

Research Paper

공동주택 개발사업의 공사단계 온실가스 배출량 산정 통합형 모델 연구

오근우* · 김영희**

서울주택도시개발공사, 호서대학교 벤처대학원 융합공학과*, 호서대학교 환경공학과**

Integrated Model for Estimating Construction-Phase Greenhouse Gas Emissions in Apartment Housing Development Projects

KunWoo Oh* · YoungHee Kim**

Seoul Housing & Urban Development Corporation (SH);
Department of Convergence Technology, Graduate School of Venture, Hoseo University*
Department of Environmental Engineering, Hoseo University**

요약: 공동주택 개발사업의 온실가스 배출은 환경영향평가에서 핵심적인 평가항목이나 사업별 산정기준과 범위의 차이로 인해 배출량 산정 결과의 비교 가능성과 신뢰성이 저하되고 있다.

본 연구에서는 2015년부터 2025년까지 환경영향평가 절차를 완료한 공동주택 개발사업 195건을 대상으로 공사단계 배출 산정 유형을 공정 기초형부터 전과정 확장형까지 4단계로 구분하고, 직접배출 및 간접배출의 공정별·배출원별 기여도를 분석하였다.

온실가스 배출 범위 분석 결과, 토공 공정의 연료 소비만을 고려한 공정 기초형이 43.1%로 가장 높은 비중을 차지하였으며, 공정 확장형(22.6%), 간접배출 통합형(24.6%), 전과정 확장형(2.5%) 순으로 나타났다. 이는 다수의 사업에서 제한적인 범위만을 반영하여 배출량을 산정하고 있음을 보여준다.

직접배출 기여도 분석에서는 구조물공이 56.3%로 가장 높은 비중을 차지하였으며, 철거공(18.8%), 토공(18.0%), 마감공(4.6%), 조경공(2.3%) 순으로 나타났다. 간접배출 기여도 분석에서는 현장 사무실 전력 사용이 91.3%로 가장 높은 비중을 보였으며, 생활폐기물 처리(6.6%), 수도 사용(1.1%), 분뇨 처리(0.9%), 오수 처리(0.1%) 순으로 분석되었다. 또한 건설폐기물 처리에 따른 배출은 사업별 특성에 따라 변동성이 존재하나, 대부분의 사례에서 높은 기여도를 보이는 주요 배출원으로 확인되었다.

이에 본 연구에서는 공정별 및 배출원별 기여도를 반영한 통합형 모델을 제안하고 이를 실제 공동주택 개발사업에 적용하였다. 그 결과 기존 환경영향평가와 비교하여 최소 1.1배에서 최대 3.5배 높은 배출량이 산정되었으며, 제안한 통합형 모델은 공사단계 온실가스 배출량 산정의 일관성과 사업 간 비교 가능성을 향상시키는 기준모델로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 환경영향평가, 공동주택 개발사업, 공사단계 온실가스 배출량, 기여도 기반 통합형 모델, 공정별 기여도

Abstract: Greenhouse gas emissions from apartment housing development projects are a key assessment item in Environmental Impact Assessment (EIA). However, differences in estimation criteria and system boundaries among projects have reduced the comparability and reliability of emission estimation results.

In this study, 195 apartment housing development projects that completed the EIA process between 2015 and 2025 were analyzed. Construction-phase emission estimation approaches were classified into four categories, ranging from process-based basic models to full life-cycle expanded models, and the contributions of direct and indirect emissions were analyzed by construction activity and emission source.

The analysis of greenhouse gas emission boundaries showed that the process-based basic model, which considers only fuel consumption in earthwork activities, accounted for the largest proportion at 43.1%, followed by the process-expanded model (22.6%), indirect-emission integrated model (24.6%), and full life-cycle expanded model (2.5%). These results indicate that many projects estimate emissions within a limited boundary.

The analysis of direct emission contributions revealed that structural work accounted for the highest proportion at 56.3%, followed by demolition work (18.8%), earthwork (18.0%), finishing work (4.6%), and landscaping work (2.3%). In the analysis of indirect emission contributions, electricity consumption at site offices accounted for the largest proportion at 91.3%, followed by municipal solid waste treatment (6.6%), water use (1.1%), human waste treatment (0.9%), and wastewater treatment (0.1%). In addition, emissions from construction waste treatment showed variability depending on project characteristics, but were identified as a major emission source with high contribution levels in most cases.

In this study, a contribution-based integrated model reflecting the contributions of construction activities and emission sources was proposed and applied to actual apartment housing development projects. The results showed that the estimated greenhouse gas emissions were 1.1 to 3.5 times higher than those reported in the existing Environmental Impact Assessments (EIAs). The proposed integrated model can serve as a reference framework for improving the consistency of construction-phase greenhouse gas emission estimation and the comparability of emission estimates among projects.

Keywords: *Environmental Impact Assessment, Apartment Housing Development Projects, Construction-phase Greenhouse Gas Emissions, Contribution-based Integrated Model, Contribution by Construction Activity*

I. 서론

기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC)는 지구 평균 기온 상승을 1.5°C 이내로 제한하기 위해, 2030년까지 전 세계 이산화탄소 배출량을 2010년 대비 45% 감축하고, 2050년경 탄소중립을 달성해야 한다고 제시하였다(IPCC, 2018). 이러한 국제적 논의에 부응하여, 대한민국은 2020년 10월 「2050 탄소중립 선언」을 발표하고 탄소중립 추진전략을 수립하였으며(MOE, 2020), 이에 따라 서울특별시도 2050년까지 탄소중립 달성을 목표

로 다양한 탄소중립 정책을 추진하고 있다(Seoul Metropolitan Government, 2023).

2023년 기준으로 서울시의 온실가스 총배출량은 45,107 천톤 CO₂eq에 이르렀으며, 이 중 건물 부문은 30,870 천톤 CO₂eq로 전체의 약 68.4%를 차지하는 것으로 나타났다(Seoul Metropolitan Government, 2025). 건물 부문은 도시지역 온실가스 배출의 핵심 배출원으로 평가되고 있으며(IPCC, 2023), 도시의 탄소중립 달성을 위해 우선적인 관리가 필요한 분야로 제시되고 있다. 특히 공동주택은 도시 내 대표적인 주거 유형으로

서 건설 및 운영과정에서 상당한 수준의 온실가스를 배출하는 것으로 알려져 있어 체계적인 관리 필요성이 지속적으로 제기되고 있다(Ortiz et al., 2009; Cabeza et al., 2014).

건설 분야의 온실가스 배출과 관련된 기존 연구들은 주로 건축물 전 생애주기(Life Cycle Assessment, LCA)를 대상으로 수행되어 왔으며(Ortiz et al., 2009; Cabeza et al., 2014), 자재 생산 및 운영단계의 배출량 산정에 초점을 맞추어 연구가 이루어져 왔다. 또한 건축물 건설 단계에서의 에너지 소비량 및 CO₂ 배출 원단위를 산정하기 위한 연구가 수행되었으며(Kim et al., 2004), 공동주택 시공과정의 공종별 CO₂ 배출 특성을 분석한 연구도 보고되었다(Lee et al., 2016). 일부 연구에서는 공동주택 시공단계의 유류 소비량 영향요인을 분석하고 건설장비의 연료 사용량을 기반으로 공사단계의 배출 특성을 분석하기도 하였다(Kim et al., 2014). 다만 공정별 작업 특성이나 산정 범위의 차이를 함께 고려한 연구는 많지 않다.

