



공동주택용 모듈러 욕실 벽패널 개발 및 자재 생산단계(Cradle-to-Gate, A1-A3) 탄소배출량 평가

Development and Cradle-to-Gate (A1-A3) Carbon Emission Assessment of Modular Bathroom Wall Panels for Residential Buildings

이상현* · 송용우**

Sang Heon Lee* · Yong Woo Song**

* Main author, Graduate Student, School of Architecture & Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (sangheon123@cau.ac.kr)

** Corresponding author, Research Assistant Professor, School of Architectural Engineering, Chung-Ang Univ., South Korea (yongma0930@cau.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: This study aimed to develop a modular bathroom wall panel applicable to residential buildings and to verify its potential for embodied carbon reduction within the cradle-to-gate (A1-A3) stage. By comparing conventional wet and existing modular construction methods, a lightweight and low-carbon wall system was proposed. **Method:** Large-format wall materials such as pre-painted steel, enamel-coated steel, and composite boards were evaluated according to KS F 2223 and KS L 1001 standards. Mock-up tests for deflection and impact were conducted to validate performance, and the embodied carbon emissions (A1-A3) were calculated based on material quantities and emission factors. **Result:** Pre-painted steel satisfied all performance criteria and was selected as the optimal material. The developed wall panel achieved 19% of the total weight of wet construction and 60% of the existing modular wall, while reducing A1-A3 emissions to 87% and 82%, respectively. The results demonstrate that modularization and material substitution can effectively reduce embodied carbon during early construction stages.

KEYWORD

모듈러 욕실
모듈러 벽패널
탄소배출량 평가

Modular Bathroom
Modular Wall Panel
Carbon Emission Assessment

ACCEPTANCE INFO

Received Oct. 14, 2025
Final revision received Oct. 24, 2025
Accepted Oct. 30, 2025

© 2025. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

세계적으로 온난화에 따른 기후 위기가 심화되는 가운데, 그 원인인 온실가스 저감을 위한 노력이 지속되고 있다. 건물-건설 부문은 전 세계 에너지 수요의 약 34%, CO₂ 배출량은 약 37%를 차지하고 있어 온실가스 감축이 시급한 상황이다[1]. 한국의 경우 2050 탄소중립, 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC; Nationally Determined Contribution)로 국가 총배출량의 40% 감축을 선언한 상태이다[2]. 이처럼 건물 부문 탄소중립의 중요성이 강조됨에 따라 탄소배출을 줄이기 위한 방법으로 건축자재의 전과정 환경영향을 평가하는 EN15804가 유럽표준화위원회(CEN; European Committee for Standardization)에서 제정되어 국제적 표준으로 활용되고 있다. EN15804는 ISO 14025 (Type III EPD; Environmental Product Declaration) 체계를 건설제품에 특화한 규격으로, 자재의 생산(A1-A3), 운송-시공(A4-A5), 사용(B1-B7), 해체·처리(C1-C4), 시스템 경계 외부(Module D)를 생애주기에 따라 모듈별로 규정한다[3,4]. 국내에서는 환경부 산하 한국환경산업기술원이 환경성적표지 인증제도를 통해 제품의 전과정 정보를 공개해 시장의 저탄소

제품 선택을 유도하고 있다.

온실가스 감축을 위한 LCA (Life Cycle Assessment)를 공법 관점 연구에서 살펴보면, 모듈러, 프리패브 공법 적용과 같은 건설업의 제조업화를 통해 자재 사용을 최적화하고 표준화된 대량생산 체계를 구축하면 내재 탄소 저감이 가능하다[5]. 국내 실증 연구에 따르면, 모듈러 공법 적용 시 기존 습식 공법 대비 A1-A3 (자재생산)단계에서 약 37.8% 저감이 가능한 것으로 나타났다[6]. 최근 신축 건물은 고효율, 저에너지 운영이 가능한 수준으로, A1-A3단계 탄소배출량 비중이 절반 수준까지 증가하는 경향이 있으며[7], 이에 따라 국제 로드맵에서도 초기 내재탄소(Embodied Carbon) 저감을 핵심과제로 제시하고 있다[8].

