

# 건축물 생애주기 내재탄소를 고려한 건물부문 온실가스 배출량 산정 개선방안 연구

이슬기\* · 이승일\*\*†

\*서울시립대학교 일반대학원 도시공학과 박사과정, \*\*서울시립대학교 도시공학과 교수

## Improvement of Greenhouse Gas Emissions Calculation Considering the Life Cycle of Embodied Carbon of Buildings

Lee, Seulki\* and Lee, Seungil\*\*†

\*Ph.D Student, Department of Urban Planning &amp; Design, University of Seoul, Korea

\*\*Professor, Department of Urban Planning &amp; Design, University of Seoul, Korea

### ABSTRACT

According to Korea's declaration of carbon-neutrality, it is necessary to prepare a method for analyzing greenhouse gas emissions from the perspective of national land planning and urban planning. The purpose of this study was to reconstruct a building's greenhouse gas inventory to allow analysis of greenhouse gas emissions on an urban scale. The research method was to propose an urban-scale inventory by identifying current national and local government inventory and analyzing prior related studies. The inventory presented in this study is intended to reflect embodied emissions in buildings based on the carbon footprint point of view when accounting for urban emissions in the recently published AR6 report. This newly proposed inventory included not only the emissions caused by energy consumption in the operation stage, but also emission of embodied carbon in the material, construction, maintenance, and disposal stages. This inventory is expected to be used in analysis of greenhouse gas emissions according to spatial changes by urban redevelopment.

*Key words: Greenhouse Gas Emission Inventory, Embodied Carbon Emissions, Spatial GHG Emissions, Carbon Footprint*

### 1. 서론

파리협정에서 금세기 말까지 지구 평균 기온 상승을 1.5℃ 아래로 제한하기 위해서는 2050년까지 전 세계 이산화탄소 배출 넷제로를 달성해야한다고 합의한 내용에 따라 탄소중립 달성을 서약한 국가의 수가 증가하고 있다. 우리나라도 2020년 12월 탄소중립 선언으로 2030년의 감축목표 상향과 2050년 탄소중립을 달성하기 위한 시나리오를 작성하였다. 현재 마련된 시나리오의 경우 top-down 방식으로 전환, 산업, 건물, 수송, 폐기물 등의 주요 업종 및 흡수원에 대한 국가 감축목표가 세워졌으며, 이를 이행하기 위해 각 관련 부처 및 기관들이 세부 이행계획을 세워야 하는 것은 필수적인 사항이 되었다.

IPCC 제5차, 제6차 WGIII(실무그룹) 평가보고서는(이하 AR5, AR6) 각각 정주지(human settlement), 도시 및 정주지(urban and other settlements)에 대해 기반시설 및 도시형태의 체계적인 전환을 통해 달성할 수 있는 도시의 온실가스 감축 잠재가능성을 언급하기 시작했다. AR5에 따르면, 전세계의 배출량은 도시지역이 증가함에 따라 영향을 받게 되어 있으며, 도시배출량은 각각 전세계 점유율의 약 62%(2015년), 67%~72%(2020년)로 추정되어, 도시에서의 감축 노력에 대한 요구가 더욱 확대될 것으로 보인다. 이에 따라 실질적으로 감축을 이행해야 하는 도시는 구체적인 감축 방안 마련을 위해 도시단위의 온실가스 감축 효과에 대한 분석이 가능해야 하며, 이와 관련된 공간계획, 도시계획의 연관성을 이해하고 정식화하는 과

†Corresponding author : [silee@uos.ac.kr](mailto:silee@uos.ac.kr) (163, Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul, 02504, Korea. Tel. +82-2-6490-5518)

ORCID 이슬기 0000-0003-4588-8528

이승일 0000-0002-1494-135X

정이 필요하다. 현재 국가 배출량은 1996 IPCC 가이드라인의 산정방법론을 기반으로 산업, 수송, 건물 등의 부문별 연료소비량과 연료별 배출계수를 곱하여 산정하고 있다. 이러한 배출량은 도시 관점에서 도시개발 또는 정비 등의 공간적 변화에 의한 결과이므로, 그에 따른 온실가스 배출 증감효과를 현재 산정방식으로 파악하는 것은 용이하지 않다. 최근(2022년 4월) 발표된 AR6에서는 도시의 배출량을 산정하기 위해 전체적인 물질의 흐름을 고려한 탄소발자국과 같은 배출량 회계 프레임워크 개념을 제시하기 시작하였다. 예를 들어 건물의 경우, 건축물의 전과정(Life Cycle)에 해당하는 자재생산, 시공, 유지관리, 폐기단계에서 발생하는 내재탄소배출량(Embodied carbon emissions)을 포함하는 것을 의미한다.

따라서 이 연구는 건축물의 운영단계에서 발생하는 에너지 사용에 따른 배출량 외 내재탄소배출량을 새롭게 반영하고자 했으며, 현재 국가 온실가스 인벤토리 산정방식 외 도시차원에서 실질적인 감축 대응이 가능하도록 온실가스 인벤토리 개선 방안과 향후 연구 방향을 제안하는데 목적이 있다. 도시는 모든 부문의 배출 활동을 포함하고 있으나, 이 연구의 범위는 도시 내 건물부문으로 한정하였다. 도시차원의 건물부문 인벤토리를 개선하기 위해 우선, 도시의 온실가스 배출량 산출을 위한 선행연구들을 조사하여 인벤토리 구성 및 산정방법론을 정리하고, 내재탄소배출량을 반영하기 위해, 건축물 내재탄소에 관한 선행연구자료를 종합적으로 고찰하여 도시차원의 해석을 통해 인벤토리의 반영범위를 설정하였다. 최종적으로 내재탄소배출량을 고려한 도시차원의 건물부문 온실가스 배출량 산정방법을 정의하고 시사점을 도출하였다.

