

코로나19 감염병이 건물 유형별 온실가스 배출에 미친 영향 실증 분석

백종락* · 황인창**† · 이현정*

*서울연구원 기후변화연구실 연구원, **서울연구원 기후변화연구실 연구위원

An empirical analysis of the impacts of COVID-19 on building greenhouse gas emissions in Seoul

Baek, Jong-rak* · Hwang, In Chang**† and Lee, Hyun Jung*

*Researcher, Division of Climate Change Research, The Seoul Institute, Seoul, Korea

**Research Fellow, Division of Climate Change Research, The Seoul Institute, Seoul, Korea

ABSTRACT

This study compared the annual per-unit area greenhouse gas (GHG) emissions from buildings in Seoul from 2017 to 2019, with those from 2020 to 2023. The objective was to empirically analyze how changes in building occupant behavior due to COVID-19 impacted GHG emissions from buildings. The analysis utilized the ‘Seoul Building GHG Emission Database,’ which integrates building information and monthly energy supply data (electricity, LNG, district heating) for all buildings in Seoul. The analysis revealed that behavioral changes induced by the COVID-19 pandemic temporarily reduced overall GHG emissions from buildings in Seoul by approximately 3% on an annual basis. GHG emissions from commercial buildings (49.4%) and residential buildings (50.6%) in Seoul were nearly identical. While emissions from commercial buildings decreased by 4.6%, those from residential buildings increased by 1.1%. However, these GHG reductions were observed only immediately after the introduction of social distancing measures and subsequently reverted to the pre-2019 levels. Additionally, the reductions primarily were driven by non-residential buildings, while emissions from residential buildings increased. Even after the easing of social distancing measures, the increased emissions from residential buildings did not return to previous levels. In 2022, there was an observed increase in GHG emissions compared to pre-COVID-19 level. The findings of this study can serve as a foundation for emission reduction scenarios through behavioral improvements and for policies aimed at encouraging such improvements.

Key words: GHG Emission Intensity, Korea Building Energy Integrated Database, COVID-19, Behavioral Changes, Carbon Neutrality

1. 연구의 배경 및 목적

탄소중립 정책 강화, ESG 경영¹⁾ 확산, 에너지 가격 인상 등이 국제적 이슈가 되며, 건물 부문에서의 에너지 소비로 인한 온실가스 배출관리 중요성은 점차 커지고 있

다. 개별 건물의 에너지 및 온실가스 관리 성과는 글로벌 ESG 평가기관인 GRESB (Global Real Estate Sustainability Benchmark) 등에서 건물의 ESG를 평가하는 데 있어 중요한 요소 중 하나이다. 북미와 유럽을 중심으로 ESG 평가 결과가 건물의 부동산 가치에 중대한 영향을 미치고

†Corresponding author : ichwang@si.re.kr (57 Nambusunhwan-ro, 340-gil, Scocho-gu, Seoul 06756 Korea. Tel. +82-2-2149-1096)

ORCID 백종락 0009-0008-2208-7967
황인창 0000-0002-4312-2476

이현정 0009-0008-6024-9349

Received: November 10, 2023 / Revised: December 4, 2023 1st, December 22, 2023 2nd / Accepted: February 19, 2024

1) 환경(Environmental), 사회(Social), 지배구조(Governance)의 약어로 지속가능성을 달성하기 위한 기업 경영의 3가지 핵심 요소를 의미한다(MOTIE, 2021).

있다(Leahy, 2022). 이에 공공정책 측면에서뿐 아니라 건물을 경영하는 관점에서도 개별 건물의 온실가스 배출량 변화 요인 분석을 통한 효과적인 관리정책 수립의 필요성이 커지고 있다.

기후변화가 급세기 가장 시급한 전지구적 문제 중 하나로 떠오르며 전 세계 많은 국가들이 온실가스 배출을 줄여 탄소중립으로의 전환을 추진하고 있다. 2023년 3월 승인된 IPCC 제6차 평가보고서(AR6) 종합보고서(IPCC, 2023)는 1.5°C 지구온난화 제한 목표 달성을 위해서는 2019년 대비 2030년까지 43%, 2050년까지 84%의 온실가스 순배출을 줄여야 한다는 내용²⁾을 담고 있다. 그러나 유엔 기후변화협약(UNFCCC, 2022)이 세계 각국의 국가 온실가스 감축목표(Nationally Determined Contributions, NDCs)를 분석한 결과, 2030년 온실가스 배출량은 2010년보다 오히려 11% 증가할 것으로 전망되었다.

도시의 높은 인구 밀도, 경제 활동의 집중, 사회적 구조로 인해 전 세계 온실가스 배출의 80%가 도시 지역에서의 활동으로 인해 발생하는 것으로 추정된다(Cai et al., 2022; Cellura et al., 2018). 이에 도시들은 시장 서약, ICLEI (Local Governments for Sustainability)³⁾ 및 C40 (Cities Climate leadership group) 등 협력기구 참여 등 다양한 형태로 기후변화 완화를 위한 세계적인 노력에 앞장서고 있다(Even-Levi and Kissinger, 2023).

서울시 온실가스 인벤토리 보고서(Seoul Metropolitan City, 2022)에 따르면 서울의 2020년 온실가스 배출량은 2010년 대비 13%를 감축되었으나, 건물 부문 온실가스 배출량은 3% 감축에 그쳤다. 국내의 2020년 건물 및 도로 수송분야 온실가스 감축은 대부분 코로나19 감염병(이하 COVID-19) 장기화에 따른 ‘집합금지 및 거리두기’ 시행에 기인한 것으로(GIR, 2023) COVID-19에 대한 영향을 제외하면 서울시 온실가스 배출량의 71%를 차지하는 건물부문 온실가스의 배출 감축 실적은 더 줄어들 가능성이 있다.

2020년 1월 국내로 유입된 COVID-19로 인해 시행된 사회적 거리두기는 2022년 4월 전면 해제에 이르기까지 이동, 교육, 문화활동 등 모든 생활 행태에 커다란 영향을 미쳤다. 국가별 방역 기간과 수준에 따라 에너지 소비 시장에는 큰 변화를 가져왔고, 완전 봉쇄 조치를 취한 국가에서는 기온 영향을 제거하더라도 봉쇄 기간 동안 최소

15%의 전기 소비가 감소하는 것으로 나타났다(Kim and Lee, 2021). 그러나 방역 피로도 등으로 인한 COVID-19 봉쇄 조치 완화 이후, 에너지 소비가 꾸준히 회복되며 COVID-19 이전 소비를 초과하였다고 분석되었다(IEA, 2021).

국가 및 서울시의 온실가스 인벤토리 보고서는 2년 후 연말에 발표가 되며, 2022년 12월에 발표된 2020년 배출 실적보고서가 현재 기준의 가장 최근 발표된 보고서이다(GIR, 2023; Seoul Metropolitan City, 2022). 국가와 서울시 모두 건물분야 온실가스 배출량이 줄어든 것으로 보고되었다. 온실가스 배출 감소는 COVID-19에 영향을 받은 것으로 추정하고 있으나 어느 정도 수준인지는 추정하지 못하고 있다. 또한 2021년부터 점진적 거리두기의 완화, 2022년 전면 해제 이후까지 온실가스 배출량이 얼마나 어떻게 회복될 것인지는 전망하지 못하고 있다.

이에 이 연구에서는 ‘서울시 건물 온실가스 모니터링 시스템’의 데이터베이스(이하 ‘서울시 건물 온실가스 DB’)의 건물에너지 소비 현황을 분석하여 COVID-19에 의한 서울시의 건물 온실가스 배출량 변화를 분석하고자 하였다. 건물 에너지효율 변화는 크게 이용자의 행태개선과 건물의 성능 개선에 의해 나타나며, 국내외 건물에너지 평가도 이를 중심으로 이루어지고 있다(Cho and Lee, 2020). 이 연구는 COVID-19에 따른 건물 온실가스 배출량 변화를 실증적으로 제시하는데 그 목적이 있으므로, 건물의 성능 개선이 아닌 이용자의 행태변화에 따른 건물 온실가스 배출량 변화를 중심으로 분석하였다. 연구의 결과는 건물 부문 온실가스 배출 저감정책 수립 시 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 선행연구

2.1. 건물 유형별 온실가스 배출 특성 연구

최근 정부에서 국가에서 에너지 및 온실가스 배출 감축 정책을 지원하기 위하여 관련 자료를 구축하고 제공함에 따라 이를 활용한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 일례로 Choi et al. (2017), Jeong and Kim (2019), Ji et al. (2020) 등은 국가 에너지통계와 ‘국가 건물에너지 통합관

2) 해당 내용은 2022년 승인된 IPCC AR6 제3실무그룹 보고서에서 분석된 내용으로, 해당 보고서는 2022년 9월 개최된 제57차 총회에서 이미 승인된 바 있다.

3) 1990년 International Council for Local Environmental Initiatives (ICLEI)로 최초 출범하였다.

