

Research Paper

온실가스 감축 실효성 확보를 위한 기후변화영향평가 대상 도시의 개발사업 사후관리 개선방안

조영일*,** · 김유미***

한국환경연구원 환경평가본부 환경자원평가실*, 연세대학교 도시공학과**,
한국환경연구원 환경평가본부 기후에너지평가실***

Post-Implementation Monitoring Strategies to Ensure the Effectiveness of Greenhouse Gas Reduction Measures in Urban Development Projects under Climate Change Impact Assessment

Young-Il Cho*,** · Yumi Kim***

Environmental Assessment Group, Environmental Resources Assessment Division, Korea Environment Institute*

Department of Urban Planning and Engineering, Yonsei University**

Environmental Assessment Group, Environmental Resources Assessment Division, Korea Environment Institute***

요약: 기후변화영향평가는 개발사업의 온실가스 배출과 기후변화 영향을 사전에 분석·평가하는 제도로서, 협의 이후 사후관리 단계에서 감축방안의 실효성을 확보하는 것이 중요하다. 그러나 현행 제도에는 기후변화영향평가의 특성을 반영한 사후관리 절차나 조사 기준이 구체적으로 마련되어 있지 않다. 본 연구는 2024~2025년 기후변화영향평가가 수행된 도시의 개발사업 총 6건을 대상으로, 온실가스 감축방안과 사후환경영향조사계획 간 연계 현황을 분석하고 사후관리 개선방안을 제시하였다. 분석 결과, 총 26개의 온실가스 감축방안(공사 단계 7개, 운영 단계 19개)과 20개의 사후환경영향조사 항목(공사 단계 9개, 운영 단계 11개)이 도출되었으며, 감축방안과 사후환경영향조사항목 간 연계율은 대책별로 큰 편차를 나타내는 경향을 보였다. 에너지 전환·효율 및 탄소흡수원 부문은 상대적으로 높은 연계율을 보인 반면, 자원순환·수소 활용 부문은 낮은 연계율을 보여 부문별 사후관리 반영 수준에 차이가 있었다. 또한 현행 사후환경영향조사계획은 대책의 도입·설치 여부 확인에 집중되어 있어, 배출량·흡수량의 정량적 모니터링 체계는 미흡한 것으로 파악되었다. 이를 개선하기 위해 협의내용 이행관리 측면에서 기존 법령 및 인증제도를 활용한 점검 방안을 제시하고, 사후환경영향조사 측면에서 탄소공간지도를 활용한 배출량 모니터링과 UAV 다분광 영상 기반 흡수량 산정 방법론을 제안하였다. 또한, 세종특별자치시 집현동 공동주택단지를 대상으로 해당 방법론의 적용 가능성을 확인하였다. 본 연구는 기후변화영향평가의 사후관리 체계를 구체화하는 데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 기후변화영향평가, 온실가스 감축, 사후관리, 도시의 개발사업, 온실가스 흡수원 조사

Abstract: The Climate Change Impact Assessment (CCIA) is a regulatory system designed to analyze and evaluate greenhouse gas (GHG) emissions and climate change impacts of development projects prior to implementation. Ensuring the effectiveness of GHG reduction measures during the post-consultation management phase is essential. However, the current regulatory framework lacks specific post-management procedures and survey criteria tailored to the characteristics of CCIA. This study analyzed the linkage between GHG reduction measures and post-environmental impact survey plans for six urban development projects for which CCIA was conducted during 2024–2025, and proposed improvements for post-management practices. The analysis identified a total of 26 GHG reduction measures (7 for the construction phase and 19 for the operational phase) and 20 post-environmental impact survey items (9 for the construction phase and 11 for the operational phase). The linkage rates varied considerably across individual reduction measures. While the energy transition/efficiency and carbon sink sectors showed relatively high linkage rates, the resource circulation and hydrogen utilization sectors exhibited low linkage rates, indicating considerable variation in their inclusion in post-management monitoring plans. Furthermore, current post-environmental impact survey plans were found to focus primarily on verifying whether reduction measures had been introduced or installed, while quantitative monitoring items for GHG emissions and carbon absorption remained limited. To address these limitations this study proposed inspection methods leveraging existing legislation and certification systems from the perspective of consultation compliance management. It also proposed an emissions monitoring approach using the Carbon Spatial Maps along with a carbon absorption estimation method based on unmanned aerial vehicle (UAV) multispectral imagery from the perspective of post-environmental impact monitoring. The applicability of the proposed methodologies was examined using a residential complex in Jiphyeon-dong, Sejong Special Autonomous City, as a case application. This study is expected to provide foundational data for developing a more structured post-management framework for CCIA.

Keywords: *Climate Change Impact Assessment, Greenhouse Gas Reduction Measures, Post-Implementation Monitoring, Urban Development Projects, Carbon Sink Monitoring*

I. 서론

도시는 전 세계 에너지 소비와 온실가스 배출의 상당 부분이 집중되는 공간으로, 탄소중립 달성을 위한 핵심 관리 대상으로 인식되고 있다(IPCC 2022; Seto et al., 2014). 특히 도시의 개발사업은 건물, 수송, 에너지 이용, 토지이용 등 다양한 부문의 온실가스 배출에 영향을 미치며, 사업 초기 단계에서 이루어지는 공간구조 및 기반시설 계획은 장기적인 배출 경로를 결정하는 것으로 알려져 있다(Creutzig et al., 2016). 또한 공원·녹지 조성과 같은 탄소흡수원 확보 방안은 도시의 온실가스 저감에 기여할 수 있어, 도시의 개발사업에서는 온실가스 배출 저감과 탄소흡수원 확보를 동시에 고려하는 통합적 접근이 요구된다(Zhao et al., 2023).

이러한 배경에서 기후변화영향평가는 도시의 개발 사업을 비롯한 개발사업의 계획 단계에서 온실가스 배출과 기후변화 영향을 사전에 분석·평가하기 위한 제도적 수단으로 도입되었다(Jung & Lee 2025; Lee et al., 2018). 제도 시행 초기에는 제도적 기반 마련, 평가기법 개발, 시범사업 수행, 운영 방안 등에 관한 연구가 수행되어 왔다(Choi et al., 2024; Lee, 2023; Lee et al., 2023). 그러나 기후변화영향평가 협의 이후 단계에서 온실가스 감축방안의 이행 여부와 감축 효과를 어떤 방식으로 점검할 수 있는지에 관한 연구는 상대적으로 부족하다.

환경영향평가 분야에서의 사후관리는 평가서에 제시된 예측, 저감방안 및 협의내용의 이행 여부를 확인하고, 사업 시행 이후의 실제 환경성결과를 관리하기 위

한 핵심 절차로 논의되어 왔다(Marshall et al., 2005; Morrison-Saunders et al., 2021). 사후관리는 환경영향평가의 사전·사후 단계 간 이행격차를 해소하는 데 핵심적 역할을 하며, 그 효과성은 규제·기법·자원·사업유형 등 맥락요인과 사업자·규제기관·시민사회 간 상호작용에 의해 좌우된다(Morrison-Saunders et al., 2003; Marshall et al., 2005). 또한 사후관리는 모니터링·평가·관리·소통·거버넌스의 5개 차원에 걸친 기준을 통해 운영되며, 모니터링 결과를 관리 조치로 환류하는 과정으로 정립되었다(Pinto et al., 2019; Morrison-Saunders et al., 2021). 이러한 논의는 기후변화영향평가에서도 협의 이후 단계의 이행점검과 정량적 모니터링 체계가 중요함을 시사한다.

Mayembe et al. (2023)은 19개국 환경영향평가 제도의 기후변화 통합 수준을 비교하면서, 온실가스 관련 사후 모니터링(post-decision monitoring) 강화의 필요성을 공통 과제로 제시하였다. 국내에서는 Jung and Lee (2025)가 2022년 시행된 한국 기후변화영향평가 제도를 정책적 관점에서 분석하고, 공공주택지구 등 도시의 개발사업 적용 사례 검토와 더불어 서울 도심·도시배경 지점의 CO₂ 농도 관측 자료를 토대로 도시 온실가스 관측망과 제도 간 연계 가능성을 제시하였다. 그러나 이들 선행연구는 환경영향평가 사후관리의 일반 원칙 또는 기후변화영향평가 제도의 구조·절차에 대한 거시적 분석에 초점을 두고 있어, 사업 단위에서 감축방안과 사후관리 항목 간 대응 관계를 정량적으로 분석한 사례는 확인되지 않는다.