국내 건설산업은 현장 생산 중심의 비표준화, 노동집약적 공정으로 인해 생산성 정체 및 하락하는 산업으로 평가되고 있다. 한국생산성본부에서 제공하는 산업생산-노동생산성지수에 따르면 건설산업은 2015년~2024년 사이 생산성 지수가 110.8 → 95.3으로 약 14% 하락하였다.¹⁾ 이에 반해 제조업은 90.6 → 112.9로 25% 상승하였는데, 이는 건설산업이 근로자의 숙련도 저하, 생산과정의 비효율성 등이 커지고 있다는 것으로 해석된다[9]. 숙련공 부족, 고령화, 외국인 근로자 의존 등의 인력 구조 문제는 건설 품질 저하에 따른 하자 발생, 공사 기간 지연으로 인한 위험 요인으로 확대되고 있다[10,11]. 대표적 요인으로 공동주택에서 공중별 하자는 마감공사에서 약 30%(1순위)가 발생하고 그 중 욕실은 3순위에 해당된다. 주요

하자 요인은 균열, 파손, 구배 불량으로 도출되었다[12]. 또한 최근 국내 공동주택 하자 분석[13]에 따르면 욕실에서 발생하는 주요 하자는 타일 들뜸 및 탈락(12.1%), 누수(7.8%)로 나타났다. 이러한 문제는 욕실 공사가 공정이 복잡하고, 다수의 공종이 작은 공간에 밀집되어 순차적으로 시공되기 때문에, 이로 인한 현장관리의 어려움이 크고, 최근 숙련 기능공 감소가 복합적으로 작용하면서 지속적인 품질 저하로 이어지고 있는 실정이다.

이러한 한계를 극복하기 위해 모듈러 욕실 공법이 생산성과 품질 확보를 동시에 달성할 수 있는 대안으로 주목받고 있으며, 국내에서는 UBR (Unit Bathroom)로 알려져 있다. 본 연구에서의 모듈러 욕실이란 욕실 공간을 구성하는 주요 자재인 바닥 방수판, 벽판, 천장판을 공장에서 제작하여 현장에서 조립하는 욕실을 말한다. 이는 일반적인 습식 방식과 달리, 현장에서 최소한의 조립과 연결 작업만으로 빠른 시공이 가능하고, 이를 통해 현장 인력과 공사 기간을 절감하면서 공장 제작을 통한 균일한 품질을 확보할 수 있다. 해외에서는 보편적으로 적용되고 있지만, 국내에서는 최초 도입 시 저가 자재 및 시공 불량으로 인해 저가형 이미지가 고착화되어 널리 보급되지 못하였다. 기존 이미지를 극복하지 못해 공공임대주택 일부에만 적용하고 있는 상황이지만, 최근 인력 수급 문제로 인한 인건비 상승으로 민간 건설사에서도 모듈러 욕실 적용을 검토하고 새로운 시스템을 개발하고 있는 상황이다.

이에 따라 본 연구에서는 시공성과 환경부하 저감이라는 이중 과제를 해결하기 위해 공동주택에 적용 가능한 기존 공법과 대비 경량 이면서 탄소배출 저감형 모듈러 욕실 벽패널을 개발하고, 자재 생산 단계(Cradle-to-Gate, A1-A3)에 대한 탄소배출량 평가를 수행하였다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구는 공동주택용 모듈러 욕실 벽패널의 경량화 및 자재 생산 단계(Cradle-to-Gate, A1-A3) 탄소배출 저감 효과를 검증하기 위해 수행되었다. 비교 분석 대상은 국내 공동주택에서 일반적으로 적용되는 습식 욕실과 기존 모듈러 욕실의 벽체 구조로 설정하였으며, 연구의 범위와 방법은 다음과 같다.

첫째, 기존 공법의 한계점을 분석하고, 벽패널 개발 방향성을 설정하였다. 이를 위해 국내·외 모듈러 욕실관련 선행 연구를 고찰하여 국내에서 적용되는 기존 모듈러 욕실 공법의 문제점을 도출하였다. 또한 해외 모듈러 욕실 시스템을 비교 분석하여 본 연구의 개발 방향을 경량화 및 탄소저감형 벽패널 개발로 선정하였다.