리시스템'의 데이터베이스(이하 '국가건물에너지 통합 DB')를 기반으로 온실가스 총배출량 추이 및 현황을 분석하였다.

Jeong and Kim (2019)은 에너지경제연구원에서 발표하는 에너지통계연보를 활용하여 건물부문(가정 및 상업)의 에너지 사용량을 바탕으로 온실가스 배출 총량 및 시계열적 추이를 연도별, 부문별, 에너지원별로 산출하였다. 다만 건물의 특성(용도, 준공년도 등)은 반영되지 못하였다.

Kim et al. (2013)은 주거용 건물(단독주택, 아파트, 연립주택, 상가주택)과 상업·공급 부문 건물의 에너지 사용 현황을 포함하는 에너지총조사보고서(에너지경제연구원)를 활용하여 건물 용도에 따른 에너지원별 분석을 통해 건물별 특성을 반영하였으나 3년마다 발표되는 보고서의 한계로 인해 연도별 배출 추세 및 변화는 제시하지 못하였다.

한편 Choi et al. (2017)은 국가 건물에너지 통합 DB의 건물 정보와 에너지사용량 정보를 활용하여 건물 특성에 따른 에너지 소비현황을 분석하였는데 주거용 건물로만 대상을 한정하였다.

Ji et al. (2020)도 마찬가지로 국가 건물에너지 통합 DB를 활용하여 건물의 용도, 유형, 준공년도, 지역 등 세부적인 건물의 특성을 고려하여 2015년부터 2018년까지의 온실가스 배출 총량 및 단위면적당 배출현황을 제시함으로써 효과적인 감축 정책 수립에 기여하고자 하였다.

건물부문의 온실가스 배출은 계획 및 설계, 시공, 운영, 해체 및 재활용 등 건축물의 전 생애에 걸쳐 발생하는데, 국가 온실가스 인벤토리에서 건물 온실가스는 건물의 운영단계에서의 에너지 사용에서 발생하는 온실가스를 말한다(Jeon, 2017). 따라서 배출 현황 및 특성을 감축 정책의 수립에 활용하기 위해서는 건물의 특성과 함께 기후 및 COVID-19 등의 건물 이용에 영향을 미칠 수 있는 다양한 요인을 복합적으로 고려할 필요가 있다.

2.2. COVID-19 영향에 관한 연구

전 세계적으로 COVID-19의 감염 및 전파를 늦추기 위한 조치가 이루어졌으며, 다양한 국가와 도시에서 이러한 조치가 에너지 수요 및 온실가스 발생에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다. 특히 주요 도시에서는 폐쇄 조치 및 재택근무 증가 등으로 인한 생활 방식 변화에 따른 영향에 주목한 연구도 활발하게 이루어졌다.

국제에너지기구(IEA, 2020)의 COVID-19의 영향에 관

한 첫 보고서에 따르면 2020년 1분기 전 세계의 에너지 수요는 2019년 1분기 대비 3.8% 감소하였으며 CO₂ 배출량은 5% 이상 감소하였다. 유럽 전역에서도 COVID-19로 인해 에너지 수요가 2015년~2019년 평균 범위보다 상당히 감소(Dabas, 2020; Zhang et al., 2020)하였다.

Bahmanyar et al. (2020)는 유럽 여러 국가에서 취한 다양한 봉쇄 조치가 미치는 전력 소비에 미치는 영향을 비교하였는데 엄격한 조치를 취한 스페인, 이탈리아, 벨기에, 영국 등의 국가의 경우 주중 소비가 상당히 감소한 것으로 나타났다. 이처럼 COVID-19의 영향은 각 국가의 대응 조치 강도 및 기간에 따라 다르게 나타났다.

이후 봉쇄 조치가 완화됨에 따라 전기 소비는 꾸준히 회복하여 2020년 말에는 2019년 수준을 초과한 것으로 나타났다(IEA, 2021).

건물 용도에 따른 영향에 대해 주목한 연구 또한 이루어졌다. Geraldi et al. (2021)은 브라질 남부 플로리아노폴리스 시의 지자체 건물을 대상으로 COVID-19로 인한 봉쇄조치가 에너지 사용에 미치는 영향에 대해 파악하고자 하였다.

Cortiços and Duarte (2022)는 팬데믹으로 인해 재택근무, 원격근무 등의 형태가 증가함에 따라 대형 사무실 건물의 에너지 효율성에 대해 건물 에너지 시뮬레이션 평가의 표준 모델을 사용하여 이전 및 사후 시나리오를 비교하였다.

국내에서도 유사한 연구가 이루어졌다. Kim and Lee (2021)는 COVID-19의 확산이 전기 소비량과 소비패턴에 미친 영향을 파악하고자 확산 단계별, 계절별, 시간별로 분석하였는데 사회적 거리두기가 강화된 2020년 12월의 경우 오히려 지난 4년 평균보다 주간 평균 전기 소비가 증가하는 등 감염 확진자 발생 추이나 그로 인한 국내 방역 조치 강화 시기와는 시간적 상관관계가 미약하게 나타났다. 즉 전면 폐쇄 등의 조치 없이 비교적 방역을 성공적으로 유지함으로써 주요 선진국에 비해 전기 소비의 변화가 크지 않았다.

한편 Kang et al. (2021)은 2020년 1월부터 2020년 5월까지 데이터를 통해 건물 용도별 건물에너지 소비 변화를 분석하였는데 전체 건물의 전기와 가스 소비량은 전년 대비 평균 4.5%, 10.4% 감소했으나 주거시설의 에너지 소비는 증가한 것으로 나타났다. 또 근린시설, 종교시설, 교육시설, 연구시설 등에서 COVID-19와 관련 요인(신규 확진자수, 누적 확진자수 등) 및 각 변화율과 유의한 상관관계를 보임을 제시하였다.

2.3. 연구의 의의와 차별성

선행 연구의 검토 결과 건물 부문의 온실가스 배출 현황 및 특성에 관해서는 지자체별 감축 목표 수립·이행 및 평가를 위하여 지역 및 건물의 특성을 반영한 연구의 필요성을 확인할 수 있었다. 또한 COVID-19로 인한 경제 및 사회적 활동의 변화가 에너지 소비 및 온실가스 배출량에도 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 건물 에너지 효율 변화는 크게 이용자의 행태개선과 건물의 성능 개선에 의해 나타나며, 국내외 건물에너지 평가도 이를 중심으로 이루어지고 있다(Cho and Lee, 2020).

서울시는 2021년 ‘2050 서울시 기후행동계획’을 통해 서울판 그린뉴딜을 통한 2050년 탄소중립 달성 계획을 발표하였다(Seoul Metropolitan City, 2021). 건물부문에는 저탄소 제로에너지빌딩 전환 추진을 위해 건물 온실가스 총량제를 비롯한 다양한 전략들이 제시되었고, 이후 공청회, 보도자료, 중앙정부와의 MOU 등을 통해 다양한 홍보 및 외부 협력 사업들을 진행하고 있다. Kim and Seol (2021)은 주택시장은 규제강화 뉴스에 민감하게 반응한다고 하였고, 실제 서울시보다 앞서 건물 온실가스 총량제와 유사한 정책 시행을 발표한 뉴욕시의 경우, 본격적인 제도 시행(2025년) 전임에도 불구하고 제도 발표 후 실질적인 단위면적당 온실가스 배출 저감효과가 있었다(NYC Buildings, 2023).

본 연구는 서울시에 소재한 개별 건물 전체를 대상으로 하여 건물 용도에 따른 온실가스 배출량을 COVID-19 영향 이전과 이후로 나누어 분석(2017~2019, 2020~2022년)하여, 서울과 같이 인구와 건물이 밀집된 도시에서 건물의 성능 개선이 아닌 이용자의 행태 변화에 따른 건물 온실가스 배출량 변화를 중심으로 제시하였다. 이를 통해 건물의 성능 개선만으로는 목표 달성에 한계가 있는 건물 온실가스 감축정책에 행태개선을 통해 보완할 수 있는 서울시의 감축잠재량을 실증적으로 파악해 보는데 의의가 있다. 또한 시장에 미리 신호를 주어 정책 수용성을 확보하는 등 서울시의 건물분야 온실가스 감축정책을 추진을 위한 효과적인 제도 설계에 있어 연구 결과의 정책적 활용 가치가 높을 것으로 기대한다.

3. 분석방법

이번 연구에서는 다음과 같이 크게 3단계로 수행되었다. 우선, 분석을 위한 데이터의 수집을 통해 기초데이터

셋을 구축하였다. 구축된 기초데이터 셋을 데이터 스크리닝 및 검증을 통해 분석 데이터 셋을 만들고, 건물 주용도 및 온실가스 배출 특성을 기반으로 건물을 재분류하였다. 끝으로 재분류된 건물 용도를 기반으로 COVID-19 이전(2017년~2019년)과 COVID-19 이후(2020년~2022년)로 구분하여 COVID-19 전후 건물 온실가스 배출량 변화를 실증 분석했다.

