

2025년 추계학술발표대회 : 일반부문

국내 사무소 건물의 준공연도와 냉난방에너지 사용량에 대한 상관성과 인과성 비교

Comparison of Correlation and Causation in the Relationship between Building Vintage and Heating and Cooling Energy Use in Korean Office Buildings

○유 영 서* 박 철 수** 김 덕 우*** 안 기 언*
Yoo, Young-Seo Park, Cheol-Soo Kim, Deuk-Woo Ahn, Ki-Uhn

Abstract

The Korean government has steadily reinforced building energy codes with growing focus on non-residential buildings. Assessing policy effects requires quantifying impacts on actual energy use, but confounding factors such as building size, system type, climate complicate analysis. This study applies causal inference to assess the impact of building codes on heating and cooling energy use in 762 office buildings, using year built as a proxy for insulation and system improvements. Results show that average treatment effects are substantially moderated compared to correlation once confounders are controlled, and they vary across building size, resion, and system type, underscoring the importance of causal approaches for objective policy evaluation.

키워드 : 건물 에너지 분석, 인과추론, 상관분석, 평균처치효과, 조건부처치효과, 인과 포레스트 기법

Keywords : Building energy analysis, Causal inference, Correlation analysis, ATE, CATE, CausalForestDML

1. 서론

정부에서는 건축물의 에너지 절감을 위해 매년 에너지 절약설계기준을 강화해왔다. 초기에는 주거 건물의 에너지 저감이 주된 관심사였으나, 최근에는 비주거 건물의 에너지 절감 필요성이 점차 강조되고 있다. 정책 개선 효과를 평가하기 위해서는 기존 제도의 시행이 실제 에너지 사용에 미친 영향을 정량적으로 분석하는 것이 중요하다. 그러나, 비주거용 건물은 주거용에 비해 인체/조명/기기 등으로 인한 내부 발열이 비교적 크고, 운영 스케줄 또한 다양하다. 따라서 냉난방 에너지 사용량은 단열 수준 강화나 시스템 효율 개선과 같은 정책적 요인뿐만 아니라 건물의 규모, 기후 조건, 설비 특성 등 다양한 내·외부 요인에 의해 좌우될 수 있다. 이러한 요인들은 정책 효과와 에너지 사용량 모두에 영향을 줄 수 있어, 정책 효과를 평가할 때 교란변수(confounder)로 작용할 가능성이 크다.

이런 관점에서, 본 연구는 인과추론(causal inference)을 활용하여 정책 효과가 실제 건물 에너지 사용량에 미친 영향을 분석하고자 한다. 이를 위해 정책 효과를 대변하는

변수로 준공연도를 설정하고, 비주거용 건물 중 사무소 건물을 대상으로 분석을 수행하였다. 나아가 본 연구는 단순 상관분석과 인과분석 결과를 비교함으로써, 정책 효과 평가에서 인과적 접근의 필요성과 의의를 제시한다.

2. 인과추론

건물 에너지 분석에서는 특정 요인(예: 단열 수준 강화, 시스템 효율 개선)이 실제 에너지 사용량에 미친 인과적 효과를 명확히 규명하는 것이 중요하다. 그러나 기존 연구들은 주로 상관분석에 기반하여 요인과 에너지 사용량 간의 관계를 평가해왔다. 이 경우, 건물 규모, 기후 조건, 내부 발열, 운영 스케줄 등과 같은 교란변수가 충분히 통제되지 않을 경우, 정책 효과가 과대 또는 과소 추정될 수 있다. 인과추론은 잠재적 결과 프레임워크(potential outcomes framework)에 기반하여, 특정 처치(treatment)가 없었을 경우 관찰될 수 있었던 대안적 결과를 추정하는데 목적이 있다 (Imbens and Rubin, 2015). 예를 들어, 사무소 건물의 준공연도를 단열 성능을 대변하는 처치 변수로 두었을 때, 동일한 기후 및 건물 조건을 가진 상황에서 준공연도가 달랐다면 난방 및 냉방 에너지 사용량이 어떻게 달라졌을지를 추정하는 방식이다. 이를 통해 단순한 상관성이 아닌, 정책적 개입이 실제로 미친 인과적 효과를 추정할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 인과추론 접근법을 활용하여, 준공연도에 따른 비주거 건물의 에너지 성능이 변화를 분석한다. 특히, 상관분석 결과와 비교함으로써 정책 효과 해석에서의 차이를 검증하고, 향후 객관적 건물 에너지 벤치

* 한국건설기술연구원 건축연구본부

** 서울대 건축학과 교수, 공학박사

*** 한국건설기술연구원 건축에너지연구본부

(Corresponding author : Department of Building Research,
Korea Institute of Civil Engineering and Building
Technology, ahnkiuhn@kict.re.kr)

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행
되었음(과제번호 RS-2024-00410456).

마킹 체계 구축의 근거를 제시하고자 한다.

3. 사례연구

본 연구에서는 건축물대장, 기상 데이터 및 한국건설기술연구원에서 제공받은 2019년 에너지 데이터를 이용하였다(KICT, 2023). 단일 건물 필지, 준공연도 1995년 이후, 연면적 100m² 이상 등 전처리를 거쳐 최종적으로 762개 사무소 건물을 분석 대상으로 선정하였다. 처치 변수는 준공연도이며, 결과 변수는 난방 및 냉방 EUI, 교란변수는 수집 가능한 데이터에서 선정하여 연면적, 난방시스템(전기/가스), HDD/CDD로 설정하였다. 분석에는 CasaulForestDML을 적용하여 평균처치효과(Average treatment effect, ATE)와 조건부 처치효과 (Conditional ATE, CATE)를 추정하고, refutation test(Placebo, Subset, random common cause, Bootstrap)을 통해 안정성을 검증하였다. 상관성은 단순 선형회귀 모델로 산출하였다.

