

도심 상권 및 상업 활동 특성과 상업용 건축물 전력 소비 간의 다층적 관계 분석

박성우* · 김현수**†

*국립부경대학교 토목공학전공 학부과정생, **국립부경대학교 토목공학전공 교수

A multilevel analysis of commercial activities and regional characteristics influencing energy consumption in commercial buildings in urban centers

Park, Seongwoo* and Kim, Hyunsoo**†

*Undergraduate Student, Dept. of Civil engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**Professor, Dept. of Civil engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

ABSTRACT

This study examines how commercial activity patterns and regional characteristics shape electricity consumption in commercial buildings across urban centers in Busan, Republic of Korea. Building-level monthly electricity use for 2024 was collected from the national building-energy database and log-transformed to address heteroskedasticity. Commercial activity was operationalized at the building level by constructing ratios of business categories derived from permit-based industry records. To enhance interpretability and mitigate multicollinearity, approximately 90 detailed business types were first consolidated into eight functional groups and then reduced through k-means clustering into four activity clusters: neighborhood services, accommodation - office, restaurants - retail, and entertainment - medical - education. The analytical framework compared ordinary least squares (OLS) regression with hierarchical linear modeling (HLM), where buildings (Level 1) were nested within ten urban commercial centers (Level 2). The null model yielded an intraclass correlation coefficient of 0.083, indicating meaningful between-center variation and supporting a multilevel approach. Results from the preferred random-intercept model show that building height and floor area ratio are positively associated with electricity consumption, while reinforced-concrete structure is linked to lower consumption. Relative to the neighborhood-services cluster, all other activity clusters exhibit higher electricity use, with the entertainment - medical - education cluster showing the strongest effect, suggesting the importance of longer operating hours and standby loads. These findings highlight that commercial-building electricity demand is jointly determined by building attributes and functional commercial activity patterns, underscoring the need for place-based energy-demand management tailored to urban center types.

Key words : Building Energy, Commercial Factors, Local Factors, Multi-Level Model, Hierarchical Linear Model, HLM

1. 서론

전 세계적으로 기후변화로 인한 에너지 수요의 급증과 온실가스 배출 증가는 지속가능한 도시 운영을 위협하는 주요 요인으로 작용하고 있다. 이에 각국은 탄소중립(Net Zero) 달성을 목표로 다양한 정책과 제도를 추진하고 있

으며, 특히 건물 부문은 전체 에너지 소비에서 큰 비중을 차지하는 핵심 관리 대상으로 인식되고 있다. EU의 경우 전체 에너지 소비의 40%를 건물이 차지하고 있으며 (European Commission, 2020), 건물의 에너지 효율 개선과 온실가스 배출 저감을 핵심 전략으로 제시하고 있다. 미국 또한 「기반시설투자 및 일자리법(IIJA)」을 통해 건물

†Corresponding author : hs.kim@pknu.ac.kr (Pukyong University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan, 48513, Korea. Tel. +82-51-629-6071) ORCID 박성우 0009-0006-2359-9329 김현수 0000-0002-1736-8747

에너지 절감 기준을 강화하고 있다(United States Congress, 2021). 국내 건물 에너지 부문의 경우 국가 전체 에너지 소비의 20% 이상을 차지하는 것으로 보고되며(Korea Energy Economics Institute, 2022), 분산에너지의 확대를 위한 건물 태양광 설치 지원이나 제로에너지건축물 인증 제도와 녹색건축물 조성 지원사업 등 건물 부문 에너지 감축을 위한 다양한 정책이 추진되고 있다(Korea Law Information Center, 2021). 특히 용도별 에너지 사용 추세를 보면 단독주택의 사용량은 감소하는 경향을 보이는 반면, 다수의 상업용 건물에서는 에너지 사용량이 증가하는 추세가 확인되어(Korean Statistical Information Service, 2024), 상업용 건물이 도시 차원의 에너지 수요 관리와 탄소중립 전략에서 중요한 정책적 대상임을 시사한다. 그러나 현재의 정책과 연구는 상업용 건물 에너지 소비의 요인 개선은 충분히 반영하지 못한다는 한계를 갖는다. 정책은 에너지 발전 측면의 전환이나 건물 설비 효율 개선, 친환경 자재 도입 등 기술적 접근에 비교적 집중되는 경향이 있으며, 도시 내 사회·경제적 조건이나 지역별 에너지 소비 행태 차이를 체계적으로 반영하는 데는 제한점이 존재한다. 또한 상업용 건물의 에너지 소비는 업종 구성, 운영시간, 이용밀도처럼 상업 활동의 기능적 특성과 밀접하게 연관될 수 있음에도(Kontokosta, 2015), 이러한 요소를 건물 단위에서 정량화해 실증적으로 검증한 연구는 부족한 실정이다.

도심 상권에 속한 상업용 건물은 동일 중심지 내에서 유사한 환경을 공유하는 위계적 구조를 갖고 있으며 이를 단일모형만으로 분석할 경우 관측치 독립성 가정의 위반으로 계수 추정의 왜곡이나 표준오차 과소 추정 가능성이 발생할 수 있다. 결국 상업용 건물을 대상으로 한 에너지 정책의 정밀도를 높이기 위해서는, 건물 수준 요인뿐 아니라 도심 상권 수준에서의 영향 관계와 상업 활동의 기능적 차이를 함께 고려하는 분석이 필요하다. 이에 따라 본 연구는 부산광역시의 도심·부도심·지역특화핵에 위치한 상업 활동이 집중되는 도심 상권을 대상으로, 상업용 건물의 전력 소비가 건물의 물리적 특성과 상업 활동 특성, 그리고 각 도시 유형별 도심 상권의 사회·경제적 조건에 의해 어떻게 달라지는지를 규명하고자 한다. 이는 건물 단위 효율 개선 중심의 정책 접근을 보완하여, 상업시설의 기능 분류와 공간적 밀집도를 함께 고려하는 지역 단위 에너지 수요 관리의 필요성을 뒷받침하는 근거를 제공한다.