## 2. 이론 및 선행연구 고찰

### 2.1. IPCC 온실가스 인벤토리 산정방법

우리나라의 국가 온실가스 인벤토리는 1996 IPCC 가이드라인을 기반으로 산정되었으며, 일부 IPCC 우수실행지침 2000, IPCC 우수실행지침 LULUCF, 2006 IPCC 가이드라인의 방법론을 적용하였다. 건물부문은 국가 인벤토리의 에너지 연료연소(1.A.4)에 해당하며 연료사용량에 대한 연료배출계수를 적용하여 배출량을 산정하고 있다. 지자체 인벤토리의 경우, 2006 IPCC 가이드라인을 기반으로 작성된 지자체 온실가스 배출량 산정지침을 준용한다. 이에 따르면 지자체의 배출원별 관리권한에 따라 Scope1, Scope2,

Scope3로 구분하여 인벤토리를 구성하고 그 의미는 다음과 같다. Scope1은 직접배출과 흡수량을 포함하고, Scope2는 에너지 간접배출량으로 전력, 열 사용에 대해 직접 생산하지는 않지만, 생산을 유도하는 소비가 일어나 이를 배출로 반영하여 포함한다. 마지막으로 Scope3의 경우는 그 밖의 간접배출량이나 물품의 생산, 사용, 처리과정에서 발생하는 배출을 포함하지만, 현재 지자체 배출량에 포함된 범위는 Scope1과 Scope2에 불과하다. 따라서 이 연구에서 추가하고자 하는 내재탄소배출과 관련된 Scope3의 개념이 포함된 인벤토리에 대한 연구는 부족한 상황이다.

### 2.2. 도시차원의 온실가스 배출량 산정 연구

앞서 국가 및 지자체 온실가스 인벤토리에 대한 내용을 확인한 결과 현재 도시차원의 공간적 해석이 가능한 배출량 산출방식에 대한 공식적인 인벤토리 구축 현황은 미미한 실정이다. 따라서 이 연구의 범위로 선정된 건물부문을 중점으로, 도시개발 및 정비 등의 공간적 해석이 가능한 도시차원의 온실가스 배출량 산출과 관련된 선행연구를 검토하였다. 특히 해외사례의 경우 최근 AR6 보고서 내용에 포함되어 있는 도시의 배출량 산출을 위해 제시한 프레임워크의 개념을 정의하고, 이에 따른 선행연구에 대해서도 살펴보았다.

Jung (2011), Kim et al.(2013), Choi et al.(2017), Lee (2017), Choi (2018) 등과 같은 기존 연구는 건물부문의 온실가스 배출량을 추정하기 위해 IPCC 가이드라인에 따라 건물부문의 활동자료인 에너지 사용량에 배출계수를 곱하여 산정하는 방식이었으나, 일부 연구에서는 도시단위, 도시계획, 도시공간에 따른 온실가스 배출량을 산정하기 위한 인벤토리 개선과 필요성을 언급하였다. 기존 국가 인벤토리 산정방법에 따라 건물 에너지사용량에 배출계수를 곱하는 방식 외 지자체 또는 도시단위 온실가스 배출량 산정을 위해 인벤토리를 개선한 선행연구로 Oh et al.(2011), Kim and Hwang (2015), Yu et al.(2019) 등을 살펴보도록 한다.

Oh et al.(2011)은 지리정보시스템을 활용하여 공간에 따른 탄소배출규모를 확인하였다. 이 연구에서는 토지이용에 따라 온실가스 배출 규모가 결정되기 때문에 탄소배출 인벤토리 구축 시 공간에 대한 정보가 고려되어야 한다고 판단했다. 따라서 지리정보시스템을 활용하여 대상지에 대한 공간정보와 속성정보를 연결하고, 토지이용별 온실가스 배출 원단위를 산정하였다. 공간정보는 건축물 대장과 지적도를 기초로 하여 구축하였고, 속성정보의 경

우 대상 도시의 에너지 사용량 자료를 IPCC 가이드라인 배출 산정식에 대입하여 배출량을 추정하였다. Kim and Hwang (2015)는 광주광역시를 대상으로 도시계획분야에 적합한 인벤토리 분류체계를 새롭게 설정하고, 이에 따라 산정된 배출량 특성을 분석하였다. 특성 분석을 위해 건축물 용도를 8가지(주거, 상업, 업무, 교통, 문화/복지, 교육, 종교, 기타) 유형으로 구분하고 26개 중분류로 구분하였으며, 건축물 속성정보에 대해서는 에너지 사용량 데이터를 활용하여 도시계획 관점에서 상응하는 온실가스 인벤토리를 구축하였다. Yu et al.(2019)은 서울시를 대상으로 공간 빅데이터를 활용하여 건물부문 온실가스 배출량의 공간패턴을 분석하였다. 공간분석을 통한 건물부문 온실가스 배출량을 산정하기 위해, 공간속성을 갖고있는 개별 공시지가 데이터와 건물별 에너지사용량 데이터를 활용하여 융합 공간 빅데이터를 구축하고, 이에 따른 필지별 온실가스 배출량을 산정하였다. 이 연구들은 도시단위에 적합한 인벤토리를 구축하기 위해, 총 에너지 사용량에 배출계수를 곱하여 산출하는 비교적 단순한 하향식(top-down) 방식에서 벗어나, 건축물대장의 공간 자료, 즉 지번별 코드를 활용하여 건물단위의 에너지 사용량 자료를 연계시킴으로써 공간적 해석이 가능하도록 상향식(bottom-up) 산출 방식으로 개선하고자 했다.