표 1은 준공연도와 난방·냉방 EUI 간 상관성과 인과성을 비교한 결과이다. 난방의 경우 상관분석에서는 준공연도가 최근일수록 난방 EUI가 낮아지는 음의 상관성이 나타났다으나, 인과분석에서는 효과가 크게 완화되어 -0.09kWh/m²/yr로 추정되었다. 냉방은 상관성이 거의 없었으나(0.05kWh/m²/yr), 인과분석에서는 소폭 증가(+0.09 kWh/m²/yr)하였다. 이는 준공연도의 난방 및 냉방EUI에 대한 효과가 건물 규모, 내부발열, 시스템 특성 등의 복합적 요인에 의해 영향을 받음을 의미한다. 따라서 상관성만으로 정책 효과를 단정할 경우 과대해석이나 왜곡 가능성이 존재하며, 인과적 접근이 보다 객관적인 해석을 제공할 수 있음을 확인할 수 있다.

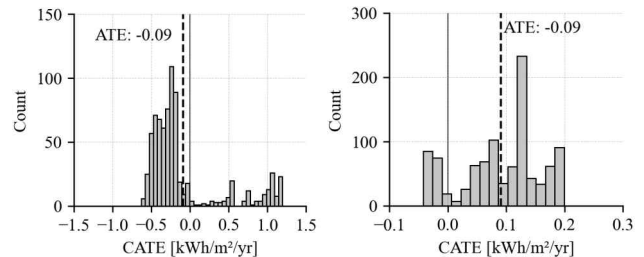
표 1. 준공연도와 EUI 간 상관성 및 인과성 (단위: kWh/m²/yr)

	상관성	인과성
준공연도 vs. 난방 EUI	-0.76	-0.09
준공연도 vs. 냉방 EUI	0.05	0.09

한편, 준공연도가 난방 및 냉방 EUI에 미치는 인과효과는 건물의 특성에 따라 달라질 수 있다. 그림 1은 준공연도가 난방 및 냉방 EUI에 미치는 조건부 평균처치효과(CATE) 분포를 나타낸다. 난방의 경우 (그림 1의 (a)), 다수 건물에서 음의 효과가 나타났으며, 이는 대체로 준공연도가 최근일수록 난방 에너지 사용량이 감소하는 경향임을 시사한다. 그러나, 개별 건물 수준에서는 효과가 -0.6에서 -1.2kWh/m²/yr까지 분포하여, 정책 효과가 건물별로 이질적으로 나타남을 알 수 있다. 냉방의 경우 (그림 1의 (b)), 다수 건물에서 양의 효과가 나타났으나, 처치효과가 -0.03에서 0.2kWh/m²/yr 사이로 대체로 작은 수준으로 나타났다. 표 2는 건물 특성별 준공연도의 CATE를 보여준다. 연면적이 작은 건물 (<500m²)에서는 난방 EUI가 증가했으나, 중대형 건물에서는 감소하였다. 이는 규모가 작은 건물에서 정책 효과가 제한적일 수 있음을 시사한다. 지역은 기후 차이를 나타내며, 지역별로 난방은 일부 인과효과 차이가 존재하나 냉방

은 차이가 미미하게 나타났다. 난방 시스템에 따라서는 전기보다 가스난방을 사용하는 건물에서 더 큰 절감효과가 나타났다.

종합하면, 준공연도의 효과는 건물 규모, 지역, 시스템 특성에 따라 이질적으로 나타나며, 객관적인 정책 효과를 분석하기 위해서는 건물의 특성에 따른 처치효과를 고려하여 정책 개선 의사결정이 이루어져야 함을 시사한다.



(a) 난방 EUI

(b) 냉방 EUI

그림 1. EUI에 대한 준공연도의 이질적 처치 효과

표 2. 건물의 특성에 따른 준공연도의 조건부 처치효과 (CATE)

		난방 EUI	냉방 EUI
연면적	<500	1.04	-0.03
	500~3,000	-0.27	0.10
	3,000≥	-0.18	0.13
지역	광주	-0.25	0.12
	대구	-0.36	0.10
	부산	-0.33	0.13
	서울	-0.28	0.12
	수원	-0.20	0.10
	인천	-0.28	0.11
난방 시스템	전기	-0.26	-
	가스	-0.35	-

4. 결론

본 연구에서는 준공연도를 처치변수로 설정하여 사무소 건물의 난방 및 냉방 EUI에 미치는 인과적 효과를 분석하였다. 분석 결과, 단순 상관성과 달리 인과효과는 완화 혹은 강화되는 양상이 나타났으며, 효과의 크기와 방향은 건물 규모·지역·난방시스템에 따라 이질적으로 분포하였다. 이는 정책 효과 평가에서 교란변수를 통제한 인과분석의 필요성을 보여주며, 건물 특성별 차이를 고려한 맞춤형 정책 설계의 중요성을 시사한다.

참고문헌

1. Imbens, G. W., & Rubin, D. B. (2015). Causal inference in statistics, social, and biomedical sciences, Cambridge university press.
2. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT). (2023). Development of a data framework for integrating building energy datasets and applications to accelerate carbon neutrality in the building sector (2023-2026) [Research project].