2. 이론적 배경 및 선행연구 고찰

2.1. 도시·지역 단위 에너지 연구

건물 에너지 소비는 건물의 물리적 특성과 이용 형태에 의해 설명될 수 있으나, 물리적 요인만을 중심으로 한 접근은 실제 에너지 소비에 영향을 미치는 사회·환경적 요인을 충분히 반영하지 못할 수 있다는 한계가 지적되어 왔다(Ali et al., 2021). 이러한 문제의식에 따라 도시의 공간 구조와 지역적 특성은 에너지 소비의 공간적 분포를 형성하는 핵심 요인으로 평가된다. Steemers (2003)는 도시의 밀도와 토지이용 구조가 지역별 에너지 수요의 차이를 유발한다고 보았으며, 특히 Ferrando et al. (2020)은 토지이용 구조는 지역에 따라 건물 이용자들의 용도별 수요 패턴을 파악할 수 있는 지표로 활용될 수 있다고 하였다. Kavgić et al. (2010)은 사회·경제적 구조와 인구 특성이 에너지 소비를 설명하는 주요 변수임을 실증적으로 제시하였다. 또한 Kim and Jung (2019), Kim et al. (2022), Lee and Yoo (2023)는 도시 차원 에너지 분석에서 인구밀도, 평균연령, 가구당 인구수, 소득 등 다양한 인구·사회·환경 요인을 통합적으로 고려하는 접근의 필요성을 강조하며 이는 지역 단위 에너지 소비를 보다 정교하게 설명할 수 있음을 제안하였다. 종합하면 도시·지역 단위의 에너지 소비는 단순한 물리적 환경뿐만 아니라 도시의 구조와 유형, 그리고 인구, 산업, 토지이용, 소비 수준 등 사회경제적 맥락에 의해 영향을 받으며, 이는 본 연구가 도심 상권 수준의 지역 특성 변수를 설정한 이론적 근거가 된다.

2.2. 건물 단위 에너지 소비 결정요인

건물 단위 에너지 소비는 건물의 물리적 특성과 이용 형태에 따라 크게 달라진다. Li et al. (2017)은 건물 에너지 모델링을 상향식(bottom-up)과 하향식(top-down)으로 구분하였으며, 특히 통계적 분석 기반의 상향식 접근은 세부 물리 정보가 제한된 상황에서도 건물의 연령, 규모, 유형 등 기초 자료를 활용해 에너지 소비 예측모형을 구축할 수 있음을 제시하였다. 건물의 물리적 특성과 에너지 소비의 관계를 다룬 선행연구를 보면, Hong (2014)과 Santamouris (2016)는 건물의 높이 및 연면적, 용적률이 증가할수록 전력 소비량이 증가함을 확인하였으며 건물의 구조 또한 전력 소비량의 관계에 중요한 요인으로 작용함을 시사했다. Godoy-Shimizu et al. (2018)은 영국 웨일스 지역의 사무용 건물을 대상으로 건물 높이가 증가할

수록 평균 에너지 사용량과 탄소 배출량이 증가한다는 연구 결과를 제시하였다. Waddicor et al. (2015), Buckley et al. (2021)은 건물의 사용연한이 증가할수록 노후 설비 및 효율 저하로 인해 에너지 소비가 증가할 수 있음을 확인하였다. 따라서 건물 단위에서 에너지 소비를 설명하기 위해서는 용적률, 연면적, 높이, 사용연한, 구조 등 물리적 요인을 핵심 결정요인으로 고려할 필요가 있다.

2.3. 상업 활동 및 이용행태와 에너지 소비

최근 연구들은 상업 활동의 기능적 특성과 이용 행태가 상업용 건물의 전력 소비를 결정짓는 주요 요인임을 강조하고 있다. Kontokosta (2015)는 뉴욕시 상업용 건물 자료를 이용하여 업종별 영업시간과 이용밀도가 전력 소비에 유의한 영향을 미친다고 밝혔다. Lee and Seo (2021)는 국내 대도시를 대상으로 매출 규모, 방문자 수, 업종 구성비 등이 건물 단위 전력 소비량과 밀접한 관계를 가진다고 분석하였다. Sun et al. (2016)은 상업시설에서 업종, 운영 시간, 설비효율, 종사자의 규모가 상업용 건물의 에너지 소비량과 영향 관계가 있다고 하였다. 도시계획적 관점에서 상업은 단순한 거래 행위를 넘어 도시의 봉사 기능과 사회경제 활동의 중심 역할을 수행하며, 입지, 건물 기능, 용적률 측면에서 높은 공공성을 지닌다(Jang and Sung, 2005). 보행활동은 상업 매출과 임대료를 좌우하는 핵심 요인으로 제시되어 왔으며, 특히 유동인구는 중심상업지역의 대표적 설명 지표로 활용되어 왔다(Choi and Shin, 2001; Kang, 2022). 이는 상업 활동의 밀도와 인구의 공간적 집중이 에너지 소비 패턴에 직접적인 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 이러한 논의에 근거하여 상업 활동의 기능적 유형과 상업의 이용 지표가 상업용 건물의 에너지 소비 패턴을 설명하는 데 중요한 역할을 할 수 있음을 파악했으며, 이에 따라 본 연구는 상업 활동 특성 변수를 주요 설명 변수로 함께 고려하였다.

특히 국내의 상업지역의 경우 일반상업지역으로 일괄 지정되는 경향이 있어, 상업 활동의 이용행태와 기능적 구성이 갖는 이질성을 제도적 구분만으로 파악하기 어렵다는 한계가 존재한다. 「2030 부산도시기본계획」 역시 도심·부도심의 공간 구조를 설정하고 구역계로 중심상업지역을 구분하고 있으나, 상업 기능의 세부 특성을 반영한 구역 구분에는 제약이 있다(Busan Metropolitan City, 2020). 또한 현행 에너지 효율 정책은 개별 건물의 기술적·구조적 성능 개선에 주로 초점을 두고 있어, 지역 단위

의 상업 활동 패턴이나 공간적 집적도 차이를 충분히 고려하지 못한다.

