

공동주택단지의 공간 특성이 단지 내 전기소비량에 미치는 영향

- 서울시 1,122개 공동주택 단지를 대상으로 -

임재빈* ·허익수** ·강명구***

A Study on Impact of Apartment Complex' Spatial Characteristics on Electricity Consumption: Evidence from Seoul, Korea

Jaebin Lim* ·Iksoo Huh** ·Myounggu Kang***

요약 : 공동주택 단지는 개별 주택과 전혀 다른 전기소비 특성을 보일 수 있다. 표준화된 다수 주택이 집합된 건물동을 이룰 뿐 아니라 공동시설과 공용공간에서도 전기가 소비된다. 기존 연구는 주로 개별 주택의 전기소비 모형을 구축했으며, 단지 단위의 개념은 미기후 시각의 접근 외에는 활발하지 못했다. 이 연구의 목적은 공동주택 단지의 공간 특성과 단지별 전기소비량의 관계를 밝히는 데 있다. 건축물대장 외 주민등록대장을 연계하여 인구를 고려해 기존 연구 결과를 확장했다. 이를 위해 주요 특성요소를 연쇄구조로 구성하는 통계기법인 STIRPAT(Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology) 모형을 응용하였다. 연구 결과, 공동주택 단지의 전기소비량에 영향을 미치는 변수는 인구뿐 아니라 인구밀도, 건폐율, 층수, 호당면적, 소득수준(단위면적당 주택거래가격), 사용월수, 평균기온이 유의한 것으로 파악됐다. 또한 저건폐율-고층 단지가 고건폐율-저층 단지보다 건폐율과 층수의 증가에 따른 전기소비증가는 덜하고, 인구밀도 증가에 따른 전기소비 감소는 적은 것을 확인하였다. 이 연구는 향후 공공주택지구 등 공동주택단지 공급 시 국지적 전기소비량 추정에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : 공동주택단지, 전기소비모형, STIRPAT, 빅데이터, 단지설계

ABSTRACT : The apartment complex can have big difference for electricity consumption factors from the individual houses. Not only does standardized multi-homes make one building, but electricity is also consumed in public facilities and public spaces. Literatures have constructed electricity consumption models of individual houses, and the concept of apartment complex was seldom studied except the approach of microeconomic view. To expand the literatures results to population factor, the resident registration ledger was used in addition to the building ledger, applying the STIRPAT (Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology). As a result, variables affecting the electricity consumption of the apartment complex are population, population density, BCR(building coverage ratio), number of floors, floor area per a house unit, the income level (house trade price per unit area), number of months used. In addition, the low BCR-High Rise type complexes showed less electricity consumption due to the increase of BCR and floors than the High BCR-Townhouse type complexes. On the other hand, the latter was more effective in reducing electricity consumption due to the increase in population density than the former. The results of this study are expected to be applicable to the estimation of local electricity consumption in the case of public housing districts.

KeyWords : Apartment Complex, Electricity Consumption Model, STIRPAT, Big Data, Complex Design

* 토지주택연구원 수석연구원(Research Fellow, Land and Housing Institute)

** 서울대학교 간호대학 교수(Professor, College of Nursing and Research Institute of Nursing Science, Seoul National Univ.)

*** 서울시립대학교 도시공학과 교수(Professor, Dept. of Urban Engineering Univ. of Seoul),
교신처지(E-Mail : mk@uos.ac.kr, 02-820-5849)

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

서울은 공동주택 단지의 도시이다(김용인·송승영, 2014). 1970년대부터 대대적으로 공동주택 단지가 공급되었으며, 그후 지금까지 개발된 신시가지다. 결과적으로 2017년 서울의 총 재고 주택 2,866,845호 중 87.4%인 2,505,206호가 공동주택이며, 단지를 구성하여 공급된 수만 1,665,922호(58.1%)에 달한다(출처: 서울시 열린데이터광장).

이제까지 공동주택은 주로 개별 주택의 전기소비 특성이 분석되어왔을 뿐, 단지 단위의 통계모형 분석은 드물다(Ko, 2013). 이는 공동주택 단지를 대상으로 한 전기소비, 인구 등의 자료를 대량으로 구득하기가 어려웠기 때문이다(박소윤 외, 2011). 그러나 소위 빅데이터 연구 환경이 갖춰지면서 단지별 전기소비량, 주민등록인구 현황, 건축물대장 특성 등의 정보를 상호 연계할 수 있는 기반이 마련되고 있다(김기중 외, 2016). 또, 그에 따르는 대용량 연산도 수월하게 수행할 수 있게 되었다.

전기사용 특성의 통계모형 분석과 관련하여 공동주택 단지는 개별 주택의 집합과는 다르며 의미 있는 차이가 있다. 첫째로 구조적으로 유사한 주택들이 동시에 집단 공급된다. 주택별 면적의 차이는 있을 수 있지만, 같은 단지내의 주택들은 입지환경 조건은 물론, 건축재료와 내부 구조가 유사하다(Kim et al., 2005; Hong et al., 2014). 특히 우리나라 공동주택 단지는 표준화를 중시하여 비슷한 시기에 만들어진 단지들끼리는 서로 유사하다(Hong et al., 2012). 둘째로 개별 주택 뿐 아니라 공용 공간을 위한 전기소비가 존재한다. 주택 내에서는 주로 실내조명, 전기제품, 냉난방 등에 전기가 사용된다(Deweese and Tombe, 2011). 공용

공간으로서는 엘리베이터, 실외조명, 지하주차장 조명, 상수도펌프 등과 체력단련시설, 경비실, 어린이집 등의 커뮤니티시설에서 전기가 사용된다. 셋째로, 대체로 한 단지 내에서는 입주민의 가구 특성이 비슷하고 그들의 생활양식도 유사하다(Rodriguez et al., 2006). 입지 조건이 동일하면 서도 공간적으로 유사한만큼 주택가격도 비슷하고, 결과적으로 소득이나 생활 패턴도 비슷할 확률이 높다(Frew and Jud, 2003). 마지막으로 비교적 고층의 건물들이 집단적으로 입지하면서 열섬, 그늘 등의 미기후적 요소가 형성되어 냉난방 에너지 소비의 요인이 된다(Aniello et al., 1995; Choi et al., 2012).

이 연구의 목적은 서울의 공동주택 단지의 전기 소비 결정인자를 단지의 인구와 공간특성 요인들로 분해하는 것이다(Kavousian et al., 2013; 오윤경·강정규, 2016). 단지별 부지의 규모, 건폐율, 용적률, 층수, 주택수 등의 특성은 연구자들에게는 익숙한 개념이지만 이들의 전기소비량 결정효과는 개별주택이 아닌 단지 단위로 접근한 예가 드물고, 통합적으로 제시되어 있지 않다.

이 연구의 결과를 통해 국지적인 공동주택 대량 공급에 의한 전기수요 변화도 예측할 수 있을 것을 기대할 수 있다. 우리나라는 정책적으로 신도시가 건설되어 단속적으로 대량의 공동주택 공급이 이뤄지고 있다. 공동주택단지 물리적 특성에 따른 전기사용량 모형의 구축은 전기소비 절감을 위한 공동주택단지 설계 방향 설정은 물론 향후의 전력소비량 예측에도 활용할 수 있을 것이다(Karger and Hennings, 2009).

2. 연구의 범위 및 방법

이 연구는 서울의 1,122개 공동주택 단지의

2016년 상반기 월별전기사용량을 패널분석한다. 이를 위해 2016년 시점의 단지별 물리적 특성 정보와 주민 정보 등을 변수화할 수 있는 건축물대장, 주민등록DB, 주택실거래가DB 등을 공통된 주소체계를 이용해 연결하였다. 또 건축물대장에 수록되지 않은 정보는 부동산114 등의 자료를 조회하였고, 기온 데이터 등도 수집하였다.

수집된 자료는 종속변수를 독립변수들의 연쇄구조로 분해하는 STIRPAT(Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology) 모형을 적용하였다(Dietz and Rosa, 1997). 패널자료의 고정효과와 확률효과를 고려하기 위해 BP 검정, Hausman 검정을 실시한다(박민근 외, 2017).

독립변수의 선정은 기존 연구에서도 다뤄진 일반개념들을 활용하였다. 종속변수인 월별전기사용량을 단지 주민수, 단지별 물리적 구조(부지면적, 건폐율, 건물높이 등), 기온, 사용기간(월), 거래가격 등의 독립변수의 효과로 분해한다.

〈그림 1〉 고건폐율/저층(좌)단지와 저건폐율/고층(우)단지
 ※ 좌: 건폐율 34%, 평균 4층, 우: 건폐율 15%, 평균 18층



우선은 단지를 구성하는 동수에 따라 샘플을 구성하여 각각의 모형을 구축한다. 1개동 이상으로 구성된 단지들과 2동 이상 또는 4동, 8동 이상의 동으로 구성된 단지들에 같은 변수를 삽입하여 패널 분석하고 비교한다. 또 건폐율과 건물높이의 관계를 고려하여, 건폐율이 낮되 고층으로 구성된 샘플들과 건폐율이 높되 저층으로 구성된 샘플들을 그룹으로 나눠 비교하여 시사점을 도출한다(Li et al., 2018).