해외에서도 도시단위의 온실가스 배출량 산정을 위한 연구가 일부 진행되고 있으나, 대부분의 경우 Scope1과 2에 대한 산정 방법 이상의 범위를 반영하고 있지는 못하고 있다. 즉 지자체 개념이 반영될 경우, 에너지 공급원이 다른 지자체에 포함되어 있더라도 수요하는 지자체도 산정되어야 한다는 개념 외, 공간구조 변화를 직접 고려하여 산정

하기보다, 범위 내에서 에너지 수요량을 산정하는 것에 그쳤다(Dahal and Niemelä, 2017; Sówka and Bezyk, 2018). 반면 Zhang et al.(2018)의 연구에서는 중국 샤먼(Xiamen) 지역을 대상으로 토지이용유형을 온실가스 인벤토리 배출원과 연계하여 배출량 산정을 가능하게 하고, 도시 규모에 따라 온실가스 배출 집약도와 감축잠재량의 차이를 지구단위(district unit)로 확인할 수 있도록 분석한 후, GIS를 이용해 시각화하여 공간적 해석이 가능하게 했다.

최근 발간된 AR6 보고서에는, 정확한 도시의 탄소 계산을 위하여 탄소 함유 에너지 및 원자재의 이동과 그에 따른 도시지역의 배출과 흡수에 대한 정량적 이해가 필요하다고 언급했다. 또한 화석연료 사용으로 인한 도시의 주요 배출원 외 대부분의 도시는 자체적으로 전력, 유류, 시멘트, 수도, 식량 등을 공급할 수 없기 때문에 도시의 공급망에 대한 내재탄소배출량을 고려해야 할 필요가 있다고 명시했다(IPCC AR6 WGIII Chap.8). AR6에서는 도시의 배출량 추정을 위한 그간의 연구들을 정리하여, (1) 영토 회계(Territorial accounting, TA), (2) 커뮤니티 기반 인프라 공급망 발자국(Communitywide infrastructure supply chain footprint, CIF), (3) 모든 소비자에 대해 해당 지역의 최종 소비를 포함하는 접근 방식인 개인 탄소 발자국(Personal carbon footprint, PCF) (4) 지역 탄소 발자국(Areal carbon footprint, ACF)으로 크게 4가지 온실가스 회계(urban emissions accounting) 프레임워크로 분류했다(Table 1 참조). 이와 같은 접근 방식은 근본적으로 도시 경계 내외로 흐르는 물질과 에너지를 추적하는 개념에 뿌리를 두고 있다. 이러한 프레임워크는 모두 도시 온실가스 배출량을 정량화하는 것을 목표로 하고 있으며, 제품 및 서비스의 수

Table 1. Framework for urban emissions accounting

Type of framework	Accounting boundary
Territorial accounting (TA)	In-city direct emission of GHGs to the atmosphere within a chosen geographic area
Communitywide infrastructure supply chain footprint (CIF)	Essential infrastructure use and demand activities in cities with their production, by combining TA emissions with the transboundary supply chain emissions associated with imported electricity, fuels, food, water, building materials, and waste management services used in cities
Consumption-based carbon footprint accounting (CBCF)	Not only the supply-chain-related GHG emissions of key infrastructure but also emissions associated with all goods and services across a city
The personal carbon footprint (PCF)	Consumption and associated supply chain emissions to only household consumption of goods and services
The areal carbon footprint (ACF)	Emissions of all consumers in a city