2.4. 기존 연구의 한계 및 본 연구의 분석 틀

기존 도시 에너지 모델링 연구는 지역 간 이질성과 관측치 간 종속성을 충분히 반영하지 못해 건물 에너지 소비에 대한 설명이 제한될 수 있다는 한계가 지적되어 왔다(Mutani et al., 2023). 특히 건물 단위와 도심 상권처럼 서로 다른 위계를 갖는 자료를 단일모형으로 분석할 경우, 동일 지역 내 관측치의 동질성을 간과하게 되어 계수의 왜곡과 표준오차의 과소 추정 문제가 발생할 수 있다(Yu, 2006). 이러한 한계점을 보완하기 위한 방법론으로 다층모형이 활용되어 왔으며, 기후 요인과 에너지 소비 관계를 지역 군집에 기반한 연구와(Wang et al., 2017), 지역 수준 특성이 건물 전력 소비에 미치는 영향을 다층적으로 추정한 연구가 진행되었다(Lee et al., 2019; Li et al., 2018). 이는 건물 에너지 소비가 건물 수준 요인만으로 결정되지 않고, 상위 계층의 영향에 의해 구조적으로 차이가 발생할 수 있음을 시사한다. 특히 도심 중심 상업지의 경우 토지이용상 상업 기능이 집중된 공간임에도 불구하고, 실제 상업 활동의 기능적 차이를 반영한 세분화가 충분히 이루어지지 못하고 있다. 이에 본 연구는 부산광역시 도심·부도심·지역특화핵의 도심 상권을 대상으로 상업 활동의 기능적 특성을 건물 단위에서 계량화하고, 도심 상권 수준의 사회·경제적 특성을 결합한 다층모형 분석을 수행하고자 한다. 이를 통해 단일모형으로는 식별하기 어려운 도심 상권 수준의 구조적 차이가 건물 전력 소비에 미치는 영향을 추정하고, 상권 특성에 기반한 지역 단위 에너지 수요 관리 및 효율화 정책 수립을 위한 실증적 근거를 제시하고자 한다.

3. 분석 자료 및 변수 구성

3.1. 연구의 범위

본 연구의 공간적 범위는 「2030년 부산도시기본계획」에서 제시한 도시 공간 구조를 기준으로 도심, 부도심, 지역특화핵 내 상업 활동이 가장 활발히 이루어지고 상업 기능이 집중된 도심 상권을 연구 대상으로 선정하였다. 도심 및 부도심의 경우 도시기본계획에서 제시한 중심상업지역의 공간적 경계를 활용하여 연구 범위를 설정하였다. 반면, 지역특화핵의 경우는 따로 공식적인 구역계가 제시

되고 있지 않아 소상공인시장진흥공단에서 제공하는 행정동 단위 상권정보와 GIS 기반 토지이용 현황, 위성사진을 종합적으로 활용하여 상업 활동이 집약적으로 이루어지고 있는 상업지역을 연구 대상으로 설정하였다. 이 과정에서 상업시설 밀집도와 상업용 건물의 비율, 주거 및 유동인구를 종합적으로 고려하였으며, 최종적으로 선정된 도시유형별 대표 도심 상권의 공간적 특성을 Table 1에 제시하였다.

시간적 범위의 경우 종속변수인 건물 전력 소비량과 설명변수인 지역 특성 변수 모두 2024년 기준 월별 평균 데이터를 사용하였다. 상업 활동 특성 변수는 행정안전부가 제공하는 인허가 데이터를 통해 2024년 기준 영업중인 업

종 데이터를 취합 후 활용하였다.

3.2. 변수의 구성

종속변수인 건물 전력 소비량 데이터는 국토교통부가 제공하는 건축HUB의 2024년 월별 전력 소비량 데이터를 사용하였으며, 건물 속성 데이터와 건물 단위 전력 소비량 데이터를 결합한 후, 전력 소비량 정보가 결측된 건물은 분석 대상에서 제거하였다. 또한 데이터의 이분산성을 해결하기 위해 자연로그(ln)를 취하였다.

본 연구에서는 선행연구 고찰을 통해 독립변수를 건물의 물리적 특성, 상업 활동 특성, 지역 특성으로 구분하였

Table 1. Representative study areas by urban center

Research area	Number of buildings	Building density (%)	Area size (km ²)
Central Business District	1978	35.9	1.09
Sub- Central Business District	320	28.7	0.36
Specialized Urban Commercial Node	210	18.0	0.22

Table 2. Variable description

	Variables	Definition	Unit	Source
	Electricity consumption	Average monthly electricity consumption	kWh	Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2024a)
Building physical characteristics	Floor area ratio	(Building foot-print area floor)/plot area	-	Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2024b)
	Building structure	1=RC, 0=Others	-	
	Building height	Building height within plot	m	
	Building age	Age of use of a building	Year	
Commercial activities characteristics	Neighborhood service facilities	Living and service commercial activities	-	Small Enterprise and Market Service (2024)
	Accommodation·office facilities	Accommodation and business facilities activities	-	
	Restaurants·Retail stores facilities	Restaurants and retail stores activities	-	
	Entertainment·education facilities	Entertainment and education activities	-	
Regional characteristics	Expenditure	Average consumption by administrative district	10,000 won	Small Enterprise and Market Service (2024)
	Commercial Sales	Average sales by business	10,000 won	
	Floating population	Floating population by administrative district	Number of people	
	Residential population	Residential population by administrative district	Number of people	
	Number of businesses	Number of businesses by administrative district	Establishments	

으며, 건물의 물리적 특성 변수는 국토교통부에서 제공하는 용도별 건물정보에서 수집하였으며 용적률, 건물 높이, 사용연한, 건물구조로 구성하였다. 건물구조는 철근콘크리트구조와 기타구조를 더미변수로 설정하였다.

도심 유형별 상권의 지역적 특성 변수는 상권 단위의 소비, 매출, 유동인구, 주거인구, 상업집중도로 구성하였으며 특히 상업집중도는 지역별 상업 활동을 진행하는 업소의 수로 상업에 대한 집적도를 파악하기 위해 사용되었다. 따라서 분석은 건물 단위 요인과 도심 상권 단위로 확보한 데이터를 상권 단위로 취합하여 사회·경제적 요인을 활용해 진행되었다. 최종적으로 분석에 사용한 변수의 구성은 Table 2와 같다.