최근에는 도시 단위의 탄소중립 이행을 지원하기 위해 온실가스 배출량을 공간적으로 산정·관리하는 연구가 확대되고 있다. 국내에서는 탄소공간지도 구축 및 활용 방향에 관한 연구가 수행되었으며(Kim & Jung, 2024), IPCC 가이드라인을 기반으로 서울시 탄소지도를 구축하고 배출·흡수의 공간적 특성을 분석한 연구도 제시되었다(Rhim et al., 2024). 국외에서도 도시 단위 배출량을 고해상도 격자로 공간분해하거나 상향식 배출량 인벤토리를 구축하는 연구가 진행되고 있어(Gurney et al., 2019; Wang et al., 2024), 기후변화영향평가 대상 도시의 개발사업 사후관리 단계에서도 공간 기반 배출량 모니터링 방법론의 활용 가능성을 검토할 필

요가 있다. 아울러 도시 녹지의 탄소흡수 기능은 조성 여부뿐 아니라 식생 유형과 유지·관리 상태에 따라 달라질 수 있으므로, 흡수원에 대해서도 공간정보 및 원격탐사 자료 등을 활용한 정량적 모니터링 체계가 요구된다(Shahtahmassebi et al., 2021; Zhao et al., 2023).

본 연구는 기후변화영향평가가 수행된 도시의 개발사업을 대상으로 온실가스 감축방안과 사후환경영향조사계획 간 연계 구조를 분석하고, 감축방안의 실효성 확보를 위한 사후관리 개선방안을 제시하고자 한다. 첫째, 기후변화영향평가서에 제시된 온실가스 감축방안의 구성과 특성을 공사 단계와 운영 단계로 구분하여 파악하고, 사후환경영향조사계획에 포함된 온실가스 관련 조사항목의 현황을 정리한다. 둘째, 감축방안과 사후환경영향조사계획 간 대응 관계를 연계율로 정량화하여 현행 사후관리 체계의 특징과 한계를 도출한다. 셋째, 주요 감축방안에 대해 기존 법령이나 인증제도를 활용한 협의내용 이행관리 점검 방안을 제시하고, 사후환경영향조사 측면에서 배출량·흡수량의 정량적 모니터링 방법론을 제안한다.

II. 연구방법

1. 연구대상 및 자료수집

본 연구는 환경영향평가정보지원시스템(EIASS)을 통해 확인되는 도시의 개발사업 중 기후변화영향평가서 본안이 제출된 사업을 대상으로 한다. 본안은 초안에 비해 감축방안과 사후환경영향조사계획이 확정·보완된 단계로서, 사후관리와의 연계 구조를 분석하기에 적합하다. 2022년 9월부터 2025년 12월까지 수행된 도시의 개발사업 기후변화영향평가서는 총 6건에 해당한다. 해당 사업의 면적은 최소 1,778,618m²에서 최대 12,714,465m²이다. 각 사업의 기후변화영향평가서에서 온실가스 부문별 배출량 및 감축방안과 사후환경영향조사계획 내 온실가스 관련 조사항목을 각각 추출하여 분석 자료로 활용하였다.

2. 온실가스 배출특성, 감축방안 및 사후조사 현황 분석

본 연구에서 사용하는 주요 분석 변수를 다음과 같이 정의한다. ‘감축방안’은 기후변화영향평가서에 명

시된 온실가스 배출 저감 또는 흡수 증대를 위한 개별 대책을 의미한다. ‘사후환경영향조사 항목’은 사후환경영향조사계획에 포함된 온실가스 관련 점검·조사 항목을 말한다. ‘제시율’은 전체 분석 대상 사업 중 해당 감축방안 또는 조사항목을 포함한 사업의 비율이며, ‘연계율’은 해당 감축방안을 제시한 사업 중 대응하는 사후환경영향조사 항목도 함께 포함한 사업의 비율이며, 두 지표 모두 0에서 1범위의 값을 가진다.

감축방안의 부문 분류는 분석대상 기후변화영향평가서들에서 공통적으로 적용된 분류 체계에 따라 정리하였으며, 해당 분류는 Green Technology Center (2019)가 제시한 온실가스 감축기술 분류 체계를 따른 것이다. 이에 따라 공사 단계는 장비·수송·폐기물·건축자재·공공/상업 부문으로, 운영 단계는 에너지 전환, 에너지 효율, 건물, 수송, 자원순환, 수소 활용, 탄소흡수원, 토지이용 부문으로 구분하였다. 사후환경영향조사 항목 또한 동일한 부문 체계에 따라 정리하여 감축방안과의 대응 관계를 분석하였다. 대응관계 분석은 감축방안과 사후환경영향조사 항목의 점검 대상이 일치하는 경우로 한정하였으며, Kim et al. (2025)에서 전문가 자문을 거쳐 검증된 결과를 활용하였다.

대상 사업의 기본 특성을 파악하기 위해, 기후변화영향평가서에 제시된 운영 단계 예상 배출량을 단위 면적당 배출량($\text{tCO}_2\text{eq}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$)으로 환산하고, 2030년대·2040년대·2050년 대별 감축률을 산출하였다. 이어, 감축방안과 사후조사 항목의 현황을 각각 파악하기 위해, 기후변화영향평가서에 제시된 온실가스 감축방안을 공사 단계와 운영 단계로 구분하여 목록화하고, 항목별 제시율을 산출하였다(Equation 1).

$$P_i = \frac{n_i}{N} \quad (1)$$

여기서 P_i 는 감축방안(또는 조사항목) i 의 제시율이며, n_i 는 전체 분석 대상 사업 중 해당 감축방안(또는 조사항목) i 를 포함한 사업 수, N 은 전체 분석 대상 사업 수(본 연구에서는 6)를 의미한다. 이를 바탕으로, 온실가스 감축방안과 사후환경영향조사계획상의 조사항목을 대응시켜, 감축방안별 연계율을 산출하였다(Equation 2).

$$L_i = \frac{m_i}{n_i} \quad (2)$$

여기서 L_i 는 감축방안 i 의 연계율이며, m_i 는 감축방안 i 를 제시한 사업 중 해당 감축방안에 대응하는 사후환경영향조사 항목도 함께 포함한 사업 수, n_i 는 감축방안 i 를 제시한 사업 수를 의미한다. 연계율은 0에서 1범위의 값을 가지며, 1에 가까울수록 감축방안이 사후환경영향조사계획에 높은 비율로 반영되어 있음을 나타낸다.

3. 사후관리 개선 방안 검토

연계율 분석 결과를 바탕으로, 협의내용 이행관리와 사후환경영향조사 두 측면에서 개선 방안을 검토하였다. 협의내용 이행관리 측면에서는, 기존 법령 또는 인증제도를 통해 이행 여부를 객관적으로 확인할 수 있는지 여부, 또는 배출량·흡수량의 정량적 점검 체계 구축이 필요한지 여부를 기준으로 주요 감축방안을 선정하였다. 선정된 감축방안에 대해 공사 단계와 운영 단계로 구분하여 구체적인 점검 항목과 방법을 검토하고, 감축방안별 협의내용 이행관리 점검 방안을 도출하였다.

사후환경영향조사 측면에서는, 온실가스 배출량 및 흡수량의 정량적 모니터링 방법론의 적용 가능성을 확인하기 위해, 현재 운영 단계 중인 세종특별자치시 집현동 공동주택단지를 적용 사례로 선정하였다. 이는 앞서 분석 대상 사업은 협의가 완료되었거나 진행 중인 단계로 아직 착공에 이르지 않아 배출량 및 흡수량 데이터의 확보가 어려운 반면, 해당 단지는 입주가 완료되어 운영 단계 배출 데이터의 확보가 가능하고, 가로수 및 조경녹지가 조성되어 흡수량 산정이 가능한 대상지이다. 배출량은 국토교통부 탄소공간지도 시스템의 격자 단위 배출량 자료를 활용하여 산정하였다(Ministry of Land, 2025). 흡수량은 Unmanned Aerial Vehicle(UAV) 다분광 영상 기반 식생 분류와 국가 승인 탄소흡수계수를 결합하여 산정하였다(Ministry of Environment, 2025).

III. 결과 및 고찰

1. 온실가스 감축방안 현황

분석대상 사업의 단위 면적당 순 배출량은 최소 약 955, 최대 약 1,708 tCO₂eq·ha⁻¹·yr⁻¹ 범위에 분포하며, 평균은 약 1,139 tCO₂eq·ha⁻¹·yr⁻¹로 나타났다(Table 1). 부문별로는 공공·상업부문이 평균 약 574 tCO₂eq·ha⁻¹·yr⁻¹, 가정부문이 약 491 tCO₂eq·ha⁻¹·yr⁻¹로 가장 큰 비중을 차지한다. 수송부문은 약 53 tCO₂eq·ha⁻¹·yr⁻¹, 폐기물 부문은 약 23 tCO₂eq·ha⁻¹·yr⁻¹ 수준으로 나타났다. Land Use, Land-Use Change, and Forestry(LULUCF) 부문은 평균 약 1.7 tCO₂eq·ha⁻¹·yr⁻¹의 흡수가 계획되어 있다.

운영 단계 감축방안의 효과는 각 사업에서 제시한 감축방안 미적용 시 배출량(Business As Usual; BAU) 대비 감축량을 기준으로 2030년대, 2040년대, 2050년대 별 감축률로 환산하여 비교하였다(Table 1). 분석대상 사업 평균 기준으로 2030년대 약 30%, 2040년대 약 34%, 2050년대에는 약 37% 수준으로 점진적 상향을 목표로 설정하고 있었다. 부문별로는 수송부문 감축률이 2030년대 약 32%에서 2050년대 약 92%까지 증가하는 것으로 계획된 반면, 공공·상업 및 가정부문은 시기별로 28~35% 내외의 감축을 목표로 하고 있다. 공공·상업

(약 50%)과 가정부문(약 43%)이 전체 순 배출량의 약 93%를 차지하므로, 이 두 부문에 대한 감축방안의 이행 여부가 사후관리의 핵심 검증 대상이 된다. 또한 수송부문은 감축률의 시기별 상향 폭이 크므로, 중장기적 이행 경과를 단계적으로 점검할 수 있는 체계가 필요하다.

