

대학 건물의 공간 단위 에너지 소비량 분석에 관한 연구

정혜진*[†] · 이성동** · 이장호***

*서울대학교 지속가능발전연구소 온실가스·에너지 종합관리센터 연구교수,

서울대학교 통계학과 박사과정생, *서울대학교 농업생명과학대 학사과정생

An Analysis of Energy Consumption by Space Unit in University Buildings

Jung, Hye-jin*[†] · Lee, Sungdong** and Lee, Jangho***

*Research Professor, Institute for Sustainable Development at Seoul National University, Seoul, Korea

**Ph.D. Student, Department of Statistics at Seoul National University, Seoul, Korea

***B.S. Student, CALS at Seoul National University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Recently, various government policy tools seeking to achieve carbon neutrality have been developed. The most common method of analysis is the benchmarking method through energy intensity setting, in which the standardized energy intensity needs to be set based on building usage. However, it is difficult to set a standard unit for one main use because buildings may have a wide variety of uses. Therefore this study sought to determine the energy intensity of a building with multiple uses, such as a university. On analysis, a more than 8-fold difference in energy intensity was found depending on the main use of building. In addition, on regression analysis estimating space unit consumption in a building, the energy intensity differed by more than 27 times. Therefore, a single energy intensity called 'school facilities' should be introduced for multi-purpose buildings such as universities. In addition, developing subdivided energy intensity suitable for various use of building in a more scientific and verifiable way is more effective for greenhouse gas and energy management.

Key words: Carbon Neutrality, Green House Gas, Benchmarking Analysis, Energy Intensity, Building Energy Consumption

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

‘2050 탄소중립’ 목표 이행을 위한 부문별 로드맵이 발표되고 있다. 탄소중립위원회를 통해 발표된 시나리오에 따라 전환, 산업, 건물, 수송, 폐기물 등의 주요 업종 및 흡수원에 대한 국가 감축 목표가 세워졌으며, 이를 이행하기 위해 각 관련 부처의 세부 이행 계획들이 제시되고 있기 때문이다.

본 연구에서 다루고 있는 건물 부문의 경우 국토교통부 소관이며 2021년 12월에 발표된 국토교통 탄소중립 로드맵이 정부의 공식 계획이다. 이에 따르면 제1과제로서 ‘건물부문 탄소중립 성능 개선을 위한 건물 데이터 기반 구

축’이 제안되어 있다. 이는 건물의 에너지 성능을 측정·기록하여 생애 주기별 관리를 지원하는 시스템을 구축하기 위해 파편화된 건물의 기본정보와 에너지 성능 및 사용량 등을 연계하여 성능 정보를 통합하고 건물 부문 탄소 중립과 제도 확산에 기여하겠다는 의의를 지니고 있다.

이와 같은 맥락 하에 서울시와 같이 전체 온실가스 중 68.7%가 건물에 집중된 지자체에서는 건물 용도에 따라 배출량의 ‘표준’을 정해 이를 넘지 않게 관리하는 “건물 에너지(또는 온실가스) 총량제”를 추진하기도 한다. 건물 에너지 총량제는 개별 건축물의 유형별 온실가스 표준 배출 기준을 설정하여 감축 목표를 관리하기 위하여 주 용도별 ‘표준 배출 기준¹⁾’을 도출하고 유사 용도 건물의 에너지 소

[†]Corresponding author : jhj2005@snu.ac.kr (Build. No. 18-508, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 08826, Korea. Tel. +82-2-880-9522)

ORCID 정혜진 0000-0002-8772-9595
이성동 0000-0003-0655-5050

이장호 0000-0002-6745-6163

비 강도를 관리하는 일종의 벤치마킹 방식의 규제이다.

이와 같은 총량 규제 방식을 위한 가장 합리적인 도구는 유형별로 정한 표준 배출량이며 보통은 단위면적(m^2)당 연간 에너지 소비량을 그 기준으로 삼고 있다. 건물 유형별 표준 배출량 대비 에너지 소비량의 과소 수준의 평가를 통해 적용 가능한 감축 기술을 제시하거나 맞춤형 컨설팅을 이행하여 온실가스 감축을 도모하기 위함이다.

따라서, 근래 건물의 용도별 에너지 소비 수준에 대한 다양한 분석 결과와 연구 결과들이 발표되고 있지만 대부분은 공공데이터에 기반하고 있어 현장에서 적용이 가능한 에너지 원단위 활용에는 한계가 있다. 특히, 대학과 같은 고등교육시설의 경우에는 단일 기관 내 입지 해 있는 다양한 용도의 에너지 소비 형태에 의하여 일관된 에너지 원단위가 존재하기 어려우므로 제도 설계시 이에 대한 고려가 필요하다. 하지만 실제 건축물에 대한 다양한 속성 정보와 동시에 건물별 에너지 소비량 데이터의 존재 등이 함께 만족되는 케이스가 부족하여 용도별 에너지 원단위 정보가 부족한 실정으므로 이에 대한 실증 연구가 필요한 시점이다.

1.2. 선행연구 고찰

1.2.1. 교육시설을 대상으로 한 에너지 소비 현황

서울시 총량제 이행 계획에 따르면 서울시에서는 전체 건축물 용도를 12개 유형으로 구분하고 유형별 표준 배출

기준을 제시하고 있다. 12개 용도의 주요한 구분 기준은 건축법상의 용도 구분을 기준으로 하고 있기 때문에 건축물 대장상의 용도 구분에 따라 에너지 소비량을 추적하여 산정할 수 밖에 없는 한계가 있다(Table 1).

한편 국토교통부에서 발간하는 건물 에너지 사용량 통계 자료집에는 용도를 30가지로 구분하고 일부 용도에 대해서는 세부 용도를 구분하여 에너지 사용량을 발표하고 있다. 일반 용도 30가지 중 교육시설 내 세부 용도로서 대학의 에너지 사용량이 구분되어 있어 서울시 발간 자료보다 세부적인 자료를 살펴볼 수 있다. 2021년도 기준 지역별 교육시설과 대학시설의 에너지 사용 총량과 원단위를 요약하여 재구성하면 Table 2와 같다.