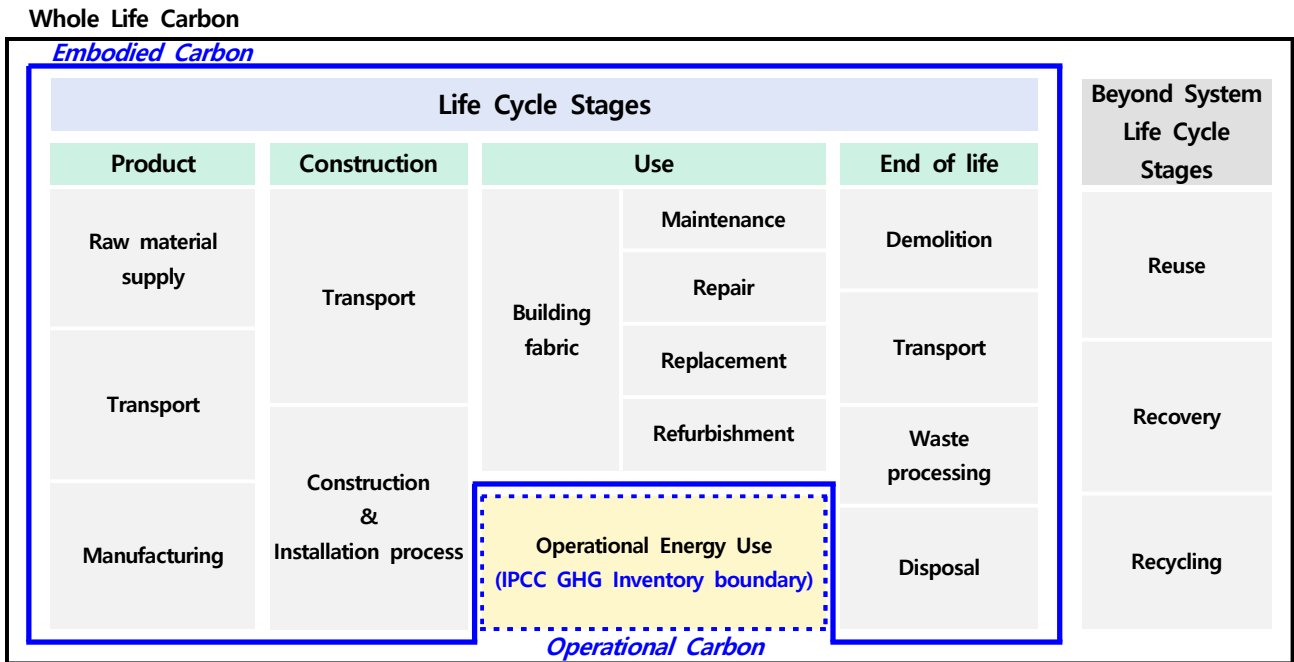


Fig. 1. System boundary of embodied carbon at the building level

출입과 관련된 온실가스 배출량의 구성요소와 배출량 책임이 할당되는 위치에 대한 다양한 관점을 반영하고 있다 (IPCC AR6 WGIII Chap.8). 첫 번째 프레임워크는 영토 경계 내에서 발생하는 직접배출만을 산정하는 방식이며, 그 외 산정방식은 모두 탄소발자국과 내재탄소를 고려한 산정방식이다. 따라서 이 연구에서 개선하고자 하는 인벤토리는 건물에서 사용하는 화석연료에 의한 온실가스 배출량 외 건축물의 전생애주기에서 발생하는 내재탄소배출을 추가적으로 반영하고자 하는 목적에서, 영토 내 직접 배출량을 산정하는 첫 번째 방법론 외, 타 지역에서 공급 받는 전력, 연료, 식량, 수도, 건축자재, 폐기물 처리 등에 대한 도시의 주요 기반시설을 사용하고 활용하는 단계에서 발생하는 배출량을 포함하여 산정하는 개념인 두 번째 산정방법론과 관련이 깊다고 볼 수 있다.

### 2.3. 건물의 내재탄소

건축물의 전생애주기에서 발생하는 내재탄소배출 원리는 다음과 같다. 자재 생산단계는 건축물에 투입되는 건축자재를 생산하는 과정, 시공단계는 건축자재의 운송 과정과 건축물의 시공과정에서 투입되는 건설기계장비와 운반장비 등의 에너지 사용, 유지보수단계 시 교체하는데 신규로 투입되는 건축자재생산, 건축물의 해체과정

에서 투입되는 장비의 유류소비량 등에서 탄소배출이 발생된다.

관련 선행연구인 Jeong and Huh (2011), Ji et al.(2016), Roh and Tae (2017), Peng and Yang (2021) 및 기타 해외 연구보고서 검토를 바탕으로, 건물의 생애주기와 내재탄소배출을 Fig. 1과 같이 정리하였다. 건축물의 전과정(Life Cycle) 중 투입되는 건축자재의 생산, 건축물의 시공, 유지 관리, 폐기 과정에서 발생하는 온실가스 배출을 내재탄소배출로 볼 수 있으며, 이때 건축물의 운영단계에서 발생하는 에너지 소비량에 대한 부분은 제외한다. 선행연구를 검토한 결과 건축물의 내재 탄소배출량( $EC_{Total}$ )은 건축자재의 생산( $EC_{PD}$ ), 건축물의 시공( $EC_{CS}$ ), 건축물의 유지 관리( $EC_M$ ), 건축물의 폐기( $EC_{EL}$ )에 대한 배출량을 의미하는 것으로 Equation 1과 같이 표현할 수 있다.

$$EC_{Total} = EC_{PD} + EC_{CS} + EC_{MT} + EC_{EL} \quad (1)$$

### 2.4. 소결

도시적 기후변화 대응을 위해서는 도시차원의 온실가스 배출량을 산출하여 현황을 파악하는 것이 가장 중요하다. 하지만 앞서 언급한 바와 같이 기존의 국가 및 지자체 인벤토리에 따르면 주요 배출원의 활동자료에 대한 배출계

수를 곱하여 산정하는 방식으로 건물부문의 총배출량을 추정하기에는 유용한 방법이나, 도시개발 및 정비에 따른 건물의 에너지 소비와 온실가스 배출 변화에 대한 도시차원의 정량적인 분석에는 한계가 있다. 또한 도시는 다양한 배출원과 흡수원이 포함되어 있으므로, 건물부문에 타 배출원과 흡수원의 상호 연관성이 발생하여 배출량 증감에 영향을 미칠 수 있다. Yang (2011)의 연구에서는 압축적 도시개발에 따른 도시에너지소비와 탄소증감 효과를 수직 이동거리와 건물에너지, 수평이동거리와 교통에너지, 비건 폐면적과 녹지부문의 변화를 통합적으로 연계하여 평가하였다. 연구결과 압축도시는 탄소저감을 위한 중요한 도시 전략이 될 수 있으나, 도시규모 및 형태, 도시의 압축정도 등에 따라 탄소저감효과를 발휘할 수 있는 임계층수, 효과를 극대화할 수 있는 최적층수 등 다양한 요인을 폭넓게 고려하기에는 한계가 발생한다고 언급하였다.

따라서 이 연구에서는 도시공간 내 건물의 공간적 위치에 따라 발생할 수 있는 교통 이동거리 변화, 흡수원의 변경으로 인한 건물 냉·난방 에너지 소비 변화 등에 따른 탄소배출량의 차이가 발생하는 현상은 고정시킨 상태에서, 건물의 자체용량과 설비를 대상으로 재개발, 재건축, 리모델링 등의 도시정비 및 개발에 한하여 기존 건축물 대비 도시정비 후 에너지 소비량 및 온실가스 배출량 증감효과가 발생하는 결과를 확인할 수 있는 정량적인 분석이 가능하도록, 건축물 내재탄소를 고려한 배출량 회계범위를 새롭게 제시하고자 한다.