LULUCF 흡수 부문은 배출 부문과 다른 양상을 보인다. 배출 부문이 BAU 대비 감축률을 목표 연도에 따라 단계적으로 상향하는 것과 달리, 분석대상 사업 모두 녹지 조성 완료 시점의 연간 흡수량을 2030년대부터 2050년대까지 동일하게 유지하는 것을 전제로 산정하고 있어, 목표 연도 간 흡수량의 변동은 나타나지 않았다(Table 1). 따라서 사후관리 단계에서는 계획된 녹지 면적이 실제로 조성·유지되어 흡수 기능이 지속되고 있는지를 정량적으로 검증하는 것이 흡수 부문의 핵심 과제가 된다.

분석대상 기후변화영향평가서에 제시된 온실가스 감축방안을 분석한 결과, 총 26개의 감축방안이 도출되었으며, 공사 단계 방안은 7개, 운영 단계 방안은 19개로 파악되었다. 공사 단계에서는 수송 부문의 '노후 건설장비 사용 및 공회전 자제', 폐기물 부문의 '건설폐기물 재활용', 건축 자재 부문의 '저탄소자재 사용', '친

Table 1. Operating-Phase Emissions of Urban Development Projects per Unit Area and Reduction Rates by Target Year

Category		Unit Area (tCO ₂ eq·ha ⁻¹ ·yr ⁻¹)	2030s	2040s	2050s
Reduction Rates (%)					
Total	Net emissions	1139.0±266.6 (955.4~1,707.8)	30.4±11.3 (15.0~46.5)	33.6±10.7 (21.1~51.4)	37.2±11.4 (21.9~56.1)
Emission	Transport	53.0±48.0 (8.7~138.7)	32.4±10.5 (23.7~47.6)	52.3±12.7 (40.0~70.0)	92.0±1.9 (90.6~96.0)
	Public/Commercial	573.9±191.2 (413.2~947.7)	27.7±9.9 (16.5~41.0)	29.8±8.6 (16.5~41.0)	31.8±9.6 (16.5~41.4)
	Industry	-	NA	NA	NA
	Residential	490.9±159.0 (264.3~731.0)	31.9±15.8 (11.7~58.6)	33.3±14.1 (20.4~58.6)	34.8±13.2 (20.4~58.6)
	Waste	23.0±9.8 (5.8~38.8)	45.2±27.0 (3.5~81.6)	55.0±24.4 (10.5~85.5)	63.2±22.9 (17.4~88.4)
	Agriculture	-	NA	NA	NA
Planned Absorption Trend by Target Year					
Absorption	LULUCF	1.7±1.2 (0.02~2.8)	No variation across target years		

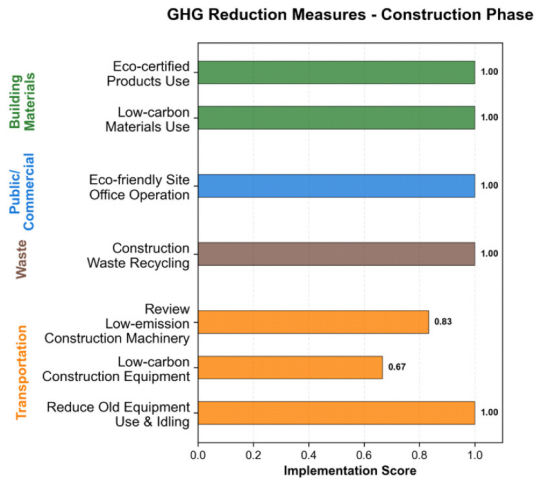


Figure 1. Frequency of Construction-Phase GHG Reduction Measures in CCIA Reports for Urban Development Projects

환경 인증제품 사용', 공공/상업 부문의 '친환경 건설 사무실 운영' 방안은 분석대상 전 사업에서 공통으로 제시되었다(Figure 1). 반면, '저공해건설기계 사용 검토'는 5개 사업(0.83), '저탄소 건설장비 사용'은 4개 사업(0.67)에서 제시되어, 공사 단계 장비·기계 부문의 저감대책은 사업별 편차가 존재하는 것으로 나타났다.

공사 단계에서 제시된 감축방안들의 유효성은 선행 연구에서도 뒷받침된다. Kim et al. (2012)은 한국 도로

건설 프로젝트를 대상으로 장비 유형별 온실가스 배출량을 비교·분석하고, 장비의 공회전 저감과 적정 유지보수가 연료 절감 및 장비 효율 향상에 기여할 수 있음을 제시하였다. Truitt (2009) 역시 오프로드 디젤 장비의 공회전을 10% 줄일 경우 미국 건설 부문에서 연간 약 83만 톤의 CO₂를 저감할 수 있다고 추정한 바 있다. 건설폐기물 재활용의 탄소저감 효과 또한 다수 연구에서 확인되고 있으며, Wang et al. (2022)은 상하이 사례 연구를 통해 건설폐기물 1톤의 재활용이 약 100.4kg의 CO₂를 절감할 수 있음을 보고하였다. 저탄소 자재 및 친환경 인증제품의 사용은 건축물 전 생애주기 관점에서 체화탄소(embodied carbon) 저감의 핵심 요소로 다루어지고 있으며, Chen et al. (2023)은 건설 부문이 전 세계 에너지 소비의 36%, 탄소배출의 39%를 차지하는 만큼 자재 단계에서의 저탄소 전환이 시급함을 강조하였다.

운영 단계에서는 에너지 전환, 에너지 효율, 건물, 수송, 자원순환, 수소 활용, 탄소흡수원 확대, 탄소 저감형 토지이용계획 등 다양한 부문의 대책이 제시된다(Figure 2). 태양광 발전, 지열에너지, 에너지이용효율 향상 설비, 제로에너지건축물(Zero Energy Building; ZEB), 건물 탄소 감축, 친환경 자동차 도입, 녹색교통 체계·인프라 구축 등은 대부분 사업에서 공통적으로

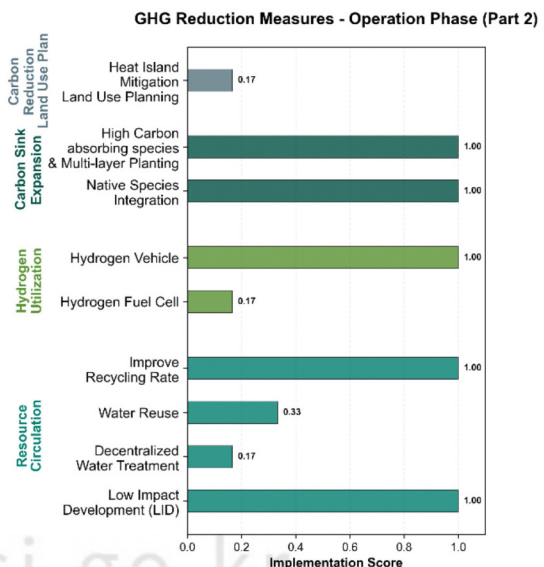
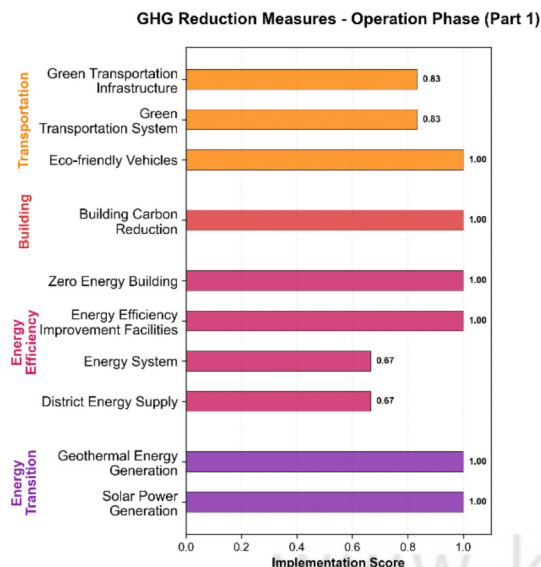


Figure 2. Frequency of Operational-Phase GHG Reduction Measures in CCIA Reports for Urban Development Projects

제시되었다. 반면, 물 재이용, 분산형 수처리, 수소연료 전지, 도시 열섬 저감형 토지이용 계획 등은 일부 사업에 한정되어 나타난다. 본 연구 대상 사업의 분석 결과, 제도적 의무화 여부와 기술 성숙도는 감축방안의 제시 여부에 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 에너지 전환·효율 부문과 탄소흡수원은 관련 법령 및 인센티브에 의해 사업별 편차가 작게 나타난 반면, 수소 활용 부문은 도시의 개발사업 단계에서 차량 보급·연료전지 설비에 관한 의무 기준이 부재하고, 인프라 보급 비용과 사회적 수용성 등 구조적 제약이 보고되어 왔다(Kim et al., 2020; Pak & Lee, 2024). 자원순환 부문의 물 재이용·분산형 수처리 등은 기술적 적용 가능성에도 불구하고, 계획대비 실적 저조, 비용부담 및 이용자 수용성 문제, 제도적 지원 미비 등의 장벽으로 인해 기후변화영향평가서 내 감축방안으로 제시되는 비율이 낮게 나타났을 가능성이 있다(Lee & Mendoza, 2022; Garrido-Baserba et al., 2024).