본 통계에 의하면 교육시설 전체의 에너지 소비 원단위는 평균 $7.88 \text{ kgoE}/m^2\text{yr}$ 이고, 대학시설의 에너지 소비 원단위는 $10.76 \text{ kgoE}/m^2\text{yr}$ 로 단위면적당 에너지 사용 강도 또는 효율의 차이가 약 37%에 이르고 있다. 에너지 소비 원단위에 대한 지역적 편차는 더욱 크게 나타나는데 교육시설 전체와 대학 시설 모두 서울 소재 기관의 에너지 소비 원단위가 가장 낮은 지역의 2배 이상 나타남을 확인할 수 있다. 이 같은 실정은 특정 용도의 에너지 효율을 산정하여 ‘표준’을 결정하고, 이에 기반한 에너지 감축 목표를 정하는 정책 이행 접근법에 시사하는 바가 크다. 또한 민간에서 정형화된 방법에 의해 다양한 종류의 에너지 데이터가 공개되어 보다 합리적인 에너지 효율 지표 선정이 필요하다는 것을 의미하고 있다.

Table 1. GHG Intensity by Building Use in Seoul

Usage by Arch. Law	Emission Average (ToE/ m^2)
Neighborhood living facilities, sales facilities	0.080
Business Facilities	0.060
Educational Research and Social Welfare Facilities	0.047
Cultural and Assembly Facilities	0.065
Automobile-related/ Warehouse Facilities	0.046
Accommodation Facilities	0.093
Factory	0.065
Dangerous Goods Storage and Disposal Facilities	0.095
Medical Facilities	0.123
Tourist Rest and Recreation Facilities	0.114
Religious Facilities	0.032
Non-residential facilities	0.059

(Source: Seoul Institute)

1) 서울시의 경우 건물 용도를 12개 유형으로 분류하여 기존 3개년('17~'19년) 평균 단위면적당 온실가스 배출량을 표준배출기준으로 설정하고 있으며, 세부단위는 $\text{ToE}/m^2\text{yr}$ 를 사용하고 있다. 본 연구에서도 국토부, 서울시에서 발표하고 있는 원단위와 일치하는 방식의 원단위를 설정하였다.

Table 2. Energy Usage and Intensity of Educational Facilities and University Facilities in 2021

Region	Education Buildings		Univ. Buildings	
	Energy Consumption (ToE)	Energy Intensity (KgoE/m ²)	Energy Consumption (ToE)	Energy Intensity (KgoE/m ²)
Seoul	368,663	9.71	146,389	14.51
Busan	65,300	5.72	19,466	8.85
Daegu	62,106	4.38	13,052	10.39
Incheon	81,092	8.08	11,673	9.02
Qwangju	47,093	6.04	20,477	11.06
Daejeon	168,205	16.65	33,550	13.70
Ulsan	27,738	6.69	9,926	12.79
Sejong	13,558	6.63	3,402	11.11
Gyeonggi	421,343	9.60	58,115	11.44
Gangwon	53,247	5.55	14,156	8.85
Chungbuk	58,889	7.98	17,748	10.14
Chungnam	60,589	6.14	22,881	7.98
Jeonbuk	48,390	5.66	13,114	7.50
Jeonnam	35,963	4.79	5,804	5.26
Kyungbuk	65,688	5.60	22,123	6.50
Kyungnam	63,100	5.78	18,208	9.21
Jeju	11,795	4.55	2,417	5.40
Total	1,652,760	7.88	432,502	10.76

(Source: Building energy usage statistics in 2021, Ministry of Land, Infrastructure and Transport)

1.2.2. 에너지 소비 영향 인자 등의 세분화를 통한 에너지 소비 효율 연구

Jung et al.(2015)은 지역별, 호텔 유형별 에너지 소비량에 대한 추정 모형을 구축하여 호텔 건물의 에너지 소비 원단위를 산정하였다. Lee (2021)는 공동주택에서의 에너지 사용량에 영향을 미치는 인자들을 종합적으로 분석하고 이를 바탕으로 난방, 냉방, 급탕, 조명, 전기기기, 취사의 용도별 에너지 사용량 추정 모델을 도출하고 세대 특성에 따른 용도별 유효 영향 인자를 분석한 바 있다. Kim et al.(2016)은 기존 소규모 업무시설의 용도별 에너지 사용량을 추정하기 위하여 건축, 설비, 기후 등 용도별 에너지 사용량에 영향을 미치는 주요 인자를 선정한 바 있다. Kim et al.(2016)은 서울지역의 고등학교 건물을 대상으로 한 에너지 소비 특성을 분석하였는데, 고등학교 내 세부 용도별로 에너지 소비 양상을 정형화하였다. Park (2022)은 우체국사 건축물을 Byun et al.(2010)은 도서관의 에너지 원단위를 분석한 결과를 제시하기도 하는 등 최근 다양한 건물 주용도별 원단위가 꾸준히 발표되고 있다.

상기와 같이 개별 용도들을 대상으로 한 에너지 소비량

을 추정할 연구 외에 에너지의 사용 목적별 에너지 소비량을 추정할 연구도 다수 있다. Kim and Yi (2019)는 건물의 용도별 냉방 에너지 소비량의 차이를 검증하기 위하여 통계적 회귀 모형을 활용하였으며 공동주택, 근생시설, 업무시설의 냉방 에너지 소비가 통계적으로 유의한 차이가 있음을 보여주었다. Kim et al.(2012)은 에너지 사용 목적에 따른 온실가스 배출량 산정을 위하여 조명, 동력, 가스냉방, 전기냉방, 가스난방, 전기난방, 취사·급탕, 수송 등의 에너지 원별 세분화 방식을 사용하여 에너지 소비 패턴과 온실가스 배출량을 산정하고자 하였다. Kim et al.(2017)은 기존의 원별(전력, 가스 등) 에너지 사용량 정보에서 더 나아가 용도별(난방, 냉방, 급탕, 조명, 환기 등) 에너지 사용량 정보를 추정하고자 하였다. Yixuan Wei et al.(2017)은 건물 에너지 소비 예측 및 분류를 위한 데이터 기반 접근법에 관한 선행연구를 정리하면서 각각의 접근법을 적용한 연구 사례를 소개하였다. Elie and Carol (2012)은 크기가 다른 일반적인 사무실 건물의 점유 행동 매개변수 및 기상 구역에 대해 수행한 종합적인 민감도 분석 연구를 통해 건물의 에너지 소비에 영향을 미치는 민감도는 건물 크기와

기상 조건에 따라 결정됨을 확인하는 등 에너지 소비 세부 특성을 도출하기 위한 연구 또한 활발히 진행되고 있다.