II. 이론적 고찰 및 선행연구 검토

1. 도시의 삶과 전기 소비

도시의 전기 소비는 크게 산업용과 비산업용으로 구분되며, 비산업용 전기 소비는 도시화, 즉 도시민과 고층건물의 증가와 관계가 깊다(Filippini and Pachauri, 2004; Rosas-Flores et al., 2011). 도시민은 비도시민보다 전기제품에의 노출이 많고 구입이 쉬우므로, 전기제품에의 의존도가 높다(Pachauri and Jiang, 2008; Sovacool, 2011). 또 도시민은 늦은 시각까지 활동하기 때문에 조명의 수요가 많고, 소득수준이 높아 냉난방도 많이 하는 편이다(Sanquist et al., 2012; Brounen et al., 2012). 도시에서 주류를 이루는 고층건물은 사람들의 수직이동은 물론, 물을 끌어올리는 데도 전기를 소비한다. 또 초고층 건물은 창문을 열기 어려워 환기에도 전기가 소비되며, 건물 면적이 넓어져 안쪽까지 햇빛이 닿지 않으므로 더 많은 조명이 필요하다(Qi et al., 2012).

정리하면, 도시내 전기는 사람이 전기제품과 시설을 사용하면서 소비된다(Wallis et al., 2016; Kavousian et al., 2013). 따라서 각 사람이 가지는 특성, 그리고 사람의 행동에 영향을 미치는 환경 특성에 의해 전기 사용량이 결정된다. 특히 공동주택의 주거용 전기는 주로는 드라이어, 냉난방 장치처럼 사용자의 주택에서 사용되지만, 수도펌프처럼 운영유지공간에서 사용되기도 하며, 주차장, 커뮤니티시설과 같은 공용공간에서 사용되기도 한다(Finch et al., 2010).

2. 주거 공간의 특성과 전기소비

구성원, 가구 등 인구 기반의 변수는 다수의 실증연구에서 일관하게 확인된 주거용 전기소비량의 결정요인이다(Jones et al., 2015; Huebner et al., 2015; Halvorsen and Larsen, 2001). 연령 구성, 소득수준, 학력 등은 에너지 소비에 영향을 미치는 요소로 꼽히나 그 효과는 연구에 따라 달라지기도 하며, 성별은 큰 효과가 없는 것으로 알려져 있다(Seebauer and Wolf, 2017). 소득이 높을수록 전기용품 소유와 사용이 증가해 에너지 소비량이 커진다는 것은 다수의 연구를 통해 일관하게 확인되어 있지만(Filippini and Pachauri, 2004; Azevedo et al. 2016; Santamouris, 2016; Halvorsen and Larsen, 2001; Abrahamse and Steg, 2009), 연령 효과는 상반된 결과를 보인다. 노승철·이희연(2013), Yamasaki and Tominaga (1997), Tonn and Eisenberg(2007)은 고령화에 의해 주택용 전력소비가 증가한다고 분석하였다. 이는 고령인이 주택 내에 오래 머무는 경향이 있기 때문이다. 그러나 Huebner et al.(2015), Broenen et al.(2012), 원두환(2012), 임현진 외(2013)는 고령화 수준이 높을수록 전력소비가 감소한다고 분석하였는데, 큰 이유는 전기제품 사용 감소였다.

건축 특성에 있어서 중요한 변수는 면적과 밀도, 그리고 건축물 상태 등이다(Huebner et al., 2015; Yamaguchi et al., 2007; Gaemi and Brauner, 2009). 바닥면적이 클수록 더 많은 전기 용품을 설치하게 되므로 소수의 연구를 제외하고는 비례 관계인 것이 확인된다(Touchie et al., 2013; Jones et al., 2015). Yohanis et al.(2008)은 모든 주택형태에서 전기소비가 바닥 면적 및 구성원수에 비례하는 한편, 공동주택이 단독주택에 비해 면적당 에너지 소비가 적음을 확인했다. 또 공동주택은 단독주택에 비해 계절적 영향

을 적게 받는다는 것도 확인할 수 있었다. 그러나 공동주택 공용공간의 전기소비가 개별전용 공간의 전기소비의 75%까지 되는 경우도 있었다(Finch et al., 2010). Ewing and Rong(2008)도 건물의 크기가 클수록 에너지소비량이 많고, 공동주택은 에너지소비량이 적음을 밝혔다.

미기후와 관련한 냉난방 에너지 소비연구도 중요하다. 건물군의 구성, 주변도로의 면적, 녹지 면적 등은 근린 또는 블록의 도시열(열섬), 바람길 등에 영향을 주고, 그에 따라 주민의 냉난방 행태가 달라진다(Givoni, 1998; de Casas Castro Marins and de Andrade Romero, 2013; Santamouris et al., 2015; Radhi and Sharples, 2013). 공동주택단지와 관련해서는 일부 연구가 단지내 건축물의 향, 배치 등을 중심으로 분석하고 있지만 주로 시뮬레이션 연구에 그치며 실증 연구는 활발하지 않다(Akbari et al., 2001; 서홍석 외, 2011; 정두운·이현후, 2000). 기후적으로 온량과 강수량이 많고 고도가 높으며, 풍속이 클수록 도시열이 적다(김기중 외, 2016). 또 주변 지역의 녹지율, 하천면적률이 높을수록 도로율이 낮을수록 도시열이 줄어든다(오규식·홍재주, 2005; Taha, 1997; 김기중 외, 2017). Tereci et al.(2013)은 건축물 밀도가 높아질수록 그림자에 의해 냉방에너지 수요가 감소하는 것으로 시뮬레이션 하였다.

3. 관련 연구의 흐름과 이 연구의 차별성

최근까지 공동주택 단지의 전기소비모형 실증 연구는 그 예가 드물었다. 공동주택 단지 단위의 센서스 등이 부재해 연구자가 직접조사를 해야했으나 공동주택 단지 특성상 조사규모가 지나치게 커지기 때문으로 보인다. 제한적이거나 직접조사를 수행했던 초기의 연구로는 황광일(2005), 이강

희·채창우(2008), 이병희 외(2011), 김강식 외(2011), 박소윤 외(2011) 등을 꼽을 수 있는데, 분석대상이 3~48개 필지로 제한되어 본격적인 통계 모형으로 분석하기 어려웠다. 그후의 연구들은 연구 환경의 개선으로 건축 특성 등에 관한 대량자료를 활용하고 있으나 아직 단지별 거주자수를 변수로 삽입한 예는 확인되지 않았다. Jones et al.(2015), Huebner et al.(2015) 등 개별 주택 단위의 주거용 전력 소비 연구들은 인구 원단위를 중요하게 다뤄왔기 때문에 개선이 필요하다.

김민경(2013)은 서울시 주거용 건물 필지 412,455개에 대하여 2010년 연간 전력 소비에 대한 주거형태(단독, 다세대, 아파트), 건축연도(10년 단위), 높이(5층단위), 구조, 지붕형태, 입지(5개 지역권) 등의 효과를 회귀분석하였다. 비교적 대규모 자료를 사용하기 시작한 연구로서 의의가 있으나 변수들을 자의적으로 구간을 나눠 더미변수로 처리하고 있다. 또 기온의 영향을 크게 받는 건축특성을 변수로 선택하였음에도 불구하고 종속변수를 1년간의 소비량으로 하여 계절에 따른 효과를 반영하기 어려웠다.

안영수 외(2014)는 2005년 서울시 4,957개 집계구(필지)를 대상으로 단위면적당 전력 사용량 등에 대해 변량분석(ANOVA)을 수행하였다. 주택규모, 종류, 건축연도가 변수로 선정되어 유의미한 효과가 있는 것으로 판단되었으나 이미 수립된 인벤토리 자료 내에서 분석하여 다양한 변수를 도입하지는 못하였다.

김기중 외(2017)은 서울시 9,424개 단독 및 공동주택 필지를 대상으로 8월의 단위면적당 에너지 소비 결정 요인을 회귀모형으로 분석하였다. 건축적으로는 지붕, 구조, 연면적이 관계가 있으며 입지적으로는 하천, 도로 등의 근접이 영향을 미쳤다. 다수 샘플을 대상으로 하였고, 소득계층까지 구분하고 있다는 점에서 의의가 있으나 여전히 변

수를 직관적으로 선정하여 선형결합관계로 도출하고 있고, 인구 변수도 사용하지 않았다.

이 연구는 김기중 외(2017)의 연장선상에 있으면서도, 단지별 주민등록인구를 변수로 삽입하여 인구 원단위를 반영한다. 이는 기존연구가 시도하지 못했던 점이다. 또, 주요 변수들이 나열적인 선형결합에 그치지 않고, STIRPAT모형을 응용하여 논리적인 연쇄구성을 갖도록 함으로써 변수들 간 상호 관계에 집중하도록 하였다. 예를 들어 한정된 용적률 안에서 반비례 관계를 가지는 건폐율과 건물층수의 구성이 어떤 효과를 보이는지 분석한다.

한편, 김기중 외(2017)가 8월 한 달의 전기소비량을 분석하여 냉방용 전기소비특성을 반영하게 되는 반면 이 연구는 상반기(1월~6월) 6개월간의 전기소비량을 분석하되 기온 변수를 통제하여 일반 전기소비특성을 탐구하고 있다는 점에서도 차별성이 있다. 비록 자료의 불연속으로 인해 하반기(7월~12월) 자료를 사용하지 못한 아쉬움이 있으나 기존 연구에 비해 확장된 시간범위는 중요한 개선점이다.