최근 공공주택 공급 확대와 도시정비사업 활성화로 인해 공동주택 개발사업이 지속적으로 추진되고 있으며, 이에 따라 공사단계에서 발생하는 온실가스 배출의 관리 필요성이 증가하고 있다. 특히 이러한 사업들은 규모가 크고 공사기간이 장기화되는 특성을 가지므로, 공사단계 배출량 산정의 정확성과 일관성이 중요해지고 있다.

공동주택 개발사업에서는 환경영향평가 과정에서 공사단계에서 발생이 예상되는 온실가스 배출량을 산정하고 이에 대한 협의를 수행한다. 그러나 사업별 및 평가기관별로 적용되는 산정 범위와 계산 방법이 상이하여 유사한 규모의 사업임에도 결과의 편차가 크게 나타나는 문제가 존재한다. 일부 사업의 경우 건설장비의 연료 소비로 인한 직접배출만을 반영하는 반면, 다른 사업은 건설폐기물 운반이나 현장 운영에서 발생하는 간접배출까지 포함하기도 한다. 이처럼 산정 기준이 일관되지 않아 유사 규모의 사업 간에도 배출량을 비교하기 어렵다는 한계가 있다.

따라서, 본 연구는 공동주택 개발사업의 환경영향평가 보고서에 제시된 공사단계 온실가스 배출 산정 현황을 분석하고, 산정 요소의 유형을 체계적으로 분류

하였다. 또한 공정별 표준 장비구성을 기반으로 직접 배출과 간접배출을 산정하고, 공정별 및 배출원별 기여도를 분석하여 공사단계 온실가스 배출량 산정을 위한 통합형 모델을 제안하고자 하였다. 통합형 모델은 개발사업의 온실가스 배출량을 정책적으로 관리하고, 평가체계를 개선하는 데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

II. 선행연구 검토

1. 건설공사 공사단계 온실가스 배출량 산정 연구

건설부문의 온실가스 배출량 산정에 관한 연구는 주로 건축물의 전 생애주기(Life Cycle Assessment, LCA)를 대상으로 수행되어 왔다. Ortiz et al. (2009)은 건축물의 자재 생산, 시공, 운영 및 해체단계를 포함한 전 생애주기 온실가스 배출 특성을 분석하였으며, Cabeza et al. (2014)은 건축물 생애주기 평가 연구 동향을 검토하고, 운영단계와 자재 생산단계가 주요 배출원임을 제시하였다.

국내에서는 건설공사의 공사단계 온실가스 배출량 산정을 위한 연구가 수행되어 왔다. Kim et al. (2004)은 건축공사의 에너지 소비량 및 CO₂ 배출 원단위를 산정하여 공사단계 배출량 평가 기초자료를 제시하였다. Kim et al. (2014)은 공동주택 시공단계의 유류 소비량 영향요인을 분석하여 건설장비의 연료 사용량이 공사단계 온실가스 배출에 중요한 영향을 미친다고 보고하였다. 또한 Lee et al. (2016)은 공동주택 시공과정의 공종별 CO₂ 배출 특성을 분석하고, 공종별 배출 특성의 차이를 제시하였다.

이와 같이 기존 연구는 건설장비의 연료 사용량, 공종별 배출 특성 및 건축물 전 생애주기 배출량 산정에 관한 연구를 중심으로 수행되어 왔다. 그러나 대부분 특정 사업 또는 개별 공정을 대상으로 배출량을 산정하는 데 초점을 두고 있으며, 실제 환경영향평가 사례를 기반으로 사업별 산정 범위의 차이를 비교·분석하거나 주요 배출 공정의 기여도를 바탕으로 표준화된 산정 범위를 제안한 연구는 부족한 실정이다.

2. 환경영향평가에서의 공사단계 온실가스 배출량 산정

환경영향평가에서는 개발사업 시행으로 인해 발생하는 온실가스 배출량을 예측·평가하여 사업 시행에 따른 기후변화 영향을 검토하고 있다. 일반적으로 공동주택 개발사업의 온실가스 배출량은 공사단계와 운영단계로 구분하여 산정되며, 공사단계에서는 건설장비의 연료 사용에 따른 직접배출과 전력 사용, 폐기물 처리 등으로 인한 간접배출을 대상으로 한다.

공사단계 직접배출은 굴삭기, 덤프트럭, 불도저 및 크레인 등 건설장비의 연료 사용량을 기준으로 산정되며, 간접배출은 현장사무실 전력 사용, 생활폐기물 처리, 건설폐기물 처리, 상수도 사용 및 오수처리 등에 의해 발생하는 배출량을 포함할 수 있다. 그러나 환경영향평가서 검토 결과 사업별로 반영 공정과 배출원 범위가 상이하게 적용되고 있는 것으로 확인되었다.

일부 사업에서는 토공단계 건설장비의 연료 사용만을 반영하는 반면, 일부 사업에서는 철거공정, 구조물 공정 및 건설폐기물 처리까지 포함하는 등 산정 범위에 차이가 존재한다. 이러한 차이는 유사 규모의 공동주택 개발사업임에도 불구하고 온실가스 배출량 산정 결과의 편차를 발생시키는 요인으로 작용할 수 있다.

따라서 환경영향평가 단계에서 공사단계 온실가스 배출량의 비교 가능성과 신뢰성을 확보하기 위해서는 주요 공정 및 배출원에 대한 일관된 산정 기준 마련이 필요하다.

3. 기존 연구와 본 연구의 차별성

기존 연구들은 건설공사 또는 공동주택 사업의 온실가스 배출량 산정과 저감방안 도출에 초점을 두고 수행되어 왔다. 특히 건설장비의 연료 사용량, 건축물의 전 생애주기(LCA) 배출량, 건설자재 생산단계 배출량 등을 중심으로 연구가 진행되었으며, 개별 사업의 배출량 산정 방법론을 제시하는 데 중점을 두었다.

반면 환경영향평가에서 적용되는 공사단계 온실가스 배출량 산정 범위와 반영 공정의 차이를 분석한 연구는 상대적으로 부족하다. 특히 공동주택 개발사업의 환경영향평가에서는 사업별로 상이한 산정 범위가 적용되고 있음에도 이에 대한 유형화 및 비교·분석 연구는 거의 수행되지 않았다.

본 연구는 2015년부터 2025년까지 환경영향평가 협의 완료한 공동주택 개발사업 195건을 대상으로 공사단계 온실가스 배출량 산정 유형을 분석하고, 공정별 및 배출원별 기여도를 정량적으로 평가하였다. 또한 분석 결과를 바탕으로 주요 배출 공정과 배출원을 중심으로 한 기여도 기반 통합형 모델을 제안하였다는 점에서 기존 연구와 차별화된다.