둘째, 적용 가능한 벽패널 자재를 조사 및 성능 평가를 진행하여 재료를 선정하였다. 이를 위해 따라 국내에서 적용이 가능한 대형 패널 자재를 대상으로 KS F 2223 기준에 따라 KS F 2223 기준에 따라 내충격성, 밀착성, 내비등수성, 내식성, 내세제성, 연필경도, 내습성, 내열성, 내온수성 시험을 하였고, 타일 수준의 성능 평가를 위해 KS L 1001 기준의 내약품성 시험을 실시하였다. Mock-up Test 수행을 위해 KS F 2223 기준의 변형, 충격강도 시험을 진행하여 적용성을 검증하였다.

셋째, 습식 벽체, 기존 모듈러 및 개발 모듈러 벽체의 경량화 및 자재 생산단계(A1-A3) 탄소배출량을 비교 분석하였다. 이를 위해 각

공법별 주요 자재의 투입 물량 및 무게를 산출하여 경량화 수준을 검증하였고, 탄소배출계수를 적용하여 탄소배출량을 산출하였다. 본 연구에서 분석 범위를 A1-A3로 한정된 이유는, 최근 초기 내재 탄소 저감의 중요성이 강조되고 있고, 본 연구가 기술 개발 초기 단계에서 수행되었기 때문에 자재 변경에 따른 내재탄소 영향을 평가하고자 하였다.

2. 욕실 공법 및 이론 고찰

2.1. 욕실 공법 고찰

Table 1.은 국내에서 적용 중인 습식 욕실과 모듈러 욕실을 비교한 것이다. 기존 습식 욕실은 현장 중심의 인력 위주 공사로 기능공에 의한 품질 편차가 발생하지만, 관례적인 안정감을 갖고 있는 공법이다. 하지만 동절기 공사에 제약이 있으며, 다수 공종이 좁은 공간에 순차적으로 투입되기 때문에 하자 책임소재가 불분명하며, 공기가 길다는 한계가 있다.

모듈러 욕실은 주요 자재(바닥 방수판, 벽패널, 천장판)을 공장에서 제작 후 현장에서는 단순 조립으로 완성하는 시스템 중심 공법으로, 공기 단축과 균일한 품질 확보가 가능하다. 모듈러 욕실 공사 단일 공종으로 공사가 진행되어 하자 책임소재가 분명하고 현장관리가 용이하다. 저가형 이미지로 일부 임대 주택에만 적용되어 생산 인프라가 빈약하지만, 향후 건설 환경이 변화함에 따라 민간 건설사에서 적용이 많아지면 설계 표준화, 공장 생산체계가 고도화에 따라 이

Table 1. Comparison of bathroom construction method


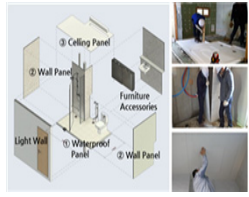
Category	Conventional bathroom	Modular bathroom
Overview	A labor-centered method prone to craftsperson-dependent quality variation. Concentrated processes / trades per unit area, resulting in elevated site-management complexity.	A modular approach in which bathroom subassemblies are factory-made and installed on site via simplified assembly.
Conceptual diagram		
Advantages	Technically validated through conventional practice; adaptable to diverse layouts; stakeholder familiarity.	Ensures consistent quality, enables construction time reduction, facilitates site management, and allows integrated defect handling under a single trade.
Disadvantages	Complex multi-trade process complicates site management; seasonal limitations in winter; defect responsibility unclear due to involvement of multiple trades.	Limited construction experience; low consumer acceptance; underdeveloped production infrastructure.

Table 2. Evolution of system bathrooms





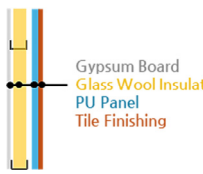
Category	1 st generation	2 nd generation	3 rd generation (oversea case)
Images			
Wall panel	Plast-faced wall panel	PU (polyurethane) wall panel with tile finish	Prefinished large-format steel wall panel

Table 3. Comparison of wall assembly

Category	Conventional bathroom	Modular bathroom
Wall assembly		
Trades	Masonry, Waterproofing, Tiling	Interior fit-out, System Bathroom
Characteristics	Site-built with discrete materials; labor-intensive	Modular components installed (factory-made)

리한 단점은 자연스럽게 개선될 것으로 판단된다.