III. 연구 분석의 틀 및 기초 통계

1. 연구 분석 대상 및 패널자료 구축 절차

연구 대상은 2016년 서울의 1,122개 공동주택 단지이며, 전기사용량과 기온 자료는 2016년 1월부터 6월까지로 패널 자료로 구성하였다. 본래 2016년 7월~12월 자료도 함께 분석하고자 하였으나 전기사용량 자료가 2016년 7월 이후 데이터 단절을 보여 제외하였다. 확보한 자료 모두 동일한 주소 체계를 가지고 있었기 때문에, 이 연구는 주

소가 같은 데이터를 서로 연결할 수 있었다.

건축물대장(주택실거래가 포함), 월별 전기사용량은 국토교통부가 운영하는 건축데이터 민간개방 시스템에서 구득하였다. 주민등록인구는 행정안전부 주민등록대장에서 제공되지만 개인정보 보호를 위해 직접 열람할 수 없었고, 담당기관에 의뢰하여 가공된 형태로 구득할 수 있었다. 기타 부동산114, 기상청 등의 자료도 사용하였다(표 1).

〈표 1〉 자료별 출처

구분	자료	출처
전기사용량	주소지별 월간 전기사용량	국토교통부
주민	주민등록대장	행정안전부
	주택실거래가	국토교통부 (한국감정원)
건축	건축물대장 교차검증자료	국토교통부 부동산114
기타	기온	기상청

건축물 대장은 주소, 부지의 면적, 부지내 건축물동수, 주택수, 건축물의 종류, 면적, 연상면적, 구조, 내외부 주차장 구조, 건축허가일 등을 등록하고 있다. 특히 이 연구가 사용한 건축물대장은 한국감정원이 보고하는 주택실거래가가 입력되어 있으며, 따라서 실거래가를 신고하는 주택만이 등재되어 있다.

전기사용량 데이터는 주소지별 사용량으로 전국의 모든 건축 부지를 대상으로 매일 제공된다. 검침기간은 매일 1일부터 말일까지이다. 공동주택 단지의 경우 각 세대가 사용하는 전기뿐 아니라 단지 커뮤니티, 단지내 상가, 공급시설, 단지내 조명 등의 공동전기 사용량도 모두 포함한다.

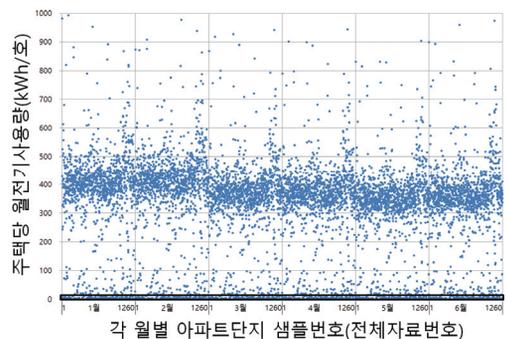
주민등록인구는 인구총조사의 인구와 달리, 개인이 거주지를 옮길 때 자율적인 신고를 하여 집계되기 때문에 실제 거주민수를 완전히 반영하지는 못한다. 그러나 주민등록 신고가 재산권 보호와 관련이 있어 신고율이 높고, 통상 1년에 1회씩 전수

현황점검을 하기 때문에 신뢰도가 높다. 정부는 2016년부터 인구총조사 전수조사 대신 주민등록 인구를 활용하고 있다.

패널자료 구축 절차는 5단계로 진행되었다. (1단계) 우선 2016년 서울 건축물 대장에 등재되어 있는 주소지 중, 주택 실거래가격이 보고된 10호 이상의 주택으로 구성된 36,587개 주소지를 선별하였다. (2단계) 선별한 주소지 목록을 담당 관리기관에 의뢰해 주소별로 주민등록 대장의 등록인수가 입력된 자료를 구득하였다. (3단계) 주소지별로 2016년 1월~6월 월 전기사용량을 입력하였다. 이는 전기사용량 정보가 주소지를 기준으로 제공되기 때문에 가능했다. 그러나 모든 주소지에 대해 제공되지는 않았기 때문에 유효한 주소지만을 추려내었다.

〈그림 2〉 1,260개 단지의 월별 주택당 전기사용량

※ 하단 표시(굵은선)은 분석대상에서 제외한 138개 샘플

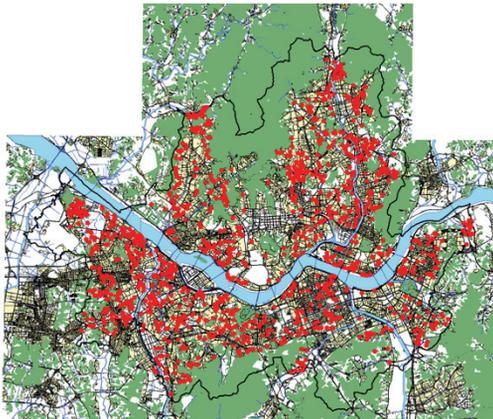


(4단계) 추려진 주소지를 대상으로 민간 부동산 데이터베이스인 부동산114 및 인터넷지도인 카카오맵을 통해 준공년월(최초 입주년월)을 조사하여 아파트단지별 사용기간을 계산하였고, 동시에 일반적인 다세대주택 등은 삭제하였다. 또 교차확인을 위해 주택수, 대지면적을 재확인하고, 일부 오류가 있는 자료는 폐기하였다.

(5단계) 최초 정리한 자료는 1,260개 단지였으나, 일부 전기사용량이 지나치게 낮은 값을 보이는

단지들이 있어, 주택당 월 전기사용량이 한 번이라도 10kWh이 미만을 기록한 단지는 제외하여 1,122개 단지 자료만을 사용하였다. 일반적인 기존 연구들이 수백에서 수천 가구 내외의 샘플을 사용했다는 점에서 샘플수는 충분한 것으로 판단하였다(Jones et al., 2015). 6개월 패널자료이기 때문에 실제 총 샘플은 6,732개이다. 한편, 서울시가 자체 공동주택 기준에 따라 조사 발표한 2016년 말 서울의 공동주택 단지는 총 4,256개이다(출처: 서울시 홈페이지).

〈그림 3〉 서울시와 연구대상 단지 분포



2. 주 분석 모형 및 변수

이 연구는 공동주택 단지 전기소비량 결정인자를 각 단지의 인구, 공간특성 요소로 분해하기 위해, STIRPAT(Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology) 모형의 연쇄구조를 활용한다. STIRPAT 모형은 인간 활동에 의한 충격(Impact)을 인구(Population)와 그들의 활동성(Affluence), 그리고 기술적 효율성(Technology)으로 분해하는 모형이다. 과거 비확률적 방법으로 IPAT 모형으로 사용되었으나(수식 1), 통계확률적 회귀분석이 접목되어 널리 사용되

고 있다(수식2)(Dietz and Rosa, 1997; Lim et al., 2019).

〈수식 1〉 IPAT 모형의 구조

$$\begin{aligned} Impact &= Population \times \frac{Economic\ Good}{Population} \times \frac{Impact}{Economic\ Good} \\ &= Population \times Affluence \times Technology \end{aligned}$$

〈수식 2〉. STIRPAT 모형의 구조

$$\begin{aligned} I &= aP_i^b A_i^c T_i^d e_i \\ \Rightarrow \log I &= \log a + b \log P_i + c \log A_i + d \log T_i + \log e_i \end{aligned}$$

단지별 월 전기사용량을 종속변수로 하고, 단지별 인구, 단지 구성 등 단지 특성 변수를 연쇄구조로 구성한 후, 최종적으로 개별가구당 전기소비 요소로 끝맺는 구조를 설정한다(수식3). 가구당 전기소비량을 결정하는 특성들은 다수의 기존 연구에서 다루어 왔기 때문에 기존 연구와 연속성도 가지게 된다.

〈수식 3〉 연구모형의 구성

$$\begin{aligned} \text{전기사용량} &= a \times \text{인구}_i^b \times \left(\frac{\text{단지면적}}{\text{인구}}\right)_i^c \times \left(\frac{\text{건축면적}}{\text{단지면적}}\right)_i^d \\ &\quad \times \left(\frac{\text{연면적}}{\text{건축면적}}\right)_i^e \times \left(\frac{\text{주택수}}{\text{연면적}}\right)_i^f \times \left(\frac{\text{전기사용량}}{\text{주택수}}\right)_i^g \times e_i \\ \Rightarrow \log \text{전기사용량} &= \log a + b \log \text{인구}_i + c \log(1/\text{인구밀도}_i) \\ &\quad + d \log \text{건폐율}_i + e \log \text{환산층수}_i + f \log(1/\text{주택당면적}_i) \\ &\quad + g \log \text{기타주택특성}_i + \log e_i \end{aligned}$$

종속변수인 전기사용량은 단지별 월 전기사용량(변수명: EUSE)으로 한다. 인구는 단지별 주민등록 인구수(POP)로 한다. 기존 연구에 의하면 인구는 전기사용량과 비례한다. 단지면적/인구는 인구밀도(DENSITY)의 역수에 해당한다. 즉, DENSITY는 POP를 단지 면적(L_AREA)으로 나눈 값이다. 인구밀도가 높아질수록 시설을 더 많이 공유하므

로 전기사용 효율은 좋아질 것으로 예상된다. 건축 면적/단지면적은 단지 건폐율(BCR)에 해당한다. BCR은 단지별 총 건축면적(B_AREA)을 L_AREA로 나눈 값이다. BCR이 높을수록 단지내 오픈스페이스가 감소하며, 시설 구성도 달라질 것으로 생각된다.

