	Ratio of green space	424	15.437	18.467	0	84.901
	Ratio of water	424	4.629	10.341	0	60.845

제2수준에서 인구 특성 중 인구밀도는 평균 0.0245/m²이며 가장 높은 인구밀도는 0.063/m²이다. 65세 이상 인구는 평균 3050.32명이며, 행정동 평균나이는 41.39살, 가장 적은 나이는 34.07살, 높은 나이는 52.20살로 행정동별 평균 나이차가 크다는 것을 알 수 있다. 가구크기는 가장 적은 곳은 1.461이며, 높은 곳은 3.456으로 나타난 것을 확인하였다. 행정동별 공시지가 평균은 103,136원/m²이며, 가장 높은 값은 1,671,647원/m²인 것으로 확인되었다. 주변 환경 요인인 녹지율과 수계율의 평균은 각 15.437%와 4.629%로 확인하였다.

2. 다층모형 분석 결과

다층모형을 이용하여 분석한 결과는 <표 3>과 같다. 모형의 적합도 척도인 Akaike Information Criterion(AIC), Bayes Information Criterion(BIC) 그리고 Deviance를 이용해 분석한 결과를 토대로 모형 적합성을 파악하였다. AIC, BIC, 그리고 Deviance는 값이 작아질수록 적합한 모형이라 판단한다(유정진, 2006). AIC는 332426.445에서 291407.070로, BIC은 332438.594에서 291556.910, 마지막으로 Deviance는 332420.445에서 291333.070로 산출되어 Model 1에서 Model 3으로 모형이 확장될수록 개선됨을 확인하였다.

Table 3. Results

		Model 1		Model 2		Model 3	
		Coef.	S.E	Coef.	S.E	Coef.	S.E
Level2	Intercept	9.058***	0.016	8.1729***	0.4752	7.7270***	0.3808
	Population density			0.8511	1.7876	-0.8275	1.3114
	Population over 65			0.000	0.000	0.0000	0.0000
	Average age			-0.0151*	0.0088	-0.0128*	0.0064
	Household size			-0.1329**	0.0595	0.0054	0.0391
	Land price			0.0002*	0.0001	0.0001*	0.0001
	Ratio of green space			-0.0007	0.0010	-0.0006	0.0008
	Ratio of water			0.0016	0.0016	0.0003	0.0015
Level1	Surface temperature			0.0415***	0.0083	0.0544***	0.0073
	Building age			0.0089***	0.0004	0.0088***	0.0004
	Floor area ratio			-0.0455***	0.0038	-0.0622***	0.0042
	Cover ratio			0.0095***	0.0003	0.0094***	0.0003
	Building floor			0.0356***	0.0039	0.0358***	0.0038
	Building structure			0.0737***	0.0125	0.0823***	0.0110
	Building use			-1.5493***	0.0368	-1.6387***	0.0284
Variance							
L1(R)		1.12526		0.81548		0.75954	
Random Effect	Variance Component	0.10016***		0.11957***		16.41562***	
	Surface temperature					0.0157***	
	Building age					0.0000***	
	Floor area ratio					0.0032***	
	Cover ratio					0.0000***	
	Building floor					0.0032**	
	Building structure					0.0176	
	Building use					0.2760***	
AIC		332426.445		296574.452		291407.070	
BIC		332438.594		296643.297		291556.910	
Deviance		332420.445		296540.452		291333.070	

*p<0.1, **p<0.05, ***p<0.01

이 연구의 Model 1은 무제약모형(Null Model)으로 다층모형 사용의 적합성을 판단하며 독립변수를 제외하고 종속변수와 1수준과 2수준의 오차항을 포함하여 모형을 구성한다. 무제약모형을 이용하여 집단 내 상관계수(Interclass Correlation Coefficient: ICC)를 구해 지역수준의 분산이 종속변수에 차지하는 비율을 알 수 있다(이성현·전경구, 2012; 식 (4) 참조). ICC 값은 5~25% 수준으로, 5% 이상일 경우, 다층모형을 사용하는 것을 권장한다(주지훈, 2012).

$$ICC = \frac{var(u_{0j})}{var(u_{0j}) + var(r_{ij})} \quad (4)$$

이 연구에서 ICC값을 통해 분석한 결과, 8.1735%는 지역요인에 의해 건물에너지 소비량이 발생하는 것을 의미한다. 즉, 건물에너지 소비에 대한 전체 분산 중 8.1735%가 424개 행정동의 특성에 따른 차이에 의해 발생된다는 것이다.