국내 모듈러 욕실은 Table 2.와 같이 1세대의 플라스틱 패널 방식에서 2세대 타일 부착형 패널로 발전해왔다. 플라스틱 패널은 내구성 및 변색 문제가 있었고, 이를 개선하기 위해 강성을 높인 타일 부착형 패널이 도입되었다. 그러나 벽패널 무게가 약 20kg/m²(폭 1.0m, 층고 2.2m 기준, 약 45kg)정도로, 운반성이 떨어지며, 운반 중 타일 파손이 빈번하고 설치 후 손상 타일 교체로 추가 작업이 발생하는 한계가 있다.

해외에서는 Table 2.와 같이 3세대 방식으로 발전하여 강판을 활용한 마감일체형 대형 벽패널이 적용되어 경량화, 내구성 향상, 재활용성을 동시에 확보하고 있다. 일본의 경우 TOTO, LIXIL, Sekisui Hometechno는 강판에 마감 시트 접착하는 방식을 적용 중이고, Takara Standard는 프린팅 강판에 법랑 처리 방식을 적용하고 있다.

국내에서는 모듈러 욕실의 품질을 습식 욕실 수준으로 향상시키기 위해 국내 UBR 업체 중심의 제품 개발이 진행되어 왔다. 한국건설기술연구원(2020)[14]에서는 타일 부착형 모듈형 욕실 모듈 벽패널을 개발하여 시공성 향상과 품질 개선에 대한 효과를 검증하였다. 그러나 모듈러 욕실관련 연구는 아직 초기단계에 머물러 있으며, 해외에서 보편화된 마감일체형 벽패널과 같은 고도화된 시스템 개발은 이루어지지 않았다. 또한 자재 생산단계(A1-A3)에 대한 환경부하 저감 연구 역시 미흡한 실정이다.

현재 국내에서 적용되는 욕실 벽체 구성은 Table 3.과 같다. 습식 욕실은 방수 및 벽타일 부착을 위한 바탕체로 조적벽이 시공되지만

Table 4. Development objectives of modular bathroom wall panels based on comparison with conventional construction methods

Category	Conventional bathroom	Existed modular bathroom	Developed modular bathroom
Quality consistency	Quality varies depending on workers' skill level	Uniform quality through factory production	Uniform quality through factory production
Wall composition	Tile detachment and surface cracking	Frequent tile breakage during transport	Integrated finish panel minimizing damage
Constructability	Complex process and multiple trades required	Simplified assembly process; no additional finishing work needed	Simplified assembly process; no additional finishing work needed
Environmental performance	Extensive use of cement materials	High embodied carbon due to PU reuse limitations	Improved recyclability by using recyclable steel panels

Table 5. Definitions by LCA phase

Category	Sub-items
Goal and scope definition	The stage that defines the study objectives and sets the analysis boundary and level of detail.
Life cycle inventory (LCI)	The stage that collects and quantifies input and output data over the entire product life cycle.
Life cycle impact assessment (LCIA)	The stage that evaluates the magnitude and significance of potential environmental impacts associated with the inventory flows across the product life cycle.
Interpretation	The stage that interprets the results with respect to the defined goal and scope, and derives conclusions and recommendations.

모듈러 욕실은 건식 공법으로 방수 및 마감 공사가 필요하지 않다. 또한 세대 칸막이 벽인 경량철골 벽체 시공 후에는 욕실 내부에서 벽패널 조립을 하기 때문에 타공종간 간섭에서 자유로울 수 있고 동절기 공사도 가능하다.

따라서 본 연구에서는 Table 4.와 같이 해외 사례를 참고하여 경량화 및 환경부하 저감을 동시에 달성할 수 있는 마감 일체형 벽패널을 개발하고, 현장 조립 공정의 단순화와 자재 재활용성 향상을 목표로 하였다.