따라서 본 연구는 환경영향평가 실무에서 적용 가능한 공사단계 온실가스 배출량 산정 기준을 제시하고, 사업 간 배출량 비교 가능성과 신뢰성 향상을 위한 기초자료를 제공한다는 점에서 학술적·정책적 의의를 가진다.

III. 연구방법

1. 연구대상 및 자료 수집

공동주택 개발사업의 온실가스 배출은 공사단계, 운영단계 및 해체단계로 구분할 수 있다. 환경영향평가에서는 일반적으로 공사단계와 운영단계의 온실가스 배출량을 산정하고 있으며, 본 연구는 공사단계 온실가스 배출량 산정방법을 대상으로 하였다. 따라서 사업별 공정 반영 범위 및 배출원 구성 차이에 따른 산정 특성을 비교·분석하고, 공사단계 온실가스 배출량 산정을 위한 통합형 모델을 제안하고자 하였다.

공동주택 개발사업에서 발생하는 공사단계 온실가스 배출 특성을 분석하기 위하여, 환경영향평가 협의를 완료한 실제 개발사업 사례를 대상으로 분석을 수행하였다. 분석 대상 사업은 서울특별시 환경영향평가 시스템 및 환경영향평가정보지원시스템(환경부)에 공개된 환경영향평가서 중, 2015년부터 2025년까지 협의가 완료된 사업으로 한정하였다. 이 중 공동주택 공급을 목적으로 하는 공공주택지구 조성사업과 정비사업(재개발 및 재건축) 총 195개 사업을 최종 분석 대상으로 선정하였다.

전체 195개 사업 중 국가 환경영향평가 대상사업은 133개, 서울시 환경영향평가 대상사업은 62개로 구분된다. 각 사업의 환경영향평가서에 제시된 공사단계 온실가스 배출량 산정 결과와 반영 범위를 검토하여, 공정별 적용 범위 및 배출원 포함 여부에 관한 자료를

Table 1. Classification of greenhouse gas accounting scopes for construction-phase emissions in apartment housing development projects.

Category	Accounting scope description	Included emission sources
Type 1	Process-based type	Direct emissions from fuel consumption in earthwork activities
Type 2	Process-extended type	Direct emissions from fuel consumption in earthwork, demolition, and structural works
Type 3	Indirect-emission Integrated Type (including indirect emissions)	Direct emissions from fuel use; indirect emissions from electricity and water consumption; wastewater treatment; municipal solid waste and construction waste
Type 4	Life cycle-extended type	Direct emissions from fuel use; indirect emissions from electricity and water consumption; wastewater and waste treatment; upstream emissions from material production and transportation (Scope 3)

추출하였다.

본 연구는 사업 규모 자체에 따른 배출량 차이보다는 환경영향평가에서 적용된 공정별 반영 범위 및 배출원 구성 차이에 따른 산정 유형의 특성과 배출 구조를 비교·분석하는 데 중점을 두었다. 이를 위해 환경영향평가 사례별 공사단계 온실가스 배출량 산정 범위를 비교·분석하여 유형화하고, 공정별 표준 장비구성을 적용한 배출량 산정을 통해 직접배출 및 간접배출의 기여도를 분석하였다. 또한 기여도 분석 결과를 바탕으로 주요 배출 공정 및 배출원을 도출하고, 이를 반영한 공사단계 온실가스 배출량 산정을 위한 통합형 모델을 제안하고자 하였다.

2. 공사단계 온실가스 배출량 분석 및 유형 분류

사업별 온실가스 배출량 산정 방식은 적용 범위와 포함 항목의 차이에 따라, 공사단계에서 반영되는 배출 항목의 구성 기준을 중심으로 4가지 유형으로 구분하였다(Table 1). 공사단계 배출량 산정 범위는 토공 공정의 연료 소비만을 고려하는 최소 수준부터, 전력 및 용수 사용, 폐기물 및 오수 처리, 나아가 건설자재의 생산 및 운송까지 포함하는 확장된 수준까지 단계적으로 확대되는 구조를 갖는다.

이에 따라 1단계는 토공 공정에서 발생하는 직접배출만을 포함하는 공정 기초형, 2단계는 토공에 더하여 철거공 및 구조물공을 포함한 공정 확장형, 3단계는 2단계 공정에 전력, 용수 사용 및 폐기물 처리 등 간접배출을 포함한 통합형, 4단계는 주요 공정과 함께 건설자재의 생산 및 운송 과정에서 발생하는 Scope 3 배출가

지 포함한 전과정 확장형으로 정의하였다.

공정 구분은 배출원 특성과 에너지 사용 구조를 기준으로 철거공, 토공, 구조물공, 마감공, 조경공의 5개 공정으로 설정하였다. 이 중 직접배출은 각 공정에서 사용되는 건설장비의 연료 소비에 따른 배출로 정의하였으며, 간접배출은 전력 및 용수 사용과 폐기물 처리 등 공사 과정에서 발생하는 현장 운영 및 외부 처리 과정에서 배출을 포함하는 것으로 구분하였다.

건설폐기물의 운반 과정은 공사 공정의 일부로 간주하여, 중간처리장까지의 운반에 사용되는 덤프트럭의 연료 소비는 철거 공정의 직접배출에 포함하였다. 반면, 폐기물의 매립 및 소각과 같은 최종 처리 과정은 외부 시스템에서 발생하는 배출로 간주하여 간접배출로 구분하여 산정하였다.

사업 규모에 따른 산정 유형의 차이를 분석하기 위하여 세대수를 기준으로 소규모(1,000세대 미만), 중규모(1,000~3,000세대), 대규모(3,000세대 이상)로 구분하여 규모별 산정 유형 분포 분석에 활용하였다.

3. 직접배출량 산정 방법

공사단계 직접배출은 건설기계 및 운반차량의 연료 연소에 따른 배출이며, 간접배출은 공사 전 기간에 걸쳐 발생하는 전력 사용, 용수 사용 및 폐기물 처리 등을 포함한다. 직접배출은 공정별 수행 기간에 한정하여 산정하고, 간접배출은 전체 공사기간에 적용함으로써 중복 산정을 방지하였다.

직접배출량은 장비 가동시간과 연료 사용량을 기반으로 다음과 같이 산정하였다.

$$E_{direct} = \sum (N \times H \times FC \times EF)$$

여기서 E_{direct} 는 공정의 온실가스 배출량(tCO_2eq), N 은 장비의 대수, H 는 장비 가동시간(hr), FC 는 시간당 연료 사용량(L/hr), EF 는 연료 온실가스 배출계수($\text{tCO}_2\text{eq/L}$)를 의미한다.

배출량 산정에는 공정별 표준 장비 세트와 공사기간을 적용하였으며, 적용한 배출계수는 Appendix A, 표준 장비 구성은 Appendix B, 공정별 산정 결과는 Appendix C에 제시하였다.