1.2.3. 대학과 같은 복합용도 건물을 대상으로 한 에너지 소비량 산정 연구

Maryam et al.(2018)은 고등교육 캠퍼스에서 다양한 유형의 건물 에너지 사용 특성을 이해하기 위한 벤치마크 시스템을 구축하기 위하여 각 활동 분야의 벤치마크 값을 SFA 통계 기법을 사용하여 분석하였다. Chung and Rhee (2014)는 기존 대학 건물들의 현재 에너지 소비 패턴을 파악하기 위해 현장 조사를 실시하고 에너지 효율 개선 전략을 실시하여 건물의 에너지 절약 가능성을 분석하고 에너지 절감 전략을 결정한 바 있다. Lee et al.(2012)은 특정 대학을 대상으로 전체 에너지 사용량 및 에너지원별 추이, 시간별 전력 사용량 수집 후 에너지 사용패턴 및 낭비 요소를 파악하기도 하였다. Kim et al.(2012)은 대학에서 발생하는 에너지 소비 패턴 및 이에 따른 온실가스 배출 현황을 분석하기 위하여 직접, 간접, 기타 간접 온실가스 배출을 포함한 인벤토리를 구축하였고, 이를 통해 감축 잠재량을 도출한 바 있다. Yoon et al.(2017)은 대학교 이공계 건물군을 대상으로 주요 파라미터 기반 16개의 유형을 구분하고 각 건물이 어느 유형에 속하는지 분석하였다. Jung and Kim (2018)은 전력 소비 지표 분석을 통한 대학 건물의 에너지 소비 특성에 관한 연구를 통해 다목적 고등 교육기관의 에너지 소비 특성을 지표화하였다.

이 같은 에너지 소비량 세분화에 관한 연구 경향은 Jiangyan Liu et al.(2017)이 밝히고 있듯이 건물이 특정 목적 혹은 주 용도에 따른 일관된 에너지 소비 특징을 보이지 않기 때문이며 제한된 정보를 통해 건물 에너지 특징을 도출해야 하는 현실적 제약에서 비롯된다. Woo et al.(2016)과 Kim et al.(2020)도 기존 건축물에서는 용도별 에너지 사용량 정보를 제공하는 것이 비용과 시간 측면에서 현실적인 한계점을 지니고 있기 때문에 다양한 종류의 건물에 대한 에너지 사용량 추정 모델(방법론) 수립의 필요성을 주장하고 있다. Maryam et al.(2018)에 의하면 동일 건물이라고 하더라도 건물 유형에 대해 개발된 에너지 벤치마크는 대학 당국이 에너지를 사용하고 실현 가능한 에너지 절약 기법을 결정하며 에너지 효율을 촉진하도록 유도할 수 있기 때문에 다양한 방식의 모델링을 도입해 에너지 소비 프로파일링을 늘려가는 추세이다.

최근 공공부문을 중심으로 건물 에너지 총량제 관리 및 벤치마킹 계수 도입을 위한 용도별 기준 소비량 연구가 활발하게 이루어지고 있는 것도 비슷한 맥락이라고 판단된

다. 다만, 학교 시설, 특히 대학과 같은 다양한 용도가 혼재한 고등교육 시설의 세분화된 에너지 소비에 관한 실증 연구는 데이터의 한계로 분석 실적이 미미한 실정이다. 특히, 대학은 교육시설 중에서도 에너지 소비 원단위가 높은 소비 주체이자 온실가스 배출원임에도 불구하고 일반적인 학교 시설과 동일한 원단위를 적용하기는 어려운 실정이므로 실증 자료의 발굴이 요구되고 있다. 종래 연구는 건축물 대장 상의 주용도를 기준으로 하기 때문에 ‘교육 및 연구시설’ 단일 용도로 취급되고 있지만, 실제 사용하는 건물 공간(바다)의 용도별로 에너지 소비 원단위의 차이가 존재하기 때문에 사례 발굴이 필요한 시기가 되었다.

2. 연구의 내용 및 방법

사례 대상으로 선정한 S 대학교 서울캠퍼스는 단일 캠퍼스 내 다양한 용도 건물이 220개 이상 존재하는 대형캠퍼스이며, 대부분 건물에 대한 에너지 소비량을 수집하고 있어 종종 에너지 특징 분석의 대상으로 소개되고 있다. 특히, 서울특별시 내 단일 기관으로 최고 에너지를 소비하며 배출권 거래제 등을 이행하는 관계로 검교정을 받는 계량기에 의한 에너지 소비가 월 단위로 공시되고 있어 사례 대상으로 적합하다. 또한 본 대학은 자체 건물 정보 관리 시스템에 의하여 캠퍼스 내 입지하고 있는 건물에 대한 일반 정보 뿐만 아니라 건물별 바닥 면적까지 일정 기준으로 특정할 수 있으므로 공간별 세분화된 에너지 소비 정보를 도출할 수 있는 환경을 지니고 있다.

본 연구 수행을 위하여 대학 공사용 건물별 에너지 소비량 3개년(2019년~2021년) 자료와 건물의 주용도 및 세부 용도에 관한 기초자료를 분석하여 에너지 소비량과 세부 공간의 용도 간 상관성을 분석하였다. 데이터 분석 도구는 빅데이터 분석에 용이한 R 패키지(Ver.4.0.3)를 활용하였으며, 건물별 에너지 사용량 정보와 속성정보를 교차하여 데이터 프레임 워크를 구축하고 이를 바탕으로 일정 기간의 트렌드와 건물별 에너지 사용 수준을 분석하였다.