3.1. 분석자료 구축

이 연구에서는 서울시가 건물 온실가스 감축사업 정책 효과 평가를 위한 내부 기초자료 활용을 위해 구축한 서울시 건물 온실가스 DB를 활용하였다. 서울시 건물 온실가스 DB는 한국부동산원에서 운영하고 있는 국가건물에너지 통합 DB를 중심으로 국토교통부의 GIS건물통합정보, 건축물대장을 결합하여 구축한 GIS 기반 시스템이다. 서울시 건물 온실가스 DB의 기반이 되는 국가건물에너지 통합 DB는 전국 모든 건물을 대상으로 건축물대장의 건축정보와 월별 에너지(전기, 도시가스, 난방 등) 공급정보를 통합하여 구축한 데이터이다(Choi et al., 2017). COVID-19 이전 3개년(2017년 1월~2019년 12월)과 이후 3개년(2020년 1월~2022년 12월)에 걸쳐 72개월 동안 총 560,984개 건물의 에너지원별 소비 데이터가 수집되었다.

이후 2006 IPCC 가이드라인(2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories)을 국내 지자체에 적용할 수 있도록 작성된 ‘지자체 온실가스 배출량 산정지침(Guidelines for Local Government Greenhouse Gas Inventories)을 준용(Seoul Metropolitan City, 2022)하여

Table 1. GHG emission factors by energy source

Energy source	Emission factors	Application criteria*
Electricity	0.4598 tCO ₂ eq/MWh	Emission factor at the end of use in 2011 by the KPX
LNG	5.6236 × 10 ⁻⁵ tCO ₂ eq/MJ	Enforcement rules of the 「ENERGY ACT」 attached form energy conversion standard (2012)
District heating	0.1226 tCO ₂ eq/Gcal	Applied the average values of the indirect emission factors for heating energy use in 2007 and 2008

Source: Seoul Metropolitan City (2022)

* While there are updated national emission factors available, for the sake of analytical consistency, the emission factors currently in use by Seoul are being applied

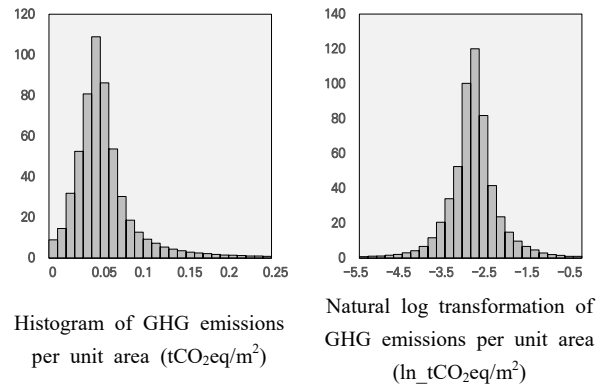
건물별 에너지 사용에 따른 온실가스 배출량을 산정하고 필지 내 건축물의 총 연면적 합(m²)으로 나누어 단위면적당 온실가스 배출량(tCO₂eq/m²)을 산출하였다. 에너지원별 배출계수는 Table 1에 제시된 바와 같은 값을 사용하였다.

서울시 건물 온실가스 DB에는 발전용 건물에서 에너지 생산을 위해 사용하는 에너지 소비량(전환부문)과 가스충전소, 공영버스차고지 등에서 차량 충전에 소비되는 에너지 소비량(수송부문)이 모두 포함되어 있다. 건물부문의 온실가스 사용량만 고려하기 위해서는 발전용과 수송용 에너지 사용량이 혼합 계측되어 서울시 건물 온실가스 DB에서 분리할 수 없는 데이터를 스크리닝하였다.

이후, COVID-19 이전 3개년 데이터를 기준으로 이상값 보정을 통해 1차 분석데이터 셋을 구축하였다. 서울시 건물 온실가스 DB의 원천데이터인 국가건물에너지 통합 DB는 건축물대장을 기반으로 생성되는 데이터이다. 정부가 지속적으로 건축물대장의 논리오류를 정비하고 있음에도 불구하고 기반이 되는 건축물대장은 일부 오류를 포함하고 있다(Ji et al., 2017; Lee, 2010). 특히 불분명한 이유로 실제와 달리 건축물대장상 건물의 연면적이 지나치게 작은 경우에는 단위면적당 온실가스 배출량이 과다하게 추정되어 평균값의 왜곡을 초래한다. 데이터의 이상탐지를 위한 기법으로 이동 평균(moving average) 및 3-시그마 기법 등이 활용된다(Son et al., 2016). 이동 평균은 시계열 데이터로부터 각 시간에 대한 일정 기간 평균을 계산하여 변화를 추정하는 기법으로 데이터의 불규칙한 변동을 제거하여 데이터의 추세를 파악하기 위해 활용된다. 3-시그마 기법은 정규분포 곡선으로부터 평균에서 ±3 표준편차 이내에 대부분의 값(99.7%)이 포함된다는 경험적인 규칙이다. 이 연구에서는 데이터 이상값 판단을 위해 3-시그마 기법을 활용하였다. Fig. 1과 같이 서울시 전체 건물의 단위면적당 온실가스 배출량 분포는 오른쪽으로 꼬리가 길고 두꺼운 비대칭 형태를 보인다. 이에 자연로

그 변환을 통해 정규분포로 변환하여 3-시그마를 적용하였다. 자연로그 변환을 통한 단위면적당 온실가스 배출량 분포는 정규분포와 가깝게 나타났다. 위 모든 절차를 통해 구축된 1차 분석데이터 셋의 수는 총 555,634개이다 (Table 2). 1차 분석데이터셋에 2021년 서울시 온실가스 배출량 상위 30개 건물(Seoul Metropolitan City, 2023a)의 포함 여부를 검토한 결과, 일부 IDC (Internet Data Center) 용도 건물을 제외한 건물은 모두 포함되었다. IDC 건물은 매우 높은 단위면적당 온실가스 배출량에 반해, 일반적인 건물들과는 달리 이용자의 행태 변화가 온실가스 배출량에 큰 영향을 주기 어렵다. 이 연구에서는 서울시 건물의 이용 행태 변화에 따른 온실가스 배출 변화를 보고자 하였으므로, 3-시그마 기법을 활용한 데이터의 보정은 최종 분석 결과의 신뢰도 향상에 긍정적이라 판단하였다.

COVID-19기간 동안의 행태변화에 의한 에너지 소비 패턴 변화만을 고려하기 위해 신축이나 말소, 대수선 등으로 인한 물리적 공간 변화가 이루어지지 않은 건물을 추출하고자 하였다. 서울시 통계에 따르면 최근 6년간 (2017년 ~ 2022년) 68,212건의 건축허가(신축, 대수선, 용도변경)가 발생하였음에도 전체건물 수는 약 3만여동 이



* X-axis: GHG emissions per unit area; Y-axis: number of buildings (1,000)
Fig. 1. Histogram of the distribution of all buildings

Table 2. Descriptive statistics of analysis dataset

Classification	N	Total area (1,000 m ²)	Annual GHG emissions (1,000 tCO ₂ eq)	Annual GHG emissions per unit area (tCO ₂ eq/m ²)				
				Min	Max	Mean	Median	Standard deviation
Raw data	560,984	609,841	41,937	0.000	164.159	0.102	0.058	3.751
1st processed dataset	555,634	580,680	28,058	0.001	1.180	0.071	0.058	0.066
Final dataset	413,479	376,884	20,134	0.001	1.163	0.069	0.059	0.055

상 감소하였다(Seoul Metropolitan City, 2023b). 또한 1차 분석데이터 셋에는 COVID-19 등으로 인해 발생한 휴업 또는 알 수 없는 이유로 인한 미계측 데이터 등이 포함되어 있다. 따라서 최종 분석데이터 셋은 1차 분석데이터 셋에서 COVID-19 이후 기간에도 지속적으로 에너지 소비가 발생하여 72개월간(2017년 1월 ~ 2022년 12월) 에너지 소비 데이터의 결측이 1개월도 발생하지 않은 건물을 대상으로 하였다.

최종적으로 건축물대장 상 누락으로 건물 용도를 파악할 수 없는 데이터(3,305동)를 제외한 최종 분석데이터 셋은 총 413,479개이다.