4. 간접배출량 산정 방법

간접배출은 활동자료(Activity Data)에 배출계수(Emission Factor)를 적용하여 산정하였다.

$$E_{indirect} = AD \times EF$$

여기서 E 는 온실가스 배출량(tonCO_2eq), AD 는 활동자료(Activity Data), EF 는 배출계수(Emission Factor)를 의미한다.

전력 사용량은 가설 사무실 면적을 기준으로 산정하였으며, 용수 사용, 오수 발생 및 폐기물 발생량은 1인당 원단위를 적용하여 산정하였다. 간접배출은 전체 공사기간에 걸쳐 적용하였으며, 적용한 배출계수는 Appendix A, 현장 인원 구성은 Appendix D, 활동자료 및 원단위는 Appendix E에 제시하였다

5. 통합형 모델 산정 방법

본 연구의 공정별 기여도 분석은 2-3절 및 2-4절에서 제시한 직접배출 및 간접배출 산정 방법을 통합한 통합형 모델을 기반으로 수행하였다. 이는 환경영향평가 보고서별로 반영 공정과 배출 범위가 상이하여 공정별 배출 특성을 일관되게 비교하기 어려운 한계를 보완하기 위한 것이다.

통합형 모델은 특정 사업 규모를 대표하기 위한 배출량 산정 모델이 아니라, 동일한 공정 구성과 배출 범위를 적용하여 공사단계 온실가스 배출 구조를 비교·분석하기 위한 기준 모델로 설정하였다. 이를 위해 철거공, 토공, 구조물공, 마감공 및 조경공의 5개 공정을 대상으로 표준 장비 세트를 구성하고, 각 공정별 직접 배출량을 산정하였다. 표준 장비 구성은 Appendix B,

공정별 배출량 산정 결과는 Appendix C에 제시하였다.

간접배출은 공사기간 중 발생하는 현장 운영 배출을 대상으로 하였으며, 현장 인원 구성 및 활동자료를 기반으로 산정하였다. 공사 규모별 인원 비교 결과(Appendix D), 상주 인원은 규모에 따른 차이가 크지 않은 것으로 나타나 대표 인원 규모를 적용하였다. 전력 사용은 가설 사무실 면적(약 570m^2)을 기준으로 산정하였고, 용수 사용, 오수 및 폐기물 발생량은 인당 원단위를 적용하였다. 용한 배출계수는 Appendix A, 관련 활동자료는 Appendix E에 제시하였다.

공정별 배출 특성을 비교하기 위하여 전체 배출량 대비 공정별 및 배출원별 기여도를 산정하였으며, 이 중 기여도가 5% 이상인 항목을 주요 배출 항목으로 선정하였다. 본 연구에서는 공정별·배출원별 상대적 기여도를 비교하기 위한 기준으로 5%를 적용하였으며, 이는 전체 배출량에 대한 영향이 상대적으로 작은 항목을 제외하고 주요 배출 공정을 중심으로 공사단계 온실가스 배출 구조를 분석하기 위한 것이다.

또한 직접배출 및 간접배출 기여도 분석 결과를 바탕으로, 공정별 및 배출원별 기여도가 일정 수준 이상인 주요 배출 항목을 우선 반영하는 기여도 기반 통합형 모델을 구성하였다. 따라서 본 연구의 통합형 모델은 사업 규모 자체를 대표하기 위한 모델이 아니라, 동일한 공정 구성과 배출 범위를 적용하여 공사단계 온실가스 배출 특성을 비교·분석하기 위한 기준 모델로 활용하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 온실가스 배출량 산정 유형 분석

국가 환경영향평가 대상사업의 경우, 공정 기초형이 전체 54.1%로 가장 높은 비중을 차지하였으며, 간접배출 통합형(33.9%)과 전과정 확장형(3.0%)이 그 뒤를 이었다. 반면 서울시 환경영향평가 대상사업은 철거공정이 포함된 공정 확장형이 54.8%로 가장 높게 나타났다. 이는 서울시 정비사업의 특성상 기존 건축물의 철거가 필수적으로 수반되기 때문으로 해석된다. 특히 공사단계 온실가스 배출량을 산정하지 않은 사업도 서울시의 경우 19.4%로 높게 나타나 중·소규모 개발사업에서는

Table 2. Distribution of Construction-Phase Greenhouse Gas (GHG) Accounting Types

Category	Number of Projects in National Environmental Impact Assessment (percentage, n=133)			Number of Projects in Seoul Environmental Impact Assessment (percentage, n=62)			Total (National + Seoul)
	Small (<1,000)	Medium (1,000-3,000)	Large (>3,000)	Small (<1,000)	Medium (1,000-3,000)	Large (>3,000)	
Not Estimated	-	1	1	2	7	3	14 (7.2%)
Type 1	9	31	32	5	6	1	84 (43.1%)
Type 2	1	6	3	12	19	3	44 (22.6%)
Type 3	4	19	22	2	1	-	48 (24.6%)
Type 4	-	4	-	1	-	-	5 (2.5%)

*Note : Small: <1,000 households, Medium: 1,000-3,000 households, Large: >3,000 households

온실가스 배출량 산정의 중요성이 상대적으로 낮게 인식되고 있는 것으로 판단된다. 국가 및 서울시 대상사업을 통합적으로 분석한 결과, 공정기초형은 43.1%, 공정 확장형은 22.6%로 나타나 두 유형이 전체의 약 65.7%를 차지하는 것으로 분석되었다. 이는 다수의 사업에서 공사단계 온실가스 배출량 산정 시 일부 공정만을 반영하는 제한적인 범위가 적용되고 있음을 의미한다.

사업 규모에 따른 산정 유형의 분포를 분석하기 위하여 세대수를 기준으로 소규모(1,000세대 미만), 중규모(1,000~3,000세대), 대규모(3,000세대 이상)로 구분하여 분석하였다(Table 2).

분석 결과, 국가 환경영향평가 대상사업은 소규모, 중규모, 대규모 모든 구간에서 공정 기초형(Type 1)의 비중이 높게 나타났으며, 특히 대규모 사업에서도 동일한 경향이 유지되는 것으로 확인되었다. 이는 사업 규모와 관계없이 토공 중심의 제한적인 산정 방식이 광범위하게 적용되고 있음을 시사한다.

반면 서울시 환경영향평가 대상사업은 중규모 사업을 중심으로 공정 확장형(Type 2)의 비중이 가장 높게 나타났으며, 이는 철거공정이 포함된 정비사업의 특성이 반영된 결과로 해석된다.

이러한 결과는 국가와 서울시 간 산정 유형의 차이가 단순히 사업 규모의 차이에 기인한다기보다는, 환경영향평가에서 적용되는 산정 범위 및 방법의 차이에 따른 구조적 특성임을 보여준다. 특히 대규모 사업에서도 공정기초형이 높은 비중을 차지하고 있다는 점은, 실제 배출 기여도가 높은 구조물공 등 주요 공정이 충분히 반영되지 못하고 있음을 시사한다.