본 연구를 통해 먼저 건물 단위 주 용도 구분과 바닥면적별 세부 용도 구성비를 도출하여 그 결과를 비교한 후, 세분화된 용도 구성비와 에너지 소비량의 상관성 분석 및 회귀 모델을 구축하여 그 결과를 제시하고자 한다.

Table 3은 본 연구에서 분석 대상으로 삼고 있는 건물 단위 명목상의 주용도와 공간단위 주용도의 구분 기호로서 건물단위는 1~9, 공간단위는 A~H까지로 구분하여 이해를 돕고자 하였다.

Table 3. Codes by Purpose

Main Usage by Building		Main Usage by Space	
1	Humanities and social sciences building	A	Public space
		B	Lecture support space
2	Natural science and engineering building	C	Administrative support space
		D	Student autonomous space
3	Art building	E	Culture and sports space
		F	Academic Support Space
4	Administrative support building	G	Storage space
		I	Convenience space
5	Research facilities building	J	graduate school laboratory
		K	teaching laboratory
6	Lecture support building	L	Humanities and Social Studies Institute
		M	Science and Engineering Research Space
7	Commercial Building	N	Dormitory space
		O	Temporary use space
8	Academic support building	H	Mechanical Facility space
9	Accommodation building		

3. 분석의 결과

3.1. 에너지 소비 원단위 도출

S 대학교 서울캠퍼스의 공간 관리 시스템에 의하면 캠퍼스 내 에너지를 소비하는 건물은 총 223개, 연면적은 1,319,848 m²에 이르고 있다. 2장에서도 소개되었지만 건축물 대장상의 용도는 교육 및 연구시설과 기숙사로 구분하고 있고, 건물 단위 주용도로 구분한 명목상의 용도 구분은 총 9가지로 구분할 수 있다. 건물단위 용도의 에너지 소비량에 대한 개요를 나타내면 Table 4와 같다.

Table 4. Energy Consumption by Main Purpose of Campus Buildings

Main Usage by Building	Floor Area (m ²)	Area Occupancy Ratio (%)	Proportion of Energy Consumption (%)
1	201,261	15.25	7.39
2	411,957	31.21	43.83
3	47,227	3.58	1.77
4	38,458	2.91	3.25
5	122,825	9.31	17.85
6	20,453	1.55	0.36
7	95,184	7.21	6.49
8	171,450	12.99	10.76
9	211,028	15.99	8.30
Total	1,319,848	100	100

(Source: S-University Information Disclosure Stats, 2021)

전술한 바와 같이 사례 대학의 에너지 공시자료에 의하면 캠퍼스 내 건물은 9개의 주 용도로 구분하고 있으며, 이공계 열 용도의 건물이 가장 많은 구성비를 보이고 있다. 행정지원 건물은 주로 행정 서비스를 제공하는 공간이며, 강의지원 건물은 대형강의 전용동, 편의시설은 식당과 체육관 등을 포함하고, 학술지원건물은 도서관이 대표적이다. 한편 연구시설건물은 이공계, 인문계를 구분하지 않고 연구소라는 명칭이 붙은 모든 건물을 포함하고 있어 에너지 소비 강도가 다름에도 건물 명칭에 의해 혼용되어 구분된 문제가 있다.

Table 4에서 알 수 있듯이 인문사회계, 예술계, 강의지원, 학술지원, 기숙사 등은 면적점유비가 에너지 소비 비율보다 높으며 이공계, 연구시설 건물 등은 면적점유 비율보다 에너지 소비 비율이 높은 것을 확인할 수 있는데 후자에 해당하는 용도의 건물이 대학 에너지 소비 증가에 영향을 끼칠 수 있다. 이에 대한 기초정보를 바탕으로 3개년의 평균 소비량과 그에 따른 에너지 원단위를 살펴보면 Table 5와 같다. 본 결과는 Table 2와 비교를 통해 시사점을 도출할 수 있다. 본 캠퍼스가 위치하고 있는 서울지역의 대학시설 에너지 소비 원단위는 평균 14.51 KgoE/m²·yr인데 반해 분석 대상 대학의 원단위는 39.44 KgoE/m²·yr로서 약 2.7배 이상 높음을 확인할 수 있다. 만약 Table 2를 기준으로 건물에너지 총량제를 한다면 사례 대학은 전국 평균인 10.76 KgoE/m²·yr 또는 서울지역 평균인 14.51 KgoE/m²·yr의 절감 목표를 설정받게 된다. 만약 서울시의 기준대로라면 교육시설 평균인 9.71 KgoE/m²·yr를 표준 원단위로 부여받기 때문에, 현 소비량의 75% 정도를 절감해야 달성할 수 있

는 목표이므로 합리적인 감축 이행이 불가능할 수 있다.

Table 5. Energy Consumption and Energy Intensity by Main Purpose of Campus Buildings

Main Use of Build.	Energy Consumption Average (ToE)	Energy Intensity Average (kgoE/m ²)
1	3,846.8	19.11
2	22,810.8	55.37
3	922.6	19.54
4	1,692.9	44.02
5	9,289.1	75.63
6	185.3	9.06
7	3,378.7	35.77
8	5,600.4	32.66
9	4,321.9	20.41
Total	52,049	39.44

Table 5에 의하면 용도별 평균 원단위가 가장 높은 연구 시설 건물과 가장 낮은 강의지원시설 건물의 차이가 8배 이상 차이가 나는 상황으로 학교시설 혹은 대학시설의 표준 원단위를 ‘하나’로 결정하기에도 무리가 있어 보인다.