Model 2는 제1수준과 제2수준을 동시에 고려한 임의절편 모형이다. 분석 결과, 제1수준의 모든 변수는 1% 수준 내에서 유의하며, 제1수준의 결과로, 지표온도, 건물나이, 건물바닥면적비율, 건물층수, 건물구조는 건물에너지 소비에 정(+)의 관계를 가지며, FAR, 건물용도는 부(-)의 관계를 가진다. 제2수준에서는 평균나이와 가구크기는 부의 관계, 지가는 양의 관계로 10% 수준 내에서 유의한 것으로 나타났다. 지표온도는 건물 단위의 주변 환경 요인으로, 온도가 높을수록 냉방을 위한 에너지 소비량이 증가하는 것으로 판단된다. 건물이 노후할수록 신규 건물에 비해 에너지 소비량이 증가하는 것으로 나타났다. 건물밀도 척도인 FAR이 높을수록 건물에너지 소비량은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 건물면적과 높이가 높을수록 에너지 효율이 증가하는 것으로 판단된다. 건물바닥면적비율은 증가할수록 에너지 소비량이 증가하는데 이는 토지피복도 증가가 여름철 온도 증가에 영향을 주어 이를 저감하기 위해 냉방 에너지소비량이 증가하는 것으로 판단된다. 철근콘크리트 구조물은 다른 구조물에 비해 건물에너지 소비량을 증가시키는 요인으로 나타났으며, 주거용도 건물이 다른 용도인 건물에 비해 건물에너지 소비량이 적은 것으로 나타났다. 제2수준에서는 평균나이가 적은 지역일수록 건물에너지 소비량이 감소하는 것으로 나타나며, 이는 평균나이가 많을수록 에너지 절약의식이 젊은 층에 비해 높기 때문(노승철·이희연, 2013) 에너지 소비량이 적은 것으로 판단되며, 가구크기가 작은 지역일수록 건물에너지소비량이 증가하는 것으로 나타난다. 지가의 경우, 공시지가가 높은 지역에 거주하는 사람은 건물에너지를 더 소비하는 경향이 있다. Model 1과 비교한 결과, 제1수준의 분산이 1.12526에서 0.81548로 줄어들었으며 건물에너지 소비량은 도입된 변수들에 의해 설명된 것으로 판단된다.

임의계수는 임의효과의 유의성과 수준별 분산 감소비율을 확인하며 설정된다(이희연·노승철, 2013). 이 연구에서는 Model 2에서 유의했던 제1수준 요인인 지표온도, 건물나이, FAR, 건물바닥면적비율, 건물층수, 건물구조, 건물용도를 임의계수로 설정하였다. Model 3의 고정효과와 Model 2와 비교하였을 때, 제1수준에서는 결과값이 유사한 것으로 나타났으며, 제2수준에서는 평균나이와 지가가 10% 수준 내에서 유의하였다. Model 3은 제1수준의 임의계수의 무선효과(Random effect)³⁾를 파악할 수 있어 Model 2에 비해 자세한 정보를 파악할 수 있다. 무선효과 기울기 분산은 건물구조를 제외한 지표온도 0.0157, 건물나이 0.0000, FAR 0.0032, 건물바닥면적비율 0.0000, 건물 층수는 0.0032, 그리고 건물용도 0.2760으로 5% 수준 내에서 유의한 것으로 나타났다. 임의계수의 값을 기반으로 샘플 수의 무작위 30%를 추출하여 그래프로 표현하였다(그림 4 참조). 그래프 확인 결과, 각 행정동마다 회귀선의 절편과 기울기가 다르다는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 지역에 따라 각각 차이가 있음을 나타낸다. 지표온도의 경우, 행정동에 따라 회귀선이 건물에너지 소비량에 정의 관계와 부의 관계를 가지는 것으로 나타났다. 건물나이, 건물바닥면적비율, 건물층수는 대부분 정의 관계를 나타내는 것으로 확인되며, FAR과 건물용도의 경우 부의 관계로 나타났다.