2. 공사단계 온실가스 배출량 산정 및 기여도 분석

공사단계 온실가스 배출량은 공정별 장비 구성과 가동시간을 기반으로 한 통합형 모델을 적용하여 산정하였다. 직접배출은 건설장비 연료 사용에 따른 배출량으로, 간접배출은 전력 사용 및 생활폐기물 등 공사기간 중 발생하는 간접배출원을 포함하였다. 공정 간 비교를 위해 '표준 장비구성' (Appendix B)을 적용하고, 사업 규모에 따른 장비 대수 차이는 제외하여 공정별 최소 장비세트를 기준으로 설정하였다. 배출계수는 관련 지침에서 제시한 값을 적용하였다.

이와 같은 기준에 따라 산정한 결과, 공사단계 총 온실가스 배출량은 약 992 tCO₂eq로 나타났으며, 이 중 직접배출은 약 694 tCO₂eq(약 70.0%), 간접배출은 약 298 tCO₂eq(약 30.0%)로 분석되었다. 이는 공사단계 온

Table 3. Distribution of Construction-Phase GHG Emissions by Emission Type

Category	GHG Emissions (tCO ₂ eq)	Contribution (%)
Direct emissions	694.39	70.0
Indirect emissions (excluding construction waste)	297.74	30.0
Total	992.13	100.0

Table 4. Contribution of Direct GHG Emissions by Construction Activity

Work Type	GHG Emissions (tCO ₂ eq)	Contribution (%)
Demolition	130.14	18.8
Earthwork	124.81	18.0
Structural Work	391.15	56.3
Finishing Work	32.12	4.6
Landscaping	16.16	2.3
Total	694.39	100.0

Table 5. Contribution of Indirect GHG Emissions by Emission Source

Category	GHG Emissions (tCO ₂ eq)	Contribution (%)
Electricity	271.93	91.3%
Solid waste	19.62	6.6%
Water supply	3.34	1.1%
Excreta	2.57	0.9%
Wastewater	0.28	0.1%
Total	297.74	100%

실가스 배출이 건설장비의 연료 사용에 따른 직접배출 중심 구조를 보이면서도, 전력 사용 및 폐기물 처리 등 간접배출 또한 상당한 비중을 차지함을 의미한다.

공정별 직접배출 기여도를 분석한 결과, 구조물공이 전체의 56.4%로 가장 높은 비중을 차지하였으며, 철거공(18.7%)과 토공(18.0%)이 그 뒤를 이었다. 반면 마감공사(4.6%)와 조경공사(2.3%)는 상대적으로 낮은 비중을 나타냈다. 이는 공사단계 온실가스 배출이 단기간 장비 투입이 집중되는 공정보다는, 장기간 지속되며 장비 가동 시간이 누적되는 구조물공의 영향이 크게 작용함을 시사한다.

한편 간접배출 항목별 기여도를 분석한 결과, 전력 사용이 전체 간접배출의 약 91.3%를 차지하여 압도적인 비중을 보였으며, 생활폐기물 처리(6.6%)가 그 뒤를 이었다. 반면 상수도, 오수 및 분뇨 등은 전체 배출량에서 차지하는 비중이 매우 낮은 수준으로 나타났다.

이는 공사단계 온실가스 배출량 산정 시 직접배출뿐 아니라 공사기간 전반에 걸쳐 지속적으로 발생하는 전력 사용 등 주요 간접배출 항목을 함께 고려할 필요가 있음을 보여준다. 또한 일부 환경영향평가 사례에서는 이러한 간접배출 항목이 충분히 반영되지 않는 경향이 있어, 실제 배출량 대비 과소 산정될 가능성이 있는 것으로 판단된다.

공사단계 온실가스 배출 구조를 종합적으로 살펴보면, 직접배출이 약 70.0%, 간접배출(건설폐기물 제외)이 약 30.0%를 차지하는 것으로 나타났다. 한편 건설폐기물 처리에 따른 배출은 사업별 발생량에 따라 변동성이 크나, 대부분 사례에서 주요 배출원 수준의 기여도를 보이는 것으로 확인되었다. 이는 건설폐기물 소각 과정에서 온실가스 배출이 크게 발생하는 특성에 기인한다. 본 산정 결과는 공정별 및 배출원별 기여도를 분석하기 위한 기준 시나리오로 활용되었다.

3. 기여도 기반 통합형 모델 제안

본 연구에서는 직접배출 및 간접배출 기여도 분석 결과를 바탕으로 공사단계 온실가스 배출량 산정을 위한 기여도 기반 통합형 모델을 제안하였다. 공사단계 총 온실가스 배출량(E_T)은 직접배출량과 간접배출량의 합으로 구성되며, 이를 식(1)과 같이 정의하였다.

$$E_T = \sum E_{direct} + \sum E_{indirect} \quad (1)$$

여기서 $\sum E_{direct}$ 는 공정별 직접배출량의 합이며, $\sum E_{indirect}$ 는 현장 운영과정에서 발생하는 간접배출량의 합을 의미한다.

직접배출의 경우, 기존 환경영향평가에서는 일부 공정에 한정하여 배출량을 산정하는 사례가 다수 확인되

Table 6. Proposed Contribution-based Integrated Model for Construction-phase GHG Emissions

Category	Construction Activity / Source	Contribution (%)	Inclusion Criteria
Direct Emissions	Demolition	18.8	Mandatory ($\geq 5\%$)
	Earthwork	18.0	Mandatory ($\geq 5\%$)
	Structural Work	56.3	Mandatory ($\geq 5\%$)
	Finishing Work	4.6	Optional ($< 5\%$)
	Landscaping	2.3	Optional ($< 5\%$)
Indirect Emissions	Electricity use	91.3	Mandatory ($\geq 5\%$)
	Solid waste	6.6	Mandatory ($\geq 5\%$)
	Water supply	1.1	Optional ($< 5\%$)
	Excreta	0.9	Optional ($< 5\%$)
	Wastewater	0.1	Optional ($< 5\%$)
	Construction waste	Site-specific	Mandatory

었으며, 이는 전체 배출 구조를 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 직접배출 기여도가 5% 이상인 철거공(E_{dem}), 토공(E_{earth}) 및 구조물공(E_{str})을 주요 반영 공정으로 설정하고, 이를 공사단계 온실가스 배출량 산정을 위한 기본 반영 범위로 제안하였다.

$$E_{direct} = E_{dem} + E_{earth} + E_{str} \quad (2)$$

간접배출의 경우에도 일부 평가 사례에서 주요 배출원이 충분히 반영되지 않는 문제가 확인되었다. 이에 따라 간접배출 기여도가 5% 이상인 전력 사용(E_{elec})과 생활폐기물 처리(E_{waste})를 주요 반영 항목으로 설정하였다.