3.2. 세분화된 공간별 에너지 소비량 분석

본 장에서는 건물 내 실제 공간 구성을 세분화하고 세분화된 공간의 용도에 기반한 소비량 예측 모형을 구축하고, 공간별 회귀계수와 에너지 소비량을 도출하고자 하였다. 사례 대학의 공간관리정보시스템에 의하면 총 223개 건물에 31,187개의 호실이 존재함을 확인하였고 호실명을 범주화하여 Table 6과 같이 총 15개로 세분할 수 있었다.²⁾ 이렇게 세분화된 용도 중에서는 대부분의 건물이 공통적인 용도로 사용하는 공간이 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 건물 단위 명칭에서 비롯된 명목상의 용도에서 드러나지는 않았던 복도, 계단, 화장실과 같은 공용공간이 전체 면적 중 약 35%에 이르고 있으며, 기계설비 공간도 8.7%에 이르는 등 건물의 주기능을 지원하기 위한 서비스 공간의 구성을 확인할 수 있다. 모든 건물은 주용도를 지원하기 위한 부가적인 공간 혹은 서비스 공간이 존재하고 있으며 주용도 이외에도 식당, 상점과 같은 생활서비스 공간이 존재하므로 공간별 에너지 소비원단위를 도출하는 것은 용도 구성비가 에너지 소비량에 미치는 영향을 도출하는 잣대가 될 수 있다.

Table 6. Energy Use by Space Unit in Building

Main Use of Space	Floor Area (m ²)	Proportion (%)
A	489,505	34.9
B	163,404	11.7
C	81,474	5.8
D	13,010	0.9
E	24,954	1.8
F	17,331	1.2
G	30,013	2.1
H	121,529	8.7
I	27,048	1.9
J	15,540	1.1
K	55,682	4.0
L	19,257	1.4
M	214,051	15.3
N	125,031	8.9
O	3,884	0.3

실제 이용 중인 공간별 용도 구성에 따른 에너지 소비량 예측 모형을 만들기 위하여 대상이 된 3개년 동안 에너지 소비량이 제공되고 건물의 규모나 에너지 소비량이 극단 값에 치우친 샘플을 제외한 총 128개의 건물(총면적 865,220 m², 전체 건물 면적 기준 약 70%)의 2019년 ~ 2021년도 3개년 동안의 평균 에너지 소비량을 종속변수로 하고 공간 단위 용도 구성비를 독립변수로 하는 회귀분석을 진행하여 용도별 에너지 사용량을 예측하고자 하였다. 이를 통해서 회귀계수, 즉 세분화된 공간 단위 원단위를 산정하고 이를 공간별 면적에 대입하여 대학 전체의 세분화된 공간별 에너지 사용량을 분석하였다. 각 건물에서 같은 용도의 호실들은 단위면적당 사용량이 같다는 가정하에, 다음 선형회귀모형을 도출하였다.

$$y = \sum_i \beta_i x_i + \epsilon$$

Eq. 1. Linear Regression Model

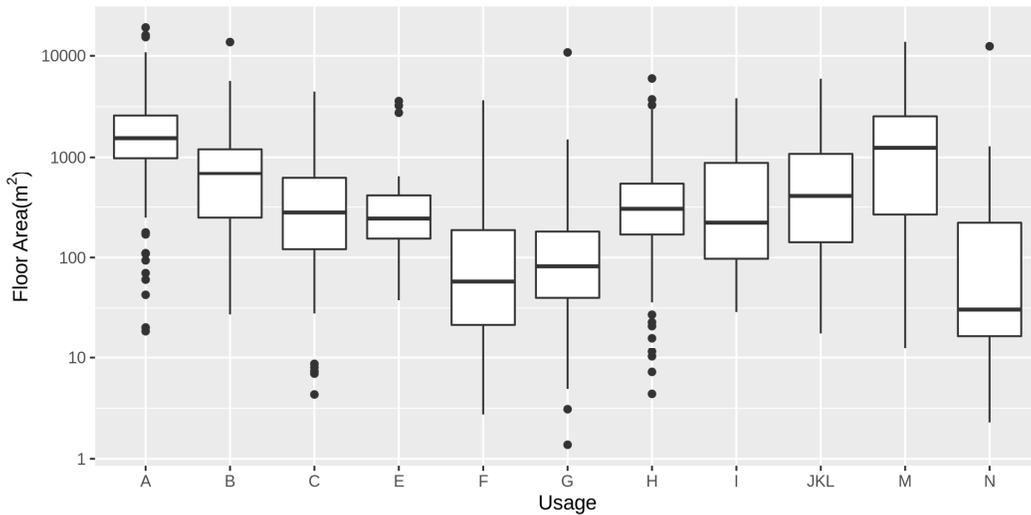
x_i : Area of Usage i

β_i : Regression Coefficient of x_i

y : Amount of Energy Consumption

ϵ : Error

2) 세분화된 용도 구분의 기준은 지면 관계 상 별도로 첨부하여 독자의 이해를 돕고자 하였다.



Main Use of Space	A	B	C	E	F	G	H	I	J,K,L	M	N
Num.	128	120	120	28	67	88	125	34	95	73	19

Fig. 1. Current Status of Space Use and Floor Area Distribution in the Buildings

분석 대상이 되는 15개의 세분화된 공간의 용도 중 점유 면적이 미미한 기타 용도, 학생 자율 용도는 제외하고 에너지 소비 유형에 유의한 차이를 보이지 않은 인문사회계 공간을 하나로 통합한 11개 용도의 독립변수를 구성하였다.

에너지 소비에 있어서 유의한 차이를 보이지 않아 통합된 4개 용도의 에너지 소비량은 회귀분석을 통해 도출된 회귀계수, 즉 원단위를 각 용도의 면적에 대입하여 당초에 구분한 15개의 세분화된 용도의 에너지 소비량을 산정하였다.

먼저 통계 분석 대상 건물에 존재하는 각 공간의 개수 및 분포 현황과 상차 도표는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 분석 대상이 되는 모든 건물에는 공용공간이 존재하고 있으며 필수 서비스 공간인 설비 공간이 존재한다. 학교 시설이기 때문에 강의와 행정 관련된 공간도 대부분 존재하고 있으며 강의실 등을 포함한 인문사회계 연구실, 이공계 연구실이 다수의 건물에 분포하고 있음을 확인할 수 있어 전반적으로 건물 내 주용도 이외의 다양한 용도가 고르게 분포되어 있음을 알 수 있다.