3.3. 상업 활동 변수의 처리

상업 활동 특성 변수는 건물 단위 상업 활동에 대한 관측치 데이터를 확보하기 위해 한국국토정보공사의 공간 데이터마켓에서 제공하는 상가 및 오피스텔 정보 데이터와 지방행정인허가데이터개방시스템에서 제공하는 인허가 업종 데이터를 수집하였다. 개별 업종은 약 90여 개로 구성되어 있어, 이를 모두 활용할 경우 다중공선성 및 해석상의 한계가 발생할 수 있다. 이를 보완하기 위해 건축법 시행령 「용도별 건축물의 종류」에 따른 분류 체계를 준용하여(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2025), 업종을 기능적 유사성에 따라 8개 기능군으로 재분류하여 업종 구조를 정제하였으며, 건물 단위에서 각 기능군이 차지하는 비율 변수로 산정하였다. 이후 상업 활동 특성 변수 간 상관성과 해석력 문제점을 개선하기 위해 K-평균 군집분석(k-means clustering)을 수행함으로써 네 가지 군집 유형으로 재분류하였다. 군집분석은 변수에 대한 데이터의 손실을 최소화하여 유사 패턴을 갖는

변수끼리 군집시키는 방법이다. 본 연구에서는 상업 활동 특성 변수 간 상관성의 개선을 위해 건물의 업종 구성 비율에 대한 유형화를 진행하여 군집 간 범주형 변수로 활용하였다. 군집분석 결과 업종 비율 변수들의 전체 변동 중 38.7%가 군집 간 차이로 요약되었으며, 상업 활동에 따른 군집 구분이 일정 수준의 분리도를 갖는 것으로 나타났다. Table 3은 표준화된 업종 비율 변수의 군집별 중심값을 제시한 것으로, 양의 값은 해당 업종 비율이 전체 평균보다 상대적으로 높은 군집을 보이는 것을 의미한다. Cluster1은 생활서비스 비율이 가장 높게 나타나 생활서비스 중심으로 분류되었으며, Cluster2는 숙박과 업무시설비율이 높아 숙박·업무 중심으로 해석되었다. Cluster3은 음식점과 소매점·쇼핑시설 비율이 높아 음식·소매 중심, 마지막으로 Cluster4는 유흥·오락과 교육·체육시설, 의료시설 비율이 상대적으로 높아 유흥·의료·교육 중심으로 군집화되었다. 이러한 군집 구분은 상업 활동의 기능적 차이가 상업 활동 특성을 설명하는 데 중요한 역할을 할 것으로 판단된다.

4. 분석방법

본 연구는 상업용 건축물의 전력 소비가 건축물 자체의 특성뿐만 아니라, 건축물이 위치한 도심 상권이라는 상위 공간 단위의 특성에 의해 체계적으로 차이를 보이는지를 분석하고자 하였다. 이를 위해 분석 대상 자료가 건물 단위 관측치가 상업지 단위에 중첩된 위계적 구조를 가진다는 점에 주목하고, OLS 회귀분석과 위계선형모형(Hierarchical Linear Model, HLM)을 단계적으로 적용하였다. OLS 분석은 상업용 건물 전력 소비와 설명변수 간의 평균적인 관계를 파악하기 위한 기준으로 설정하였으

Table 3. Clsuter analysis results

Variable	Cluster1	Cluster2	Cluster3	Cluster4
Restaurants · Beverage Facilities Ratio	-0.42752	0.501137	-0.40077	1.254723
Entertainment · Recreation Facilities Ratio	-0.77242	-1.03068	0.889646	-0.68286
Neighborhood service Facilities Ratio	2.341077	-0.42252	-0.32976	-0.30241
Accommodation Facilities Ratio	-0.34189	1.730665	-0.32795	-0.2212
Retail · Shopping Facilities Ratio	-0.11764	-0.14658	0.104037	-0.05111
Education · Sports Facilities Ratio	0.045774	-0.15004	-0.12141	0.291811
Office Facilities Ratio	-0.18433	1.150466	-0.20962	-0.18413
Medical Facilities Ratio	-0.11707	-0.22084	-0.23911	0.634477
between_SS / total_SS (%)	38.7			

며, 이후 동일한 설명변수를 활용한 위계선형모형 결과와의 비교를 통해 상업지 수준의 맥락 효과를 검증하였으며 모형은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{p=1}^P \beta_p X_{pi} + r_i \quad (1)$$

Y_i : 종속변수

X_{pi} : 설명변수

β_0 : 절편

β_p : 설명변수의 회귀계수

r_i : 오차항

OLS 분석은 건축물의 물리적 특성과 상업 활동 특성, 그리고 지역 특성을 모두 독립변수로 투입하여 상업용 건축물 전력 소비의 전반적인 결정요인을 추정하는 데 활용되었다. 그러나 상업용 건축물은 특정 상업지에 속해 있으며, 동일 지역 내 건축물들은 유사한 상업 환경과 공간적·사회경제적 조건을 공유한다는 점에서 관측치 간 독립성 가정을 충족하기 어렵다. 이러한 자료 구조를 단일 회귀모형으로 분석할 경우, 집단 내 상관을 충분히 반영하지 못해 계수의 편의 및 표준오차의 과소 추정 문제가 발생할 수 있다. 이에 본 연구는 OLS 결과를 비교 기준으로 제시 하되, 분석의 중심 모형으로 위계선형모형을 적용하였다.

위계선형모형에서는 상업용 건축물을 1수준(level 1), 건축물이 위치한 도심 상권을 2수준(level 2)으로 설정하였다. 종속변수는 상업용 건축물의 전력 소비량이며, 1수준에는 건축물의 물리적 특성과 상업 활동 특성 변수들을 포함하였다. 2수준에는 도심 상권의 매출, 소비, 유동인구, 주거인구, 상업집중도 등 지역적 특성을 반영하는 변수를 포함하여, 상권에서의 구조적 차이가 전력 소비에 미치는 영향을 분석하였다.

위계선형모형의 추정은 상향식 접근법에 따라 단계적으로 수행하였다. 먼저, OLS 회귀모형을 활용한 추정을 통해 상업용 건축물 전력 소비와 설명변수 간의 평균적인 관계를 추정하고 분석 절차의 기준선을 마련하였다. 이후 분석 대상 자료의 건물 단위 관측치가 도심 상권 단위에 중첩된 위계적 구조를 가진다는 점을 고려하여, 위계선형모형을 단계적으로 적용하였다.

Model 1에서는 설명변수가 포함되지 않은 절편만 있는 모형(null model)을 설정하였다. 2수준에서의 평균절편은

γ_{00} 이며 2수준 집단 평균 차이는 μ_{0j} , r_{ij} 는 1수준의 개인 간 차이이다. 상업용 건물 전력 소비의 전체 분산 중 도심 상권 수준에서 설명되는 분산의 비중을 급내상관계수 (Intraclass Correlation Coefficient, ICC)를 통해 산정하였다. 이를 통해 상업지 수준의 차이가 전력 소비 변동을 설명하는 데 일정 부분 기여하는지를 검증함으로써, 위계선형모형 적용의 타당성을 확인하였다. 식 (2), 2수준에서의 평균절편은 γ_{00} 이며 2수준 집단 평균 차이는 μ_{0j} , r_{ij} 는 1수준의 개인 간 차이이다.