3.2. 분석자료 검증

Table 3은 구축된 건물 온실가스 배출량 분석자료의 유효성 검증을 위해 서울시 온실가스 인벤토리 보고서(Seoul Metropolitan City, 2022)의 건물부문 온실가스 배출량과 비교한 결과이다. 스크리닝 된 1차 분석데이터 셋의 배출 총량은 공식 인벤토리 대비 약 87.0% ~ 88.8% 수준을 보였다. 데이터 스크리닝 과정 외에 발생한 오차의 주요 원인으로서는 데이터 수집 방법의 차이, 원천 데이터 자체의 오류, 건축물 대장과 에너지 사용량 데이터 사이의 비매칭 등에서 발생한 것으로 판단된다. 또한 온실가스 인벤토리에는 석유제품과 석탄 소비로 인한 온실가스 배출량도 포함되어 있는데, 이 연구에서 구축한 DB에는 자료의 한계로 이들 에너지로 인한 온실가스 배출량이 포함되어 있지 않다. 온실가스 인벤토리는 개별 에너지 서비스 업체의 연간 에너지 서비스량 통계를 바탕으로 하향식(Top-down) 방법을 통해 산정되며, 연구의 분석자료는 개별 건물의 월별 에너지 사용량 계측치를 통한 상향식(Bottom-up)방법을 통해 산정되었다. 원데이터의 정확도 확보는 국토교통부와 에너지 공급자간의 긴밀한 협조가 필요하기 때문에 현실적으로 현재 수준 이상의 정확도

확보는 어렵다. 현재 활용 가능한 개별 건물 에너지 사용량 데이터의 한계를 고려하면 분석결과의 연구 활용도는 충분하다고 판단된다.

3.3. 건물 용도별 온실가스 배출 원단위 산정

국토교통부는 건물의 사용 목적 및 규모에 따라 「건축법」 시행령 [별표 1]에 의거하여 Table 4와 같이 건물 용도를 29개 시설군으로 구분하고 있다. 건물 용도별 단위면적당 평균 온실가스 배출량을 산정하는 방식은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 유형별 전체 건물의 총 온실가스 배출량을 유형별 전체 건물의 연면적의 총합으로 나누는 가중평균 방식의 식 (1)과 분석대상 개별 건물의 단위면적당 온실가스 배출량을 산정하고 용도별 건물의 단위면적당 배출량의 평균값을 산정하는 단순평균 방식의 식 (2)이다.

$$\frac{\sum_i^N GHG_{i,j}}{\sum_i^N GFA_{i,j}} \tag{1}$$

$$\frac{\sum_i^N (GHG_{i,j} / GFA_{i,j})}{N_j} \tag{2}$$

$GHG_{i,j}$: 유형 j에 속한 건물 i의 온실가스 배출량 (tCO₂eq)

$GFA_{i,j}$: 유형 j에 속한 건물 i의 연면적(m²)

N_j : 유형 j의 총 건물 수

가중평균 방식은 상대적으로 면적이 넓은 중대형 건물의 가중치가 높게 반영되고 단순평균 방식은 건물 수가 많은 소규모 건물의 가중치가 높게 반영되는 경향을 보인다. 서울시의 중대형 건물(연면적 3천m² 이상) 수는 전체 건물의 약 5% 수준이지만(Hwang et al., 2021), 전체 건물 온실가스의 47%를 배출하고 있으며, 뉴욕시나 도쿄 등 해외 주요 도시도 소수의 대형 건물이 건물 온실가스 배출 비중이 높은 비중을 차지하고 있다(Hwang and Back, 2020). 따라서 중대형 건물의 가중치가 높게 반영되는 가중평균 방식의 평균 산정 방식에 따라 건물 유형별 단위 면적당 온실가스 배출량을 계산하였다.

Table 3. Comparing GHG emissions between analytical data and GHG inventory data

unit: 1,000 tCO ₂ eq			
Classification	2017	2018	2019
Seoul Metropolitan City GHG Inventory Data	31,851.0	32,368.0	31,591.0
Analytical data	27,718.6	28,751.5	27,702.5
Ratio (%)	87.0%	88.8%	87.7%

4. 분석 결과 및 해석

4.1. 유형별 온실가스 배출 원단위

Table 4와 Fig. 2는 1차 분석데이터 셋을 통해 산정된 2017년 ~ 2019년의 연평균 단위면적당 온실가스 배출량

이다. 전체 건물의 단위면적당 온실가스 배출량은 0.048 tCO₂eq/m²이다. 가장 건물 수가 많은 단독주택은 0.063 tCO₂eq/m²로 전체 평균에 비해 약 29.4% 높은 온실가스 배출량을 보였다. 두 번째로 건물수가 많지만, 상대적으로 대규모 건물 위주의 공동주택은 0.032 tCO₂eq/m²로 단독 주택의 절반 수준의 단위면적당 온실가스 배출량을 보였

Table 4. GHG emissions per unit area by building purpose for the three-year average before COVID-19 (2017 ~ 2019)

Building purpose		N	Total area (1,000 m ²)	Total GHG emissions (1,000 tCO ₂ eq)	GHG emissions per unit area (tCO ₂ eq/m ²)
Total		555,634	580,680	28,058	0.048
Residential buildings		408,554	344,453	12,700	0.037
	Detached houses	279,798	57,687	3,606	0.063
	Multi-family housing	128,756	286,766	9,094	0.032
		147,080	236,227	15,357	0.065
	Type 1 Neighborhood living	54,716	30,053	2,453	0.082
	Type 2 Neighborhood living	53,256	34,660	2,693	0.078
	Sales	841	11,281	906	0.080
	Business	8,613	62,033	3,746	0.060
	Educational and Research	6,666	29,094	1,380	0.047
	Child and Elderly Care	3,242	4,292	188	0.044
	Cultural and Assembly	1,032	3,495	226	0.065
	Automotive	1,272	3,156	141	0.045
	Warehouses	975	1,313	63	0.048
	Lodging	2,084	6,792	629	0.093
	Factories	2,203	12,443	803	0.065
	Storage and Disposal of hazardous substance	607	247	23	0.095
Commercial buildings	Medical	710	4,807	592	0.123
	Religious	2,733	5,482	175	0.032
	Tourist and Recreation	120	53	6	0.111
	Amusement	167	153	18	0.116
	Broadcasting and Communication	91	1,157	299	0.258
	Correctional and Military	387	1,094	27	0.024
	Sports	307	1,207	94	0.078
	Animals and Plants related	54	12	0	0.033
	Training	51	146	11	0.076
	Cemetery related	11	23	4	0.161
	Resource recycling	9	48	1	0.019
	Funeral	4	7	1	0.078
	Campsite	2	0	0	0.040
	Transportation	245	1,482	101	0.068
	(Unknown purpose)	6,682	21,695	777	0.036

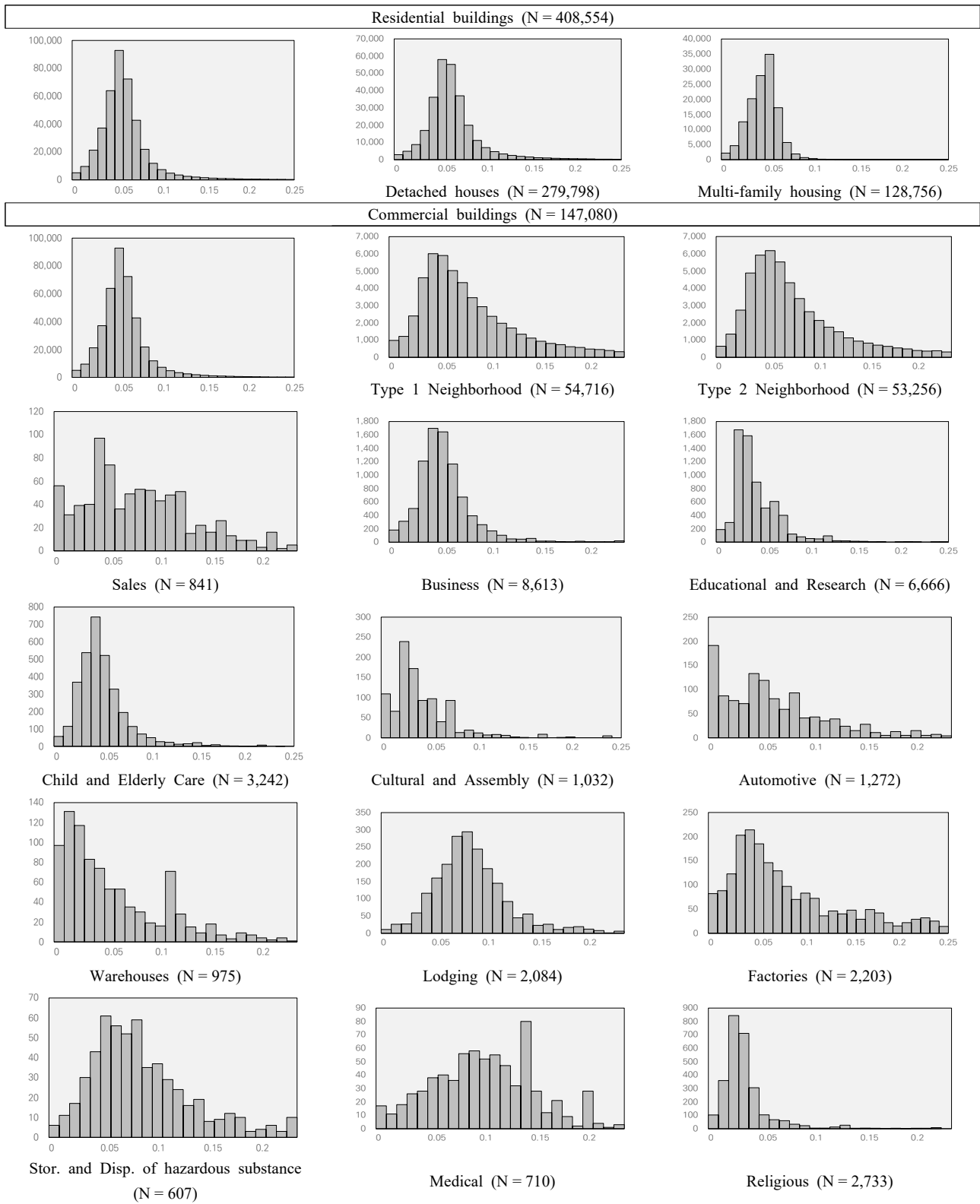


Fig. 2. Distribution of GHG emissions per unit area by building purpose (2017 ~ 2019)