운영 단계 감축방안의 효과성 역시 학계에서 광범위하게 검증되고 있다. 태양광·지열에너지 등 신재생에너지 도입과 제로에너지건축물은 건물 부문 탈탄소화의 핵심 전략으로 평가되며, Li et al. (2025)은 고성능 단열재가 냉난방 부하를 최대 18.2%까지 저감하고, 옥상

태양광 시스템이 특정 지역에서 가정 에너지 수요의 최대 70%를 충당할 수 있음을 보고하였다. 도시 녹지를 통한 탄소흡수원 확대는 자연기반해법(Nature-Based Solutions)의 대표적 적용 사례로서, Nowak et al. (2013)은 미국 28개 도시의 현장 측정 데이터를 기반으로 도시 수목이 약 6억 4,300만 톤의 탄소를 저장하고 연간 2,560만 톤을 흡수하는 것으로 추정하여, 도시 녹지의 탄소저감 기여가 정량적으로 유의미한 수준임을 제시하였다. 또한 녹색교통 체계 구축과 친환경 차량 보급은 도시 수송 부문 온실가스 감축의 핵심으로, Winkler et al. (2023)은 런던 사례를 통해 차량 전기화만으로는 파리협정 목표 달성에 불충분하며, 대중교통 확대와 자동차 이용 감소를 포함한 통합적 정책 조합이 필수적임을 실증하였다. 이는 기후변화영향평가서에 제시된 운영 단계 감축방안들이 학술적 근거에 기반한 실효적 대책임을 확인해 주며, 이러한 방안들이 계획 단계에 그치지 않고 사업 이행 과정에서 체계적으로 관리·검증될 필요성을 시사한다.

2. 사후환경영향조사계획 내 온실가스 관리 항목

분석대상 도시의 개발사업의 기후변화영향평가서 수립된 사후환경영향조사계획에서 온실가스 관련 조

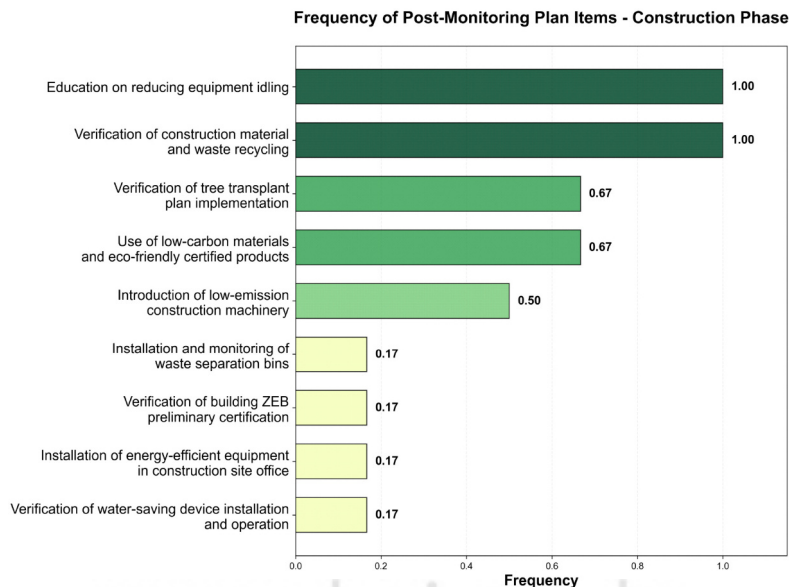


Figure 3. Frequency of Construction-Phase Post-Monitoring Plan Items for GHG Reduction in CCIA Reports for Urban Development Projects

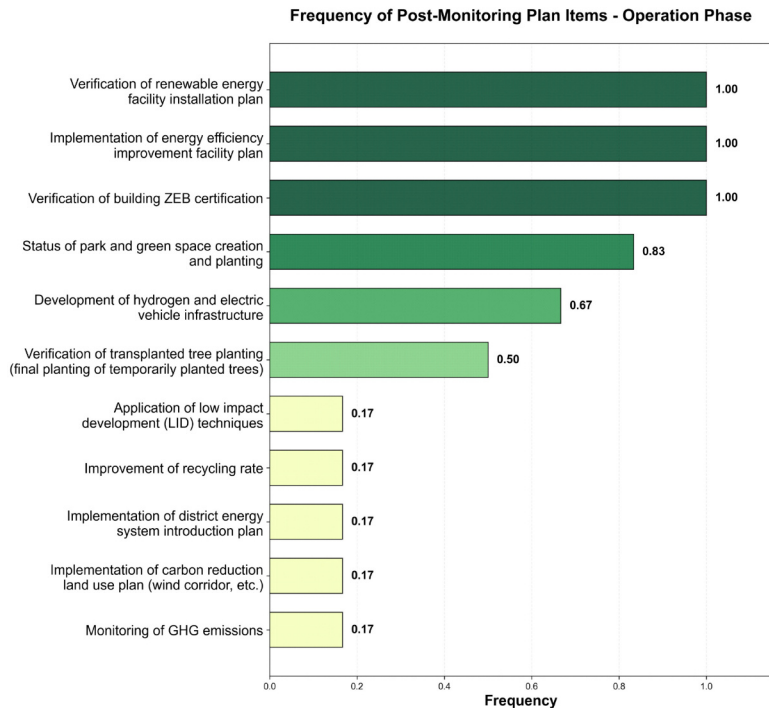


Figure 4. Frequency of Operational-Phase Post-Monitoring Plan Items for GHG Reduction in CCIA Reports for Urban Development Projects

사항목을 추출한 결과, 공사 단계 9개, 운영 단계 11개의 항목이 도출되었다. 공사 단계에는 ‘공사장비 공회전 자제 등 교육 이행 여부’와 ‘건설자재 및 폐기물 재활용 실시 확인’이 6개 전 사업에서 공통적으로 제시되었다(Figure 3). ‘저탄소 자재 및 친환경 인증제품 사용 여부’와 ‘수목이식 계획 이행 여부 확인’은 4개 사업, ‘저공해 건설기계 도입여부’는 3개 사업에서 제시되어, 장비·자재·수목이식 관련 항목이 공사 단계 사후관리 of 중심을 이루고 있다. 반면, ‘절수형 기기 설치 여부’, ‘생활폐기물 분리수거함 설치 및 관리 모니터링’, ‘현장사무실 내 에너지효율 설비 설치 여부’, ‘제로에너지 건축물 예비인증 확인’ 등은 일부 사업에만 포함되어 사업별 편차가 큰 것으로 나타났다.

운영 단계에는 ‘신·재생에너지 설비 도입계획 이행 확인’, ‘에너지이용효율 향상설비 도입계획 이행 여부’, ‘제로에너지건축물 인증 확인’이 전 사업에서 공통적으로 제시되며, ‘공원·녹지 조성 및 식재 현황’도 5개 사업에서 포함되어 있다(Figure 4). 반면, ‘온실가스 배출량 점검’ 항목은 전체 사업 중 1개 사업에서만 제시되

었다. 이는 대부분의 사업에서 사후조사가 에너지 설비·인프라의 도입 여부 확인에 집중되어 있으며, 운영 단계 온실가스 배출량·흡수량을 정량적으로 모니터링 하기 위한 항목은 제한적인 것으로 나타났다.