Model 2에서는 건물 수준의 물리적 특성과 상업 활동 특성 변수를 투입한 임의절편모형(random intercept model) 모형은 동일 도심 상권에 위치한 건물들이 공유하는 평균적인 전력 소비 수준의 차이를 임의절편으로 반영하는 동시에, 건물 수준 설명변수가 전력 소비에 미치는 영향을 고정효과로 추정한다. 이를 통해 상업지 간 평균 소비 수준의 이질성을 통제된 상태에서 건축물 특성의 영향력을 분석하였다. 식은 (3)과 같이 설정하였으며 γ_{p0} 는 1수준 변수의 고정효과이며 X_{ij} 는 1수준의 설명변수이다.

Model 3에서는 Model 2를 확장하여, 도심 상권의 매출, 소비, 유동인구, 주거인구, 상업집중도 등 2수준 설명변수를 추가하였다. 이를 통해 도심 상권 특성이 상업용 건물 전력 소비에 미치는 직접적인 영향을 추정하고, 건물 수준 요인만으로는 설명되지 않는 상업지 간 구조적 차이를 보다 명확히 분석하였다. 아울러 일부 건축물 수준 변수에 대해서는, 상권에 따라 효과가 달라질 가능성을 탐색적으로 검토하기 위해 임의기울기모형(random slope model)을 추가적으로 적용하였으나, 이는 주된 분석 결과에 대한 보조적 검증으로 활용하였다(식 (4)와 식 (5)). W_j 는 2수준의 설명변수이며 μ_{ij} 는 1수준에 대한 독립변수 기울기의 집단 수준에서의 잔차 그리고 γ_{10} 는 1수준 독립변수의 전체 집단의 평균 기울기이다.

$$Y_{ij} = \gamma_{00} + \mu_{0j} + r_{ij} \quad (2)$$

$$Y_{ij} = \gamma_{00} + \sum_{p=1}^P \gamma_{p0} X_{pij} + \mu_{0j} + r_{ij} \quad (3)$$

$$Y_{ij} = \gamma_{00} + \gamma_{01} W_j + \beta_1 X_{ij} + \mu_{0j} + r_{ij} \quad (4)$$

$$Y_{ij} = \gamma_{00} + \gamma_{10} X_{pij} + \gamma_{01} W_j + \mu_{ij} X_{ij} + \mu_{0j} + r_{ij} \quad (5)$$

5. 분석결과

5.1. 기초통계량

기초통계를 통해 제1수준과 제2수준에서의 분석을 진행하였으며 기초통계량은 Table 4와 같다. 상업 활동 특성의 경우 353, 412, 709, 1328로 각각 구분되어 준수한 분포 정도를 보였다. 종속변수인 전력 소비량은 최솟값이 5.7이고 최댓값이 14.6으로 건물 단위로 상이하게 차이가 존재한다는 것을 확인하였다. 제1수준인 건물 물리적 특성 및 상업 활동 특성은 2,802개 건물 단위이며, 제2수준인 지역적 특성은 10개의 도심 상권을 대상으로 하였다. 제1수준인 건물 물리적 특성 변수의 용적률은 평균 317%이며 최댓값이 1,199%로 상업의 활동에 따른 규모의 차를 확인하였다. 건물 사용연한은 평균 31년이었으며 건물의 높이는 평균 17.9로 나타났다. 건물구조는 철근콘크리트 83%, 기타 17%로 구성되었다. 제2수준인 상업집중도 변수는 평균 3658개이며 매출은 평균 4,787만 원, 소비액은 4,991만 원으로 상권 내 매출과 소비금액은 유사하게 나타났다. 마지막으로 주거인구는 평균 4.19만 명 유동인구는 26.08만 명으로 확인되었다.

5.2. 분석결과

Table 5는 다층모형과 OLS모형의 분석 결과로 먼저 무제약모형을 통해 ICC값을 분석하였으며, 8.3%의 지역요인을 확인하였다. OLS모형과 임의절편모형의 추정된 절

편은 유사한 값을 갖고 있어 전체 평균에 대한 전력 소비량 수준의 분석은 크게 달라지지 않음을 확인하였다. 그러나 OLS모형에 비해 임의절편모형의 표준오차가 큰 값을 갖는 거로 보아 도심 상권 수준의 군집 효과를 반영함으로써 관측치 간 독립성 가정이 완화되었으며, 이는 모형의 적합도가 OLS모형에 비해 향상되었다는 것으로 판단되었다. Model 2의 제1수준 변수 중 사용연한과 건물구조 변수를 제외한 대부분의 변수에서 1% 유의수준에서 통계적으로 유의한 것으로 보여주었으며, 용적률, 건물높이 모두 양(+)의 관계를 갖고 있으며 사용연한과 건물구조 변수는 음(-)의 방향을 보였다. 상업 활동 특성 변수는 업종 구성에 따른 유형 차이를 반영하는 변수로, 기준 변수인 생활 및 서비스 변수에 비해 유희·의료·교육중심 유형에서 전력 소비량이 상대적으로 큰 업종 유형으로 확인되었다. 이는 상업 활동이 주간에 집중되는 다른 유형과 다르게 야간에도 활동이 지속되는 업종 특성을 갖기 때문에 이러한 결과가 나온 것으로 볼 수 있다. 또한 예상했듯이 용적률과 건물의 높이가 높을수록 전력 소비량이 증가하는 것으로 확인되었다. 이는 상업의 규모가 클수록 전력부하가 많이 발생하는 것으로 판단되었으며, 철근콘크리트 구조물은 다른 구조물에 비해 건물 전력 소비량을 감소시키는 것으로 나타났다. Model 2와 Model 3 비교결과 제1수준의 계수값은 두 모형에서 전반적으로 유사한 결과를 보였지만, AIC와 BIC가 Model 3에서 증가하여, 2수준 변수의 추가로 인한 영향력이 크지 않았다는 것을 확인하였다. Model 3의 제2수준은 상업집중도가 높을수록 전력