다. 공동주택은 전체 용도 중에서도 자원순환관련시설 및 교정및군사시설 다음으로 낮은 온실가스 원단위를 보인다. 자원순환관련시설은 표본 수가 매우 적고(9동), 교정및군사시설은 그 특성상 에너지 소비가 제한된다고 보았을 때, 실질적으로 온실가스 배출 원단위가 가장 낮은 건

물 용도로 볼 수 있다. 방송통신시설, 묘지관련시설, 의료시설, 위락시설, 관광휴게시설 등은 단위면적당 온실가스 배출량이 0.010 tCO₂eq/m² 이상으로 매우 높았다. 위 시설들은 공통적으로 에너지 소비량이 큰 설비들이 설치되어 있고 지속적으로 시설을 사용해야 하는 특성이 있다.

Table 5. Changes in GHG emissions by building purpose before and after the COVID-19

Building purpose	Buildings		Annual average emissions before COVID-19 (1,000 tCO ₂ eq)	Annual average emissions after COVID-19 (1,000 tCO ₂ eq) ^{c)}			
	# of target building ^{a)} (N)	Ratio ^{b)} (%)		Average (2020 ~ 2022)	2020	2021	2022
Total	413,479	75.3	19,425	19,134 (98.5)	18,830 (96.9)	19,134 (98.5)	19,438 (100.1)
Residential buildings	332,373	81.4	9,837	9,947 (101.1)	9,843 (100.1)	9,982 (101.5)	10,016 (101.8)
Detached houses	222,970	79.7	2,998	2,989 (99.7)	2,952 (98.5)	2,995 (99.9)	3,022 (100.8)
Multi-family housing	109,403	85.0	6,839	6,958 (101.7)	6,891 (100.8)	6,987 (102.2)	6,995 (102.3)
Commercial buildings	81,106	57.8	9,588	9,187 (95.8)	8,987 (93.7)	9,153 (95.5)	9,422 (98.3)
Type 1 Neighborhood living	30,242	55.3	1,549	1,461 (94.3)	1,447 (93.4)	1,446 (93.4)	1,488 (96.1)
Type 2 Neighborhood living	32,184	60.4	1,838	1,730 (94.1)	1,714 (93.3)	1,703 (92.7)	1,773 (96.5)
Sales	418	49.7	651	594 (91.2)	587 (90.2)	590 (90.6)	604 (92.9)
Business	5,869	68.1	2,771	2,715 (98.0)	2,659 (96.0)	2,723 (98.3)	2,762 (99.7)
Educational and Research	4,065	61.0	728	666 (91.5)	623 (85.6)	668 (91.9)	707 (97.1)
Child and Elderly Care	2,389	73.7	138	125 (90.7)	121 (87.8)	126 (91.1)	129 (93.3)
Cultural and Assembly	505	48.9	75	61 (82.2)	58 (77.5)	60 (79.7)	67 (89.4)
Automotive	317	24.9	65	66 (102.2)	63 (97.9)	66 (102.9)	68 (105.9)
Warehouses	175	17.9	35	38 (107.2)	36 (102.5)	38 (108.3)	39 (110.6)
Lodging	1,389	66.7	329	301 (91.6)	281 (85.4)	297 (90.4)	325 (98.9)
Factories	533	24.2	538	542 (100.7)	528 (98.2)	543 (101.0)	553 (102.9)
Stor. and Disp. of hazardous substance	113	18.6	6	5 (95.0)	5 (93.1)	5 (95.5)	5 (96.4)
Medical	512	72.1	424	435 (102.6)	423 (99.8)	441 (103.9)	441 (104.1)
Religious	1,983	72.6	136	118 (86.2)	111 (81.7)	115 (84.3)	126 (92.4)
Others ^{d)}	412	28.5	307	331 (107.9)	329 (107.4)	331 (107.8)	333 (108.6)

a) The final dataset used for COVID-19 impact analysis, consisting of buildings with continuous energy consumption over 72 months from 2017 to 2022

b) The ratio of buildings included in the analysis to the total number of buildings with energy consumption over the 36 months from 2017 to 2019

c) The percentage relative to the before COVID-19 annual average emission inside the parentheses (before COVID-19 annual average emission = 100)

d) N ≤ 500 units each building purpose

4.2. COVID-19 영향 분석

코로나19에 의한 온실가스 배출량 변화 분석은 6년(72개월)간 연속으로 에너지 사용량이 발생한 건물만을 대상으로 하였다. Table 5와 같이 에너지를 사용하지 않은 월이 없는 건물은 앞서 건물 재유형화를 위해 분석된 데이터셋의 75.3%였다. 이 건물들은 코로나19 기간 동안에도 리모델링, 휴·폐업, 대수선 등의 특정 이벤트가 없이 지속적으로 건물이 이용됐다는 의미이다. 따라서 해당 건물의 데이터 분석 결과는 코로나 19로 인한 근무형태와 생활양식 등 행태 변화가 건물 온실가스 배출에 어떤 영향을 미

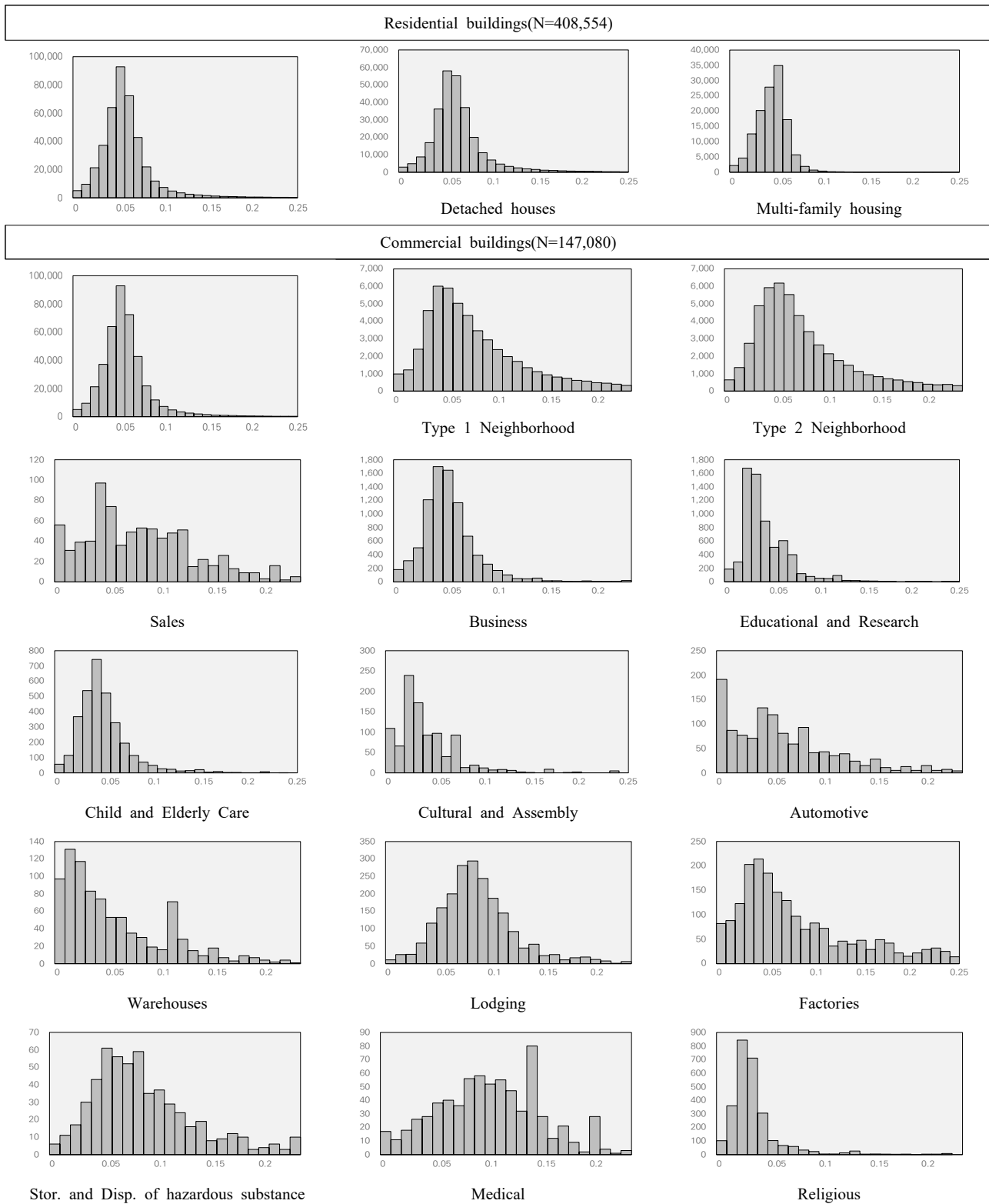
쳤는지 직접적으로 나타내는 지표가 될 수 있다.