연면적/건축면적은 환산층수(FLOORS)에 해당한다. 다만, 연면적은 지하층의 공간도 포함하기 때문에 일부 왜곡이 있을 수 있다. FLOORS는 연면적(F_AREA)을 B_AREA로 나눈 값이다. 주택수/연면적은 주택당 연면적(SPACE)의 역수에 해당한다. SPACE는 F_AREA를 단지내 주택수(HOUSE)로 나누어 계산한다. 이 변수는 단지내 주택이 얼마나 대형평형 주택위주로 구성되어있는지를 보여준다. 단지 전체 연면적이 같을 때 주택수가 줄어들어 이 값이 증가한다는 것은 각 주택이 대형화한다는 의미이기 때문이다.

전기사용량/주택수는 기존 연구가 다뤄온 주택당 전기사용량에 해당하며, 주택사용월수(OLD), 면적당 주택거래가격(TRADE), 해당월의 화씨 기온(TEMP) 등으로 구성하였다. OLD, TRADE와 EUSE는 비례관계가 예상된다(김기중 외, 2017;

정재원 외, 2015). TRADE는 해당 주택 거주민의 소득수준의 대체변수로 사용하는 것으로 높은 거래가격의 주택에서 거주하는 사람은 소득수준도 높은 것으로 가정한다(손철, 2013). TEMP는 로그를 취하는 모형 특성상 영하가 있는 섭씨가 아닌 화씨로 사용하는데, EUSE와 반비례관계가 예상된다.

3. 기초 통계

단지별 월 전기사용량(EUSE)의 총 평균값은 172,591.6kWh이며, 최소값은 264.0kWh, 최대값은 5,612,342.0kWh이다. 월별평균값은 1월보다 2월의 소비량이 많고, 4월까지의 감소하다가 6월에 다시 증가한다(그림 2). 이는 겨울에서 봄을 거쳐 여름으로 변하는 계절변화와 관계가 깊다. 평균 기온(TEMP)은 1월에 화씨 31도(섭씨 영하 0.6도)로 최저치를 보이고 6월의 화씨 74도(섭씨 23도)까지 지속적으로 증가한다(표 2). 흥미로운 점은 1월이 2월보다 2일 길었고(2016년은 윤년임), 평균기온도 더 낮음에도 2월의 전기소비량이 조금 더 많았다는 것이다. 1월이 휴가 시즌으로 집을 비

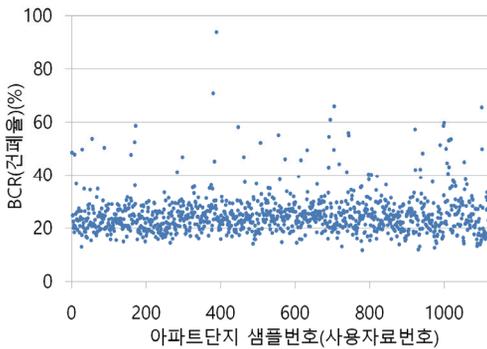
〈표 2〉 전체 샘플(1,122개 단지) 기초 통계량

구분	변수	변수명	단위	평균	중간값	표준편차	최소	최대
IMPACT	월 전기사용량	EUSE	kWh	172,591.6	97,182.0	269,246.9	264.0	5,612,342.0
Population	주민등록 인구수	POP	인	1,457.6	879.5	1,836.3	16.0	22,098.0
Site특성	대지면적	L_AREA	m ²	18,065.6	10,555.8	22,993.0	516.0	279,928.3
	건축면적	B_AREA	m ²	3,991.6	2,477.6	4,435.9	226.9	43,326.9
	연면적	F_AREA	m ²	47,304.5	28,162.9	60,643.0	773.9	793,974.2
	건폐율	BCR	%	25.0	23.7	7.6	11.7	93.8
	용적률	FAR	%	271.6	263.6	71.6	57.3	936.9
	환산층수	FLOORS	층	11.4	11.5	3.3	2.1	25.2
	주택수	HOUSES	호	460.4	281.5	566.1	10.0	6,864.0
	인구밀도	DENSITY	인/m ²	0.085	0.084	0.027	0.001	0.430
	호당 면적	SPACE	m ² /호	105.1	101.9	24.5	34.1	279.8
House특성	건물동수	BLDS	동	6.8	4.0	7.1	1.0	72.0
	사용월수 (2016.6.)	OLD	개월	163.9	158.0	59.1	13.0	458.0
기온	거래가격	TRADE	만 원/m ²	587.9	540.8	196.4	173.9	1,444.0
	평균기온	TEMP	°F (°C)	51.3 (10.7)	51.0 (10.6)	16.5	31.4 (-0.3)	74.5 (23.6)

우는 시간이 많을 수 있다는 것과, 당 연구가 사용한 자료가 개별 주택, 공용공간과 시설 전기사용량을 모두 포함한 단지 전체의 전기사용량이라는 것이 관련 있을 수 있다.

단지별 주민등록 인구수(POP)의 평균값은 1,457.6인이며, 최소 16인, 최대 22,098인이다. 단지면적(L_AREA) 평균은 18,065.6㎡로 반지름 약 75m의 원의 면적과 같다. 최대값은 279,928.3㎡로 약 반경 300m의 원에 해당한다. 최소값은 516.0㎡이다. 인구밀도(DENSITY)의 평균값은 0.085인/㎡ (850인/ha), 최소값은 0.001인/㎡ (10인/ha), 최대값은 0.43인/㎡ (4,300인/ha)이다.

〈그림 4〉 1,122개 샘플의 BCR(%) 분포

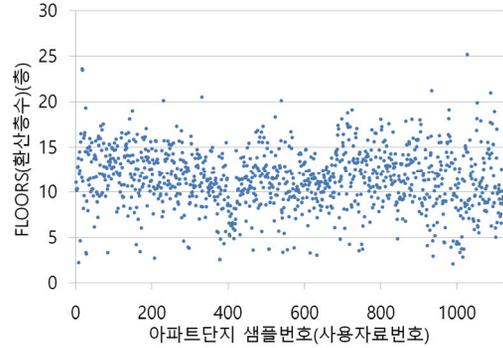


건축면적(B_AREA)은 평균이 3,991.6㎡이며, 최소 226.9㎡, 최대 43,326.9㎡이다. 건폐율(BCR)은 평균 25.0%, 최소 11.7%, 최대 93.8%이다. 주로 20% 전후에서 형성되어 일반적인 공동주택 단지의 건폐율을 가진다(그림 4).

연면적(F_AREA)는 평균 47,304.5㎡이며 최소 773.9㎡ 최대 793,974.2㎡이다. 환산층수(FLOORS) 평균은 11.4층, 최소 2.1층, 최대 25.2층이고, 대부분의 값이 10층~15층 사이에 형성된다(그림5). 주택수(HOUSES)는 평균 460.4호, 최소 10호, 최대 6,864호이다. SPACE의 평균은 105.1㎡/호이며, 최소 34.1㎡/호 최대 279.8㎡/호이다. 건물동

수(BLDS)는 평균 6.8개동으로 최소 1개동, 최대 72개동이다.

〈그림 5〉 1,122개 샘플의 FLOORS 분포



사용월수(OLD)는 2016년 6월 기준으로 평균 163.9개월, 최소 13개월, 최대 458개월로 모든 샘플이 입주후 최소 6개월 이상은 경과되어 있다. 면적당 주택거래가격(TRADE)는 평균 587.9만 원/㎡, 최소 196.4만 원/㎡, 최대 1,444.0만 원/㎡이다. 화씨 기온(TEMP)은 평균 화씨 51.2도(섭씨 10.7도), 최소 31.4도(1월, 섭씨 -0.3도), 최대 74.5도(6월, 섭씨 23.6도)이다.

한편, 구축한 패널 자료 시계열은 6기로 짧기 때문에 단위근의 염려는 적다. 일반적으로 10기 이하이면서 일정한 시간 간격에 관측된 시계열 자료는 단위근의 존재 가능성이 높지 않은 것으로 판단된다(Hlouskova and Wagner, 2006).

IV. 모형 구축 및 분석

1. 이슈1: 단지구성 건물동수의 문제

1,122개의 단지는 공동주택으로 구성된다는 공통점을 가지지만, 건물동수(BLDS)의 구성에 따라 전기사용 특성이 달라질 수 있다. 우선, 많은 건물로 구성된 단지는 1개 또는 2개의 건물로 구성된 단지에 비해 단지로서의 특성을 강하게 가질 수 있다. 다수의 건물로 이뤄진 대단지는 별도의 커뮤니티 시설 등 부속시설이 많을 뿐 아니라, 더 고차원의 전기설비시설, 더 많은 가로등 등이 필요하다.

건물동수(BLDS)가 1동 이상(전체), 2동 이상, 4

동 이상, 8동 이상인 샘플(단지)별로 모형을 구축하여 비교하였다. 건물동수 제한이 커질수록 샘플 수가 감소하기 때문에 모형 적합도가 하락할 수 있다. 4개 모형 모두 BP검정 결과 INDIVIDUAL에 관해 고정효과가 있다고 할 수 없었으며($p < 0.001$), Hausman검정 결과 2-way 고정효과 모형은 사용할 수 없었다. 이는 패널 내에서 샘플 고유특성은 유의하지 않되, 월별 고유특성은 존재할 수 있음을 의미한다. 따라서 TIME을 고려한 확률효과 모형으로 구축하였다. 로그모형이기 때문에 변수별 계수는 log 함수의 계수이고, 탄력성 개념이 되므로 따로 표준화계수를 구하지 않아도 제한적이거나 계수간 비교가 가능하다(표 3).