건물의 공간 단위 용도별 구성비와 에너지 소비량을 변수로 한 회귀분석 결과, $R^2(\text{수정계수}) = 0.935$ 를 얻을 수 있었으며, 이는 건물 단위 주용도별 평균 원단위를 통해 예측한 모형의 R^2 인 0.898보다 높았다. 각 용도별 회귀계수는 아래의 모형 요약을 통해서 확인할 수 있다(Table 7).

회귀계수 β_i 의 값이 클수록 해당 용도 i 의 단위면적 당 에너지 소비량은 높다고 할 수 있다. 각 용도별 공간 중에

서는 이공계연구공간(0.137) > 학술지원공간(0.113) > 편의시설공간(0.090) > 문화시설공간(0.073) > 행정지원공간(0.068) > 설비공간(0.052) > 기숙시설(0.042) > 보관공간(0.016) > 강의공간 (0.015) > 인문사회계 공간(대학원 연구실, 교수연구실, 인문사회연구소 포함)(0.008) > 공용공간(학생자율공간, 임시공간 포함)(0.005)의 순서대로 에너지를 많이 소비하는 것으로 나타났다. 또한, 가장 높은 회귀계수는 가장 낮은 회귀계수보다 27배 정도 높아 에너지 원단위의 분포가 동일 건물 내에서도 매우 다양할 것임을 유추할 수 있으며, 원단위가 높은 용도가 건물 내에 많이 분포할수록 에너지 소비량이 늘어남을 한번 더 확인하였다.

Table 7을 살펴보면 추정된 회귀계수들 중에서 공용공간(A), 강의지원공간(B), 학생자치공간(D), 보관공간(G), 대학원실(J), 교수연구실(K), 임시공간(O) 등 해당 회귀계수의 p-value가 높게 나오는 공간들은 건물별 원단위 소비량의 편차가 실제 사용량 대비 클 것으로 판단된다. 다시 말해, 에너지 원단위가 크지 않음과 동시에 매우 다양한 건물에 분포하는 보조적 성격의 용도로서 해당 건물의 주용도 원단위의 영향을 크게 받는 것으로 유추할 수 있다. 하지만 다른 용도들, 특히 면적 대비 소비량이 큰 공간들에 대해서는 표준편차가 비교적 작은 유효한 추정값들을 얻을 수 있었으며, 계산된 회귀모형의 $R^2 = 0.935$ 값은 자료에 대한 설명력이 매우 높은 수치라고 평가할 수 있

다. 다시 말해, 통계적 유의성을 가지는 p-value가 나오는 공간들은 이공계연구공간(M), 학술지원공간(도서관, 전산실 등)(F), 편의공간(상점, 식당 등)(I), 문화체육공간(E), 행정지원공간(C)으로서 모두 에너지 사용 원단위가 높고 건물의 주용도로써 의의를 가질 수 있다. 결과적으로 공간단위의 원단위 분석 결과(Table 7)가 건물 단위 원단위 결과(Table 5)를 일부 지지하는 것을 확인하였다. 다만, Table 5의 건물 단위 주용도는 건물의 명칭만으로 설정된, 다시 말해, 건물 전체의 명목상의 주 용도로써 공간별 구분에 기반한 분석 결과보다 실증적이진 않은 단점이 있어 보완적인 수단으로서 보다 세밀한 공간단위 분석의 결과가 의의를 가지며 동일 건물 내 주용도와 보조 용도가 에너지 소비에 미치는 영향을 미루어 짐작할 수 있다. 따라서, 각 기관(대학)에서는 조금 더 유사한 소비 패턴을 가진 공간 단위 용도를 정의하고, 각 용도별 면적에 대한 샘플을 일정 수준 확보한다면 회귀 분석 등의 방법을 통해 단일 건물의 용도별 구성비에 따른 에너지 소비 모형을 구축하고, 이를 에너지 원단위로 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

Table 7. Summary of Linear Regression Model

Main Use of Space	Estimate*	Std. Error**	t-value	Pr(> t)***
A,D,O	0.005	0.01	0.575	0.566
B	0.015	0.013	1.181	0.24
C	0.068	0.021	3.153	0.002
E	0.073	0.023	3.146	0.002
F	0.113	0.043	2.602	0.01
G	0.016	0.018	0.896	0.372
H	0.052	0.034	1.541	0.126
I	0.09	0.022	4.189	0.00
J,K,L	0.008	0.017	0.45	0.654
M	0.137	0.008	16.313	0.00
N	0.042	0.01	4.023	0.00

*Regression Coefficient , **Standard Error, ***P-value

3.3. 분석 결과 종합

선형회귀분석을 통해 도출된 공간 단위 회귀계수와 공간별 구성 면적을 활용하여 해당하는 용도의 공간 면적에 대입하게 되면 모든 건물에 대하여 각 용도별 공간의 에

너지 소비량을 유의하게 추정해볼 수 있으며, 하나의 건물뿐만 아니라 다수의 건물에 대해서도 분석 대상 공간의 사용 목적별 에너지 소비량을 종합하고 이를 연면적의 구성비와 비교해볼 수 있다. 다음은 분석 대상인 S-대학교 서울캠퍼스의 용도별 면적 구성비와 용도별 에너지 소비 비율을 종합한 표이다.

Table 8. Estimated Energy Consumption by Space Unit

Main Use of Space	Floor Area (㎡)	Estimated Energy Consumption (ToE)	Estimated Proportion of Energy Consumption (%)
A	460,137	2,240	4.30
B	160,345	2,342	4.50
C	77,530	5,133	9.86
D	13,009	63	0.12
E	24,095	1,713	3.29
F	16,951	1,865	3.58
G	28,338	442	0.85
H	111,691	5,655	10.87
I	28,579	2,504	4.81
J	15,540	121	0.23
K	55,682	434	0.83
L	19,256	150	0.29
M	182,671	24,368	46.82
N	122,221	4,998	9.60
O	3,796	19	0.04
Total	1,319,848	52,048	-

Table 8의 분석 결과를 해석하면 다음과 같다. 먼저 에너지 소비 비중과 용도별 점유비의 간극이 가장 큰 시설은 이공계연구소 공간과 공용공간으로서 이공계연구소 공간은 실제 점유 면적 대비 에너지 소비량이 매우 높은 공간이고, 공용공간은 점유 면적 대비 에너지 소비 규모가 매우 낮은 공간임을 확인할 수 있다. 따라서 동일한 주 용도라고 하더라도 상기 공간이 많고 적음에 따라 원단위가 다를 것임을 이해할 수 있다.