분산을 이용해 Model 1과 비교하여 식 (5)를 이용하여 최종모형인 Model 3의 유사 R²를 구한 결과, 32.5%로 확인하였다.

$$R^2 = (\sigma_1^2 - \sigma_2^2) / \sigma_1^2 \quad (5)$$

σ_1^2 : 무제약 모형의 1수준 분산

σ_2^2 : 최종 결합모형의 1수준 분산

V. 결론

이 연구는 건물의 물리적 요인과 지역적 요인을 고려하여 기존 모형에서 단일구조로 진행한 한계점을 극복하기 위해 다층모형을 적용하여 건물에너지에 미치는 영향요인을 분석하였다. 분석 결과를 토대로 다음과 같은 시사점을 도출하였다.

첫째, 건물에너지 소비량은 행정동에 따라 차이가 나타남을 확인하였다. 다층모형을 적용하여 건물에너지 소비의 요인을 통합적으로 분석한 결과, 건물에너지 소비는 건물·지역 요인에 모두 영향을 받으며, 특히 상위수준인 행정동 특성에 의한 8.1735%가 건물에너지 소비 차이로 설명된다. 또한, 임의계수를 기반으로 그래프를 확인한 결과, 각 지역별 절편과 기울기가 다르다는 것을 확인하였다. 이 연구결과를 바탕으로 건물면적, 건물구조, 건물용도 등 건물의 물리적 개선을 통한 에너지 저감정책에 대해서 지역 유형에 따라 건물에너지 소비량이 달라질 수 있음을 고려한