2.2. LCA 이론 고찰

전과정평가는 제품이나 공법의 전 생애주기에 걸친 환경영향을 평가하는 방법으로 국제 표준 ISO14040, 14044에 Table 5.와 같이 정의되어 있다. LCA는 목표 및 범위 설정(Goal & Scope), 전과정 목록 분석(LCI, Life Cycle Inventory), 전과정영향평가(LCIA, Life Cycle Inventory Analysis), 전과정해석(Interpretation)의 4단계를 걸쳐 수행된다. 건설 산업에서는 건축물의 전생애주기에 걸쳐 발생하는 투입 및 산출물에 대한 환경영향을 종합적으로 평가하는 데에 활용된다.

본 연구에서 활용한 LCI DB는 한국환경산업기술원의 환경성적

Table 6. Embodied-carbon emission factors for wall materials

Materials	Emission factor (kgCO ₂ e/kg)	Remark
Cement brick	0.12	Korea LCI DB
Concrete Block	0.15	
Tile adhesive	0.18	
Ceramic tile	0.52	Korea EPD -certified product
Premixed mortar	0.18	
Corrosion-resistant steel	2.00	
Gypsum board	0.14	
Glass wool insulation	1.71	
Rigid PU foam	3.20	
ALC block	0.21	Oversea EPD

표지 인증 제품 중 유사 제품을 적용하였고, 부족할 경우 한국 LCI DB, 해외 제품 EPD를 활용하여 보완하였다. 욕실 주요 자재별 탄소배출계수는 Table 6.과 같다.

본 연구는 자재 생산단계(A1-A3)에 한정하였기 때문에 탄소배출량 계산은 투입 자재 수량에 탄소배출계수를 곱하여 평가하였다.

3. 모듈러 욕실 벽 패널 개발

3.1. 자재 선정

벽패널 마감재 선정을 위해 Table 7.과 같이 국내에서 욕실에 적용이 가능한 대형 패널 마감재를 조사하였다. 재활용이 가능한 철소

Table 7. Materials applicable to wall panels





Category	Porcelain-enamelled steel panel	Pre-painted (coil-coated) steel panel	PVC-based polymer composite board	Stone-plastic composite (SPC) board
Image				
Overview	Metal substrate fused with vitreous enamel glaze, enhancing durability and functionality.	High corrosion-resistant steel panel with printed graphics and special surface coatings.	Board composed of PVC, PET, and CaCO ₃ filler, laminated with patterned decorative sheets.	Composite of stone powder and polymer resin, laminated with patterned decorative sheets.
Properties	Recyclable / excellent cleanability / high durability	Recyclable / excellent cleanability / moderate durability	Lightweight / moderate cleanability / widely used domestic finishing material / low cost	Relatively heavy / moderate cleanability / widely used domestic finishing material / low cost

Table 8. Performance criteria and test results for wall-panel materials

Test item	KS standard	Criteria	Result			
			Porcelain-enamelled steel panel	Pre-painted (coil-coated) steel panel	PVC-based polymer composite board	Stone-plastic composite (SPC) board
Impact resistance	KS F 2223	No surface abnormality	No abnormality	No abnormality	No abnormality	No abnormality
Adhesion		≤ 3 peelings (target: 0)	0	0	0	0
Water spot resistance		No surface abnormality	No abnormality	No abnormality	Warping observed	No abnormality
Corrosion resistance		No corrosion observed	Corrosion observed	No abnormality	Warping observed	No abnormality
Detergent resistance		No abnormality	No abnormality	No abnormality	Warping observed	No abnormality
Pencil hardness		No abnormality	No abnormality	No abnormality	Surface marks observed	No abnormality
Moisture resistance		No surface abnormality	No abnormality	No abnormality	No abnormality	No abnormality
Heat resistance		No surface abnormality	No abnormality	No abnormality	Warping and surface deformation observed	No abnormality
Hot water resistance		No surface abnormality	No abnormality	No abnormality	No abnormality	No abnormality
Acid resistance		KS L 1001	No surface abnormality	Surface discoloration	No abnormality	No abnormality
Alkali resistance	No surface abnormality		No abnormality	No abnormality	No abnormality	No abnormality
Overall performance	-	-	Fail	Pass	Fail	Fail