Table 4. Descriptive statistic

Division	Variables	Mean	SD	Min	Max
Dependent Variable	ln (Electricity consumption)	8.98	1.17	5.7	14.6
Level 2 (N=10)	Number of businesses	3658	2569	361	9026
	Commercial Sales	4787	3053	1108	14330
	Expenditure	4991	4262	1005	18258
	Residential population	419	573	8.04	2454
	Floating population	2608	1790	134	5344
Level 1 (n=2802)	Floor area ratio	317	195	4	1199
	Building age	31.1	19.6	1	125
	Building height	17.9	15.2	0	170
	Building structure	0.828	0.377	0	1
	Cluster 1	0.126	0.332	0	1
	Cluster 2	0.147	0.354	0	1
	Cluster 3	0.474	0.499	0	1
Cluster 4	0.253	0.434	0	1	

Table 5. Comparison of OLS and HLM results

Variable	Model 1		Model 2		Model 3		OLS	
	Coef.	S.E.	Coef.	S.E.	Coef.	S.E.	Coef.	S.E.
Intercept	9.0163***	0.1115	8.775***	0.082	8.924***	0.136	8.793***	0.0486
Level 2								
Number of businesses					2.99E-05*	3.47E-06	-3.89E-06	1.84E-05
Commercial Sales					3.15E-05***	9.50E-06	6.91E-06	5.97E-06
Expenditure					-3.44E-05***	1.84E-05	7.04E-07	4.14E-06
Residential population					-1.95E-06	1.19E-06	9.738E-07**	3.09E-07
Floating population					1.29E-07	4.08E-07	6.091E-07*	2.62E-07
Level 1								
Accommodation·office facilities			0.3426***	0.0819	0.3379***	0.0672	0.2820***	0.067
Restaurants·retail stores			0.3767***	0.067	0.3814***	0.053	0.3602***	0.054
Entertainment·Medical·Ed ucational facilities			0.5716***	0.0535	0.5372***	0.0585	0.5501***	0.059
Floor area ratio			0.0012***	1.49E-04	0.0011***	1.52E-04	0.0010***	1.43E-04
Building age			-5.66E-04	9.35E-04	-6.49E-04	9.44E-04	-0.0019*	9.2E-04
Building height			0.0334***	0.0019	0.0439***	0.0049	0.0365***	0.0018
Building structure			-0.074	0.0462	-0.1143*	0.0467	-0.0598	0.0461
L1 (R)	1.1374		0.8801		0.8773			
Random Effect								
Floor area ratio					0.0009			
Building height					0.0136			
AIC	8711.6		7334.5		7412.1		7312	
BIC	8729.4		7393.9		7501.2		7383.3	
ICC	0.083		0.052		0.12			
REML	8705.6		7314.5		7381			

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

소비량이 증가하는 경향을 보이며 이는 상업 활동이 활발하게 이루어지는 지역 즉, 상업집적도가 더 높은 지역일수록 전력을 더 많이 소비하는 경향을 탐색하였다. 매출이 높은 지역일수록 전력 소비량이 더 높은 것으로 보여지며 유동인구가 많은 지역에서 전력 소비량이 증가하는 것으로 나타나 실제 상업활동의 집적과 강도에 매출과 상업집적도가 밀접하게 연관될 가능성을 시사한다. 반면에 주거인구가 많은 지역일수록 전력 소비량이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 주거인구 비중이 높은 지역일수록 해당 지역의 도심 상권에 대한 상업의 집적도가 약해지거나, 상권의 기능이 상대적으로 분산되는 가능성을 확인하였다. 종합하면, Model 3의 지역 특성이 전력 소비량에 일정 부분 영향을 미칠 가능성은 있으나, 본 연구에서는 Model3의 AIC와 BIC가 Model 2에 비해 개선되지 않아 통계적으로 안정된 Model 2를 중심으로 연구의 주요 해석을 수행한다.

6. 논의

본 연구의 주요 해석은 적합도 지표와 모형 구조의 간결성을 고려하여 최종 채택된 Model 2를 기준으로 수행하였으며, 도심 상권 수준 설명변수를 추가한 확장 모형인 Model 3은 결과를 검토하기 위한 보조적 분석으로 활용하였다. 기존 연구가 주로 건물의 물리적 요인과 지역의 사회·경제적 요인에 집중했던 것과 달리, 본 연구는 부산광역시를 대상으로 도심 상권의 상업 활동과 지역 특성을 세분화하여 분석함으로써 상업용 건물의 전력 소비 특성을 보다 구체적으로 규명하였다. 분석 결과, 예상했던 대로 건물의 물리적 특성은 전력 소비량에 통계적으로 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 건물의 물리적 규모 증가는 전력 사용량을 높이는 주요 요인으로 작용함을 보여주었다. 상업 활동 특성은 모두 생활서비스 중심 대비 양의 관계를 보였으나, 각 중심별로 상이한 결과를 나타냈다. 특히 유희·의료·교육시설이 가장 높은 전력 소

비량을 보여주었으며 이는 주간에 집중되는 다른 상업 활동에 비해 유흥, 의료, 교육시설 모두 야간에도 대기전력이 발생한다는 특성을 갖고 있어 이러한 결과가 나왔다고 볼 수 있다. Model 3에서는 도심 상권내 상업집중도와 매출 그리고 유동인구 모두 전력 소비량과 양의 관계를 갖는 것으로 나타났다. 이는 도심 상권에 위치한 상업용 건물의 전력 소비량이 거주민의 소비력보다는, 실제 상업 활동이 집약적으로 이루어지는 공간적 특성 즉, 매출과 유동인구에 더 큰 영향을 받는다는 가능성을 시사한다.

본 내용을 종합하면 건물 단위의 업종 구성과 상권의 구분에 따라 상업용 건물의 전력 소비량이 상이한 결과를 갖는 것으로 확인되었다. 본 연구의 결과는 상권 및 상업 유형별 전력 소비 수준의 차이를 정량적으로 제시함으로써, 도시나 지역 차원의 에너지 수요 관리를 위한 과정에서 다음과 같은 정책적 활용이 되고자 한다. 우선 전력 소비가 상대적으로 집중되는 상권과 상업 유형을 구분하여 우선 관리 대상을 식별하거나, 분산에너지, 지역에너지와 같은 공간 중심적 에너지 정책에 기초 자료를 제공하고자 한다. 마지막으로 본 연구는 상업집중도와 매출 그리고 유동인구의 증가에 따른 전력 소비량의 증가는 거리의 보행인구가 증가하면 상업시설의 매출액이 증가하고, 이러한 공간 생산성의 증대는 결국 상업시설의 가치를 증진시킨다는(Choi and Shin, 2001) 선행연구의 결과에 부합하는 결과로 보여진다.