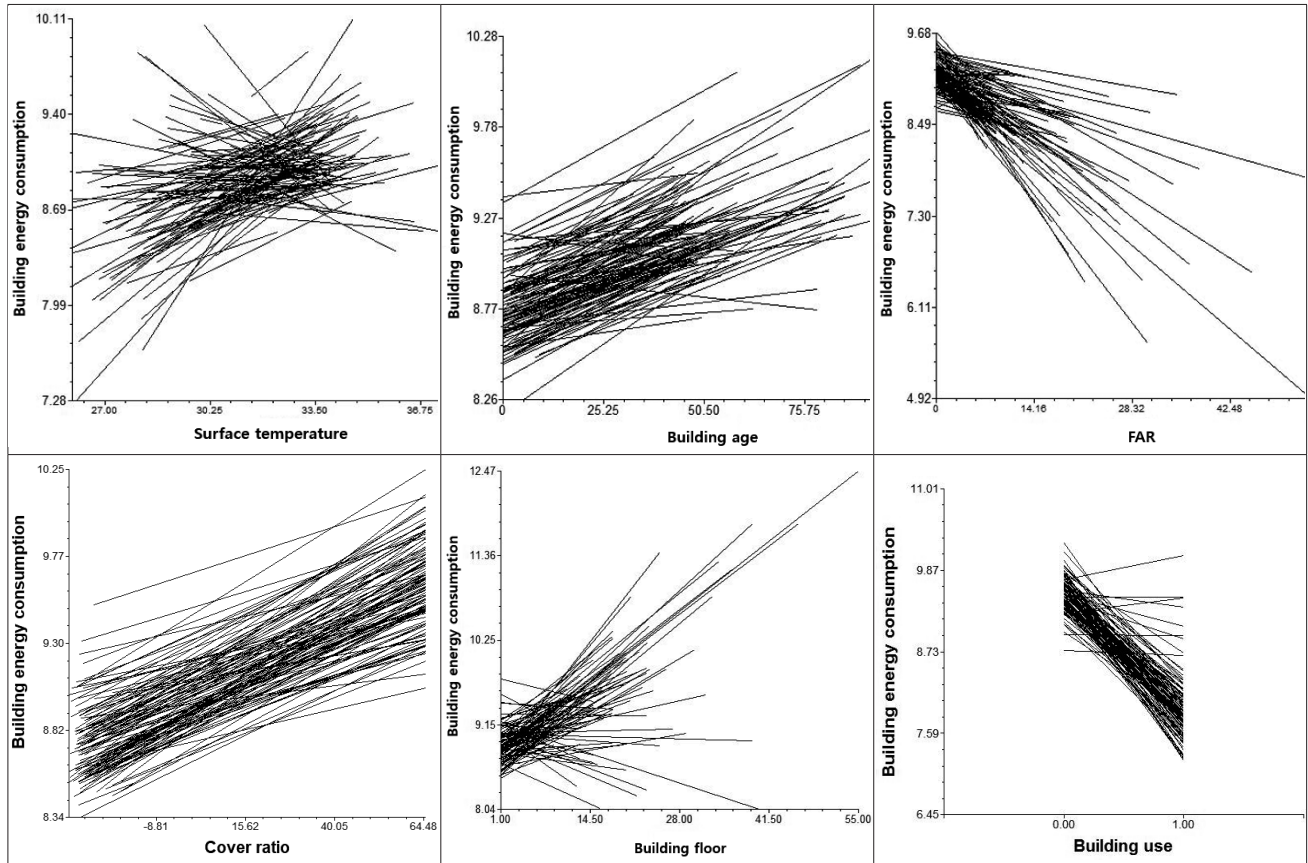


Fig. 4. Random effect graph

지역밀착형 정책을 적용한다면 그 효과를 더욱 제고할 수 있을 것으로 기대된다.

둘째, 건물의 물리적 요인은 건물에너지 소비에 영향을 미친다. 건물나이, FAR, 건물바닥면적비율, 건물층수, 건물구조 등 건물의 물리적 요인과 관계가 있는 것으로 분석되었다. 특히, FAR이 높을수록 에너지소비에 있어 효율적이지만, 건물바닥면적의 필지 내 차지하는 비율이 높을수록 에너지소비가 높다. 이는 향후 건물에너지 저감을 위해서 건물 자체에 대한 높이, 면적 등 규모에 대한 고려가 필요함을 의미하며, 서울시에서 진행하는 건물 효율화 사업에 있어 기초자료가 될 것으로 판단한다.

셋째, 건물에너지는 행정동의 사회·경제, 인구 등 요인에 영향을 받는다. 이는 건물의 개별 특성 외에 지역 및 주변 환경에 대한 고려가 필요함을 나타낸다. 특히, 소득을 나타내는 지가가 건물에너지 소비량에 정의 영향을 미치는 것으로 확인하였으며, 이는 지역별 경제적 조건에 따라 건물에너지 소비 저감 정책이 달라야 함을 의미한다. 또한, 평균나이가 높은 지역일수록 단위면적당 건물에너지 소비량이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 건물을 이용하는 사람의 특성에 따라 에너지 소비량 차이가 나타나며, 연령, 가구원, 소득 등 가구 특성을 고려한 건물에너지 소비량 저감에 대한 정책이 필요함을 의미한다.

연구의 한계점으로는 국토부에서 제공하는 건물에너지 데이터

는 단독주택을 포함하고 있지 않아 실제 전력 사용량과 차이가 나타날 수 있다. 또한, 건물에너지 사용에 밀접하게 관련된 사용자의 행동과 소득에 대해서는 이에 대한 데이터 구축 문제로 인해 고려가 미흡하였다. 건물에너지의 지역 및 주변 환경을 포함하는데 있어 상위수준의 구분의 적절성에 대한 후속 연구가 필요하다. 이러한 한계에도 불구하고, 이 연구의 결과는 건물에너지 소비 연구를 기존의 단일 구조로 진행한 것과 달리, 데이터의 위계적 구조를 고려하여 진행함으로써 지역별 차이를 고려한 건물에너지 소비 저감 정책에 대한 필요성 및 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

- 주1. IQR 검사는 [1사분위수(Q1)-1.5IQR, 3사분위수(Q3)+1.5IQR]의 허용범위를 벗어나는 수치는 이상치로 정의하여 처리하는 방법이다(주영선·조교영, 2016).
- 주2. 지표온도는 건물 내 주변 온도와 더불어, 건물 표면에 입사되는 열로 인해 외부 온도가 건물로 유입하여 건물에너지 소비량에 영향을 미칠 수 있다(Shen et al., 2011; Santamouris et al., 2001). 이 연구에서는 이를 고려해 지표온도를 건물단위인 제1수준에서 분석하였다.
- 주3. 무선흐과(Random effect)는 상위 수준의 특성에 따라서 기울기 및 절편 값이 다수인 것을 의미한다(이희연·노승철, 2013).