또한 건설폐기물 처리(E_{cons})에 따른 배출은 사업별 발생량에 따라 편차가 크게 나타났으나(0.9~43.5%), 사례 분석 결과 전체 공사단계 온실가스 배출량 대비 평균 17.6%의 기여도를 나타내는 주요 배출원으로 확인됨에 따라 기여도 수준과 관계없이 주요 반영 항목으로 포함하였다.

$$E_{indirect} = E_{elec} + E_{waste} + E_{cons} \quad (3)$$

본 연구에서 제안한 기여도 기반 통합형 모델은 사업별로 상이하게 적용되는 공정 및 배출 범위를 일정 기준에서 비교·분석하기 위한 기준 모델의 성격을 가진다. 따라서 공사단계 온실가스 배출량 산정 시 주요 배출 공정 및 배출원을 일관되게 반영함으로써 사업 간 비교 가능성을 높이고 배출량 과소 산정을 방지하는 데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 기존 환경영향평가 결과와의 비교 분석

약 1,200~1,300세대 규모의 공동주택 재건축·재개발 사업에 대한 환경영향평가 사례를 검토한 결과, 공사단계 온실가스 배출량은 약 413~1,608 tCO₂e/q 범위로 나타나 사업 간 편차가 큰 것으로 확인되었다. 일부 사업에서는 철거공사 및 토공사 단계의 장비 연료 사용만을 반영하고, 구조물공사나 마감공사, 조경공사와 같은 주요 공정 또는 간접배출을 포함하지 않은 사례도 확인되었다.

동일한 사업에 본 연구의 통합형 모델을 적용하여 재산정한 결과, 공사단계 배출량은 약 1,091~1,947 tCO₂e/q 범위로 나타났으며, 기존 환경영향평가 결과와 비교할 때 최소 약 1.1배에서 최대 약 3.5배 높게 산정되는 것으로 나타났다. 철거공 또는 구조물 공정과 같이 온실가스 배출 주요 공정이 반영된 사례에서는 그 차이가 상대적으로 크지 않은 것으로 나타났으며, 반면, 대부분의 환경영향평가에서와 같이 토공만 산정한 경우는 온실가스 배출량 차이가 크게 나타났다.

이러한 결과는 공사단계 온실가스 배출량이 실제 공사 특성 자체보다는 산정 시 포함된 공정과 배출 범위에 따라 크게 달라질 수 있음을 보여준다. 특히 반영 공정과 산정 범위가 사업별로 상이할 경우, 배출량 비교의 신뢰성이 저하되고 정책적 활용에도 한계가 발생할 수 있다.

따라서 공사단계 온실가스 배출량을 비교 가능한 지표로 활용하기 위해서는 공정별 반영 범위와 장비 구

Table 7. Comparison of Construction-Phase GHG Emissions between EIA Results and the Integrated Model

Project	No. of Households	Emission Sources considered in EIA	GHG Emissions in EIA (tCO ₂ eq)	GHG Emissions by Integrated Model (tCO ₂ eq)	Construction Waste Contribution (%)	Increase (%)	Ratio
HG-5	1,336	Demolition Earthwork Structural Work	1,371	1,648	9.9	20.2%	1.20
GJ-5	1,278	Demolition Earthwork	1,531	1,883	19.9	23.0%	1.23
SPA	1,386	Demolition Earthwork	863	1,185	5.2	37.3%	1.37
JU	1,146	Demolition Earthwork	628	1,343	9.8	113.9%	2.14
M-3	1,212	Earthwork	425	1,416	14.3	233.2%	3.33
SW-2	1,212	Demolition Earthwork	678	1,510	22.9	122.7%	2.23
WW	1,240	Earthwork	482	1,324	16.4	174.7%	2.75
SD	1,326	Earthwork	647	1,144	21.5	76.8%	1.77
SJ	1,222	Earthwork	740	1,091	6.3	47.4%	1.47
SS-2	1,332	Earthwork	413	1,451	27.8	251.3%	3.51
GH	1,292	Demolition Earthwork	746	1,788	0.9	139.7%	2.40
WD-1	1,303	Demolition Earthwork	1,608	1,947	43.5	21.1%	1.21
DG-1-1	1,377	Demolition Earthwork	1,563	1,712	30.5	9.5%	1.10

성 기준을 일정 수준에서 표준화할 필요가 있으며, 공정별 기여도를 고려한 산정 접근이 요구된다.

5. 통합형 모델 적용성 및 타당성 검토

본 연구에서 제안한 통합형 모델은 공동주택 개발사업의 실제 시공과정에서 일반적으로 수행되는 철거공, 토공, 구조물공, 마감공 및 조경공을 대상으로 표준 공정 시나리오를 구성하고, 이를 기반으로 공정별 온실가스 배출 특성을 분석하여 제안하였다. 따라서 특정 사업에 한정된 공정 구성이 아니라 공동주택 개발사업 전반에 적용되는 대표 공정을 반영하였다는 점에서 적용성을 가진다.

공정별 및 배출원별 기여도 분석 결과, 구조물공, 철거공 및 토공은 전체 직접배출량의 93.1%를 차지하는 것으로 나타났으며, 전력 사용 및 생활폐기물은 전체 간접배출량의 97.9%를 차지하는 것으로 분석되었다. 반면 마감공, 조경공, 상수도, 오수 및 분뇨처리는 전체 배출량에 미치는 영향이 상대적으로 낮은 것으로 확인되었다.

이에 본 연구에서는 전체 배출량에 대한 기여도가 5% 이상인 공정 및 배출원을 필수 반영 항목으로 설정하였다. 기여도 5% 기준은 실제 배출량에 영향을 미치는 주요 배출원을 반영하면서도 산정 항목의 과도한 확

대를 방지하기 위한 기준으로 설정하였다. 또한 건설 폐기물은 사업별 편차가 크지만 평균 17.6%의 기여도를 나타내는 주요 배출원으로 확인됨에 따라 별도 필수 반영 항목으로 포함하였다.

이와 같이 제안된 통합형 모델은 공동주택 공사에 실제 적용되는 주요 공정과 배출원을 반영하면서도, 기여도가 낮은 항목은 제외하여 실무 적용성을 확보하였다. 또한 기존 환경영향평가 사례와의 비교 결과, 주요 공정이 반영되지 않은 경우 배출량이 최대 3.5배까지 과소 산정될 수 있는 것으로 나타나, 본 모델이 공사단계 온실가스 배출 특성을 보다 합리적으로 반영할 수 있는 기준으로 활용 가능할 것으로 판단된다.

V. 결론

본 연구는 공동주택 개발사업의 환경영향평가서에 제시된 공사단계 온실가스 배출량 산정 범위와 반영 항목을 분석하고, 공정별 장비 특성과 배출원별 기여도를 고려한 기여도 기반 통합형 모델을 제안하였다.

첫째, 환경영향평가 보고서별로 산정 범위와 반영 공정에 큰 차이가 존재하였으며, 공정 기초형이 43.1%로 가장 높은 비중을 차지하였다. 이는 다수 사업이 여

전히 토공 중심의 제한적 범위에서 배출량을 산정하고 있음을 보여주며, 사업 간 비교 가능성과 신뢰성을 저하시킬 수 있다.