Table 6과 Fig. 3은 분석된 배출량을 단위면적당 배출량으로 환산한 결과이다. 분석 대상 기간동안 지속적으로 이용된 건물에서 코로나19 유행 이전 3개년 동안 배출된 단위면적당 온실가스는 연평균 0.052 tCO₂eq/m²였다. 코로나 19가 유행함에 따라 사회적 거리두기가 시행되며 사회경제활동에 많은 제약이 따랐다. 이에 따라 사회경제활동에 영향을 받는 대부분의 상업용 건물에서 전반적으로 에너지 사용이 줄어들며 온실가스 배출량이 감소하였다. 2021년은 코로나 19 확산세 둔화와 길어진 거리두기 조치에 따른 피로감으로 인해 자율과 책임 기반의 방역 조치

Table 6. Changes in GHG emissions per unit area before and after COVID-19

Building purpose	(A) Average for the 3 years before COVID-19 (2017 ~ 2019)	2020		2021		2022	
		Emissions per unit area	Change compared to (A)	Emissions per unit area	Change compared to (A)	Emissions per unit area	Change compared to (A)
Total	0.052	0.050	-0.002	0.051	-0.001	0.052	0.000
Residential buildings	0.042	0.042	0.000	0.042	0.001	0.042	0.001
Detached houses	0.063	0.062	-0.001	0.063	0.000	0.064	0.000
Multi-family housing	0.036	0.037	0.000	0.037	0.001	0.037	0.001
Commercial buildings	0.068	0.064	-0.004	0.065	-0.003	0.067	-0.001
Type 1 Neighborhood living	0.084	0.079	-0.006	0.079	-0.006	0.081	-0.003
Type 2 Neighborhood living	0.081	0.076	-0.005	0.075	-0.006	0.078	-0.003
Sales	0.080	0.072	-0.008	0.072	-0.007	0.074	-0.006
Business	0.061	0.059	-0.002	0.060	-0.001	0.061	0.000
Educational and Research	0.043	0.037	-0.006	0.039	-0.003	0.042	-0.001
Child and Elderly Care	0.046	0.040	-0.006	0.042	-0.004	0.043	-0.003
Cultural and Assembly	0.051	0.040	-0.012	0.041	-0.010	0.046	-0.005
Automotive	0.046	0.045	-0.001	0.047	0.001	0.049	0.003
Warehouses	0.045	0.047	0.001	0.049	0.004	0.050	0.005
Lodging	0.084	0.072	-0.012	0.076	-0.008	0.083	-0.001
Factories	0.061	0.060	-0.001	0.062	0.001	0.063	0.002
Stor. and Disp. of hazardous substance	0.111	0.103	-0.008	0.106	-0.005	0.107	-0.004
Medical	0.130	0.130	0.000	0.135	0.005	0.136	0.005
Religious	0.031	0.026	-0.006	0.026	-0.005	0.029	-0.002
Others ^{a)}	0.128	0.139	0.011	0.141	0.012	0.141	0.012

* a) N ≤ 500 units each building purpose



※ X-axis: GHG emissions per unit area; Y-axis: number of buildings

Fig. 3. Distribution of GHG emissions per unit area by building purpose (2017 ~ 2019)

로 완화되었다. 2020년에 비해 1.6%p 온실가스 배출량은 증가하였으나, 코로나 19 이전에 비해서는 온실가스 배출량이 적었다. 2022년은 단계적 거리두기 완화를 거쳐 사회적 거리두기가 전면 해제되었다. 건물온실가스 배출량도 코로나 19 이전 수준으로 기록하며 2021년과 2022년의 온실가스 배출량 감소가 거리두기 조치로 인한 일시적

인 효과였음을 보여준다.

건물 유형별로 보면, 집합금지, 영업시간 제한 등 방역 조치에 따라 직접적으로 건물 이용을 제한받은 근생판매 시설, 위락시설 등은 COVID-19 유행 이후 배출량이 크게 감소한 후, 제한 조치들이 대부분 해제된 2022년에 배출량이 상승하는 모습을 보였다. 소상공인 중심의 근생판매

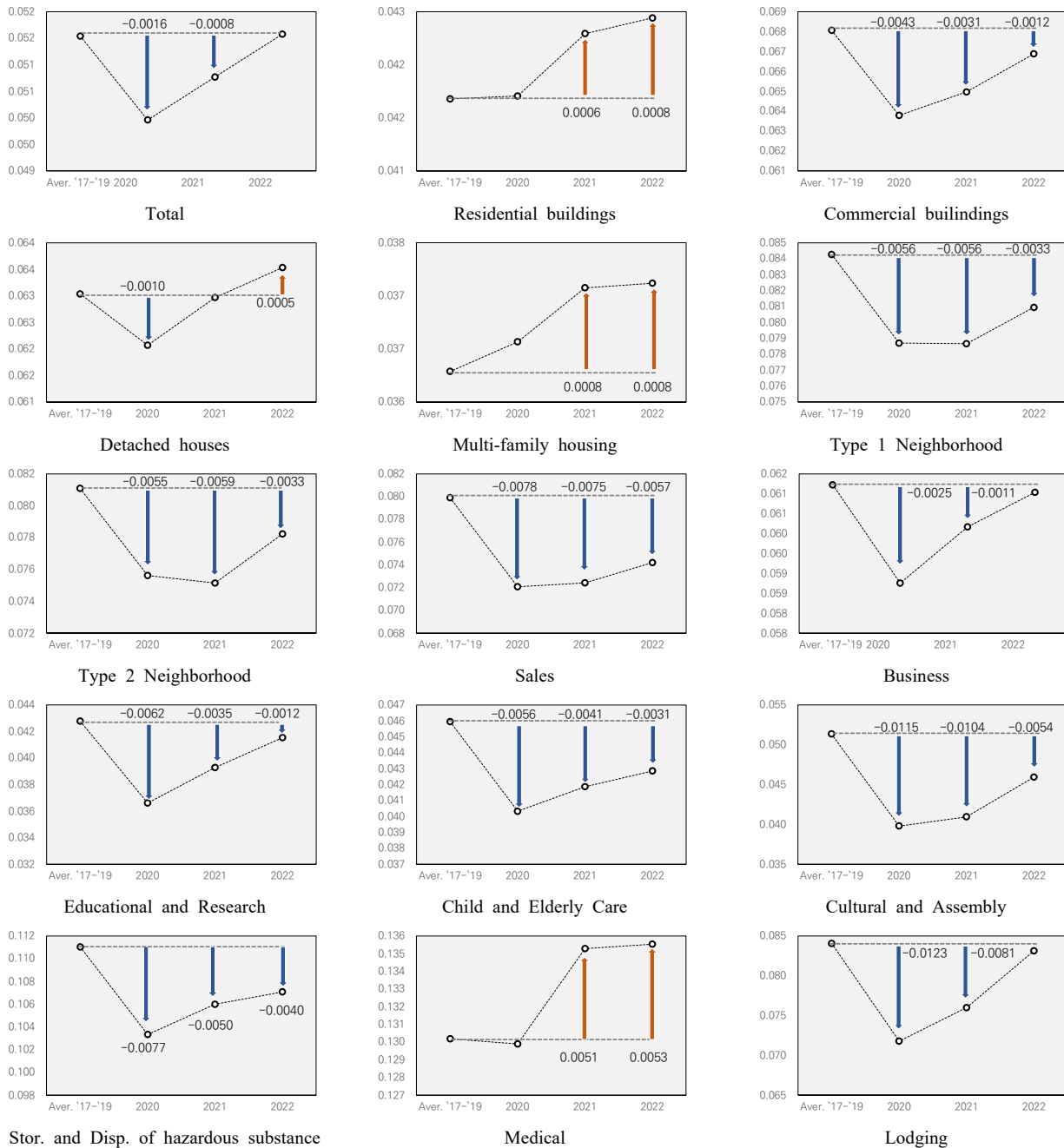


Fig. 4. Changes in GHG emissions per unit area by building purpose before and after COVID-19

시설은 비주거용 건물 중 가장 많은 건물 수 비중을 차지한다. 이 중 57.8%의 건물만이 COVID-19 유행 기간동안에도 매달 에너지를 소비하였고, 위탁시설은 24.7%만이 지속적으로 영업한 것으로 나타났다.