모형1부터 모형4까지 전체 모형은 log POP의

〈표 3〉 이슈1 모형 분석 결과(모형1~모형4)

변수	변수명	모형1(전체) BLDS 10이상	모형2: BLDS 20이상	모형3: BLDS 40이상	모형4: BLDS 80이상
상수	Intercept (z-value)	1.056 (3.697)***	0.844 (2.900)**	1.334 (3.291)***	2.424 (4.423)***
주민등록인구수	log POP (z-value)	1.040 (105.127)***	1.050 (102.359)***	1.035 (65.118)***	1.011 (41.828)***
인구밀도	log DENSITY (z-value)	-1.053 (-25.387)***	-1.100 (-26.114)***	-1.080 (-19.599)***	-0.498 (-4.955)***
건폐율	log BCR (z-value)	1.118 (20.047)***	1.175 (20.767)***	1.115 (15.184)***	0.728 (6.437)***
환산층수	log FLOORS (z-value)	1.257 (24.923)***	1.285 (25.190)***	1.146 (17.271)***	0.677 (6.401)***
호당면적	log SPACE (z-value)	-0.259 (-5.636)***	-0.262 (-5.572)***	-0.312 (-4.892)***	-0.149 (-1.585)
거래가격	log TRADE (z-value)	0.097 (3.445)***	0.101 (3.552)***	0.084 (2.217)*	0.176 (3.727)***
사용월수	log OLD (z-value)	0.099 (4.757)***	0.103 (4.904)***	0.141 (5.296)***	0.099 (2.911)**
평균기온	log TEMP (z-value)	-0.174 (-5.472)***	-0.174 (-5.466)***	-0.164 (-5.142)***	-0.158 (-3.946)***
샘플수		6,732 (1,122 * 6)	6,558 (1,093 * 6)	4,104 (684 * 6)	1,968 (328 * 6)
패널특성 (BP검정)		1-way (TIME)	1-way (TIME)	1-way (TIME)	1-way (TIME)
Hausman검정 p-value		0.998 (고정효과모형 사용불가)	0.998 (고정효과모형 사용불가)	0.938 (고정효과모형 사용불가)	1.000 (고정효과모형 사용불가)
최대 VIF		5.095	5.096	4.819	8.077
χ^2 검정		16,975.7	16,060.7	5,331.71	2,385.47
R^2 (adj R^2)		0.716 (0.716)	0.710 (0.710)	0.566 (0.565)	0.549 (0.547)

***: $p < 0.001$ ** : $p < 0.01$ * : $p < 0.05$

계수가 약 1.0을 유지한다. 즉 단지별 인구가 1% 증가하면, 단지별 전기사용량도 1% 증가한다. 이것은 인구수가 전기사용량의 원단위라는 기존 연구와 일치하는 것이다. 다만 1.0보다는 크기 때문에 인구 면에서 대단지가 소단지보다 전기소모가 크다는 것을 알 수 있다.

log DENSITY의 계수는 모형1~모형3까지 모두 (-)1.0 수준이며 모형4만 (-)0.4이다. 모든 모형에서 음수로, 다른 변수값이 같을 때 인구밀도가 높아질수록 전기사용량은 감소한다(Chen et al., 2008)). 이는 각 가구내 전기제품, 단지내 전기시설을 더 많이 공유하기 때문으로 생각할 수 있고, 한편으로는 단지면적이 작을수록 전기소비를 줄일 수 있음을 시사한다.

log BCR의 계수는 모형1~모형3은 1.1 내외이나, 모형4는 0.6이다. log FLOORS의 계수 역시 1.1 내외이나 모형4는 0.6이다. 모든 모형에서 건폐율과 환산층수의 효과는 꾸준히 존재하며, 건폐율이 높을수록, 단지 내 건물들이 고층으로 구성될수록 전기사용량이 증가한다. 강력한 용적률 규제를 하는 한국의 공간맥락에서 전기사용량에 대한 건폐율과 환산층수의 관계는 중요한 의미가 있으며 다음 절에서 분석한다.

log SPACE의 계수는 (-)0.25~(-)0.31로 유의하나, 모형4는 유의하지 않다. 호당면적이 증가할수록 전기사용량이 감소하는 것은 일부 기존 주택단위의 연구결과와 상이한 것처럼 보인다(Kavousian et al., 2013; Yohanis et al., 2008). 그러나 SPACE는 단지 내 주택이 얼마나 대형주택 위주로 구성되는지를 보이는 변수로, 인구와 소득수준, 기온을 통제할 때, 대형주택 위주 단지는 소형주택 위주 단지에 비해 전기사용량이 적다는 것을 보이는 것이다. 그 이유는 단지 차원에서 관리, 지원해야 할 주택의 수가 늘어나 효율이 떨어지기 때문으로 생각할 수 있다.

log TRADE의 계수는 모형1~모형3은 0.1내외이며, 모형4는 0.17이다. 논리적으로 주택거래 가격은 주택의 품질, 입지의 우월성 등에 해당하나, 이 연구는 이를 소득수준 통제변수로 대체하여 활용하였다. 즉 소득수준이 높은 단지는 면적당 거래가격도 높을 것으로 전제한다. 결과에 따르면 소득수준(면적당 거래가격)이 높을수록 전기사용량이 증가하여 기존 연구와 일치한다(서현철 외, 2012)

log OLD의 계수는 모든 모형에서 0.1 내외로, 사용월수가 1% 증가할수록 전기사용량은 0.1% 증가한다. 즉 사용월수가 2배(100%) 될 때마다 사용량은 10% 증가한다. 건축물 사용월수가 증가할수록 설비 등이 노후화하고 건축 당시 에너지 기준도 낮을 것이므로 합리적인 결과이다(Brounen et al., 2012).

log TEMP의 계수는 모든 모형에서 (-)0.16 내외로, 기온(화씨)이 1% 증가할수록 전기사용량은 0.16% 감소한다. 연구대상 기간이 1월부터 6월까지로 기온과 관련해서는 주로 난방전기가 사용되는 결과로 판단된다.

2. 이슈2: 건폐율, 환산층수의 문제

모형1부터 모형4에 삽입된 건폐율(BCR)과 환산층수(FLOORS)는 반비례 관계일 수 있기 때문에 이 관계를 해체하였을 경우에도 유사한 결과가 도출되는지 확인할 필요가 있다. 한국의 아파트단지는 용적률 규제가 강해 대부분의 단지가 한정된 용적률에서 건폐율과 건축물 높이를 조정하기 때문이다. 다만 용적률 산정 시의 연면적은 이 연구의 환산층수 계산 시 사용된 총 건축연면적에서 지하층, 주민공동시설의 연면적 등이 제외되기 때문에 차이가 있다.

모형에 동시 삽입되는 건폐율(BCR)과 환산층수

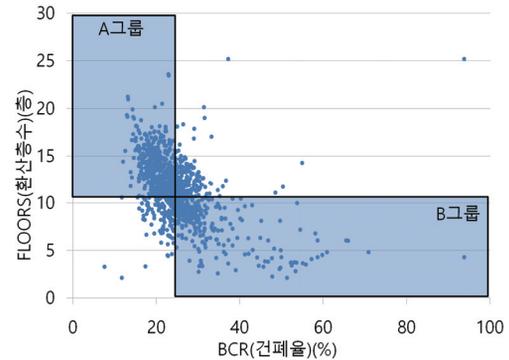
(FLOORS)가 반비례관계일 수 있다는 것은 통계적으로로는 교호작용의 고려가 필요할 필요가 있다는 의미가 된다. 모형5는 log BCR과 log FLOORS의 교호항을 삽입한 것이다. BP검정 결과 INDIVIDUAL에 관해 고정효과가 있다고 할 수 없었으며(p<0.001), Hausman검정 결과 2-way 고정효과 모형은 사용할 수 없었다(표5).

z-value가 2.041로, 유의확률 5% 수준에서 양(+)의 교호작용이 있다는 것을 확인할 수 있다. 다만 모형5의 설명력이 모형1에 비해 크게 개선되지 않고 계수값도 거의 동일하다.

또 살펴봐야 할 것은 낮은 건폐율(BCR)과 높은 환산층수(FLOORS)를 가지는 단지와 높은 건폐율과 낮은 환산층수를 가지는 단지는 물리적으로 큰 차이가 있다는 점이다(Li et al., 2018). 전자는 지

상부 오픈스페이스를 넓히고 건물을 고층화한 것이고, 후자는 오픈스페이스를 줄이되 저층화한 것이다. 이들에 해당하는 샘플을 2개 그룹으로 구성하여 모형1의 기본형태가 유지되는지, 그리고 상호 비교할 때 어떤 차이가 있는지 확인하였다.