선행연구를 검토한 결과 도시차원의 건물부문 인벤토리는 크게 두 가지 관점의 개선이 필요하다고 판단했다. 첫째, 공간적 배출량 해석을 위한 인벤토리 개선이다. 일부 선행연구에서 도시공간적 해석을 위해 사용한 방식으로 건축물대장 데이터를 활용하여 자치구, 법정동(행정동), 필지 단위로 건축물을 구분해 에너지원 사용량을 확인할 수 있도록 하고, 사용한 에너지원에 대해 IPCC 및 국가 배출계수를 활용하여 배출량을 산출하면 공간적 배출량 분포를 확인할 수 있게 된다. 둘째, 건축물의 운영단계에서 발생하는 에너지 소비량에 의한 배출 외 자재의 추출, 시공, 유지관리, 폐기단계에 대한 내재탄소를 산출 범위에 포함시키는 것이다. 이 연구에서 제안하는 건물부문 인벤토리는 도시공간 단위로 산출이 가능하며, 내재탄소를 고려함에 따라 탄소배출량의 종합적인 정량화가 가능한 인벤토리를 새롭게 정립하여 제시한다는 점에서 연구의 차별성이 있다.

### 3. 내재탄소를 고려한 도시차원의 온실가스 배출량 산정

#### 3.1. 내재탄소를 고려한 건물부문 온실가스 인벤토리

내재탄소배출을 고려하고자 하는 이유를 선행연구를 통해 확인해보았다. Jeong (2022)은 건물부문에서의 온실가스 감축은 주로 운영단계의 에너지 사용량 감소 효과에 초점이 맞춰져 왔지만, 자재의 추출, 가공, 운송 및 제작 등 전반적으로 건물을 구현하는데 발생하는 탄소배출량 또한 적지 않게 발생하기 때문에 건물의 운용 시 에너지 사용량 절감만을 고려한 온실가스 감축이 아닌 건물의 전생애주기 동안 발생하는 탄소배출량인 내재탄소 측정의 중요성이 대두되고 있다고 하였다. Roh and Tae (2017)의 연구에서도 건물 운영단계의 에너지 소비량 절감만을 고려한 에너지 절약형 건축물의 경우, 건축자재의 생산단계, 시공단계, 유지관리과정, 폐기단계 등에 기인하여 잠재적으로 발생하는 내재탄소배출량을 증가시킬 수 있어, 전생애 주기 관점에서 내재탄소배출량의 비율은 운영단계에서 발생하는 탄소배출량의 비율을 넘어설 가능성이 있다고 했다. 또한 해외사례를 검토한 결과, 건축물 수명기간의 전과정에서 발생하는 내재탄소비율은 건물 에너지 효율에 따라 26% ~ 100%까지 다양하게 나타날 수 있으며(Chastas et al., 2017), 건축물의 에너지 효율 향상과 전력 공급의 탈탄소화가 빠르게 전환되는 지역에서는 내재탄소 온실가스 배출량의 비중이 증가할 것이라는 연구결과(Bionova Ltd, 2018)를 토대로, 탄소중립을 달성하기 위해 건축물의 제로 에너지화가 지속적으로 이루어질 경우, 내재탄소 비중이 증가하게 되어 운영단계에서 발생한 온실가스 배출 절감 효과가 상쇄될 가능성이 있다(Skillington et al., 2022)는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 이 연구에서는 운영단계의 에너지 소비량에 대해서만 산정하고 있는 현재 국가 인벤토리에 내재탄소배출을 고려하여 건축자재 생산, 시공, 유지(사용), 폐기 등의 과정을 반영한 건물부문 배출량 산정 방법을 새롭게 설정하고자 한다.

도시차원의 건물부문 인벤토리를 개선하기 위해 이 연구에서 새롭게 제시하는 인벤토리는 공간적 해석을 위해 건축물대장 데이터를 활용하고, 건물의 운영단계에서 발생하는 에너지 소비와 내재탄소를 추가적으로 고려하여 배출량 산출이 가능하도록 했다. Fig. 2는 도시차원의 건물부문 배출량을 운영단계에서 발생하는 에너지 소비량(OC<sub>EU</sub>)에 의한 온실가스 배출량과 자재생산(EC<sub>PD</sub>), 시공