이외에도 면적 대비 에너지 소비 강도가 높은 대표적인 공간은 행정지원공간, 편의시설공간, 설비공간, 학술지원 공간 순이며, 면적 대비 에너지 소비 강도가 낮은 대표적

인 공간은 강의지원공간, 교수연구실 공간, 보관공간인 것으로 나타났다. 양의 간극이 가장 큰 공간부터 음의 간극이 가장 큰 공간을 나열하면 Fig. 2와 같다.

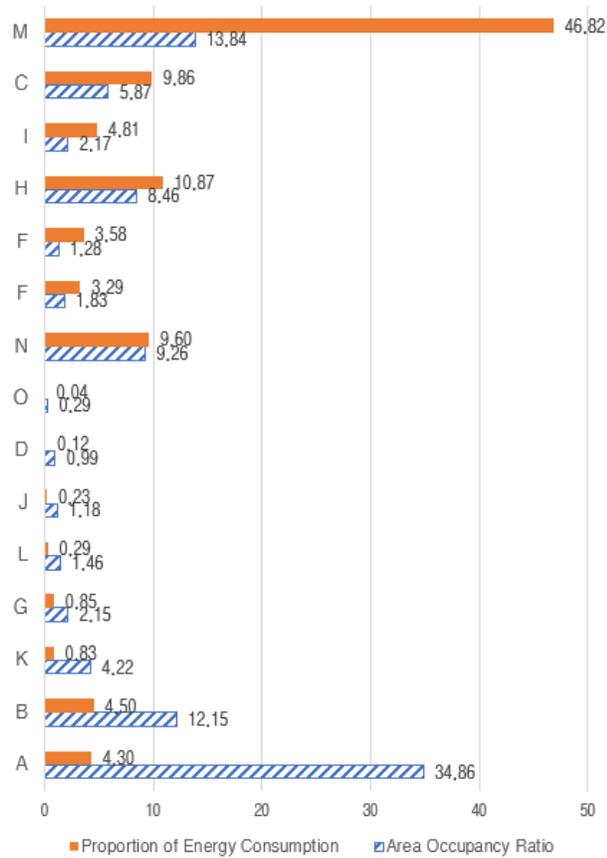


Fig. 2. Comparison of Floor Area Proportion and Energy Consumption Ratio by Space Unit

4. 결론 및 함의

본 연구는 근래 온실가스와 에너지 저감을 위한 정책 수립 과정에서 다양한 용도의 건물을 대상으로 한 표준 소비량, 즉 원단위 설정을 통해 건물의 주용도별 감축 목표를 설정하고 건물의 에너지 소비 등을 이 기준에 충족하도록 유도하고자 하는 활동을 지원하고자 진행하였다. 이를 위하여 건물 내 다양한 세부 공간을 구분하고 공간 단위 원단위를 산정하는 분석을 진행하고 그 결과를 제시하였다. 특히, 대학과 같이 건축물 대장 상 단일 층으로 구분이 되어 있지만 실질적인 공간의 사용에 따라 원단위 차이가 많이 나는 건물들에 대해서는 온실가스 에

너지 감축 목표 설정시 이를 고려한 합리적인 감축 목표 설정이 필요함을 확인할 수 있다. 본 연구의 대상인 서울 소재 종합 대학 캠퍼스를 대상으로 조사한 결과 건물 단위로는 주 용도별 원단위가 8배 이상 차이가 났고, 건물 내 공간의 용도에 따라서도 원단위가 27배 이상 차이가 나는 등 단일한 온실가스와 에너지 원단위를 사용하기에 고려사항이 있음을 확인할 수 있다. 이 같은 현상은 국토교통부에서 추구하는 건물 데이터 기반 구축 과정인 과도기적 상황에서 발생한 것이기도 하고, 기관의 내부 자료 공개와 이의 활용이 미진한 것이 원인인 것으로 판단된다.

한편으로는 본 연구를 통해 기관 내 신뢰할 만한 데이터를 바탕으로 MRV에 기반한 객관적인 검증증을 진행할 수 있다면 자체적인 배출 원단위를 개발할 수 있는 가능성을 확인하였다. 따라서, 검교정 데이터로 자체 원단위를 산정할 수 있는 기관의 경우에는 과거 실적에 기반한 표준원단위와 베이스라인 대비 절감 목표율을 부여 받거나, 준수해야 할 용도별 표준 원단위를 특정 숫자로 지정 받지 않고 용도별 감축 목표율을 부여 받아 업체별 원단위 수준에 적합한 감축 실적을 스스로 관리하도록 하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

하지만, 궁극적으로는 보다 세분화된 원단위 계수 개발이 병행될 필요가 있다. 본 연구에서는 공간 단위까지 세분하여 에너지 집약도를 도출하였지만, 건물 단위 주용도별 원단위만 살펴보다라도 동일 기관 내에서도 다양한 건물별 에너지 집약도를 도출할 수 있다. 따라서, 기관 전체를 업종에 따라 단일용도로 설정하고 해당 원단위를 부여하는 것이 아니라, 건물 단위의 실제 용도별 원단위에 기반한 총량 제도 설계를 고려하여야 한다. 시범 사업 등을 통해 참여 기관의 세부 용도별 원단위 정보를 꾸준히 확보해나가는 것도 실효성 있는 원단위를 결정해가는 방법이며, 정도 검사를 받는 계량 장비에 의한 데이터 수집 주기와 방법 등의 가이드라인 또한 제공되어야 할 것이다.