둘째, 직접배출 기여도는 구조물공이 56.3%로 가장 높고, 철거공과 토공이 뒤를 이은 것으로 나타났다. 또한 간접배출에서는 전력 사용이 91.3%로 가장 높은 비중을 차지하였으며, 건설폐기물 처리 역시 대부분의 사례에서 주요 배출원으로 확인되었다. 전체적으로 직접배출은 약 70%, 간접배출은 약 30% 수준으로 분석되어, 간접배출 또한 주요 관리 대상임을 확인하였다.

셋째, 본 연구에서는 공정별 및 배출원별 기여도 분석 결과를 바탕으로 주요 배출 공정과 배출원을 우선 반영하는 기여도 기반 통합형 모델을 제안하였다. 직접배출에서는 철거공, 토공 및 구조물공을 주요 반영 공정으로 설정하였으며, 간접배출에서는 전력 사용, 생활폐기물 및 건설폐기물 처리 항목을 주요 반영 항목으로 구성하였다. 특히 건설폐기물 처리에 따른 배출은 사업별 편차가 크게 나타났으나, 대부분 사례에서 높은 기여도를 보이는 주요 배출원으로 확인되었다.

공사단계 온실가스 배출량을 정책 지표로 활용하기 위해서는 주요 공정과 간접배출 항목을 포함한 표준화된 산정 체계가 필요하다. 본 연구 결과, 동일 규모의 공동주택 개발사업이라 하더라도 환경영향평가 시 반영 공정 및 배출원 범위에 따라 배출량이 최대 3.5배까지 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 현재 환경영향평가에서 사업별로 상이한 산정 범위가 적용되고 있음을 의미하며, 공사단계 온실가스 배출량의 비교 가능성과 신뢰성을 저하시킬 수 있다.

이에 따라 환경영향평가 단계에서는 철거공, 토공 및 구조물공과 같은 주요 공정과 전력 사용, 생활폐기물 및 건설폐기물 처리와 같은 주요 배출원을 최소 반영 항목으로 설정할 필요가 있다. 이를 통해 사업 간 공사단계 온실가스 배출량의 비교 가능성을 향상시키고, 보다 일관된 온실가스 배출량 관리체계를 구축할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 산정 범위의 차이를 유형화하고 주요 배출 항목을 기준으로 통합형 산정 범위를 제안하였다는 점에서 의의가 있다. 다만 본 연구에서 제안한 통합형 모델은 공사단계를 대상으로 분석을 수행하였기 때문

에 운영단계 및 해체단계를 포함한 전주기적 온실가스 배출 특성을 반영하지 못한 한계가 있다. 향후에는 운영단계를 포함한 전주기적 배출 특성 분석과 저탄소 건설기술과의 연계 방안에 대한 추가 연구가 필요하다.

References

- Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394-416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>
- 온실가스종합정보센터. (2025). 2025년 승인 국가 온실가스 배출·흡수계수.
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea (GIR). (2025). [Approved national greenhouse gas emission and absorption factors in 2025]. <https://www.gir.go.kr/home/board/read.do?menuId=36&boardId=86&boardMasterId=2>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). *Global Warming of 1.5°C*. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- 김건웅, 고명진, 김용식, 최두성, 조균형. (2014). 공동주택 시공단계 유류 소비량 영향요인 조사 및 분석. *한국생활환경학회지*, 21(2), 195-204.
- Kim, G.-W., Ko, M.-J., Kim, Y.-S., Choi, D.-S., & Jo, K.-H. (2014). The investigation and analysis of oil consumption impact factors on construction stage of the apartment housing. *Journal of the Korean Society of Living Environmental System*, 21(2), 195-204. <https://doi.org/10.21086/ksles.2014.04.21.2.195>
- 김종엽, 이승언, 손장열. (2004). 건축물 건설단계에서의 에너지소비량 및 CO₂ 배출량 원단위 산출.

- 대한건축학회논문집, 20(10), 319-326.
- Kim, J.-Y., Lee, S.-U., & Son, J.-Y. (2004). An estimation of the energy consumption & CO₂ emission intensity during building construction. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 20(10), 319-326.
- 이종건, 태성호, 채창우, 김낙현. (2016). 공동주택 시공 과정의 공종별 CO₂ 배출 특성분석에 관한 연구. *전과정평가학회지*, 17(1), 51-59.
- Lee, J. G., Tae, S. H., Chae, C. W., & Kim, R. H. (2016). A study on the analysis of CO₂ emission by work-type in the apartment housing construction. *Korean Journal of Life Cycle Assessment*, 17(1), 51-59. <https://doi.org/10.62765/kjlca.2016.17.1.51>
- 기후에너지환경부. (2015). 온실가스 항목 환경영향평가등 평가지침.
- Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE). (2015). [Guidelines for greenhouse gas assessment in environmental impact assessment]. http://www.mcee.go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuId=10261&seq=6606
- 기후에너지환경부. (2025a). 2023년 전국 폐기물 발생 및 처리현황.
- Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE). (2025a). [National Waste Generation and Treatment Status in 2023]. <https://library.mcee.go.kr/#/search/detail/5923931?offset=6>
- 기후에너지환경부. (2025b). 에너지법 시행규칙. (2025. 10. 1. 시행). 국가법령정보센터.
- Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE). (2025b). [Enforcement Rule of the Energy Act]. (2025, October 1). Korean Law Information Center. <https://www.law.go.kr/lsInfoP.do?efYd=20251001&lsiSeq=278961>
- 기후에너지환경부. (2025c). 환경영향평가서등 작성 등에 관한 규정. (2025. 10. 23. 시행).
- Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE). (2025c). [Regulations on Preparation of Environmental Impact Assessment Documents]. (2025, October 23). Korean Law Information Center. <https://www.law.go.kr/LSW/admRulInfoP.do?admRulSeq=2100000265318>
- 기후에너지환경부. (2026). 신·재생에너지 설비의 지원 등에 관한 규정. (2026. 7. 15. 시행).
- Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE). (2026). [Regulations on Support for New and Renewable Energy Facilities]. (2026, July 15). Korean Law Information Center. <https://www.law.go.kr/LSW/admRulInfoP.do?admRulSeq=2100000282496>
- 국토교통부, 건설연구원. (2026). 2026 건설공사 표준 품셈.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, & Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT). (2026). [2026 standard estimating system for construction works]. <https://cost.kict.re.kr/#/notice/file/detail/44520;page=0;category=calculation>
- Ortiz, O., Castells, F., & Sonnemann, G. (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials*, 23(1), 28-39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012>
- 서울특별시. (2023). 2050 온실가스 감축 추진계획.
- Seoul Metropolitan Government. (2023). [2050 Greenhouse gas reduction plan]. <https://news.seoul.go.kr/env/archives/510120>
- 서울특별시. (2024). 2040 하수도 정비 기본계획.
- Seoul Metropolitan Government. (2024). [2040 Seoul sewerage maintenance master plan]. <https://news.seoul.go.kr/env/archives/561308>
- 서울특별시. (2025). 서울시 온실가스 인벤토리 보고서 (2023년분).
- Seoul Metropolitan Government. (2025). [Seoul greenhouse gas inventory report (2023)]. <https://news.seoul.go.kr/env/climate-environment/climate-change-strategy/green-inventory-report#view/451138>

Appendix A. Energy Properties and Emission Factors

The energy properties and greenhouse gas emission factors used in this study were obtained from the Approved National Greenhouse Gas Emission and Absorption Factors (GIR, 2025), the Enforcement Rule of the Energy Act, and the Regulations on Support for New and Renewable Energy Facilities.