인용문헌 References

1. 강명구, 2007. “주거비용에 영향을 미치는 요소 분석: 시스템다이내믹스 계수추정을 위한 다층모형과 회귀모형의 비교”, 『한국 시스템다이내믹스 연구』, 8(2): 253-273.
Kang, M.G., 2007. “Determinants of Housing Cost: Hierarchical Linear Model for Estimating Coefficients of a Housing System Dynamics Model”, *Korean System Dynamics Society*, 8(2): 253-272.
2. 강창덕, 2011. “공간계량모형에 의한 서울시 에너지 소비 분석과 정책과제: 전력과 도시가스 소비를 중심으로”, 『서울도시연구』, 12(4): 1-22.
Kang, C.D., 2011. “Analysis on Energy Consumption and Its Policy Implication in Seoul with Spatial Econometrics -Focusing on Electricity and Gas Consumption”, *Seoul Studies*, 12(4): 1-22.
3. 김기중·안영수·이승일, 2017. “소득격차를 고려한 조건에서 건물과 도시계획 요소가 건물에너지 소비에 미치는 영향요인 분석-서울시 8월 전기사용량을 중심으로”, 『국토계획』, 52(5): 253-267.
Kim, K.J., An, Y.S., and Lee, S.I., 2017. “Analysis of Influencing Factors of Building and Urban Planning on Building Energy Consumption Considering Income Gap-Focused on electricity consumption on August in Seoul”, *Journal of Korea Planning Association*, 52(5): 253-267.
4. 김동현·송슬기, 2016. “도시 고온현상에서의 토지피복 유형과 체감온도 간 관계분석”, 『국토계획』, 51(1): 137-152.
Kim, D.H. and Song, S.K., 2016. “Analyzing the Relationships between Land Cover Type and Sensible Temperature in Urban Heat Wave”, *Journal of Korea Planning Association*, 51(1): 137-152.
5. 김민경, 2013. “서울시 주거용 건물의 전력 소비량 추정모델”, 『서울도시연구』, 14(2): 179-192.
Kim, M.K., 2013. “An Estimation Model of Residential Building Electricity Consumption in Seoul”, *Seoul Studies*, 14(2): 179-192.
6. 김선희, 2006. “에너지절약적 도시개발과 과제”, 『국토』, 300: 17-32.
Kim, S.H., 2006. “Energy Saving City Development and Task”, *Planning and Policy*, 300: 17-32.
7. 김소연, 2012. “공간 속성을 고려한 주택 가격 결정 모형: 서울시 아파트를 대상으로”, 고려대학교 대학원 석사학위논문.
Kim, S.Y., 2012. “A Study on House Price Determinants Model Considering Spatial Attributes-The Case of Apartment in Seoul”, Master Dissertation, Korea University.
8. 노승철·이희연, 2013. “가구 부문의 에너지 소비량에 영향을 미치는 요인 분석”, 『국토계획』, 48(2): 295-312.
Noh, S.C. and Lee, H.Y., 2013. “An Analysis of the Factors Affecting the Energy Consumption of the Household in Korea”, *Journal of Korea Planning Association*, 48(2): 295-312.
9. 박종문, 2018. “지역유형에 따른 가구 전력 소비의 영향요인 비교 연구”, 『한국지역개발학회지』, 30(2): 193-220.
Park, J.M., 2018. “A Comparison of Factors Affecting Household Electricity Consumption by Regional Types”, *Journal of The Korean Regional Development Association*, 30(2): 193-220.
10. 산업통상자원부, 에너지경제연구원, 2015. 「2014 에너지총조사 보고서」, 서울.
Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea Energy Economics Institute, 2015. *2014 Energy Consumption Survey*, Seoul.