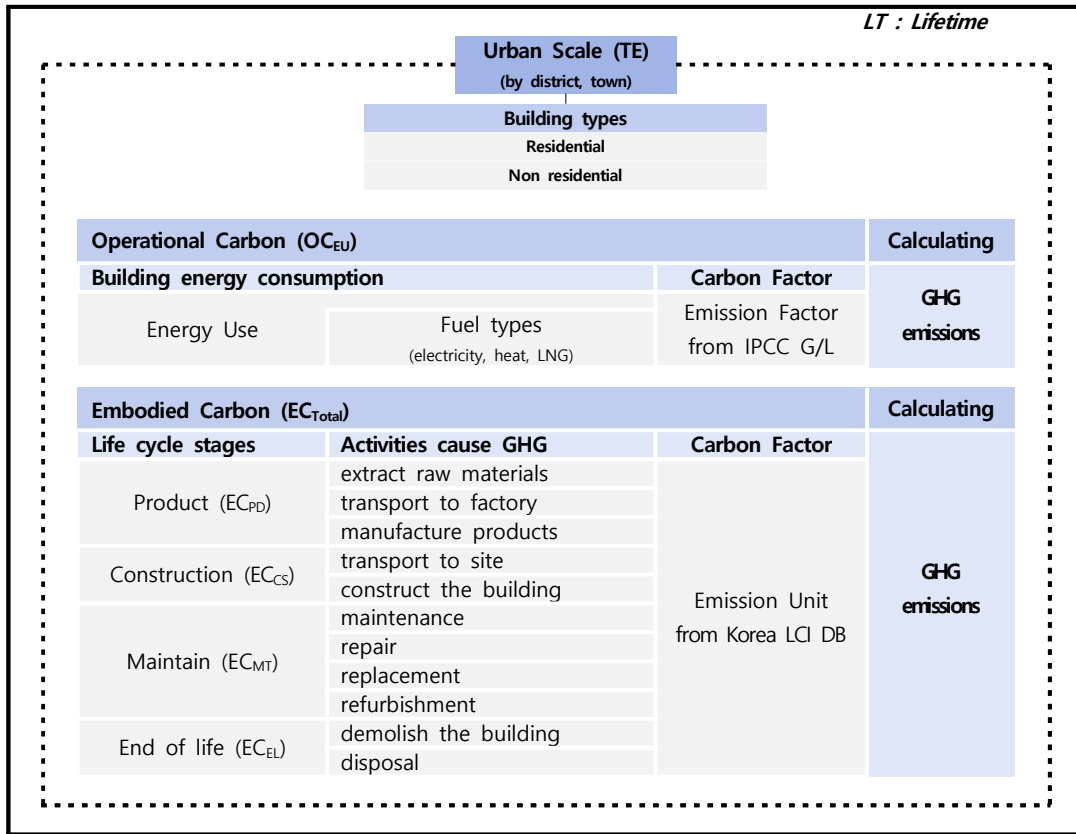


Fig. 2. Building Inventory in urban scale considering operational & embodied carbon

(EC<sub>CS</sub>), 유지관리(EC<sub>M</sub>), 폐기단계(EC<sub>EL</sub>)에서 발생하는 내재탄소배출량(EC<sub>Total</sub>)의 합(TE, Total Emission)으로 산출하는 개선된 인벤토리 범위를 나타낸다.

운영단계의 에너지 사용량에 대한 배출량 산출은 자치구, 법정동(행정동), 필지 내 건축물 구별이 가능한 건축물 대장 공간정보, 건물에너지사용량 데이터, 에너지원별 배출계수를 활용해 융합데이터를 구축하여 산정하도록 한다. 내재탄소배출의 경우 Fig. 2에서 정의한 바와 같이 생애주기별 온실가스를 유발하는 활동자료와 제품기능단위당 탄소배출량 원단위를 도출한 LCI DB(제품기능단위당 원료의 채취, 생산, 수송·유통, 사용, 폐기 등의 전과정에 대하여 투입물과 배출물을 정량화한 데이터)를 이용해 배출량을 산출할 수 있다. 건물부문 내재탄소배출량을 산출하기 위해서는 산정 대상의 건축물에 대한 용도 구분, 특성을 미리 파악하고 대표적인 활동자료와 원단위를 적용하는 것이 매우 중요하다. 자재 생산단계에서는 사용된 주요 건축자재의 물량정보, 시공단계는 건축자재의 운송 과정에 대한 운송차량의 유류소비량과 건설과정에 투입

되는 장비의 에너지 소비량, 유지관리는 개보수 시 교체되는 주요 건축자재 사용량, 폐기단계는 건축물 해체과정에서 투입되는 장비의 유류소비량, 매립되는 폐건축자재 물량 등의 수량을 파악하는 활동자료 수집단계가 필요하며, 활동자료와 연관된 적절한 원단위(LCI DB)를 활용해 내재탄소배출량을 추정할 수 있다.

### 3.2. 내재탄소를 고려한 건물부문 온실가스 배출량 산정

본 연구에서 제안한 인벤토리 Fig. 2에서 도시차원의 건물부문 온실가스 배출량은 운영단계와 내재탄소에 대해 산정하는 것으로 정의했다. 따라서 건물의 운영단계에서 발생하는 연간 에너지 소비량에 수명기간(LT, Lifetime)을 곱하여 매년 발생하는 배출량(OC<sub>EU</sub> × LT)을 산정하고, 자재생산(EC<sub>PD</sub>), 시공(EC<sub>CS</sub>)과정에서 발생하는 배출량과 건축물의 해체과정(EC<sub>EL</sub>)에서 발생하는 온실가스 배출량은 건물의 생애주기동안 한차례 발생하는 것으로 1회 적용하여 배출량을 산정한다. 건물 유지관리(EC<sub>M</sub>)의 경우 개보수 주기(RP, Remodeling Period)에 따라 내재탄소가 발생

한다고 가정하여 건물의 수명기간을 개보수 주기로 나누어 횟수만큼 배출량을 산정하여 포함한다. 최종적으로 건축물의 생애주기동안 발생하는 총 온실가스 배출량( $TE_{LT}$ )은 Equation 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$TE_{LT} = (OC_{EU} \times LT) + \{EC_{PD} + EC_{CS} + EC_M \times (LT/RP) + EC_{EL}\} \quad (2)$$