재인 법랑, 고내식 컬러 강판과 국내에서 유통 중인 플라스틱 복합 보드, 무기질 복합 보드에 대한 성능 검증을 통해 벽패널 마감 자재를 선정하였다. 시험 방법은 국내 모듈러 욕실 시험 기준인 KS F 2223 주택용 복합 세니터리 유닛의 치장금속판 시험을 근거로 하였으며, 국내 욕실 마감재로 적용 중인 타일 수준의 성능 확보를 위해 KS L 1001 도자기질 타일의 내약품성 시험을 준용하여 추가 성능 시험도 진행하였다. 시험 기준 및 시험 결과는 Table 8.과 같다. 벽패널 자재 시험 결과, 법랑은 내식성 시험에서 녹이 발생하였고 내약품성 시험에서 표면 변색이 발생하였다. 플라스틱 복합 보드는 내비등 수성, 내세제성, 내식성 시험에서 휨발생, 연필 경도 시험에서 자국 발생, 내열성 시험에서 휨 및 표면 변형이 발생하였다. 무기질 복합 보드의 경우 내약품성 시험에서 표면 변색이 발생하여 성능에 만족하지 못하였다. 본 시험에서 컬러강판만 모든 시험 항목에서 이상이 발견되지 않아, 성능 기준을 충족하여 최종 자재로 선정되었다.

3.2. Mock-Up Test

Fig. 1.과 같이 Mock-up Test를 위한 Prototype을 설계하여 욕실 시스템에 대한 기본 성능 검증을 실시하였다. 한국에서 일반적인 소형 주거용 욕실에 적용되는 1.5m×2.4m의 면적은 약 3.2m², 천장고는 2.2m를 기준으로 하였다. 벽패널 구성은 Fig. 2.와 같이 폭은 최소 450mm에서 최대 1,050mm로 설계하였고, 욕실 1개소당 10개의 패널로 구성하였다. 시험 방법은 한국의 모듈러 욕실 성능 기준인 KS F 2223 주택용 복합 세니터리 유닛의 항목 및 성능의 벽체의 변

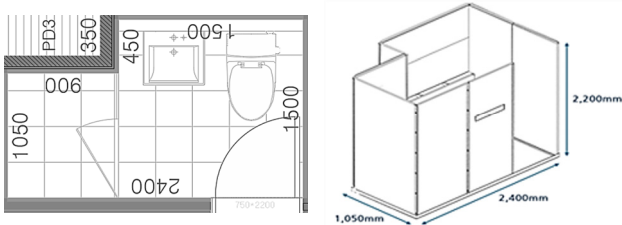


Fig. 1. Prototype drawing for mock-up test

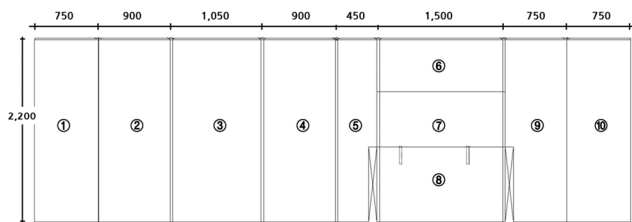
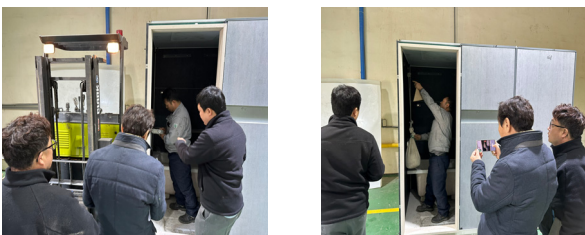


Fig. 2. Wall panel developed elevation



a) Deflection test

b) Impact resistance test

Fig. 3. Test for wall panel

형 및 충격강도 시험을 진행하였다. 변형 시험은 벽패널 중앙부에 지름 150mm, 두께 5mm 고무판을 대고 98N (10kgf)의 하중을 가했을 때 최대 변형량이 7mm 이하여야 하며, 변위 게이지를 사용하여 측정한다. 충격강도 시험은 지름 200mm 형검주머니(15kg)를 길이 1M, 각도 30°까지 올린 후 충격 5회 반복하였을 때 사용에 지장이 있는 변형, 파손, 균열 등의 결점이 없어야 한다. 시험 사진은 Fig. 3., 시험 기준 및 결과는 Table 8.과 같다.