11. 서현철·홍원화·남경목, 2012. “거주자 구성유형 및 소득수준에 따른 주거용 건물 내 전력소비성향”, 『한국주거학회논문집』, 23(6): 31-38.
Seo, H.C., Hong, W.H., and Nam, G.M., 2012. “Characteristics of Electric-Power Use in Residential Building by Family Composition and Their Income Level”, *Journal of The Korean Housing Association*, 23(6): 31-38.
12. 안영수·김기중·이승일, 2014. “서울시 주택의 규모와 종류, 건축연도별 특성이 에너지 소비량의 차이에 미치는 영향 실증 연구”, 『국토계획』, 49(3): 175-194.
An, Y.S., Kim, K.J., and Lee, S.I., 2014. “An Empirical Research on the Difference of Energy Consumption According to the Housing and Regional Characteristics of Seoul”, *Journal of Korea Planning Association*, 49(3): 175-194.
13. 양혜미·송재민, 2017. “에너지 소비특성에 따른 도시 유형화 및 유형별 특성 분석”, 『한국지역개발학회지』, 29(3): 113-133.
Yang, H.M. and Song, J.M., 2017. “Typology of Energy Consumption Patterns in Cities and Analysis of Their Characteristics by Type”, *Journal of The Korean Regional Development Association*, 29(3): 113-133.
14. 유정진, 2006. “위계적 선형모형의 이해와 활용”, 『아동학회지』, 27(3): 169-187.
Yu, J.J., 2006. “Understanding and Application of Hierarchical Linear Model”, *Korean Journal of Child Studies*, 27(3): 169-187.
15. 이성현·전경구, 2012. “위계적 선형모형을 통한 도시기반시설이 주택가격에 미치는 영향 연구”, 『국토계획』, 47(4): 193-204.
Lee, S.H. and Chun, K.K., 2012. “A Study of the Influences of Urban Infrastructure on Housing Prices: A Hierarchical Linear Model”, *Journal of Korea Planning Association*, 47(4): 193-204.
16. 이수진·김기중·이승일, 2019. “연립방정식을 이용한 도시온도와 건물에너지 소비의 상호영향관계 실증 분석: 서울시를 중심으로”, 『서울도시연구』, 20(1): 33-44.
Lee, S.J., Kim, K.J., and Lee, S.I., 2019. “Empirical Analysis of Mutual Influential Relationship between Urban Temperature and Building Energy Consumption Using Simultaneous Equation: Focused on Seoul, Korea”, *Seoul Studies*, 20(1): 33-44.
17. 이순아, 2015. “한국사회 가구빈곤의 결정요인에 관한 다층분석”, 『한국사회학』, 49(1): 139-177.
Lee, S.A., 2015. “Determinants of Household Poverty in South Korea: Using Multi-level Analysis”, *Korean Journal of Sociology*, 49(1): 139-177.
18. 이희연·노승철, 2013. 『고급통계분석론: 이론과 실습』, 서울: 문우사.
Lee, H.Y. and Noh, S.C., 2013. *Advanced Statistical Analysis*, Seoul: MoonWoosa.
19. 임기추·강운영·정창봉·권태규, 2004. 「생활양식이 가정부문 에너지소비에 미치는 영향 분석」, 의왕: 에너지경제연구원.
Lim, K.C., Kang, Y.Y., Jung, C.B., and Kwon, T.G., 2004. *Analysis of the Effect of Lifestyle on Household Energy Consumption*, Uiwang: Korea Energy Economics Institute.
20. 정재원·이창효·이승일, 2015. “서울시 행정동별 가구의 에너지 소비량에 영향을 미치는 요인의 통합적 분석”, 『국토계획』, 50(8): 75-94.

