

# DTW 기반 시계열 클러스터링을 활용한 캠퍼스 건물 에너지 소비 패턴 분석

## Analysis of Energy Consumption Patterns in University Campus Using DTW-Based Clustering

○정 봉 훈\*      ○윤 정 호\*\*      김 태 연\*\*\*  
Jeong, Bonghoon      Youn, Jeongho      Kim, Taeyeon

### Abstract

University buildings serve multiple functions such as education, research, and student activities, making their energy use highly complex and variable. Therefore, simple distinctions like semester/vacation or weekday/weekend are not sufficient to fully explain their actual usage patterns. In this study, one year of daily energy consumption data from campus buildings was analyzed using Dynamic Time Warping (DTW)-based time series K-Means clustering to group similar usage patterns and identify representative types. The analysis showed that engineering buildings could be categorized into three types: (1) weekdays during the semester, (2) days with high heating/cooling loads, and (3) weekends and holidays. The library exhibited regular patterns aligned with its operating hours, while the dormitory displayed distinct independent patterns driven by 24-hour operation and seasonal HVAC demand. These findings demonstrate that DTW-based clustering effectively captures energy use characteristics that reflect building functions and operational behaviors, and suggest its potential as a valuable foundation for developing efficient and precise energy management strategies for university campuses.

키워드 : 건물 에너지 사용량, 대학교 건물, 군집화

Keywords : Building energy consumption; Campus Building; Clustering

### 1. 서론

한국의 건물 에너지 소비 분석에 따르면 아파트(20.2%), 병원(11.8%), 오피스(10.5%)에 이어 대학교 건물(10.2%)이 높은 비중을 차지한다. 대학 캠퍼스는 교육, 연구, 학생 생활 등 다양한 기능을 지원하는 복합 공간으로, 단일 목적 건물보다 복잡한 에너지 관리가 필요하다. 특히 학기·방학·휴일 등 운영 기간과 스케줄에 따라 소비 패턴이 크게 달라지므로 정밀한 분석이 요구된다. 선행연구들은 대학 건물의 에너지 소비가 건물 용도, 점유율, 기상조건 등 여러 요인의 영향을 받으며, 운영시간이 점유율 변동의 핵심 요인임을 밝혀왔다. 그러나 대부분의 연구는 군집화 기법의 적용 및 성능 검증에 집중되어, 실제 도출된 군집화 결과를 운영 맥락과 연결해 분석하는 부분은 상대적으로 부족하였다.

이에 본 연구는 실제 1년간의 건물별 에너지 데이터를 기반으로 클러스터링을 수행하여 유사한 소비 패턴을 보이는 기간을 식별하고, 각 군집의 대표 패턴을 도출하였다. 더 나아가 건물의 용도와 운영 방식에 따른 맥락적 분석을 통해 소비 변동성과 불안정성이 집중되는 시간대를 파악하고, 건물군 간 차이를 비교하였다. 이를 통해 캠퍼

스 건물의 에너지 사용 특성을 심층적으로 이해하고, 향후 정밀한 에너지 운영 전략 수립에 활용 가능한 기초자료를 제공하고자 한다.

### 2. 연구 방법

본 연구에서는 1년간 수집된 건물별 일일 에너지 소비 시계열 데이터를 대상으로, 서로 다른 날들 간의 패턴 유사성을 정량적으로 비교하였다. 이 과정에서 동일한 형태의 소비 곡선이라 하더라도 수업 시작 시점, 최대 부하 발생 시각, 사용 지속 시간 등의 차이로 인해 시간축이 변형(time shift)되거나 앞뒤로 이동하는 문제가 발생한다. 이러한 특성을 고려하기 위하여, 본 연구는 유클리디안 거리(Euclidean distance) 대신 Dynamic Time Warping (DTW) 기법을 적용하였다. DTW는 두 시계열 간의 시간 순서를 유지하면서도 유연하게 시점을 정렬할 수 있는 워핑 경로(warping path)를 정의하고, 누적 비용이 최소가 되는 최적의 경로를 선택하여 식(1)처럼 두 시계열 간 거리를 계산한다. 이를 통해 시점이 다소 어긋나 있거나 길이가 상이하더라도 전체적인 소비 패턴의 형태적 유사성을 정확하게 반영할 수 있으며, 일별 에너지 소비 패턴 간 비교의 신뢰성을 확보할 수 있다.

$$DTW(x_i, x_j) = \min_{\pi \in \rho(t, s) \in \pi} \sum \|x_i^{(t)} - x_j^{(s)}\|^2 \quad (1)$$

DTW 기반 거리를 활용하여, 본 연구는 Time Series K-Means 알고리즘을 통해 건물의 일일 에너지 소비 패턴

\* 연세대 건축공학과 박사과정

\*\* 연세대 건축공학과 석사과정

\*\*\* 연세대 건축공학과 교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Architecture & Architectural Engineering, Yonsei University, tkim@yonsei.ac.kr)

이 성과는 정부 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2024-00351820).