전면 휴관, 비대면 수업, 긴급돌봄 등으로 제한적인 운영만 가능했던 교육복지 시설은 운영 범위 조정을 통해 정상화를 위한 정책이 도입되기 시작하면서 2021년부터 에너지 소비량이 늘어 2022년에는 다시 COVID-19 이전 수준으로 온실가스를 배출하였다. 마찬가지로 재택근무 등을 통해 건물 이용자가 줄어 온실가스 배출량이 줄어들었던 업무시설도 2021년부터는 다시 배출량이 증가해 COVID-19 이전 수준의 배출량을 보이고 있다.

의료시설은 시설 특성상 다른 시설들과는 다르게 COVID-19가 유행하기 시작한 2020년에도 배출량에 큰 변화는 없는 것으로 나타났다. 대유행 등으로 병상부족 등을 겪었던 2021년부터는 다른 유형 건물들과는 반대로 온실가스 배출량이 증가하는 경향을 보였다.

외부 활동이 줄어들며 주거용 건물의 온실가스 배출량은 증가하고 있다. 단독주택은 큰 변화가 없으나, 공동주택의 경우 꾸준히 배출량이 증가하고 있다. COVID-19 기간 동안 활성화 된 디지털 및 온라인 기술 이용이 COVID-19 이후에도 지속적으로 유지되고 있기 때문인 것으로 추정된다.

그 외 공장, 자동차 및 창고, 기타 시설들은 COVID-19 유행 시기에 건물 온실가스 배출량이 증가한 것으로 나타났다. 이러한 유형의 건물들은 COVID-19 유행 시기동안 기존 건물의 30% 미만만이 운영을 지속하였고, 그 표본수도 적었다. COVID-19에 큰 영향을 받지 않거나 해당 시기동안 수요가 증가한 업종들을 중심으로 운영된 것이 반영된 결과일 것으로 추정된다.

이번 연구를 통해 COVID-19 유행 전후 기간의 분석을 통해 COVID-19가 건물 온실가스 배출에 미치는 영향을 실증적으로 알아보고자 하였다. 분석기간 내 연속적으로 에너지를 사용한 건물만을 대상으로 하였기 때문에, 건물 에너지 효율화의 큰 축 중 하나인 건물 이용 행태변화에 따른 영향을 중심으로 분석된 결과로 볼 수 있다.

COVID-19 유행 전 서울시 전체 비주거용 건물 온실가스 배출량의 80.0%를 차지하던 주요 건물유형인 근생판매 시설, 업무시설, 교육복지시설의 온실가스 배출량이 2020년에는 COVID-19 유행 전 대비 각각 7.2%, 4.0%, 14.0%가 감축되었다. 이에 따라 서울시 전체 건물의 온실가스 배출량도 일시적으로 96.9%까지 감소하였으나, 대부분의

거리두기 조치가 해제된 2022년부터는 다시 이전의 온실가스 배출량을 기록하는 것으로 나타났다. 이는 사회경제 활동이 빠르게 회복되면서 건물부문에서의 온실가스 배출량도 이전 수준을 빠르게 회복했음을 의미한다.

전체 건물의 약 75.3%가 COVID-19 기간에도 지속적으로 이용된 것으로 나타났고, 이는 나머지 24.7%가 휴업이나 폐업, 대수선 등을 겪었을 가능성이 높다는 의미이다. 공장이나 자동차 및 창고 시설, 의료시설의 분석결과에서 볼 수 있듯이 일부 시설은 상대적으로 COVID-19라는 특수한 상황에 영향을 덜 받거나 반대로 수요가 늘어나는 일부 업종도 있을 수 있다.

주거부문의 온실가스 배출량은 COVID-19 유행기간 동안 크게 증가하였다. 거리두기 해제 이후 활동이 늘어나며 비주거부문 건물 온실가스 배출량이 COVID-19 이전과 유사한 수준으로 회복되었음에도 주거부문에서는 지속적으로 온실가스 배출량이 상승하는 것으로 분석되었다. 이는 COVID-19 유행기간 동안 확산된 비대면 서비스, 재택근무 등과 문화·예술·교육 분야 등의 디지털 전환 COVID-19 유행기간 이후에도 지속적으로 확대되고 있는 것에서 기인한 것으로 추정된다. 다만, 같은 주거용 건물이라도 단독주택과 공동주택의 온실가스 배출 변화 형태가 서로 다르게 나타나기 때문에 이에 대한 추가적인 분석 등이 필요하다.

5. 결론

탄소중립 달성은 피할 수 없는 국제적인 추세이고, 우리나라 정부 및 서울시는도 적극적으로 이에 동참하고 있다. 특히, 건물의 온실가스 배출 기여가 높은 서울시는 건물에서의 온실가스 감축이 매우 중요하다. 건물 부문 온실가스 감축 목표 달성을 위해서는 에너지효율 개선, 에너지 자립률 개선, 전력배출계수 개선 등과 함께 건물 이용자의 행태개선이 반드시 함께 이루어져야 한다. COVID-19에 따른 집합금지 및 거리두기 조치들은 일시적으로 건물이용의 행태변화를 가져왔다. 특수한 상황에 따른 극단적인 제한 조치는 일부 용도의 건물에 있어 건물이용 행태 변화로 유도할 수 있는 최대한의 감축률을 확인할 수 있는 계기가 되었다. 이에 이 연구에서는 COVID-19 전후 단위면적당 건물 온실가스 배출량 변화 비교를 통해 건물 이용자의 행태변화가 온실가스 배출 감축에 얼마나 영향을 미쳤는지 분석해보고자 하였다. 이 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫 번째로, COVID-19에 따른 거리두기 조치 등은 건물 이용 행태변화를 가져왔고, 이러한 행태변화는 건물 용도 별로 편차는 있으나 전체의 약 3%가량의 온실가스 감축 효과를 가져오는 것으로 나타났다. 집합금지, 영업 시간 제한 등에 따라 상업용 건물 온실가스 배출량의 80% 이상을 차지하는 근생시설(6.6%), 판매시설(9.8%), 업무시설(4.0%), 교육시설(14.4%), 노유자시설(12.2%)의 온실가스 배출이 모두 줄어들었다. 배출량 비중이 높지는 않지만 문화 및 집회시설(22.5%), 숙박시설(15.6%), 위락시설(24.9%), 종교시설(18.3%) 등은 배출량이 큰 쪽으로 감소하였다. 그러나 이는 COVID-19라는 특수한 상황에 따른 일시적이고 강력한 조치에 의해 발생한 효과로 거리두기 조치의 점진적 완화에 따라 단위면적당 온실가스 배출량은 COVID-19 이전 수준으로 회복되는 모습을 보였다.

두 번째로는 상대적으로 체류시간이 길어진 주거용 건물의 단위면적당 온실가스 배출량은 증가하였고, 이렇게 변화한 온실가스 배출량은 거리두기 등이 해제되어도 다시 이전 수준으로 돌아오지 않았다. COVID-19에 의해 변화된 주거 환경이 COVID-19 종식 후에도 체류시간과 관계없이 영향을 끼치고 있음을 의미한다.

이 연구를 통해 건물 이용 행태개선을 통한 온실가스 배출량 감축의 한계점을 전반적으로 확인할 수 있었다. 특수한 상황에 기댄 강한 강제력을 바탕으로 한 건물 이용의 행태 개선으로는 상업용 건물 배출량의 약 6% 가량의 일시적인 감축효과만을 가져오며, 주거용 건물의 온실가스 배출량은 반대로 증가하였다. 한번 증가한 온실가스 배출량은 특별한 계기 없이 감축을 유도하기 어려우며, 강한 강제력의 제도 추진은 피로감과 보복 심리로 인해 이후 더 큰 온실가스 배출로 이어진다. 앞선 Kim and Seol (2021)의 연구결과와 뉴욕시의 건물 온실가스 총량제 유사 제도 계획 발표에 따른 배출 저감효과등을 보았을 때, 서울시는 제도 추진 전 적극적인 제도 홍보를 통한 시장 신호가 필수적이라 할 수 있다.

서울시의 분석 대상 주거용 건물과 상업용 건물의 온실가스 배출량은 유사한 수준이다. 이는 비주거용 건물의 행태 개선 유도만으로는 그 한계가 분명하며 강제적인 이행이 어려운 주거용 건물의 행태 개선 유도가 반드시 따라야 함을 의미한다. 최근 신축되었거나 리모델링 등이 이루어진 주거용 건물은 건물 성능 개선을 기대하기 어렵다. 이러한 건물들의 행태 개선을 이를 방안 마련이 필요하다.