Table A1. Energy Properties and Greenhouse Gas Emission Factors by Energy Source

Energy Source	Net Calorific Value of Diesel Fuel (MJ/L)	GHG Emission Factor (kg/TJ)			GHG Emission Factor (kgCO ₂ eq/MWh)
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Diesel	35.3	74,100	3.0	2.0	-
Electricity	-	-			433

Appendix B. Standard Equipment Sets and Input Parameters

The standard equipment sets and input parameters used for estimating direct emissions are summarized in Table B1. The equipment configurations were defined based on representative construction equipment commonly used in apartment housing projects and were applied as standardized sets to enable comparison of emission characteristics across construction activities. The hourly fuel consumption rates were obtained from the Standard Estimating System for Construction Works (2026). Each equipment set represents a typical combination used in each construction activity, and one standard set was assumed for comparative analysis. The specifications of major equipment were defined based on commonly used capacities in apartment housing construction.

Table B1. Composition of Standard Equipment Sets and Input Parameters by Construction Work Type

Work Type	Equipment	Specification	Units per Standard Set	Energy Source	Hourly Consumption
Demolition	Excavator	1.0 m ³ (with breaker)	1	Diesel	19.5 L/Hr
	Dump Truck	24 ton	1	Diesel	23.0 L/Hr
Earthwork	Excavator	1.0 m ³	1	Diesel	19.5 L/Hr
	Dump Truck	24 ton	1	Diesel	23.0 L/Hr
	Bulldozer	32 ton	1	Diesel	41.6 L/Hr
	Vibratory Roller	10 ton	1	Diesel	14.4 L/Hr
Structural Work	Concrete Pump Truck	43 m boom	1	Diesel	26.3 L/Hr
	Concrete Mixer Truck	6 m ³	1	Diesel	13.0 L/Hr
	Tower Crane	12 ton	1	Electricity	42 kWh/Hr
Finishing Work	Crane	10 ton	1	Diesel	3.8 L/Hr
	Forklift	2.5 ton	1	Diesel	4.0 L/Hr
Landscaping	Excavator	0.8 m ³	1	Diesel	15.3 L/Hr

Appendix C. Estimated GHG Emissions by Standard Equipment Set

This appendix provides detailed input data and intermediate results used for estimating greenhouse gas emissions during the construction phase.

The estimation was conducted based on a standard equipment set for each work type, including demolition, earthwork, structural work, finishing work, and landscaping. Operating hours were derived from reconstructed construction durations based on the SH construction period estimation guideline, and fuel/electricity consumption was calculated using equipment-specific hourly consumption rates.

Emissions of CO₂, CH₄, and N₂O were estimated using corresponding emission factors, and total GHG emissions were calculated in tCO₂eq.

This appendix is intended to enhance transparency and allow reproducibility of the calculation methodology presented in the main text.

Table C1. Estimated GHG Emissions by Standard Equipment Set

Work Type	Equipment	Operating Hours (hr)	Total Fuel Consumption (L or MWh)	CO ₂ Emission (kgCO ₂ eq)	CH ₄ Emission (kgCO ₂ eq)	N ₂ O Emission (kgCO ₂ eq)	Total GHG Emissions (tCO ₂ eq)
Demolition	Excavator	1,160	22,620 L	59,167.8	50.3	495.1	59.71
	Dump Truck		26,680 L	69,787.7	59.3	583.9	70.43
	Sum		49,300 L	128,957.5	109.6	1,079.0	130.14 (18.7%)
Earthwork	Excavator	480	9,360 L	24,483.2	20.8	204.9	24.71
	Dump Truck		11,040 L	28,877.7	24.6	241.6	28.14
	Bulldozer		19,968 L	52,230.9	44.4	437.0	52.71
	Vibratory Roller		6,912 L	18,079.9	15.4	151.3	18.25
	Sum		47,280 L	123,671.7	105.2	1,034.8	124.81 (18.0%)
Structural Work	Concrete Pump Truck	3,208	84,370.4 L	220,690.2	187.6	1,846.5	222.72
	Concrete Mixer Truck		41,704 L	109,086.4	92.7	912.7	110.09
	Tower Crane		134,736 kWh	58,340.7	-	-	58.34
	Sum			388,116.7	280.3	2,759.3	391.15 (56.4%)
Finishing Work	Crane	1,560	5,928 L	15,506.0	13.2	129.7	15.65
	Forklift		6,240 L	16,322.2	13.9	136.6	16.47
	Sum		12,168 L	31,828.2	27.1	266.3	32.12 (4.6%)
Landscaping	Excavator	400	6,120 L	16,008.3	13.6	133.9	16.16 (2.3%)
Sum (Total)							694.39 (100.0%)

Appendix D. Comparison of On-site Personnel by Construction Project Scale

This appendix provides a comparative analysis of on-site personnel according to construction project scale. While project size indicators, such as construction cost and number of households, vary considerably, the number of contractor and supervision personnel remains within a relatively narrow range. Based on this observation, a representative workforce size of 36 personnel was adopted for indirect emission estimation.

Table D1. Comparison of Contractor and Supervision Personnel by Construction Project Scale

Case	Construction Cost (billion KRW)	Number of Households	Contractor Personnel	Supervision Team	Construction Duration (months)
Case A	153	75	8	9	24
Case B	407	132	10	10	31
Case C	1,278	555	24	19	36
Case D	1,448	608	28	20	32
Case E	2,612	1,305	28	18	42
Case F	4,716	1,240	39	20	45

Appendix E. Unit Factors for Indirect Emissions

This appendix presents the unit factors and activity data applied in estimating indirect emissions associated with on-site operations during the construction phase. The categories include electricity/heating, water supply, wastewater, solid waste, and excreta, which are related to temporary site facilities and workforce activities. All unit factors were derived from established national and municipal references to ensure consistency and reliability of the estimation.

Table E1. Activity Data and Assumptions Used for Indirect GHG Emission Estimation

Category	Unit factor / Activity data	Basis	Source
Electricity / Heating	Temporary office: 570 m ²	Estimated from direct labor cost (>500 billion KRW) based on Standard Construction Estimating System	Standard Construction Estimating System (2026)
Water Supply	204 L/capita·day	Domestic water use unit	Seoul Sewerage Master Plan (2040)
Wastewater	196.7 L/capita·day	Water use × effective water rate × wastewater conversion rate	
Solid Waste	1.08 kg/capita·day	Municipal solid waste generation rate in Seoul	National Waste Generation and Treatment Status (2023)
Excreta	1.15 L/capita·day	Average excreta generation rate in Seoul	Seoul Sewerage Master Plan (2040)