### 3.3. 도시차원 적용 가능성 검토

건물의 내구연한 기간동안 발생한 총배출량은 Equation 2와 같이 나타낼 수 있으나, 도시차원의 탄소배출 저감방안으로 활용하기 위해서는 건축물 수명기간을 고려하여 다르게 표현할 수 있다. 기존건물 대비 재건축, 재개발, 리모델링 등의 도시정비 후 변화하는 탄소배출을 산정하기 위해서는 Equation 3과 같이 연간 배출량으로 산정하여 비교하는 것이 필요하다. 건축물 운영단계의 에너지 소비에 대한 연간 배출량( $OC_{EU}$ )을 산정하고, 자재생산·시공·유지관리·폐기 단계에서 발생하는 배출량을 수명기간으로 나누어 합하면 연간 총배출량( $TE_{yr}$ )은 Equation 3과 같이 표현할 수 있다.

$$TE_{yr} = OC_{EU} + \{EC_{PD} \times (1/LT) + EC_{CS} \times (1/LT) + EC_M \times (LT/RP)/LT + EC_{EL} \times (1/LT)\} \quad (3)$$

연간 총배출량 산정식(Equation 3)은 도시공간 내 기존의 용량, 설비를 그대로 유지하는 건축물을 대상으로 도시차원에서 재개발, 재건축, 리모델링 등의 건설과 관련된 행위가 일어날 시, 기존 건축물 대비 도시정비 후 건물 운영단계에 발생하는 에너지 소비 절감효과와 내재탄소를 종합적으로 고려한 탄소배출량을 산출할 수 있으며, 탄소저감형 도시계획에 더 유리한 건축물 관리 방안을 도출하는 방법으로도 활용이 가능하다. 예를 들어 기존 건축물의 연간 배출량( $TE_{yr-A}$ )과 도시정비 후 연간 배출량( $TE_{yr-B}$ )을 비교했을 때, 연간 배출량이 A가 B보다 크거나 같을 경우( $A-B \geq 0$ ) 도시정비 시 변경되는 건축물은 건물 운영단계에서 발생하는 에너지 소비 절감효과 외 내재탄소를 고려해도 기존건물보다 유리한 조건이므로 탄소저감형 건물로서 적합하다고 볼 수 있으며, B가 A보다 크게 발생할 경우 탄소저감 관점에서는 기존 건축물을 유지하는 것이 더 유리하므로, 도시정비 계획을 재검토해야 하는 기준이 될 수 있다.

## 4. 결론

이 연구는 기존 국가 온실가스 인벤토리 방식에서 벗어나 건축물에서 발생하는 온실가스 배출량을 도시차원에서 평가할 수 있는 인벤토리를 제안하기 위한 기초적인 연구로서 건물 자체를 운영하는 과정에서 발생하는 온실가스 배출 외 내재탄소배출을 반영한 인벤토리를 새롭게 제시하였다. 연구의 주요결과와 시사점을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 도시차원의 건물부문 온실가스 배출량을 산정하기 위해 인벤토리 개선점을 크게 두가지로 보았다. 하나는 공간적 해석이 가능하도록 건축물대장의 자치구, 법정동(행정동), 필지 단위의 공간 정보를 인용하여 배출량을 산정하는 체계를 만들고, 건축물 운영단계에서 발생하는 에너지사용량에 의한 배출 외 건축물 전생애주기에서 발생하는 내재탄소배출을 정량화하여 산출할 수 있도록 배출활동 목록에 대해 정리하여 종합적인 회계 시스템을 구축하는 것이다.

둘째, 건축물의 내재탄소 배출량을 산정하기 위해 전생애주기의 건설자재 생산단계, 시공단계, 유지관리단계, 건물 폐기단계를 포함하였고, 단계별 요구 데이터와 목록 분석을 제시하였다. 각 단계별 배출활동에 대한 원단위는 국내외 적합한 LCI DB를 연계하여 내재탄소배출량 산출의 신뢰성을 확보할 수 있도록 한다.

셋째, 새롭게 제시한 도시차원의 건물부문 인벤토리는 건축물 운영단계에서 발생하는 배출량과 내재탄소를 반영함으로써 기존건물 대비 도시정비 후 건물의 에너지 효율 향상에 따른 저감효과와 전과정에서 발생하는 내재탄소를 고려한 종합적인 배출량 변화를 추정하여 탄소저감에 유리한 건축물에 대한 고찰이 가능하다.

끝으로 이 연구는 도시차원의 건물부문 인벤토리에 대한 예시적인 인벤토리를 제안한 것으로 내재탄소배출량을 반영하여 목록화하였으나, 추후 현재 포함하지 못한 내재탄소 배출원을 세분화하고, 내재탄소배출량의 정확성을 높이기 위해 국내에서 가용할 수 있는 원단위 LCI DB 개선연구도 함께 이루어져 통합적인 배출량 평가가 가능하도록 인벤토리를 확장하는 연구가 필요할 것이다. 또한 공간적 해석이 가능하도록 특정 도시의 자치구를 대상으로 개선된 인벤토리를 적용하여 실제 건축물과 도시계획의 재개발 등 실증적용을 통한 후속 연구가 뒤따라야 할 것이다.

## 사사

이 논문은 2021년 한국연구재단 중견연구자지원사업(NRF-2021R1A2C1012039)과 국토교통과학기술진흥원의 국토교통기술촉진연구사업(22CTAP-C163604-02)의 지원을 받아 수행되었음.