〈그림 6〉 1,122개 샘플의 FLOORS, BCR 분포 산점도



〈표 4〉 그룹별 기초 통계량(A그룹 N=2,262, B그룹 N=2,322)

구분	변수	변수명	그룹	평균	중간값	표준편차	최소	최대
IMPACT	월 전기사용량	EUSE	A	262,265.5	164,803.0	334,575.6	2,467.0	3,123,275.0
			B	87,531.7	60,999.0	98,055.4	264.0	992,471.0
Population	주민등록 인구수	POP	A	2,275.9	1,506.0	2,582.5	115.0	22,098.0
			B	726.1	537.0	692.8	16.0	4,699.0
Site특성	대지면적	L_AREA	A	26,734.1	17,664.1	30,704.5	1,133.4	279,928.3
			B	9,729.4	6,509.7	9,729.1	516.0	63,100.0
	건축면적	B_AREA	A	5,019.9	3,396.1	5,161.8	226.9	39,910.8
			B	2,858.3	1,898.4	3,035.6	255.3	24,109.1
	연면적	F_AREA	A	74,440.3	47,806.4	85,556.2	3,065.7	793,974.2
			B	23,529.7	17,511.3	21,737.2	773.9	124,202.0
	건폐율	BCR	A	19.7	19.8	2.5	12.0	23.7
			B	31.0	28.2	8.9	23.7	93.8
	용적률	FAR	A	282.1	278.1	45.7	162.3	538.9
			B	252.2	249.6	59.8	82.1	537.0
	환산층수	FLOORS	A	14.4	14.2	2.0	11.5	23.6
			B	8.5	9.1	2.2	2.1	11.5
	주택수	HOUSES	A	708.8	458.0	778.0	65.0	6,864.0
			B	234.4	162.0	228.4	10.0	268.9
	인구밀도	DENSITY	A	0.087	0.086	0.019	0.031	0.176
			B	0.078	0.079	0.023	0.005	0.155
호당 면적	SPACE	A	106.4	103.1	22.5	34.1	279.8	
		B	104.7	102.5	23.1	37.6	268.9	
건물동수	BLDS	A	9.6	7.0	9.5	1.0	72.0	
		B	4.2	3.0	3.5	1.0	24.0	
House특성	사용월수	OLD	A	165.7	157.0	54.5	25.0	396.0
			B	157.7	151.0	58.5	13.0	458.0
	거래가격	TRADE	A	633.1	575.0	216.0	173.9	1,444.0
			B	564.4	513.4	188.8	228.8	1,323.2

〈그림 6〉은 건폐율(BCR)과 환산층수(FLOORS)의 중간값 기준으로 BCR 23.7 이하, FLOORS 11.5 초과인 샘플(A그룹)과, BCR 23.7 초과, FLOORS 11.5 이하인 샘플(B그룹)을 구분한 것이다.

A그룹은 B그룹에 비해 단지 규모가 2배 이상 크지만, 밀도 면에서는 유사하다. A그룹이 월 전기 사용량(EUSE) 3배, 인구규모(POP) 3배, 면적(L_AREA, B_AREA, F_AREA), 주택수(HOUSES)는 2~3배 정도 크지만, 용적률(FAR), 인구밀도(DENSITY)는 유사하다. 샘플 수는 A그룹이 2,262개(377*6), B그룹이 2,322(387*6)개로 비슷하다(표4).

두 그룹의 물리적인 단지특성은 뚜렷하게 구분되는 반면, 개별주택의 특성은 유사하다. 건폐율(BCR) 평균은 A그룹 19.7%, B그룹 31.0%이며, 환산층수(FLOORS) 평균은 A그룹이 14.4층, B그룹이 8.5층이다. 최소 건물동수는 A그룹이 B그룹보다 평균 약 2배, 표준편차 약 3배, 최대치는 약 3배 크다. 그러나 호당 면적(SPACE), 사용월수(OLD), 거래가격(TRADE)은 유사하다.

모형6은 A그룹을, 모형7은 B그룹을 대상으로 분석한 결과이다. 모형6과 모형7 모두 건폐율과 환산층수의 교호항은 유의하지 않고, 삽입하여도 VIF가 10을 초과해 교호항을 제외하였다. BP검정

〈표 5〉 이슈2 모형 분석 결과(모형1, 모형5~모형7)

변수	변수명	모형1 전체샘플	모형5: 전체샘플(교호)	모형6: A 그룹	모형7: B 그룹
상수	Intercept (z-value)	1.056 (3.697)***	0.932 (3.192)***	0.949 (1.951)	-1.083 (-2.265)*
주민등록 인구수	log POP (z-value)	1.040 (105.127)***	1.041 (105.168)***	0.954 (65.220)***	1.170 (63.263)***
인구밀도	log DENSITY (z-value)	-1.053 (-25.387)***	-1.053 (-25.393)***	-0.562 (-6.705)***	-1.343 (-20.524)***
건폐율	log BCR (z-value)	1.118 (20.047)***	1.011 (13.185)***	0.735 (6.631)***	1.410 (14.952)***
환산층수	log FLOORS (z-value)	1.257 (24.923)***	1.317 (22.502)***	0.799 (7.363)**	1.660 (20.524)***
건폐율- 환산층수 교호항	log BCR * log FLOORS (z-value)	-	0.048 (2.041)*	-	-
호당면적	log SPACE (z-value)	-0.259 (-5.636)***	-0.269 (-5.821)***	-0.079 (-1.006)	-0.357 (-4.321)***
거래가격	log TRADE (z-value)	0.097 (3.445)***	0.102 (3.618)***	0.202 (4.757)***	0.277 (5.114)***
사용월수	log OLD (z-value)	0.099 (4.757)***	0.099 (4.786)***	0.290 (7.941)***	-0.008 (-0.215)
평균기온	log TEMP (z-value)	-0.174 (-5.472)***	-0.174 (-5.472)***	-0.167 (-4.618)***	-0.185 (-4.149)***
샘플수		6,732 (1,122 * 6)	6,732 (1,122 * 6)	2,262 (377 * 6)	2,322 (387 * 6)
패널특성 (BP검정)		1-way (TIME)	1-way (TIME)	1-way (TIME)	1-way (TIME)
Hausman검정 p-value		0.998 (고정효과모형 사용불가)	0.999 (고정효과모형 사용불가)	1.000 (고정효과모형 사용불가)	1.000 (고정효과모형 사용불가)
최대 VIF		5.095	9.927	3.099	3.626
x ² 검정		16,975.7	16,987.9	4,752.57	5,580.2
R-sq (adj R-sq)		0.716 (0.716)	0.716 (0.716)	0.678 (0.677)	0.707 (0.706)

***: p<0.001 **: p<0.01 *: p<0.05

결과 INDIVIDUAL에 관해 고정효과가 있다고 할 수 없었으며($p < 0.001$), Hausman검정 결과 2-way 고정효과 모형은 사용할 수 없었다(표 5).

모형 6과 모형 7은 대체적으로 모형1과 유사한 결과를 보여주어 이 연구의 모형이 안정적임을 확인할 수 있다. log POP, log TEMP의 계수는 유사하며, 나머지 변수의 계수는 값은 다소 차이가 있을지라도, 모형7의 log OLD의 계수를 제외하고는 부호가 동일하다.

모형6과 모형7을 비교하면, 전기소비의 요인에 대하여 A그룹은 건폐율, 환산층수의 증가, 즉 공간적 규모증가에 의한 전기사용량 증가가 B그룹보다 덜하고, B그룹은 인구밀도의 증가에 의한 전기사용량 감소 효과가 A그룹보다 크다. 이를 해석해보면, 저건폐율의 단지는 고건폐율의 단지에 비해 고층화에 따른 전기사용량 증가가 적다. 반면 저층/고건폐율의 단지는 인구밀도를 높임으로써 1인당 전기사용량을 크게 줄일 수 있다. 즉 부지크기가 같다면 고층/저건폐율 단지는 공간확장 측면에서, 저층/고건폐율 단지는 인구증가 측면에서 유리하다고 볼 수 있다.

V. 결론 및 토론

이 연구는 서울 공동주택 단지의 2016년 1월부터 6월까지의 전기소비가 단지의 건폐율, 평균 건물층수, 인구밀도 등과 같은 공간 특성으로 설명될 수 있음을 확인하였고, 함께 삽입한 통제변수를 포함한 모형 설명력은 70% 내외였다. 그 결과는 단지구성 건물동수에 따라, 그리고 건폐율과 건물층수(환산층수)의 특징적인 구성 등 다양한 경우의 수를 고려하여 모형을 구축하였을 때에도 일관된

결과를 보였다.

단지별 전기사용량은 단지 인구와 정비례했다. 그리고 기온, 소득수준(단위면적당 거래가격으로 대체)과 같은 변수를 추가적으로 통제하면, 인구밀도가 높을수록, 건폐율이 작을수록, 건물 높이가 낮을수록 전기소비가 적었다. 또 대형주택위주로 구성되어있을수록, 그리고 단지의 준공이 최근일수록 전기소비가 적었다.

한편으로 공동주택단지가 오픈스페이스가 많은 고층 위주로 이뤄진 경우와 오픈스페이스는 적으나 낮은 건물로 이뤄진 경우를 구분하여 단지 전기사용량에 대한 공간특성의 영향이 다른지 분석한 결과 변수들의 전체적인 방향성은 유사하나, 명시적인 차이가 있으며 각각의 장단점도 있음을 확인할 수 있었다.

이 연구는 자료가 2016년 7월부터 불연속하여 1월부터 6월까지의 자료만을 사용하였고, 그 결과 상반기의 전기소비를 다뤘다는 연구의 한계가 있다. 다만 이 연구의 초점은 냉난방에 관련한 계절적 특성보다는 단지의 공간특성에 의한 일반적인 전기사용량 영향에 있고, 계절적 특성은 기온변수로 통제하고자 하였다. 우리나라 연간 개별가정용 전력소비에서 냉난방 목적은 약 24.6%를 차지하므로 그 비율이 적지는 않다(임기추, 2013). 그러나 이 연구의 분석기간인 1월~6월 중에 냉방수요는 미미하고, 난방수요와 관련한 기온변수의 효과는 이 연구가 수립한 7개 모형 전부에 대해 일관된 값을 보이므로, 연구결과에 반영되지 않은 계절적 요인의 영향은 제한적일 것으로 판단하였다. 다만, 추후의 연구가 자료의 연속성을 확보하여 한여름과 한겨울의 자료를 비교분석함으로써 계절적 요인의 이해를 더할 수 있기를 기대한다.