3. 감축방안과 사후관리 간 연계 분석

1절과 2절에서 도출된 온실가스 감축방안(26개)과 사후환경영향조사 항목(20개) 간 대응 관계는 Table 2에 정리하였다. 분석 결과, 현행 사후관리 체계의 세 가지 구조적 특성이 확인되었다. 첫째, 감축방안의 제시 빈도와 사후조사 항목의 점검 범위 사이에 비대칭성이 존재한다. 공사 단계 7개 감축방안 중 1개, 운영 단계 19개 중 8개가 대응 사후조사 항목 없이 평가서에만 제시되어 있다. 이는 일부 부문에서 감축방안에 대한 계획은 수립하였으나 그 이행은 사후 점검 절차에 포함되지 않음을 시사한다. 둘째, 사후조사 항목 일부는 둘 이상의 감축방안을 단일 항목으로 통합 점검하는 구조를 지닌다. ‘저탄소 자재 및 친환경 인증제품 사용 여부’ (공사 단계), ‘신·재생 에너지 설비 도입계획 이행 확인’

Table 2. Correspondence between GHG Reduction Measures and Post-Environmental Impact Monitoring Items in CCIA Reports of Urban Development Projects

Phase	Sector	Reduction Measure	Post-Monitoring Item
Construction	Transportation	Reduce old equipment use and idling	Education on reducing equipment idling
		Low-carbon construction equipment	-
		Review of low-emission construction machinery	Introduction of low-emission construction machinery
	Waste	Construction waste recycling	Verification of construction material and waste recycling installation and monitoring of waste separation bins
	Public/Commercial	Eco-friendly site office operation	Installation of energy-efficient equipment in construction site office
		Low-carbon materials use	Verification of water-saving device installation and operation
	Building Materials	Eco-certified products use	Use of low-carbon materials and eco-friendly certified products
		Solar power generation	Verification of renewable energy facility installation plan
	Energy Transition	Geothermal energy generation	Implementation of district energy system introduction plan
		District energy supply	-
Operation	Building	Energy system	Implementation of energy efficiency improvement facility plan
		Energy efficiency improvement facilities	Verification of building ZEB preliminary certification (Construction)
		Zero energy building (ZEB)	Verification of building ZEB certification (Operation)
	Transportation	Building carbon reduction	-
		Eco-friendly vehicles	-
		Green transportation system	-
	Resource Circulation	Green transportation infrastructure	Development of hydrogen and electric vehicle infrastructure
		Low Impact Development (LID)	Application of low impact development (LID) techniques
		Decentralized water treatment	-
	Hydrogen Utilization	Water reuse	-
		Improve recycling rate	Improvement of recycling rate
		Hydrogen fuel cell	-
	Carbon Sink Expansion	Hydrogen vehicle	-
		Native species integration	Verification of transplanted tree planting (final planting of temporarily planted trees) (Operation)
		High carbon-absorbing species and multi-layer planting	Verification of tree transplant plan implementation (Construction)
Carbon Reduction Land Use Plan	Cross-sectoral	Status of park and green space creation and planting	Implementation of carbon reduction land use plan (wind corridor, etc.)
		Heat island mitigation land use planning	Monitoring of GHG emissions
		Not applicable (monitoring item, not a reduction measure)	

Note: “-” indicates that no directly corresponding post-monitoring item for the reduction measure was established in the CCIA reports analyzed in this study.

(운영 단계) 등이 대표적이다. 셋째, 운영 단계 사후환경영향조사 항목 중 ‘온실가스 배출량 점검’은 특정 감축방안에 직접 대응되지 않는 결과 기반 모니터링 항목으로 분류된다. 이는 개별 대책의 이행 여부 점검을 넘어 사업 전체의 배출량 결과를 정량적으로 검증하기 위한 항목이라는 점에서, 이행 점검 중심으로 구성된 여타 항목들과 성격을 달리한다. 전술된 대응 관계 구조를 바탕으로, 감축방안별 연계율을 정량적으로 산출하여 부문별 편차와 사후관리 체계의 한계를 분석하였다.

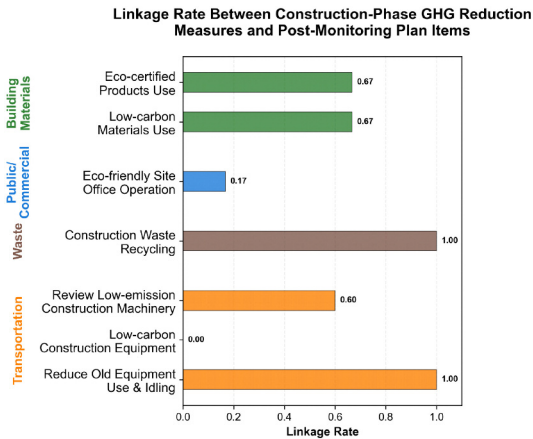


Figure 5. Linkage Rate Between Construction-Phase GHG Reduction Measures and Post-Monitoring Plan Items

감축방안별 사후환경영향조사계획과의 연계율 산출 결과, 공사 단계와 운영 단계 모두에서 대책별 편차가 크게 나타났다. 공사 단계의 경우, ‘노후 건설장비 사용 및 공회전 저감’과 ‘건설폐기물 재활용’은 연계율 1.00으로, 전 사업에서 사후조사 점검 항목으로 포함되어 있다(Figure 5). 반면 ‘저탄소 건설장비 사용’은 0.00으로, 감축방안으로는 제시되나 사후조사에는 반영되지 않았다. ‘저공해 건설기계 사용 검토’는 0.60, ‘친환경 인증제품 사용’과 ‘저탄소 자재 사용’은 각각 0.67, ‘친환경 현장사무실 운영’은 0.17로 나타났다.

운영 단계의 경우, 에너지 전환·효율 부문에서 ‘태양광 발전’, ‘지열 발전’, ‘에너지 효율 향상 설비 도입’, ‘제로에너지건축물’은 모두 연계율 1.00으로 나타났다(Figure 6). 탄소흡수원 및 토지이용 부문에서도 ‘열섬 저감형 토지이용 계획’, ‘탄소흡수율이 높은 수종 및 다층구조 식재’, ‘기존 자연식생과 연계한 수종 도입’은 모두 1.00이었다.

반면, ‘녹색교통 인프라’는 0.80으로 비교적 높은 연계를 보였으나, ‘집단에너지 공급’은 0.25에 머물렀다. ‘에너지 시스템 고도화’, ‘건물 탄소 감축’은 0.00으로, 감축방안으로 제시되나 사후조사에는 반영되지 않았다. 수송 부문의 ‘녹색교통체계’와 ‘친환경 차량 도입’, 수소 활용 부문의 ‘수소자동차’와 ‘수소연료전지’ 또한 모두 0.00으로 나타났다. 사후환경영향조사계획에 수

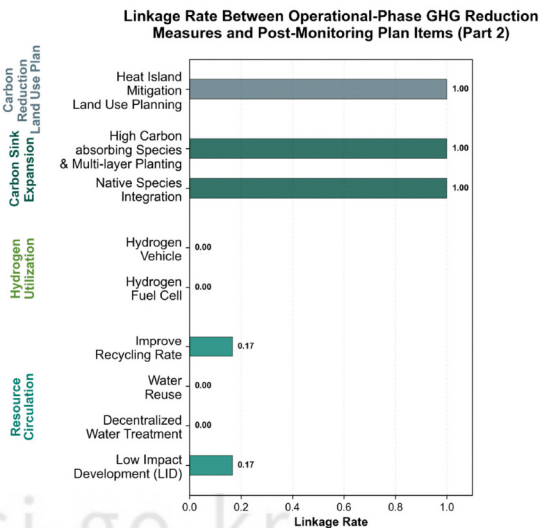
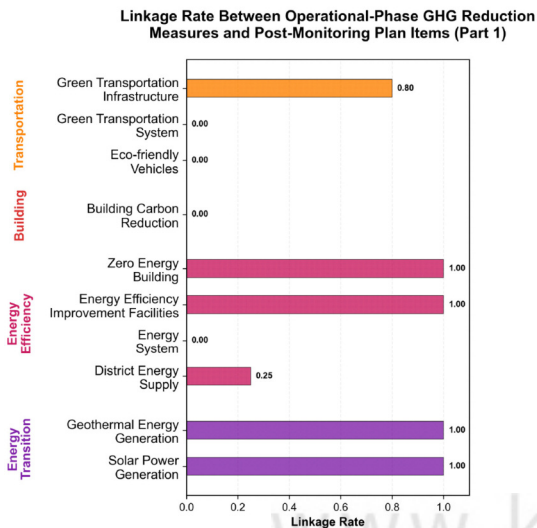


Figure 6. Linkage Rate Between Operational-Phase GHG Reduction Measures and Post-Monitoring Plan Items

소 및 전기차 인프라 구축' 항목이 포함되어 있으나, 이는 충전시설 설치에 관한 항목으로서 교통체계 구축, 차량 보급, 수소 활용 설비의 이행 확인과는 관리 대상이 상이하여 대응 관계로 처리하지 않았다. 자원순환 부문의 '재활용률 향상'과 '저영향개발(Low Impact Development; LID)'은 각각 0.17, '물 재이용'과 '분산형 수처리'는 각각 0.00으로 나타났다.

이상의 분석 결과는 두 가지 한계를 시사한다. 첫째, 감축방안별 사후관리 연계 수준이 불균등하여 본 연구 대상 사업에서는 일부 대책의 사후관리 포함 여부에 편차가 존재하였다. 운영 단계 19개 감축방안 중 연계율이 0.00인 항목이 8개에 달하며, 자원순환·수소 활용 부문은 전 항목의 연계율이 0.25 이하로 나타났다. 감축방안과 사후관리의 낮은 연계율은 해당 감축방안의 기술적 가능성 부족과 더불어 평가서에 제시된 감축방안이 사업시행자가 직접 통제·점검할 수 있는 사후환경영향 조사항목으로 구체화되지 못한 데서 비롯된 것으로 해석된다. 수소차 보급, 수소연료전지 운영, 물 재이용 및 분산형 수처리 등은 시설 설치 여부뿐 아니라 이용 수요, 운영 주체, 공급 인프라, 유지관리 체계와 연계되어 있어 이행 여부와 감축 효과를 직접 점검하기 어려운 상황이 반영된 것으로 보여진다(Kim et al., 2020; Lee & Mendoza, 2022; Garrido-Baserba et al., 2024; Wang et al., 2024).