다만 본 연구는 몇 가지 한계를 지닌다. 우선 상업 운영 특성을 모형에 직접적으로 포함하지 못해 인과관계를 설명하지 못한다는 한계점이 있다. 즉, 군집분석을 통한 상업 활동 특성 변수는 직접적인 건물 전력 소비량의 구조적 해석보다는 운영 특성의 부재로 인한 오차의 완화 및 업종 유형에 대한 군집의 성격을 띠고 있다. 아울러 상권 구분에 대한 샘플 수가 제한적이고 분포 간 불균형이 존재하여, 상권 수준 효과를 보다 정교하게 해석하는 데 제약이 존재했다. 또한 본 연구에서 적용한 상권 구분 기준은 비교적 단순화되어, 상권 간 이질성을 충분히 반영하지 못했을 가능성이 있다. 마지막으로 단일 연도 전력 소비량 자료 활용과 기후 요인의 부재는 건물의 전반적인 에너지 소비량과 장기적인 시계열 변화 및 계절별·시간대별 전력 소비 패턴을 충분히 반영하지 못하였다는 한계를 지닌다. 이에 따라 향후 연구는 상권 구분에 대한 샘플 수의 확대와 분포 간 균형 확보를 통해 보다 정교한 상권 수준 분석을 수행하고, 상권 구분 기준을 더 세분화하여 상권 간 이질성을 충분히 반영할 필요성이 있다. 또한 단위

면적당 전력 소비량과 가스 소비량을 결합하여 더 정확하고 세부적인 업종 유형의 효율성 분석과 운영 특성 같은 직접 요인을 결합한 고차원적 분석을 진행할 필요성을 확인하였다. 마지막으로 시계열의 변화와 건물의 에너지를 포괄적으로 함께 고려한 분석 체계의 단계적 고도화를 진행할 예정이다. 이러한 접근은 도시 차원의 에너지 소비 구조를 보다 정밀하게 규명하고, 지역 맞춤형 에너지 관리 및 효율화 정책 수립을 위한 실증적 근거를 제공하는 데 기여할 것으로 기대된다.

7. 결론

본 연구는 대한민국 부산광역시 도심, 부도심, 지역특화핵의 도심상권을 대상으로, 상업 활동 특성과 지역 특성을 분석하여 상업용 건물의 전력 소비량과 상업 활동 특성과 도심 상권 수준의 사회·경제적 요인 간의 관계를 규명하고자 하였다. 이를 위해 상업 활동에 대한 정도를 정량적으로 해석하기 위해 상업용도를 건물 단위 업종 구성 비율 변수로 고려하여 도심 상권분석에 활용 가능한 상업 활동 특성을 설명하는 변수를 제안하였다. 또한, 기존의 단일모형 결과와 다층모형 결과를 비교 분석하여 위계적 자료에 대한 단계별 모형 확장 방법을 활용하였다. 이러한 분석 방법을 통해 상업용 건물의 전력 소비의 설명 요인을 규명하는 관계를 도출하였다.

본 연구에서 제시한 바와 같이, 상업 활동을 구분하는 용도의 종류는 약 90개에 달하나, 이를 군집분석을 통해 4개의 변수로 축약하는 과정에서 상업 활동 특성에 대한 설명력이 일부 감소한 것은 중요한 한계로 작용한다. 또한 지역특화핵의 경우 건물의 전력 소비량 데이터에 대한 결측이 다수 존재하여 충분한 표본에 대한 확보가 원활하지 못하였으며, 이로 인해 도심 유형에 따른 상권 특성을 보다 정교하게 분석하는 데 한계가 있었다. 향후 결측자료가 보완되고 지역특화핵에서도 많은 표본을 확보할 수 있다면, 도심 상권의 상업 활동 특성과 전력 소비에 대한 분석을 보다 세밀하게 할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 상업용도를 보다 포괄적이고 세분화된 형태로 활용할 수 있다면 상업 활동의 기능적 특성을 보다 정밀하게 반영하고 고도화된 분석적 접근이 가능할 것으로 보인다.

이러한 한계에도 불구하고, 본 연구는 상업용 건물의 전력 소비가 단순한 건물 단위 요인뿐만 아니라, 상업 활동의 기능적 특성과 지역적 요인의 상호작용에 의해 결정됨을 실증적으로 입증하였다. 정책적 측면에서, 이는 개별

건물의 효율 개선에 그치지 않고 상업시설의 기능적 분류와 공간적 밀집도를 고려한 지역 단위의 에너지 수요 관리가 중요함을 시사한다. 향후 부산광역시를 비롯한 대도시의 탄소중립 전략 수립 시, 이러한 도심 상권 단위의 상업 밀도와 전력 소비 관계를 활용한 상업 공간의 구조적 효율화와 기능적 재편이 핵심 과제로 고려되어야 할 것이다.

사사

이 연구는 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2025년)의 지원을 받아 수행된 연구임.