또 통제변수로 소득수준을 반영하기 위해 단위면적당 거래가격을 활용하였고, 그 결과 실거래료가 있는 단지만을 대상으로 분석하여 임대주택

은 연구대상에서 일괄 제외되었다는 점도 연구의 한계이다. 그러나 분양주택이라도 전세 등의 임대 생활자가 포함되어 있으므로 이 연구가 소유주택만의 특성을 포함하고 있다고 할 수는 없을 것이다. 다만 후속 연구에서 분양단지과 임대단지의 차이가 존재하는지 판단할 필요는 있을 것으로 생각할 수 있다. 한편으로, 추후의 연구는 소득수준을 통제하고자 할 때 단지별 위치데이터를 활용해 단지별 주변지역의 신용카드 이용액 등을 활용하는 것도 고려해볼 수 있을 것이다.

이 연구의 결과는 공동주택 단지의 전기소비를 효율화하는데 활용할 수 있다. 특히 최근 공공주택 지구가 다수 지정되고 있는 가운데, 이들 지구들이 청년주택, 신혼희망 타운 등 다양한 개념과 형태의 공동주택단지로 구성되도록 계획되고 있어 시사점이 크다. 청년주택은 역세권 중심으로 공급되어 단지 규모는 작으면서, 건폐율과 건물높이 모두 크게 설정되는 가운데, 소형 주택위주로 공급되고 소득수준이 작은 인구가 유입되는 등 이 연구가 다른 변수들과 뚜렷한 관계를 가질 수 있다.

예를 들어, 공공주택지구를 오픈스페이스를 갖춘 고층단지와 저층의 타운하우스형 단지로 구분하여 혼합할 경우, 연구 결과에 따르면 전자는 건폐율은 유지하되 층수를 높이는 것이 전기소비량 관점에서 더 효율적이며, 후자는 되도록 인구밀도를 높이는 것이 효율적이다. 다만 이는 계절에 따른 미기후효과 즉 열섬 등의 개념을 고려하지는 못한 것으로 종합적인 검토는 필요하다.

학술적인 관점에서 이 연구는 공동주택 단지의 전기사용 모형은 개별주택의 전기사용 모형과는 다르다는 것을 시사하고자 하였다. 기존의 다수 연구는 개별 주택내 주민의 활동과 전기제품 사용에 많은 관심을 두었는데, 그 총합이 단지 단위의 전기사용 모형과 같을 수는 없다. 이 연구에 따르면 인구의 원단위적 특성은 기존 개별주택 연구과 유

사한 결과를 보인다. 그러나 단지내 시설 구성과 관련될 수 있는 요소들은 자세히 다루지지 못하고 있다. 이 연구는 건폐율과 건물층수 등을 다루었으나 건물동간의 간격과 향, 주차장·커뮤니티 시설 등의 구성, 단지 부지의 형상 등 후속연구의 여지가 많다. 또 단지의 입지적 요인, 즉 주변의 공원, 하천, 산, 도로 등의 배치, 상업지역 등과의 상대적 위치 등도 자세히 고려해볼 수 있는 부분이다.

단지별 전기소비 모형은 수소연료전지, 태양광(Photovoltaic) 등의 도시내 신재생에너지 발전과 연계한 분산형 전원체계 도입에 관련하여 국지적인 전력 수요를 고려하는데도 중요하다(Blaabjerg et al., 2004; Fan et al., 2011). 소수의 대형 발전소가 광역적인 전기 공급을 하는 중앙집중형 전원과 달리, 분산형 전원은 소규모 지구에서 신재생에너지로 전기를 자체생산, 현지소비하기 때문이다(Wang and Nehrir, 2008; Arul et al., 2015).

지속 발전하고 있는 빅데이터의 확산은 공동주택단지의 전력소비 모형 구축에 더욱 도움이 될 것으로 기대된다. 국외 사례로 스마트전기계량기를 사용한 연구 결과가 나오고 있으며(Kavousian et al., 2013), SNS 콘텐츠도 유용한 자료로 사용되고 있다. 또 미세먼지 계측기, 3차원 지도 등 연구다변화를 위해 사용할 수 있는 자료들은 폭발적으로 증가하고 있다. 이를 다 활용하지 못하였음이 아쉬울 뿐이다.

서울의 공동주택은 세계적인 연구대상이다. 겨우 십 수년 전에, 인구가 천만 명에 달하는 도시 중 주택의 90%가 공동주택이면서 거의 모든 소득계층이 공동주택에서 거주하는 도시는 서울 외에는 드물었다. 그러나 이런 특성은 서울의 뒤를 따라 빠르게 성장하고 있는 중국, 이란, 베트남 등의 개발도상국 도시들에서 적지 않게 재현되고 있다(Chen and Gao, 2011; Yaghoobzadeh and Amiri, 2011; Nguyen et al., 2015). 서울의 공

동주택을 대상으로 한 연구가 앞으로도 다각적으로 모색되어야 할 중요한 이유이다.

참고문헌

- 김강식·임경업·윤종호, 2011, “대전지역 공동주택의 전력소비 실태 및 패턴 분석 연구”, 「한국생태환경건축학회 논문집」, 11(5): 91~96.
- 김기중·안영수·이승일, 2016, “도시 구성요소가 도시열과 에너지소비에 미치는 직간접적인 영향관계 규명 연구”, 「서울도시연구」, 17(1): 125~145.
- 김기중·안영수·이승일, 2017, “소득격차를 고려한 조건에서 건물과 도시계획 요소가 건물에너지소비에 미치는 영향요인 분석”, 「국토계획」, 52(5): 253~267.
- 김민경, 2013, “서울시 주거용 건물의 전력 소비량 추정모델”, 「서울도시연구」, 14(2): 179~192.
- 김용인·송승영, 2014, “공동주택의 에너지사용량 실태 분석 및 각종 인자가 에너지 사용량에 미치는 영향 분석”, 「한국태양에너지학회 논문집」, 34(6): 93~102.
- 노승철·이희연, 2013, “가구 부문의 에너지 소비량에 영향을 미치는 요인 분석”, 「국토계획」, 48(2): 295~312.
- 박민근·박정인·이병호, 2017, “서울시 주택가격, 인구, 지역내총생산의 인과분석”, 「서울도시연구」, 18(3): 129~141.
- 박소윤·이윤재·이현수, 2011, “공동주택 건축계획요소에 따른 전기 에너지 소비특성 분석”, 「한국생태환경건축학회 논문집」, 11(5): 107~117.
- 서현철·홍원화·남경목, 2012, “거주자 구성유형 및 소득수준에 따른 주거용 건물 내 전력소비성향”, 「한국주거학회 논문집」, 23(6): 31~38.
- 서홍석·김유곤·양고수, 2011, “미기상 수치 모델을 이용한 고층아파트 입지에 따른 바람장 및 기온 변화 연구”, 「대한환경공학회지」, 33(5): 340~352.
- 손철, 2013, “지역사회건강 연구와 근린의 사회경제적 수준 지표로서 주택 가격 수준의 이용”, 「한국공간정보학회지」, 21(6): 81~89.
- 안영수·김기중·이승일, 2014, “서울시 주택의 규모와 종류, 건축연도별 특성이 에너지 소비량의 차이에 미치는 영향 실증 연구”, 「국토계획」, 49(3): 175~194.
- 오규식·홍재주, 2005, “도시 공간구성요소와 도시 열섬현상의 관련성 연구”, 「한국도시설계학회지」, 6(1): 47~63.
- 오윤경·강정규, 2016, “고급주택의 주거특성 및 가격형성요인에 관한 연구”, 「부동산학회보」, 64: 31~45.
- 이강희·채창우, 2008, “공동주택 단지의 건물외부 조건을 활용한 에너지 소비량 산정모델”, 「대한건축학회논문집 계획계」, 24(9): 85~92.
- 이병희·이재혁·제해성, 2010, “초고층 주상복합 아파트의 에너지 소비특성에 관한 연구”, 「한국생태환경건축학회 논문집」, 10(5): 63~69.
- 임기추, 2013, “생활행위 분류에 의한 가정부문 용도별 에너지소비 분석모형 개발”, 「에너지공학」, 22(1): 38~43.
- 정두운·이현우, 2000, “아파트 배치계획의 변화에 따른 일조시간 및 난방비에 관한 연구”, 「대한건축학회 논문집」, 16(9): 205~211.
- 정재원·이창효·이승일, 2015, “서울시 행정동별 가구의 에너지 소비량에 영향을 미치는 요인의 통합적 분석”, 「국토계획」, 50(8): 75~94.
- 황광일, 2005, “공동주택의 전력소비실태에 관한 연구”, 「대한건축학회논문집 계획계」, 21(12): 305~312.
- Abrahamse, W. and Steg, L., 2009, “How do socio-demographic and psychological factors relate to households’ direct and indirect energy use and savings?”, *Journal of economic psychology*, 30(5): 711~720.
- Akbari, H., Pomerantz, M., and Taha, H., 2001, “Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas”, *Solar Energy*, 70(3): 295~300.
- Aniello, C., Morgan, K., Busbey, A., and Newland, L., 1995, “Mapping micro-urban heat islands using LANDSAT TM and a GIS”, *Computers &*