둘째, 「기후변화영향평가방법 등에 관한 규정」 제25조와 제26조는 사업자가 사후환경영향조사계획 수립 시 연간 온실가스 배출량 관리 등을 위한 계획을 포함하도록 규정하고 있으나, 연계가 이루어진 방안에서도 조사항목은 '녹지 조성 여부', '에너지 절약 대책의 이행 여부' 등 대책의 도입·설치 여부를 확인하는 수준에 머물러 있어, 배출량·흡수량의 정량적 모니터링 항목은 제한적인 것으로 나타났다. 기후변화영향평가 단계에서 Table 1과 같이 부문별 정량적 감축목표가 설정되고 있음에도 불구하고, 이를 실제 배출·흡수량과 연계하여 검증할 수 있는 조사체계는 본 연구 대상 사업에서 충분히 확인되지 않았다.

4. 사후관리 개선 방안

1) 협의내용 이행 관리

기후변화영향평가서에 제시된 감축방안 중 기존 법령이나 인증제도를 활용하여 이행 여부를 객관적으로 확인할 수 있는 방안과, 정량적 점검 체계의 구축이 필요한 방안을 선정하여 협의내용 이행관리 점검 방안을 정리하였다(Table 3). 공사 단계에는 「대기환경보전법」에 근거한 저공해건설기계와 환경성적표지 인증제도를 활용할 수 있는 저탄소 건설자재를, 운영 단계에는 「녹색건축물 조성 지원법」 및 인증시스템을 통해 검증이 가능한 제로에너지건축물 인증, 준공 도면 및 현장

Table 3. Proposed Inspection Methods for Key GHG Reduction Measures in Consultation Compliance Management

Phase	GHG Reduction Measure	Relevant Regulation or Certification System	Inspection Items	Remarks
Construction	Low-emission construction machinery	Clean air conservation act	Equipment registration and usage records	Joint inspection with air quality items in EIA
	Low-carbon construction materials	Environmental product declaration	Usage records of carbon footprint-certified products	Requires CCIA-specific management
Operation	ZEBs	Green buildings construction support act	Certification status; BEMS monitoring data	Verification of operational energy performance
	Eco-friendly transportation infrastructure	-	Installation of EV charging and hydrogen refueling stations; BRT and pedestrian/bicycle facilities	Verification through as-built drawings and field data
	Carbon sinks	-	Green space area and tree growth status	Applicable to UAV-based quantitative absorption monitoring

* Note: “-” indicates that no specific regulation or certification system directly applies to the measure; these items were included because they require quantitative monitoring or verification using field data.

자료를 통해 확인할 수 있는 친환경 교통인프라, 그리고 정량적 흡수량 산정이 필요한 온실가스 흡수원을 대상으로 하였다.

공사 단계 감축방안 중 저공해건설기계는 「대기환경보전법」에 따라 환경영향평가의 대기질 항목에서도 관리되는 항목으로서, 장비 등록 및 사용 실적을 통해 이행 여부를 확인할 수 있다. 다만 사후관리 단계에서 중복 점검에 따른 비효율이 발생할 수 있으므로, 환경영향평가의 대기질 사후환경영향조사 결과를 기후변화영향평가 사후관리에서도 공통 근거 자료로 활용하는 방안이 검토될 수 있다. 반면, 저탄소건설자재는 환경영향평가에서 주요 관리 항목으로 다루어지지 않는 감축수단으로서, 환경성적표지 인증제도의 탄소발자국 정보를 활용하여 기후변화영향평가에서 별도로 이행 여부를 점검할 필요가 있다.

운영 단계 감축방안의 경우, 제로에너지건축물은 「녹색건축물 조성 지원법」을 근거로 건축물의 에너지 소비를 최소화하고 신·재생에너지 생산을 확대하여 에너지 소비와 생산의 균형을 달성하는 것을 목표로 하는 제도다(Kim & Yu, 2020). 이에 한국에너지공단의 제로에너지건축물 통합 인증시스템을 통해 인증 취득 여부를 검증할 수 있다(ZEB 2026). 나아가 Building Energy Management System(BEMS) 데이터를 통해 운영 단계 에너지 성능의 유지 여부를 확인할 수 있으며, 태양광·지열 등 신·재생에너지 설비의 가동 상태와 고단열·고기밀 외피 등 패시브 요소의 훼손 여부도 병행 점검하는 것이 바람직하다.

친환경 교통인프라는 충전소, Bus Rapid Transit(BRT), 보행·자전거 인프라의 구축·운영 현황을 준공도면 및 현장 자료를 통해 점검할 수 있다. 온실가스 흡수원의 경우, 감축방안의 목적이 녹지 조성을 통한 탄소흡수 기능 확보에 있으므로, 단순히 조성 여부만을 확인하는 데 그치지 않고 실제 식재 면적, 수종 구성, 수목 생육 상태 등을 확인하여 계획 대비 이행 수준을 점검할 필요가 있다. 특히 대규모 도시의 개발사업의 경우 사업 면적이 광범위하여 현장 전수조사에 한계가 있으므로, UAV 영상 등 고해상도 원격탐사 자료를 활용한 녹지 현황 파악이 효과적이다(Cheng et al., 2024; Kim et al., 2024).

2) 온실가스 배출량 모니터링

도시부문 온실가스 배출량의 공간적 파악을 위해 국내외에서 다양한 플랫폼이 운영되고 있다. 국내에서는 국토교통부 탄소공간지도 시스템이 격자(100m) 단위로 건물부문 배출량을 제공하고 있으며(Ministry of Land, 2025), 경기기후플랫폼에서도 건축물 에너지 사용에 따른 탄소배출 정보를 정량적으로 제공하고 있다(Gyeonggi-do, 2025). 해외에서도 미국 Cool Climate Network, 영국 UK Emission Interactive Map, 일본 CO₂ 배출 추계량 격자지도 등 유사한 플랫폼이 운영되고 있다(Kim & Jung, 2024).

세종특별자치시 집현동 공동주택단지의 2023년 기준 격자 단위 온실가스 배출량을 에너지원별(전기, 가스, 지역난방)로 조회한 결과, 전기 1,222.94 tonCO₂-eq, 가스 20.42 tonCO₂-eq, 지역난방 379.43 tonCO₂-eq로 나타났다(Figure 7). 전기 사용에 따른 배출이 전체의 약 75%를 차지하고, 지역난방(23%), 가스(1%) 순으로 비중이 감소한다. 이는 도시의 개발사업 운영 단계에서 건물부문 전기 사용이 온실가스 배출 구조를 지배함을 보여주며, 건물·에너지 부문 감축방안 이행 여부 평가 시 우선 검증해야 할 배출원임을 시사한다. 도시의 개발사업 사후환경영향조사계획에 전기·가스·지역난방의 연간 배출량을 탄소공간지도 등 공적 플랫폼을 활용하여 산정·보고하고, 이를 기후변화영향평가서의 운영 단계 배출량 및 감축목표와 비교·검증하는 절차가 포함되어야 한다.

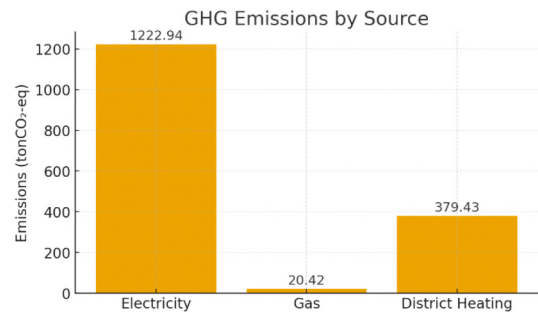


Figure 7. Case Application of the Carbon Spatial Map for Estimating 2023 Energy-Use GHG Emissions in a Residential Complex in Jiphyeon-dong

3) 온실가스 흡수량 모니터링

도시 녹지의 탄소흡수량 산정에는 UAV 기반 원격 탐사가 효과적인 도구로 주목받고 있다(Cheng et al., 2024; Kim et al., 2024). 현행 사후환경영향조사계획은 녹지 조성 여부 확인에 머무르고 있어, 온실가스 흡수량을 정량적으로 파악하는 데 한계가 있다. 세종특별자치시 집현동 공동주택단지를 대상으로 UAV 다분광 영상 기반 흡수량 산정을 수행하였다. 식생 활력기(7~9월)에 MicaSense Altum-PT 센서를 탑재한 UAV로 촬영을 수행하고, Metashape에서 정사영상 및 Digital Surface Model(DSM)으로 처리하였다. 식생 영역은 Normalized Difference Vegetation Index(NDVI) 임계값(≥ 0.3)을 적용하여 추출하였다(Hashim et al., 2019). 추출한 식생 영역에서 DSM 높이 정보를 활용하여 가로수와 조경녹지로 구분하였다(Figure 8).