## References

- Bionova Ltd. 2018. The Embodied Carbon Review - Embodied Carbon Reduction in 100+ Regulations and Rating Systems Globally. Bionova Ltd.
- Chen C, Zhao ZF, Xiao JH, Tiong R. 2021. A conceptual framework for estimating building embodied carbon based on digital twin technology and life cycle assessment. Sustainability, MDPI journals.
- Cho SY, Leigh SB. 2017. A Study of the Possibility of Building Energy Saving through the Building Data : A Case Study of Macro to Micro Building Energy Analysis(in Korean with English abstract). Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering 29(11): 580-591.
- Choi JM. 2018. A study on the characteristics of building energy usage and greenhouse gas emissions in Gyeongsangnam-do(in Korean with English abstract). Journal of Architectural Institute of Korea 20(3): 81-88.
- Choi SY, Park MY, Choi JM. 2017. A Study on the Status of Energy consumption and Greenhouse Gas Emissions in Busan Metropolitan City(in Korean with English abstract). Proceedings of 2017 Spring Annual Conference of AIK; 2017 April 26-28; Jeju, Korea. Architectural Institute of Korea 37(1): 433-434.
- Dahal K, Niemelä J. 2017. Cities' Greenhouse Gas Accounting Methods : A study of Helsinki, Stockholm, and Copenhagen, Climate, MDPI journals.
- Giovanetti LD. 2020. The building system carbon framework, WBCSD (World Business Council for Sustainable Development).
- IPCC. 2022. AR6 WGIII Chapter 8. 8.1.6.Urban carbon footprint, 8.1.6.2. Urban emissions accounting. p.15-18.
- Jang HS, Lee SH. 2014. A study on Problems of the G-SEED Process and their Improvements : Focusing on case studies of office buildings. KIEAE Journal 14 (1): 91-99.
- Jeong JW. 2022. Definition of building embodied carbon. Architectural Institute of Korea, Words and Architecture 66(5): 46.
- Jeong YS, Huh JH. 2011. A study on the calculation process of carbon dioxide emission for buildings with life cycle assessment(in Korean with English abstract). Journal of the Korean Solar Energy Society 31(1): 23-30.
- Ji CY, Hong TH, Jeon JW. 2016. Evaluation of Life Cycle Energy Consumption and CO2 Emission of Elementary School of Buildings(in Korean with English abstract). KJCEM17.3. 52-60.
- Jo KH, Tae SH, Lim HJ, Kim HS. 2021. A study on the proposal of Remodeling buildings life cycle assessment method(in Korean with English abstract). Proceedings of 2021 Autumn Annual Conference of AIK; 2021 Oct. 27~30; Yeosu Expo Convention Center, Korea. Architectural Institute of Korea. 443-444.
- Jung HJ. 2011. The direction of building greenhouse gas inventory in urban planning. Journal of Environmental Studies Seoul Univ. 97-113.
- Katie Skillington, Robert H. Crawford, Georgia Warren-Myers, Kathryn Davidson. 2022. A review of existing policy for reducing embodied energy and greenhouse gas emissions of buildings, Energy Policy 168: 112920.
- 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. Journal of Energy&Climate Change 8(1): 30-44.
- Kim TH, Hwang CH. 2015. Reduction policy plan through analysis of greenhouse gas emission characteristics by urban in the building sector. Proceedings of 2015 Summer Conference of KAGOS; 2015 July 24-25; Kumoh National Institute of Technology, Korea. 177-192.



- Korea Environment Corporation. 2017. Guidelines for Local Government Greenhouse Gas Inventories.
- Lee YA, Mum YS. 2017. Analysis of greenhouse gas emissions in the Ulsan Metropolitan City(in Korean with English abstract). Proceedings of 2017 Autumn Annual Conference of AIK; 2017 Oct. 25-27; Gyeongju, Korea. Architectural Institute of Korea 37(2): 581-584.
- McArleton A, Racusin JD. 2018. Beyond Energy Efficiency : Why embodied carbon in materials matters, BUILDINGENERGY 37(2): 16-21.
- Ministry of Environment Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea. 2021. National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea.
- Oh SH, Kim DW, Ryu JW, Cha JG, Jung EH. 2011. A study for Construction of CO2 inventory using GIS(in Korean with English abstract). KAGIS.14.2. 40-52.
- P.Chastas, T.Theodosiou, D.Bikas, K.Kontoleon. 2017, Embodied Energy and Nearly Zero Energy Buildings: A Review in Residential Buildings. Procedia Environmental Sciences 38: 554-561.
- Peng YN, Yang LE, Scheffrana J. 2021. A life-cycle assessment framework for quantifying the carbon footprint of rural households based on survey data, MethodsX 8: 101411
- Roh SJ, Tae SH, Bok YJ, Shin SW. 2015. Suggestion of life cycle carbon emission assessment model for remodeling building(in Korean with English abstract). Proceedings of 2015 Spring Annual Conference of AIK; 2015 April 24; Myoungji University, Korea. Architectural Institute of Korea. 435-436.
- Roh SJ, Tae SH. 2017. An analysis of the life cycle embodied carbon emissions of apartment buildings using probabilistic analysis method(in Korean with English abstract). JAIK\_SC. 33(1) 65-72.
- Seoul Metropolitan Government. 2021. Seoul Greenhouse gas Inventory Report 2019.
- Sówka I, Bezyk Y. 2018. Greenhouse gas emission accounting at urban level : A case study of the city of Wroclaw(Poland). Atmospheric Pollution Research 9: 289-298.
- Yang HJ, Choi MJ. 2011. Compact city and carbon emissions : An integrated approach of building, transport, and greenfield(in Korean with English abstract). Journal of Korea Planning Association 46(3): 281-292.
- Yu SC, Shin DB, Ahn JW. 2019. A study on spatial analysis of greenhouse gas emissions in building sector used by the spatial by data in case of Seoul(in Korean with English abstract). Journal of KSGIS 27 (4): 11-19.
- Zhang G, Ge R, Lin T, Ye H, Li Xh, Huang N. 2018. Spatial apportionment of urban greenhouse gas emission inventory and its implications for urban planning : A case study of Xiamen, China. Ecological Indicators 85: 644-656.