한편, COVID-19 유행 직후, 문화시설의 전면 휴관 및

집합 금지 등으로 야외활동이 극히 제한되고 재택근무 및 비대면 수업, 긴급돌봄 등으로 실내활동이 늘어난 것에 반해, 주거용 건물의 온실가스 배출량은 큰 변화가 없었다. 또한 단독주택은 반대로 조금이나마 온실가스 배출량이 감소하는 경향을 보였다. 행태개선에 따른 비주거용 건물의 온실가스 배출량 감축의 주거용 건물 온실가스 배출량 상쇄 영향에 대한 요인 파악을 위한 별도의 분석이 필요할 것으로 생각된다. 향후 이 연구의 결과를 바탕으로 분석에 적합한 특정 지역을 선정하고, 시간단위 데이터 비교 분석을 통해 행태 변화 주요 요인의 실증이 가능할 것으로 기대된다.

또한 이번 연구에서는 건물 이용자 수, 매출액, 영업시간 등 실질적인 이용객 행태와 관련된 자료를 수집하여 건물 온실가스 배출량과의 구체적 상관관계 등 정밀한 이용객 행태 분석을 포함하지는 못하였다. 이는 이 연구가 COVID-19에 의한 포괄적인 행태변화가 건물 온실가스 배출변화에 실제 어느 정도 영향을 주는지 실증 제시를 위한 연구이기 때문이다. 건물 이용자 수, 매출액, 영업시간 등 세부 정보를 바탕으로 한 건물 온실가스 배출원단위 변화 등에 대한 연구는 향후 연구과제로 남긴다.

사사

본 논문은 2023년도 서울시의 지원으로 서울연구원에서 수행 중인 “건물 온실가스 총량제 제도설계 용역” 연구를 수정·보완하였습니다.

References

- Bahmanyar A, Estebansari A, Ernst D. 2020. The impact of different COVID-19 containment measures on electricity consumption in Europe. *Energy Res Social Sci* 68: 101683. doi: 10.1016/j.erss.2020.101683
- Cai K, Sun C, Wang H, Song Q, Wang C, Wang P. 2022. The potential challenge for the effective GHG emissions mitigation of urban energy consumption: A case study of Macau. *Environ Impact Assess Rev* 93: 106717. doi: 10.1016/j.eiar.2021.106717
- Cellura M, Cusenza MA, Longo S. 2018. Energy-related GHG emissions balances: IPCC versus LCA. *Sci Total Environ* 628-629: 1328-1339. doi: 10.1016/j.scitotenv.

- 2018.02.145
- Cho JK, Lee YJ. 2020. A study on the institutionalization of energy efficient operation and maintenance program for existing buildings (in Korean with English abstract). *J Korean Sol Energy Soc* 40(3): 33-42. doi: 10.7836/kses.2020.40.3.033
- Choi MS, Oh SY, Ji CY, Lee DY. 2017. An analysis of residential building energy consumption using building energy integrated database - Focused on building uses, regions, scale and the year of construction completion - (in Korean with English abstract). *J Real Estate Anal* 3(1): 101-118. doi: 10.30902/jrea.2017.3.1.101
- Cortiços ND, Duarte CC. 2022. Energy efficiency in large office buildings post-COVID-19 in Europe's top five economies. *Energy Sustain Dev* 68: 410-424. doi: 10.1016/j.esd.2022.04.006
- Dabas C. 2020. European power demand falls below five-year average amid Covid-19 outbreak; [accessed 2023 Sep 14]. <https://www.energylivenews.com/2020/04/17/european-power-demand-falls-below-five-year-average-amid-covid-19-outbreak/>
- Even-Levi TH, Kissinger M. 2023. An integrated urban neighbourhood GHG mitigation analysis as a means to advance urban climate management. *Habitat Int* 131: 102716. doi: 10.1016/j.habitatint.2022.102716
- Geraldi MS, Bavaresco MV, Triana MA, Melo AP, Lamberts R. 2021. Addressing the impact of COVID-19 lockdown on energy use in municipal buildings: A case study in Florianópolis, Brazil. *Sustain Cities Soc* 69: 102823. doi: 10.1016/j.scs.2021.102823
- GIR (Greenhouse gas Inventory and Research center). 2023. 2022 National GHGs inventory report. Sejong, Korea: Ministry of Environment. National Statistics 115018.
- Hwang IC, Baek JR. 2020. Market mechanisms for addressing climate change and air pollution in Seoul. Seoul, Korea: The Seoul Institute. Policy Report 2020-PR-08.
- Hwang IC, Kim KD, Baek JR, Nam HJ. 2021. Greenhouse gas total emission regulation of building. Seoul, Korea: Seoul Metropolitan Government. Academic Research Report.
- IEA (International Energy Agency). 2020. Global energy review 2020: The impacts of the Covid-19 crisis on global energy demand and CO2 emissions; <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020>
- IEA (International Energy Agency). 2021. Covid-19 impact on electricity: Updated through the end of 2020; <https://www.iea.org/reports/covid-19-impact-on-electricity>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: Author. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- Jeon ED. 2017. A study on the greenhouse gas emission characteristic analysis for revitalizing the emission trading system in building sector: Focusing on index decomposition analysis of the greenhouse gas inventory [dissertation]. Namseoul University.
- Jeong YS, Kim TH. 2019. Estimation and feature of greenhouse gas emission in building sector by national energy statistic (in Korean with English abstract). *J Archit Inst Korea Struct Constr* 35(7): 187-195. doi: 10.5659/JAIK_SC.2019.35.7.187
- Ji CY, Choi MS, Shin SE, Oh SY. 2017. The development and application of method for validating the data reliability of national building energy integrated database (in Korean with English abstract). *J Real Estate Anal* 3(2): 57-75. doi: 10.30902/jrea.2017.3.2.57
- Ji CY, Choi MS, Gwon OI, Jung HR, Shin SE. 2020. Greenhouse gas emissions from building sector based on national building energy database (in Korean with English abstract). *J Archit Inst Korea Struct Constr* 36(4): 143-152. doi: 10.5659/JAIK_SC.2020.36.4.143
- Kang HA, An JB, Kim HP, Ji CY, Hong TH, Lee SH. 2021. Changes in energy consumption according to building use type under COVID-19 pandemic in South Korea. *Renew Sustain Energy Rev* 148: 111294. doi: 10.1016/j.rser.2021.111294
- Kim DK, Lee JH, Park HS, Lee JB, Jung JS. 2013.

- Calculation and analysis of GHG emissions from building by analysis of energy consumption survey. *J Energy Clim Chang* 8(1): 30-44.
- Kim HH, Seol Y. 2021. Effects of government policy news on house prices in Korea (in Korean with English abstract). *Financ Stab Stud* 22(1): 259-292. doi: 10.26588/kdic.2021.22.1.007
- Kim SI, Lee SJ, 2021. Analysis of the impact of COVID-19 on South Korea's power supply. Ulsan, Korea: Korea Energy Economics Institute. Policy Research Paper 2021-03.
- Leahy T. 2022. London and Paris offices: Green premium emerges; [accessed 2023 Sep 13]. <https://www.msci.com/www/quick-take/london-and-paris-offices-green/03510893060>
- Lee SH. 2010. A study on the logical error types of building book attribute information (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Cadastre* 26(1): 145-161.
- MOTIE (Ministry of Trade, Industry and Energy). 2021. K-ESG Guidelines v1.0. Sejong, Korea: Author.
- NYC Buildings. 2023. Local law 97: Methodology for converting emissions limits from occupancy groups to energy star property types for 2024-2029 compliance period. New York, NY: Author.
- Seoul Metropolitan City. 2021. 2050 Seoul climate action plan. Seoul, Korea: Author.
- Seoul Metropolitan City. 2022. 2020 Seoul GHGs inventory report. Seoul, Korea: Author.
- Seoul Metropolitan City. 2023a. Energy information in Seoul; [accessed 2023 Dec 14]. <https://energyinfo.seoul.go.kr/energy/buildSaverate?menu-id=Z040300>
- Seoul Metropolitan City. 2023b. Statistics data of Seoul; [accessed 2023 Dec 16]. <https://data.seoul.go.kr/dataList/235/S/2/datasetView.do>
- Son SW, Gil MS, Moon YS, Won HS. 2016. Anomaly detection of Hadoop log data using moving average and 3-sigma (in Korean with English abstract). *KIPS Trans Software Data Eng* 5(6): 283-288. doi: 10.3745/KTSDE.2016.5.6.283
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2022. 2022 NDC synthesis report; [accessed 2023 Sep 5]. <https://unfccc.int/ndc-synthesis-report-2022>
- Zhang X, Pellegrino F, Shen J, Copertaro B, Huang P, Saini PK, Lovati M. 2020. A preliminary simulation study about the impact of COVID-19 crisis on energy demand of a building mix at a district in Sweden. *Appl Energy* 280: 115954. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115954