흡수량 산정에는 환경부 국가 승인 탄소흡수계수(‘수종 통합(가로수)’ $1.57 \text{ ton C ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$, ‘수종 통합(조경녹지)’ $1.92 \text{ ton C ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$)를 적용하고, 분자량비(44/12)로 CO_2 단위로 환산하였다(Ministry of Environment, 2025). 산정 결과, 가로수 면적 $1,280.8 \text{ m}^2$ 에서 연간 0.74 tCO_2 , 조경녹지 면적 $7,841.4 \text{ m}^2$ 에서 연간 5.18 tCO_2 가 흡수되는 것으로 나타났다(Figure 9). 이는 UAV 기반

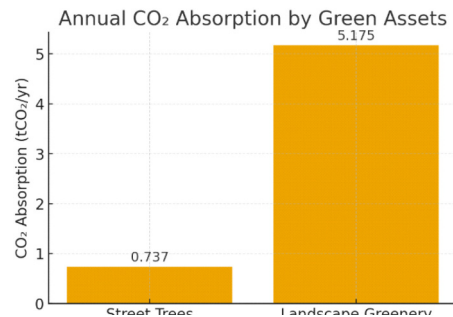
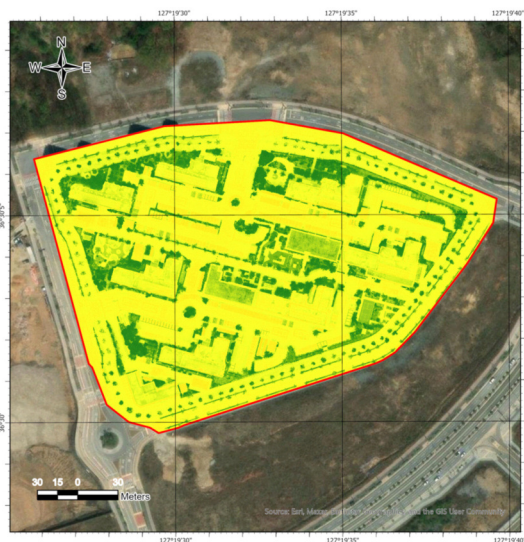


Figure 9. Annual CO₂ Absorption Estimated Using UAV-Derived Data and National Absorption Coefficients for a Residential Complex in Jiphyeon-dong

방법론을 통해 식생 유형별 흡수량을 구분하여 정량화할 수 있음을 보여주며, 기후변화영향평가서에서 제시한 녹지 확대 대책의 이행 효과를 유형별로 검증할 수 있는 근거를 제공한다.

IV. 결론

본 연구는 도시의 개발사업을 대상으로 기후변화영향평가 시 수립된 온실가스 감축방안과 사후환경영향조사계획 간 대응 관계를 정량적으로 분석하였고, 감축방안의 실효성 확보를 위한 사후관리 개선 방안을 제



(a)



(b)

Figure 8. UAV Multispectral Imagery-Derived Results for Carbon Sink Estimation in a Residential Complex in Jiphyeon-dong: (A) NDVI Distribution; (B) Vegetation Classification

시하였다. 제도 시행 이후 2025년 12월까지 기후변화 영향평가가 수행된 총 6개 도시의 개발사업을 대상으로 분석한 결과, 총 26개의 온실가스 감축방안(공사 단계 7개, 운영 단계 19개)과 20개의 사후환경영향조사계획 항목(공사 단계 9개, 운영 단계 11개)이 도출되었다.

감축방안과 사후환경영향조사계획 간 연계 분석 결과, 감축방안별 연계율은 0.00에서 1.00까지 분포하여 대책별 편차가 큰 것으로 나타났다. 에너지 전환·효율 부문과 탄소흡수원 부문은 연계율이 높은 반면, 자원 순환·수소 활용 부문은 연계율이 낮아 사후관리 항목으로는 충분히 반영되지 않는 경향이 확인되었다. 또한 현행 사후환경영향조사계획은 대책의 '이행 여부' 확인에 집중되어 있어, 온실가스 배출량·흡수량을 정량적으로 모니터링하기 위한 조사항목은 부족한 것으로 나타났다.

이에 본 연구에서는 사후관리 개선 방향으로 협의 내용 이행관리 측면에서 저공해건설기계, 저탄소 건설자재, 제로에너지건축물, 친환경 교통인프라, 탄소흡수원 등 주요 감축방안에 대해 기존 법령·인증제도, 준공도면, 현장자료 등을 활용한 점검 방안을 제시하였다. 또한 사후환경영향조사 측면에서는 탄소공간지도를 활용한 배출량 모니터링과 UAV 다분광 영상 및 국가 승인 탄소흡수계수를 결합한 흡수량 산정 방법론의 적용 가능성을 확인하였다.

본 연구의 한계로는 기후변화영향평가 제도가 시행 초기 단계에 있어 협의가 완료되었거나 진행 중인 도시의 개발사업이 현재까지 6건에 한정되므로 분석 대상이 제한적이라는 점을 들 수 있다. 다만 이는 해당 시점까지 본안이 제출된 전수에 해당하지만, 본 연구의 결과는 제도 시행 초기의 경향을 보여주는 것으로서 향후 대상 사업이 증가함에 따라 일반화 가능성을 재검토할 필요가 있다. 또한 실제 사후환경영향조사 결과와의 비교가 이루어지지 않았다는 점을 들 수 있다. 배출량 및 흡수량의 시범 적용은 단일 공동주택단지를 대상으로 방법론의 적용 가능성을 확인하는 데 목적이 있었으며, 기후변화영향평가서의 예측값과의 비교·검증까지는 수행하지 못하였다. 향후 기후변화영향평가 협의 완료 사업이 증가하고 사후환경영향조사가 본격화되는 시점에서, 사업지구 전체를 대상으로 배출량·

흡수량 모니터링 방법론을 확대 적용하고 기후변화영향평가서의 계획값과 비교·검증하는 후속 연구가 필요하다. 그럼에도 본 연구는 기후변화영향평가서에 제시된 온실가스 감축방안과 사후관리 항목 간 대응 관계를 사업 단위에서 구조화하고, 배출량·흡수량의 정량적 모니터링 필요성과 적용 가능성을 제시했다는 점에서 기후변화영향평가 사후관리 체계 구체화를 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

사사

본 논문은 한국환경연구원의 2025년도 기본과제 「기후변화영향평가 실효성 확보를 위한 사후관리 방안 연구-도시개발사업 협의내용 이행·관리 방안을 중심으로(RE2025-03)」와 2026년 일반사업 「기후변화영향평가 검토 및 기법 연구(GP2026-06)」의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Chen, L., Huang, L., Hua, J., Chen, Z., Wei, L., Osman, A. I., Fawzy, S., Rooney, D. W., Dong, L., & Yap, P.-S. (2023). Green construction for low-carbon cities: A review. *Environmental chemistry letters*, 21(3), 1627-1657. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01544-4>
- Cheng, H., Wang, Y., Shan, L., Chen, Y., Yu, K., & Liu, J. (2024). Mapping fine-scale carbon sequestration benefits and landscape spatial drivers of urban parks using high-resolution UAV data. *Journal of Environmental Management*, 370, 122319. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122319>
- 최현진, 이영수, 강유진, 주용준, 김유미. (2024). 기후변화영향평가 기법 마련: 연구 도로 건설 부문. (KEI 정책보고서 2024-11). 한국환경연구원.
- Choi, H.-J., Lee, Y., Kang, Y., Joo, Y., & Kim, Y. (2024). *Development of climate change impact assessment techniques: The road construction sector* (KEI Policy Report 2024-11). Korea Environment Institute.