- Geosciences*, 21(8): 965~967.
- Arul, P., Ramachandaramurthy, V., and Rajkumar, R., 2015, "Control strategies for a hybrid renewable energy system: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42: 597~608.
- Azevedo, J., Chapman, L., and Muller, C., 2016, "Urban heat and residential electricity consumption: A preliminary study", *Applied Geography*, 70: 59~67.
- Blaabjerg, F., Chen, Z., and Kjaer, S., 2004, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems", *IEEE Transactions on PowerElectronics*, 19(5): 1184~1194.
- Brounen, D., Kok, N., and Quigley, J., 2012, "Residential energy use and conservation: Economics and demographics", *European Economic Review*, 56(5): 931~945.
- Chen, A. and Gao, J., 2011, "Urbanization in China and the Coordinated Development Model—The Case of Chengdu", *the Social Science Journal*, 48(3): 500~513.
- Chen, H., Jia, B., and Lau, S., 2008, "Sustainable urban form for Chinese compactcities: Challenges of a rapid urbanized economy", *Habitat International*, 32: 28~40.
- Choi, I., Cho, S., and Kim, J., 2012, "Energy consumption characteristics of high-rise apartment buildings according to building shape and mixed-useddevelopment", *Energy and Buildings*, 46: 123~131.
- Deweese, D. and Tombe, T., 2011, "The Impact of Sub-Metering on Condominium Electricity Demand", *Canadian Public Policy*, 37(4): 435~457.
- Dietz, T. and Rosa, E., 1997, "Effects of population and affluence on CO2 emissions", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(1): 175~179.
- de Casas Castro Marins, K. and de Andrade Roméro, M., 2013, "Urban and Energy Assessment from a Systemic Approach of Urban Morphology, Urban Mobility, and Buildings: CaseStudy of Agua Branca in Sao Paulo", *Journal of Urban Planning and Development*, 139: 280~291.
- Ewing, R. and Rong, F., 2008, "The Impacts of Urban Form on US Residential Energy Use", *Housing Policy Debate*, 19: 1~30.
- Fan, J., Liang, Y., Tao, A., Sheng, K., Ma, H., Xu, Y., Wang, C., and Sun, W., 2011, "Energy policies for sustainable livelihoods and sustainable development of poor areas in China", *Energy Policy*, 39(3): 1200~1212.
- Finch, G., Burnett, E., Knowles, W., and Eng, P., 2010, "Energy consumption in mid and high rise residential buildings in British Columbia, *Proceedings of Building Enclosure Science and Technology Conference*.
- Filippini, M. and Pachauri, S., 2004, "Elasticities of electricity demand in urban Indian households", *Energy policy*, 32(3): 429~436.
- Frew, J. and Jud, G., 2003, "Estimating the Value of Apartment Buildings", *Journal of Real Estate Research*, 25(1): 77~86.
- Gaemi, S. and Brauner, G., 2009, "User behavior and patterns of electricity use for energy saving", *Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, IEWT*.
- Givoni, B., 1998, *Climate considerations in building and urban design*, John Wiley & Sons.
- Halvorsen, B. and Larsen, B., 2001, "Norwegian residential electricity demand—a microeconomic assessment of the growth from 1976 to 1993", *Energy Policy*, 29(3): 227~236.
- Hlouskova, J. and Wagner, M., 2006, "The performance of panel unit root and stationarity tests: results from a large scale simulation study", *Econometric Reviews*, 25(1): 85~116.
- Hong, T., Koo, C., and Kim, H., 2012, "A decision

- support model for improving a multi-family housing complex based on CO2 emission from electricity consumption”, *Journal of environmental management*, 112: 67~78.
- Hong, T., Koo, C., and Lee, S., 2014, “Benchmarks as a tool for free allocation through comparison with similar projects: Focused on multi-family housing complex”, *Applied Energy*, 114: 663~675.
- Huebner, G., Hamilton, I., Chalabi, Z., Shipworth, D., and Oreszczyn, T., 2015, “Explaining domestic energy consumption – the comparative contribution of building factors, socio-demographics, behaviours and attitudes”, *Applied energy*, 159: 589~600.
- Jones, R., Fuertes, A., and Lomas, K., 2015, “The Socio-economic, dwelling and appliance related factors affecting electricity consumption in domestic buildings”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43: 901~917.
- Karger, C. and Hennings, W., 2009, “Sustainable evaluation of decentralized electricity generation”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(3): 583~593.
- Kavousian, A., Rajagopal, R., and Fischer, M., 2013, “Determinants of residential electricity consumption: Using smart meter data to examine the effect of climate, building characteristics, appliance stock, and occupants’ behavior”, *Energy*, 55: 184~194.
- Kim S, Yang, I., Yeo, M., and Kim, K., 2005, “Development of a housing performance evaluation model for multi-family residential buildings in Korea”, *Building and Environment*, 40(8): 1103~1116.
- Ko, Y., 2013, “Urban Form and Residential Energy Use: A Review of Design Principles and Research Findings”, *Journal of Planning Literature*, 28(4): 327~351.
- Li, C., Song, Y., and Kaza, N., 2018, “Urban Form and Household Electricity Consumption: A Multilevel Study”, *Energy and Buildings*, 158: 181~193.
- Lim, J., Kang, M., and Jung, C., 2019, “Effect of national-level spatial distribution of cities on national transport CO2 emissions”, *Environmental Impact Assessment Review*, 77: 162~173.
- Nguyen, L, Raabe, K., and Grote, U., 2015, “Rural-urban migration, household vulnerability, and welfare in Vietnam”, *World Development*, 71: 79~93.
- Pachauri, S. and Jiang, L., 2008, “The Household energy transition in India and China”, *Energy Policy*, 36(11): 4022~4035.
- Qi, R., Lu, L., and Yang, H., 2012, “Impact of climate change on ventilation load and energy use of air conditioning systems in buildings of Hong Kong”, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 7(4): 303~309.
- Radhi, H. and Sharples, S., 2013, “Quantifying the domestic electricity consumption for air-conditioning due to urban heat islands in hot arid regions”, *Applied energy*, 112: 371~380.
- Rodriguez, D., Khattak, A., and Evenson, K., 2006, “Can New Urbanism Encourage Physical Activity?: Comparing a New Urbanist Neighborhood with Conventional Suburbs”, *Journal of the American Planning Association*, 72(1): 43~54.
- Rosas-Flores, J., Rosas-Flores, D., and Galvez, D., 2011, “Saturation, energy consumption, CO2 emission and energy efficiency from urban and rural household appliance in Mexico”, *Energy and Buildings*, 43(1): 10~18.
- Sanquist, T., Orr, H., Shui, B., and Bittner, A., 2012, “Lifestyle factors in U.S. residential electricity consumption”, *Energy Policy*, 42: 354~364.
- Santamouris, M., 2016, “Cooling the buildings~past,

- present and future”, *Energy and Buildings*, 128: 617~638.
- Santamouris, M., Cartalis, C., Synnefa, A., and Kolokotsa, D., 2015, “On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings – A review”, *Energy and Buildings*, 98: 119~124.
- Seebauer, S. and Wolf, A., 2017, “Disentangling household and individual factors in explaining private electricity consumption”, *Energy Efficiency*, 10: 1~20.
- Sovacool, B., 2011, “Conceptualizing urban household energy use: Climbing the Energy Services Ladder”, *Energy Policy*, 39(3): 1659~1668.
- Taha, H., 1997, “Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat”, *Energy and buildings*, 25(2): 99~103.
- Tereci, A., Ozkana, S., and Eicker, U., 2013, “Energy benchmarking for residential buildings”, *Energy and Buildings*, 60: 92~99.
- Tonn, B. and Eisenberg, J., 2007, “The Aging US Population and Residential Energy Demand”, *Energy Policy*, 35(1): 743~745.
- Touchie, M., Binkley, C., and Pressnail, K., 2013, “Correlating energy consumption with multi-unit residential building characteristics in the city of Toronto”, *Energy and Buildings*, 66: 648~656.
- Wallis, H., Nachreiner, M., and Matthies, E., 2016, “Adolescents and electricity consumption: Investing sociodemographic, economic, and behavioural influences on electricity consumption in households”, *Energy Policy*, 94: 224~234.
- Wang, C. and Nehrir, M., 2008, “Power Management of a Stand-Alone Wind / Photovoltaic / Fuel Cell Energy System”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23(3): 1184~1194.
- Yagoubzadeh, N. and Amiri, P., 2011, “Ranking of new town in Iran”, *Earth Science in Asia Magazine*, 1(2): 2~8.
- Yamaguchi, Y., Shimoda, Y., and Mizuno, M., 2007, “Proposal of a modeling approach considering urban form for evaluation of city level energy management”, *Energy and Buildings*, 39(5): 580~592.
- Yamasaki, E. and Tominaga, N., 1997, “Evolution of an Aging Society and Effect on Residential Energy Demand”, *Energy Policy*, 25(11): 903~912.
- Yohanis, Y., Mondol, J., Wright, A., and Norton, B., 2008, “Real-life energy use in the UK: How occupancy and dwelling characteristics affect domestic electricity use”, *Energy and Buildings*, 40(6): 1053~1059.
- 건축데이터 민간개방시스템: <http://open.eais.go.kr/>
 서울시 열린데이터광장: <http://data.seoul.go.kr/>
 서울시 홈페이지: <http://www.seoul.go.kr/>
- 원 고 접 수 일 : 2019년 7월 18일**
1 차 심 사 완 료 일 : 2019년 9월 20일
최 종 원 고 채 택 일 : 2019년 9월 27일