- Jung, J.W., Yi, C.H., and Lee, S.I., 2015. "An Integrative Analysis of the Factors Affecting the Household Energy Consumption in Seoul", *Journal of Korea Planning Association*, 50(8): 75-94.
21. 정창헌·김지영·김석기·김태연·이승복, 2009. "서울 주거부문 에너지 소비량 저감 전략에 따른 효과 분석", 「대한건축학회논문집」, 25(11): 323-331.
Cheong, C.H., Kim, J.Y., Kim, S.K., Kim, T.Y., and Leigh, S.B., 2009. "Evaluation on the Energy Reduction Strategy of Residential Buildings in Seoul, Korea", *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 25(11): 323-331.
22. 주영선·조교영, 2016. "경제조사에서의 이상치 탐지와 처리 방법", 「한국데이터정보과학회지」, 27(1): 131-142.
Joo, Y.S. and Cho, G.Y., 2016. "Outlier Detection and Treatment in Industrial Sampling Survey", *Journal of the Korean Data and Information Science Society*, 27(1): 131-142.
23. 주지훈, 2012. "연구개발조직에 있어 팀의 가상성, 다양성 및 임파워먼트의 선행요인과 결과요인에 관한 연구: 위계적 선행모형을 이용한 다수준 접근법을 중심으로", 충남대학교 대학원 박사학위논문.
Joo, J.H., 2012. "A Study on the Antecedents and Consequences for Team's Virtuality, Diversity and Empowerment in a Research & Development Organization – An Analysis by Hierarchical Linear Model", Ph. D. Dissertation, Chungnam University.
24. 한국에너지공단, 2016a, 「2015년도 에너지사용량 통계」, 서울.
Korea Energy Agency, 2016a. *2015 Annual End-Use Energy Statistics*, Seoul.
25. 한국에너지공단, 2016b, 「2016 대한민국 에너지편람」, 서울.
Korea Energy Agency, 2016b. *2016 Korea Energy Handbook*, Seoul.
26. Cayla, J.M., Maizi, N., and Marchand, C., 2011. "The Role of Income in Energy Consumption Behaviour: Evidence from French Households Data", *Energy Policy*, 39(12): 7874-7883.
27. Dillman, D.A., Rosa, E.A., and Dillman, J.J., 1983. "Lifestyle and Home Energy Conservation in the United States: The Poor Accept Lifestyle Cutbacks While the Wealthy Invest in Conservation", *Journal of Economic Psychology*, 3(3-4): 299-315.
28. Estiri, H., 2015. "A Structural Equation Model of Energy Consumption in the United States: Untangling the Complexity of Per-capita Residential Energy Use", *Energy Research & Social Science*, 6: 109-120.
29. Ewing, R. and Rong, F., 2008. "The Impact of Urban Form on U.S. Residential Energy Use", *Housing Policy Debate*, 19(1): 1-30.
30. Hox, J., 2002. "Multilevel Analysis Techniques and Applications", *Lawrence Erlbaum Associates*, 22(3): 255-265.
31. Ker, H.W., 2014. "Application of Hierarchical Linear Models/Linear Mixed-effects Models in School Effectiveness Research", *Universal Journal of Educational Research*, 2(2): 173-180.
32. Li, C., Song, Y., and Kaza, N., 2018. "Urban Form and Household Electricity Consumption: A Multilevel Study", *Energy and Buildings*, 158: 181-193.
33. Qin, B. and Han, S.S., 2013. "Planning Parameters and Household Carbon Emission: Evidence from High- and Low-carbon Neighborhoods in Beijing", *Habitat International*, 37: 52-60.
34. Quan, S.J., 2017. "Energy Efficient Neighborhood Design Under Residential Zoning Regulations in Shanghai", *Energy Procedia*, 143: 865-872.
35. Rosenfeld, A.H., Akbari, H., Bretz, S., Fishman, B.L., Kurn, D.M., Sailor, D., and Taha, H., 1995. "Mitigation of Urban Heat Islands: Materials, Utility Programs, Updates", *Energy and Building*, 22(3): 255-265.
36. Santamouris, M., Papanikolaou, N., Livade, I., Koronakis, I., Georgakis, C., Argiriou, A., and Assimakopoulos, A., 2001. "On the Impact of Urban Climate on the Energy Consumption of Buildings", *Solar Energy*, 70(3): 201-216.
37. Shen, H., Tan, H., and Tzempelikos, A., 2011. "The Effect of Reflective Coatings on Building Surface Temperatures, Indoor Environment and Energy Consumption: An Experimental Study", *Energy and Buildings*, 43(2-3): 573-580.
38. Steadman, P., 1979. *The Evolution of Designs: Biological Analogy in Architecture and the Applied Arts*, London: Routledge.
39. Tereci, A., Ozkam, S.T.E., and Eicker, U., 2013. "Energy Benchmarking for Residential Buildings", *Energy and Buildings*, 60: 92-99.
40. Tso, G.K.F. and Guan, J., 2014. "A Multilevel Regression Approach to Understand Effects of Environment Indicators and Household Features on Residential Energy Consumption", *Energy*, 66: 722-731.
41. Yu, Z., Haghighat, F., Fung, B.C.M., and Yoshino, H., 2010. "A Decision Tree Method for Building Energy Demand Modeling", *Energy and Buildings*, 42(10): 1637-1646.
42. Yun, G.Y. and Steemers, K., 2011. "Behavioral, Physical and Socio-economic Factors in Household Cooling Energy Consumption", *Applied Energy*, 88(6): 2191-2200.

Date Received	2019-01-21
Reviewed(1 st)	2019-03-03
Date Revised	2019-07-30
Reviewed(2 nd)	2019-08-12
Date Revised	2019-08-20
Reviewed(3 rd)	2019-09-02
Date Accepted	2019-09-02
Final Received	2019-09-11