- <https://repository.kei.re.kr/handle/2017.oak/24534>
- Creutzig, F., Agoston, P., Minx, J. C., Canadell, J. G., Andrew, R. M., Le Quéré, C., Peters, G. P., Sharifi, A., Yamagata, Y., & Dhakal, S. (2016). Urban infrastructure choices structure climate solutions. *Nature Climate Change*, 6(12), 1054-1056. <https://doi.org/10.1038/nclimate3169>
- Garrido-Baserba, M., Sedlak, D. L., Molinos-Senante, M., Barnosell, I., Schraa, O., Rosso, D., Verdaguer, M., & Poch, M. (2024). Using water and wastewater decentralization to enhance the resilience and sustainability of cities. *Nature Water*, 2(10), 953-974. <https://doi.org/10.1038/s44221-024-00303-9>
- 녹색기술센터. (2019). 녹색기후기술백서 2019.
- Green Technology Center. (2019). *White Paper 2019 on Green Climate Technology*.
- Gurney, K. R., Liang, J., O'Keeffe, D., Patarasuk, R., Hutchins, M., Huang, J., Rao, P., & Song, Y. (2019). Comparison of global downscaled versus bottom-up fossil fuel CO₂ emissions at the urban scale in four U.S. urban areas. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(5), 2823-2840. <https://doi.org/10.1029/2018JD028859>
- 경기도. (2025). 경기 기후플랫폼. <https://climate.gg.go.kr/ip>
- Gyeonggi-do. (2025). *Gyeonggi Climate Platform*. <https://climate.gg.go.kr/ips>
- Hashim, H., Abd Latif, Z., & Adnan, N. A. (2019). Urban vegetation classification with NDVI threshold value method with very high resolution (VHR) Pleiades imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 237-240. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W16-237-2019>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change: Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (P. R. Shukla et al., Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>
- Jung S., & Lee, J. (2025). Current status of the climate change impact assessment system in Korea and its linkage with urban greenhouse gas observation for sustainability: A systematic review and case. *Sustainability*, 17(24), 11339. <https://doi.org/10.3390/su172411339>
- Kim, B., Lee, H., Park, H., & Kim, H. (2012). Greenhouse gas emissions from onsite equipment usage in road construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(8), 982-990. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000515](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000515)
- Kim, H., Eom, M., & Kim, B.-I. (2020). Development of strategic hydrogen refueling station deployment plan for Korea. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(38), 19900-19911. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.246>
- Kim, J., Kang, Y., Kim, D., Son, S., & Kim, E. J. (2024). Carbon storage and sequestration analysis by urban park grid using i-Tree Eco and drone-based modeling. *Forests*, 15(4), 683. <https://doi.org/10.3390/f15040683>
- 김민서, 정승현. (2024). 탄소공간지도의 발전방향 연구: 미국, 영국, 일본, 한국 탄소공간지도 사례를 바탕으로. *환경정책*, 32(2), 43-68.
- Kim, M., & Jung, S. (2024). A study of development direction of carbon spatial map: Comparative analysis from the United States, United Kingdom, Japan, and South Korea. *Journal of Environmental Policy and Administration*, 32(2), 43-68. <https://doi.org/10.15301/jepa.2024.32.2.43>
- 김유미, 조한나, 조영일, 주광현, 허남주, 이상윤, 백동해. (2025). 기후변화영향평가의 실효성 확보를 위한 사후관리 방안 연구 도시개발사업의 협의내용 이행·관리 방안을 중심으로. (KEI 기본연구 보고서 2025-08). 한국환경연구원.

- Kim, Y., Cho, H., Cho, Y., Joo, K., Heo, N., Lee, S., & Baek, D. (2025). *Follow-up management for effective climate change impact assessment: Implementation and oversight of agreements in urban development projects*. (KEI Basic Research Report 2025-08). Korea Environment Institute. <https://repository.kei.re.kr/handle/2017.oak/24641>
- Kim, Y., & Yu, K. H. (2020). Study on the certification policy of zero-energy buildings in Korea. *Sustainability*. 12(12), 5172. <https://doi.org/10.3390/su12125172>
- Lee, M.-Y., & Mendoza, J. A. M. (2022). Evaluation and diagnosis for policy of water reuse in the Republic of Korea. *Water Cycle*. 3, 171-179. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2022.11.001>
- 이영수. (2023). 기후변화영향평가 제도 도입을 위한 시범사업. 한국환경연구원.
- Lee, Y. (2023). *Pilot project for the introduction of the climate change impact assessment system*. Korea Environment Institute. https://www.kei.re.kr/elib/List.es?mid=a10101000000&elibName=researchreport&class_id=&act=view&c_id=759209
- 이영수, 강유진, 유현석, 전동준, 김완희, 박정환. (2023). 탄소중립 달성을 위한 기후변화영향평가제도의 효율적 운영 방안 연구. (KEI 정책보고서 2023-06). 한국환경연구원.
- Lee, Y., Kang, E., Yoo, H., Chun, D., Kim, W., & Park, J. (2023). *A study for effective operation method of climate change impact assessment in order to achieve carbon net zero*. (KEI Policy Report 2023-06). Korea Environment Institute. <https://repository.kei.re.kr/handle/2017.oak/24033>
- 이영수, 이승현, 최상기. (2018). 기후변화영향평가제도 시행 방안. *환경영향평가*, 27(4), 345-352.
- Lee, Y. S., Lee, S., & Choi, S. (2018). Implementation Methods for Climate Change Impact Assessment. *Journal of Environmental Impact Assessment*. 27(4), 345-352. <https://doi.org/10.14249/eia.2018.27.4.345>
- Li, Q., Ma, R., Yang, M., Wang, W., & Chen, J. (2025). Net zero energy buildings for low-carbon cities: Progress, challenges, and future directions. *Journal of Building Design and Environment*. 3, 202559. <https://doi.org/10.70401/jbde.2025.0014>
- Marshall, R., Arts, J., & Morrison-Saunders, A. (2005). International principles for best practice EIA follow-up. *Impact Assessment and Project Appraisal*. 23(3), 175-181. <https://doi.org/10.3152/147154605781765490>
- Mayembe, R., Simpson, N. P., Rumble, O., & Norton, M. (2023). Integrating climate change in Environmental Impact Assessment: A review of requirements across 19 EIA regimes. *Science of The Total Environment*. 869, 161850. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161850>
- 환경부. (2024) 2024년 승인 국가 온실가스 배출·흡수 계수.
- Ministry of Environment. (2025, January 7). *2024 Approved national greenhouse gas emission and removal factors*. Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea. <https://www.gir.go.kr/home/board/read.do?boardId=80&boardMasterId=2&menuId=36>
- 국토교통부. (2025). 탄소공간지도.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2025). *Carbon Spatial Map*. <https://carbonmap.kr/index.do>
- Morrison-Saunders, A., Arts, J., Bond, A., Pope, J., & Retief, F. (2021). Reflecting on, and revising, international best practice principles for EIA follow-up. *Environmental Impact Assessment Review*. 89, 106596. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106596>
- Morrison-Saunders, A., Baker, J., & Arts, J. (2003). Lessons from practice: towards successful follow-up. *Impact Assessment and Project Appraisal*. 21(1), 43-56. <https://doi.org/10.3152/147154603781766527>
- Nowak, D. J., Greenfield, E. J., Hoehn, R. E., & Lapoint,

- E. (2013). Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. *Environmental Pollution*. 178, 229-236. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.019>
- Pak, S. B., & Lee, Y. (2024). Common but differentiated? Policymakers' priorities of social acceptance for expanding hydrogen refueling stations in Japan and Korea. *International Journal of Hydrogen Energy*. 89, 799-809. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.09.375>
- Pinto, E., Morrison-Saunders, A., Bond, A., Pope, J., & Retief, E. (2019). Distilling and applying criteria for best practice EIA follow-up. *Journal of environmental assessment policy and management*. 21(2), 1950008. <https://doi.org/10.1142/S146433321950008X>
- 임희수, 백서현, 최진무. (2024). IPCC 가이드라인 기반 서울특별시 탄소 지도 구축과 공간적 특성 분석. *대한지리학회지*, 59(6), 758-773.
- Rhim, H., Baek, S., & Choi, J. (2024). Construction of carbon map and its spatial characteristics in Seoul metropolitan area based on IPCC guidelines. *Journal of the Korean Geographical Society*. 59(6), 758-773. <https://doi.org/10.22776/kgs.2024.59.6.758>
- Seto, K. C., Dhakal, S., Bigio, A., Blanco, H., Delgado, G. C., Dewar, D., Huang, L., Inaba, A., Kansal, A., Lwasa, S., McMahon, J. E., Müller, D. B., Murakami, J., Nagendra, H., & Ramaswami, A.. (2014). Human settlements, infrastructure, and spatial planning. In O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, & J. C. Minx (Eds.), *Climate change 2014: Mitigation of climate change* (pp. 923-1000). Cambridge University Press. <https://escholarship.org/uc/item/7kz997d2>
- Shahtahmassebi, A. R., Li, C., Fan, Y., Wu, Y., Lin, Y., Gan, M., Wang, K., Malik, A., & Blackburn, G. A. (2021). Remote sensing of urban green spaces: A review. *Urban Forestry & Urban Greening*. 57, 126946. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126946>
- Truitt, P. (2009). *Potential for reducing greenhouse gas emissions in the construction sector*. US Environmental Protection Agency
- Wang, R., Zhang, Y., Zhao, S., & Wang, X. (2024). Open-data-based city-scale gridded carbon dioxide emission inventory: Supporting urban carbon monitoring in Chengdu, China. *Carbon Footprints*. 3, 14. <https://doi.org/10.20517/cf.2024.19>
- Wang, T., Li, K., Liu, D., Yang, Y., & Wu, D. (2022). Estimating the carbon emission of construction waste recycling using grey model and life cycle assessment: A case study of Shanghai. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 19(14), 8507. <https://doi.org/10.3390/ijerph19148507>
- Winkler, L., Pearce, D., Nelson, J., & Babacan, O. (2023). The effect of sustainable mobility transition policies on cumulative urban transport emissions and energy demand. *Nature Communications*. 14, 2357. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37728-x>
- 제로에너지건축물. (2026) ZEB 소개. ZEB. (2026). Zero Energy Building. https://zeb.energy.or.kr/BC/BC02/BC02_01_001.do
- Zhao, D., Cai, J., Xu, Y., Liu, Y., & Yao, M. (2023). Carbon sinks in urban public green spaces under carbon neutrality: A bibliometric analysis and systematic literature review. *Urban Forestry & Urban Greening*. 86, 128037. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128037>