Reference

- Ali U, Shamsi MH, Hoare C, Mangina E, O'Donnell J. 2021. Review of urban building energy modeling (UBEM) approaches, methods and tools using qualitative and quantitative analysis. *Energy Build* 246: 111073. doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111073
- Buckley N, Mills G, Reinhart C, Berzolla ZM. 2021. Using urban building energy modelling (UBEM) to support the new European Union's Green Deal: Case study of Dublin Ireland. *Energy Build* 247: 111115. doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111115
- Busan Metropolitan City. 2020. 2nd monitoring of the 2030 Busan Urban Master Plan.
- Choi M-J, Shin S-M. 2001. An empirical analysis of the effect of pedestrian volume on retail sales (in Korean with English abstract). *J Korea Plann Assoc* 36(2): 75-83.
- European Commission. 2020. A renovation wave for Europe: Greening our buildings, creating jobs, improving lives. European Commission.
- Ferrando M, Causone F, Hong T, Chen Y. 2020 Urban building energy modeling (UBEM) tools: A state-of-the-art review of bottom-up physics-based approaches. *Sustainable Cities Soc* 62: 102408. doi: 10.1016/j.scs.2020.102408
- Godoy-Shimizu D, Steadman P, Hamilton I, Donn M, Evans S, Moreno G, Shayesteh H. 2018. Energy use and height in office buildings. *Build Res Inf* 46(8): 845-863. doi: 10.1080/09613218.2018.1479927
- Hong K-G. 2014. The influences of apartment complex characteristics on housing price by hierarchical linear model (in Korean with English abstract). *J Korean Hous Assoc* 25(6): 39-50. doi: 10.6107/jkha.2014.25.6.039
- Jang S-J, Sung Y-S. 2005. Public spirit and the development of commercial districts: Based on an experience of Dogog-dong in the 1990s-2003 (in Korean with English abstract). *J Archit Inst Korea Plann Des* 21(2): 71-78.
- Kang C. 2011. Analysis on energy consumption and its policy implication in Seoul with spatial econometrics: Focusing on electricity and gas consumption (in Korean with English abstract). *Seoul Stud* 12(4): 1-22.
- Kang C-D. 2022. Effects of commercial environments and agglomeration on retail sales in cluster hierarchies: Evidence from Seoul, Republic of Korea. *J Urban Plann Dev* 148(4): 04022045. doi: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000866
- Kavgic M, Mavrogianni A, Mumovic D, Summerfield A, Stevanovic Z, Djurovic-Petrovic M. 2010. A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. *Build Environ* 45(7): 1683-1697. doi: 10.1016/j.buildenv.2010.01.021
- Kim H, Kwon Y, Choi Y. 2022. Determinants of electricity consumption of energy vulnerable group using ensemble gradient-boosting algorithm. *KSCE J Civ Eng* 26(12): 5010-5021. doi: 10.1007/s12205-022-1984-2
- Kim M, Jung S. 2019. Analysis of the factors affecting energy consumption by the physical elements and the household features in residential buildings (in Korean with English abstract). *J Korean Hous Assoc* 30(1): 13-25. doi: 10.6107/JKHA.2019.30.1.013
- Kontokosta CE. 2015. A market-specific methodology for a commercial building energy performance index. *J Real Estate Finance Econ* 51: 288-316. doi: 10.1007/s11146-014-9481-0
- Korea Energy Economics Institute (KEEI). 2022. Energy

- statistics yearbook 2020.
- Korea Law Information Center. 2024. Framework Act on Carbon Neutrality and Green Growth for Coping with Climate Crisis (Act No. 20514, Oct 22, 2024); [accessed 2025 Oct 23]. <https://www.law.go.kr/법령/기후위기대응을위한탄소중립·녹색성장기본법>
- Korean Statistical Information Service (KOSIS). 2024. Building energy consumption by building use (Total) [data set]; [accessed 2025 Sep 29]. https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?conn_path=I2&orgId=408&tblId=DT_408003_A000_0
- Lee G, Seo M. 2021. The impacts of urban forms and building character on the energy consumption of old downtowns: Based on a comparative analysis of the old downtowns of Daejeon City and Jecheon City (in Korean with English abstract). *KIEAE J* 21(2): 53-63. doi: 10.12813/kieae.2021.21.2.053
- Lee S, Kim K, Lee S. 2019. An empirical analysis of building energy consumption considering building and local factors in Seoul (in Korean with English abstract). *J Korea Plann Assoc* 54(5): 129-138. doi: 10.17208/jkpa.2019.10.54.5.129
- Lee S, Yoo J. 2023. Driving factors of residential building energy consumption in Seoul (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 14(1): 1-10. doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.1.001
- Li C, Song Y, Kaza N. 2018. Urban form and household electricity consumption: A multilevel study. *Energy Build* 158: 181-193. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.10.007
- Li W, Zhou Y, Cetin K, Eom J, Wang Y, Chen G, Zhang X. 2017. Modeling urban building energy use: A review of modeling approaches and procedures. *Energy* 141: 2445-2457. doi: 10.1016/j.energy.2017.11.071
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 2024a. Building electricity consumption (monthly), 2024 [data set]. *ArchitectureHUB*; [accessed 2025 Mar 3]. <https://www.hub.go.kr/portal/opn/tyb/idx-nbem-elcty.do>
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 2024b. VWorld Digital Twin Korea (National Spatial Data); [accessed 2025 Mar 3]. https://www.vworld.kr/dtmk/dtmk_ntads_s002.do?svcCde=NA&dsId=2
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 2025. Enforcement Decree of the Building Act [Appendix 1: Types of Buildings by Use]; [accessed 2025 Jan 1]. <https://www.law.go.kr/LSW/lsBylInfoPLinkR.do?lsiSeq=267115&lsNm=%EA%B1%B4%EC%B6%95%EB%B2%95+%EC%8B%9C%ED%96%89%EB%A0%B9&bylNo=0001&bylBrNo=00&bylCls=BE&bylEfYd=20251218&bylEfYdYn=Y>
- Mutani G, Vocale P, Javanroodi K. 2023. Toward improved urban building energy modeling using a place-based approach. *Energies* 16(9): 3944. doi: 10.3390/en16093944
- Santamouris M. 2016. Innovating to zero the building sector in Europe: Minimising the energy consumption, eradication of the energy poverty and mitigating the local climate change. *Solar Energy* 128: 61-94. doi: 10.1016/j.solener.2016.01.021
- Small Enterprise and Market Service (SEMAS). 2025. Commercial district analysis API (Small business big data platform); [accessed 2025 Mar 3]. <https://bigdata.sbiz.or.kr/#/apiMain/commercialGuide/2>
- Stemmers K. 2003. Energy and the city: Density, buildings and transport. *Energy Build* 35(1): 3-14. doi: 10.1016/S0378-7788(02)00075-0
- Sun D, Xiao H, Wang X, Liu J, Wang X, Jin X, Wang J, Xie X. 2016. Energy consumption quota management of Wanda commercial buildings in China. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci* 40: 012014. doi: 10.1088/1755-1315/40/1/012014
- United States Congress. 2021. Infrastructure Investment and Jobs Act (Pub. L. No. 117-58); [accessed 2025 Sep 29]. <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/3684/text>
- Waddicor DA, Fuentes E, Sisó L, Salom J, Favre B, Jiménez C, Azar M, Khodabuccus R. 2015. Evaluation of the influence of climate warming and building ageing on building energy consumption. *Proceedings of the 14th Conference of the International Building*

- Performance Simulation Association (BS2015).
Hyderabad, India. p. 610-617.
- Wang S, Sun X, Lall U. 2017. A hierarchical Bayesian regression model for predicting summer residential electricity demand across the USA. *Energy* 140(1): 601-611. doi: 10.1016/j.energy.2017.08.076
- Yu JJ. 2006. Understanding and application of hierarchical linear model (in Korean with English abstract). *Korean J Child Stud* 27(3): 169-187.