을 군집화하였다. 이 방법은 기존의 유클리디안 거리 기반 K-Means보다 시간축 변형에 유연하게 대응할 수 있으며, 각 군집의 중심(centroid)을 DTW 거리가 최소화되는 대표 시계열로 정의함으로써, 해당 군집을 대표하는 에너지 소비 패턴 곡선을 도출할 수 있다. 또한, 최적의 클러스터 개수  $k$ 는 2~6 범위에서 반복적으로 평가한 후, 전체 데이터에 대한 실루엣 계수(Silhouette Score)가 최대가 되는 값을 기준으로 결정하였다. 이를 통해 1년간의 건물별 에너지 소비 데이터로부터 유사한 소비 패턴을 보이는 기간을 식별하고, 각 군집별 대표 패턴을 제시할 수 있도록 하였다.

### 3. 연구 결과

그림 1에서처럼 공학관은 첫 번째 클러스터는 계절적 냉난방 부하가 크게 작용하는 여름철과 두 번째 클러스터는 학기 중 평일, 마지막 클러스터는 주말 및 공휴일과 같이 상대적으로 낮은 부하를 보이는 날들로 구성되어 있음을 확인할 수 있었다. 이와 같은 경향은 연구 및 강의 시설뿐만 아니라 학생 활동 공간인 학생회관에서도 일관되게 관찰되었다. 반면, 도서관은 두 개의 클러스터만 형성되었으며 이는 운영 일정보다는 냉난방 부하 여부에 따라 구분되었고, 기숙사는 계절적 냉난방 부하에 의해 전적으로 클러스터가 결정되어 다른 건물들과는 뚜렷이 구별되는 독립적인 소비 패턴을 보였다.



그림1. 일일 에너지 소비 패턴 유사일자의 캘린더 시각화

그림 2의 공학관의 클러스터링 결과를 보면, 첫 번째 클러스터는 냉·난방 부하가 반영된 패턴으로 새벽부터 기저 부하가 높게 유지되는 완만한 형태를 보였고, 두 번째는 학기 중 평일의 전형적인 양상으로 오전 9시 이후 급격히 증가해 정오~오후 시간대 최고치를 기록한 뒤 저녁

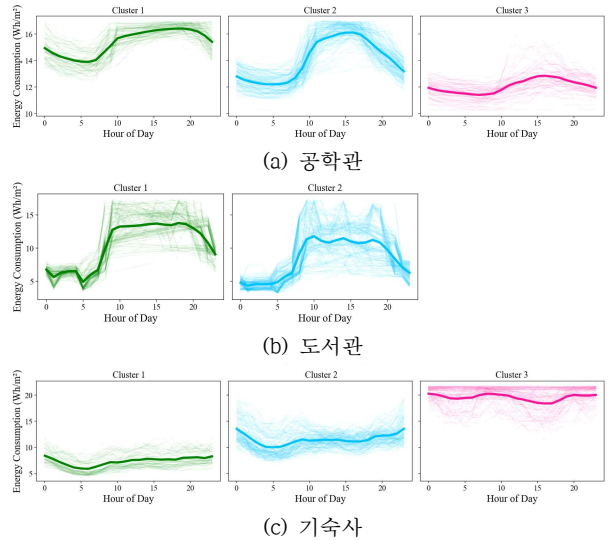


그림2. 클러스터링된 날짜에 따른 DTW 기반 일일 에너지 사용 패턴

에 감소하는 구조를 보였다. 반면 세번째는 주말·공휴일에 해당하며 하루 종일 낮은 부하 수준을 유지하되, 간헐적 활동으로 인한 소폭의 변동성이 관찰되었다. 도서관은 운영 시간(9시~18시)에 맞춘 규칙적 주기가 공통적으로 나타났다고, 구분 기준은 계절적 냉난방 수요였다. 기숙사는 24시간 상시 운영되는 거주 공간 특성상 주중·주말 차이가 거의 없었고, 계절별 난방·냉방 수요에 따라 완만한 소비 곡선을 보였으며, 특히 야간에 에너지 사용이 증가하는 특성이 관찰되었다. 전반적으로 클러스터는 계절적 부하와 건물 운영 및 점유 특성의 상호작용을 반영한 결과였다.

### 4. 결론

DTW 기반 클러스터링은 동일한 건물이라도 요일이나 기간별로 에너지 사용 시작 시점과 최대 부하 시점이 달라 발생하는 시간축의 어긋남을 효과적으로 보정하였다. 이를 통해 유사한 부하 양상을 가진 날들을 하나의 군집으로 통합할 수 있었으며, 결과적으로 기존 기법보다 실제 운전 패턴에 더 근접하고 명확하며 일관된 클러스터 분류를 도출할 수 있었다.

분석 결과, 건물의 용도와 운영 특성에 따라 뚜렷한 차이가 확인되었다. 도서관은 계절이나 운영 기간과 관계없이 일정한 주기적 패턴을 유지했다. 반면, 기숙사는 냉난방 부하에 크게 반응하여 여름과 겨울 시즌별로 독립적인 군집을 형성했다. 이는 단순히 학기/방학, 평일/주말과 같은 이분법적 분류로는 실제 운전 행태를 설명하기 어렵다는 점을 보여주며, 냉난방기 가동 여부와 운영 기간을 함께 고려한 다차원적 분석의 필요성을 강조한다.

### 참고문헌

- 정봉훈, 김하성, 나후승, & 김태연. (2024). LSTM 모델을 이용한 대학교 건물의 기간별 에너지 사용량 예측. 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 44(1), 333-334.