본 논문은 교육 시설 부문만을 대상으로 한 일률적인 원단위 설정의 불합리함을 보여주기 위하여 다양한 교육 시설의 자료를 종합하지 못한 한계가 있다. 하지만, 기관별로 구축 가능한 다양한 용도의 원단위가 공공데이터로 축적된다면 총량제와 같은 제도 이행시 다양한 옵션의 선택이 가능하고, 이와 같은 옵션은 기관의 특성과 관리 방식에 적합한 합리적인 온실가스 총량제 이행을 도모할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Byeon SH, Kim JY, Hong WH. 2010. A study on the Energy Consumption and the Greenhouse gas Emission intensity of library (in Korean with English abstract). *Journal of The Korean Solar Energy Society* 30(1): 88-93.
- Elie Azar, Carol C. Menassa. 2012. A comprehensive analysis of the impact of occupancy parameters in energy simulation of office buildings, *Energy and Buildings* 55: 841-853.
- Jiangyan Liu, Huanxin Chen, Jiahui Liu, Zhengfei Li, Ronggeng Huang, Lu Xing, Jiangyu Wang, Guannan Lia. 2017. An energy performance evaluation methodology for individual office building with dynamic energy benchmarks using limited information, *Applied Energy* 206: 193-205.
- Jung HJ, Kim JN. 2018. A Study on the Energy Consumption Characteristics in University Buildings based on the Analysis of Power Consumption Indicators - Focused on Load Profiling of S-University - (in Korean with English abstract). *Journal of Energy and Climate Change Education* 8(2): 99-111.
- Kim JS, Lee KB, Lee IH, Kim SD. 2012. Analysis of Energy Consumption Pattern and Greenhouse Gas Emission in the Academic Facility (in Korean with English abstract). *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 34(9): 604-612.
- Kim KJ, Yi CH. 2019. A Study on the Difference of Cooling Energy Consumption by Building Use (in Korean with English abstract). *Seoul Studies*. 20(2): 91-103.
- Kim SB, Oh BC, Shin UC. 2016. A Case Study for Energy Consumption Characteristics of High School Facilities in Seoul (in Korean with English abstract). *Journal of The Korean Solar Energy Society* 36(6): 61-69.
- Kim SI, Lim SH, Jin HS, Yang IH, Lim JH, Song SY. 2017. Estimation Method for Energy Consumption by end-use in Office Building of Korea (in Korean). *Proceedings of the SAREK Conference* 2017(6): 885-888.
- Kim SI, Yang IH, Ha SY, Lee SJ, Jin HS, Suh IA, Song SY. 2020. Estimation Method of Energy Consumption by End-Use in Office Buildings based on the Measurement Data (in Korean with English abstract). *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction* 36(5): 165-176.
- Lee SJ. 2021. A Study on the Development of end-use energy consumption of apartment units through analysis of determinants on the energy consumption [dissertation]. Ewha Womans University.
- Lee WJ, Lee DW, Lee JB, Yoon JH, Shin UC. 2012. A Case Study of Electric Power Consumption Characteristics in University Building (in Korean with English abstract). *Journal of The Korean Solar Energy Society* 32(4): 90-95.
- Maryam Khoshbakht, Zhonghua Gou, Karine Dupre. 2018. Energy use characteristics and benchmarking for higher education buildings. *Energy & Building* 164: 61-76.
- Min Hee Chung, Eon Ku Rhee. 2014. Potential opportunities for energy conservation in existing buildings on university campus. A field survey in Korea, *Energy and Buildings* 78: 176-182.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2021. 2050 Carbon Neutral Road Map for Buildings.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2022. Green Building Stats.
- Park TK. 2022. The Current Status Analysis on Energy Consumption of Facilities in Post Office - Based on an analysis by unit requirement (in Korean with English abstract). *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea* 13(4): 209-216.
- Seoul Metropolitan Government. 2022. Press Release on Total Amount of Greenhouse Gas in Buildings.
- Woo HJ, Choi KW, Kim HS, Auh JS, Cho SY, Baek JM, Kim GS, Lee SB. 2016. A Study on Classifying Building Energy Consumption Pattern Using Actual Building Energy Data (in Korean with English abstract). *Journal of the Architectural Institute of*

- Korea 32(5): 143-151.
- Yixuan Wei, Xingxing Zhang, Yong Shi, Liang Xia, Song Pan, Jinshun Wu, Menjie Han, Xiaoyun Zhao. 2017. A review of data-driven approaches for prediction and classification of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82: 1027-1047.
- Yoon JH, Lee BH, Yeo MS, Kim KW. 2017. Classification of Energy Consumption Patterns in University Buildings Using Change Point Model and Analysis According to Energy Impact Factors (in Korean with English abstract). *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction* 33(11): 71-78.

부록

(별첨) 공간별 주요 호실 구성 현황

전유 수준	공유	공유(실)					전유	공유 (실)	전유					기타	전유						
		강의 지원	행정 지원용	학생 자율	문화 체육	학술 지원			편의 시설	보관	대학 원연구실	교수 연구실	인문사회계 열연구소			이공계 연구소	기숙 시설	임시/ 특수용도	설비		
공간 관리 시스템상의 호실 명	화장실	강의실	학과 사무실	학생 자치 공간	체력 단련실	도서관	일반 상가	공실	대학원 연구실	교수 연구실	연구소 (인문사회계)	연구 실험실 (이공계)	기숙사	리모델링 대체공간	피트룸						
	복도	세미나 실	학과 장실		강당	전산실	상업 체육 시설	자료실								공익법률센터	표본실	빨래방	폐기물 처리	기계실	
	계단실	도서실 (소형)	기타 사무실	동아 리방	극장	전산원		창고								교원양성 지원센터	시료 보관실	취사실		전기실	
	각종 휴게실	회의 (준비) 실	서류 보관실	학부 생실	체육관		구내 식당									교육 지원센터	실험 장비실	기숙 관련 시설		EPS/PS	
	주차장	스터디 룸	조교실													사어버 교육센터		어린이 집		창고	
	방풍실	디자인 스튜디오	학생 생활 문화원																		엘리베이터
	로비	부속실	동창 회실																		방송실
	경비실	모의 법정	국제 교육 지원실																		TPS DZ AV
	탕비실	실습실 (예술계)	원장 (소장) 실																		ED (AD)
	테라스		학과 장실																		펌프실
사위실		행정 지원용 사무실											정화조								
수유실		대학 신문사											소화 가스실								
		숙직실												발전기실							