벽패널 변형 시험 결과, 하중치 7mm 이하에서 3mm로 측정되어 요구성능에 충족하였다. 충격강도 시험에서는 조인트 및 표면 변형 등의 이상이 관찰되지 않아, 내충격 성능을 충족하였다. 이에 따라 개발 벽체는 모듈러 욕실의 요구 성능을 확보하며 실제 적용에도 문제가 없음을 확인하였다.

4. 전과정평가(LCA)

4.1. 평가 개요

전과정평가를 위해 Mock-up Test 욕실을 기준으로 하여 습식 욕실 벽체, 기존 모듈러 욕실 벽체, 개발된 모듈러 욕실 벽체를 비교 분석하였다. 공법별로 적용되는 각 자재의 물량을 산출 후 총 중량과 자재 생산단계(A1-A3)의 탄소배출량(kgCO₂-eq)을 산출하였다. 분석 단위는 욕실 1개소이며, 분석 대상 자재의 범위는 욕실 벽체를 구성하는 칸막이벽부터 마감재까지이다.

습식 욕실의 경우, 바닥 방수 및 벽 타일 부착을 위해 욕실 칸막이 벽과 AP/PD 벽에 조적을 적용하였다. 모듈러 욕실 공법은 바닥 방수판을 전제로, 바닥 방수와 벽 타일 부착 공정이 생략되며, 칸막이 벽체는 경량 철골 벽체로 적용하였다. 또한 AD/PD 면에는 ALC 블록을 적용하여 습식 공법을 최소화시켰다.

4.2. 평가 결과

욕실 공법별 산출 물량에 대한 벽체 무게를 Table 9.와 같이 비교한 결과, 습식 욕실의 경우 조적 2,247kg, 미장용 레미탈 660kg, 타일 및 부자재 543kg으로 총 3,479kg이었다. 기존 모듈러 욕실은 PU 벽패널 637kg (타일 포함), 경량벽체 413kg, ALC 60kg으로 총 1,110kg이었다.

개발 모듈러 욕실은 컬러강판 벽패널 무게가 189kg, 그 외 자재 무게는 기존 모듈러 욕실과 동일하여 총 662kg으로 산출되었다. 개발 모듈러 욕실 벽체는 기존 습식 욕실 대비 19%, 기존 모듈러 욕실 대비 60% 수준으로 경량화가 가능한 것으로 확인되었다. 이는 습식 욕실의 경우, 시멘트 기반 자재(조적, 몰탈) 및 타일이 대량 사용되는 반면, 개발 모듈러 욕실은 경량 철골 벽체, 금속 패널 마감재를 적용하여 무게를 줄일 수 있었다. 또한 기존 모듈러 욕실은 습식 대비 32% 수준으로 경량화가 가능하였으나, 개발 모듈러 욕실과 비교하면 1.7배 무게게 나타났다. 이에 따라 개발 모듈러 욕실은 기존 공법 대비 하중을 줄일 수 있으며, 이는 자재 운반성, 시공성 측면에서도 장점이 있다는 것을 확인할 수 있었다.

욕실 공법별 벽체의 탄소배출량을 Table 10.과 같이 분석한 결과, 습식 욕실은 조적 227kgCO₂eq, 미장용 레미탈 120kgCO₂eq, 타일

Table 9. Performance test criteria for system-bathroom wall panels

Test item	Test method	Criteria	Test Result
Deflection	At the panel center, place a rubber pad (Ø150mm, 5mm thick) and apply a 98N (≈10kgf) load	Maximum deflection ≤ 7mm	3mm (Pass)
Impact resistance	Using a steel pendulum (length 1m), raise it to 30° and release it to strike the cloth bag (Ø200mm, 15kg) for five consecutive impacts	No defects that hinder serviceability, such as deformation, fracture, or cracking	No abnormality (Pass)

Table 10. Wall weights by bathroom construction method

Conventional bathroom wall		Existed modular bathroom wall		Developed modular bathroom wall	
Material	Weight (kg)	Material	Weight (kg)	Material	Weight (kg)
Masonry	2,247	ALC block	60	ALC block	60
Water proofing	28	Lightweight stud wall	413	Lightweight stud wall	413
Mortar	660	PU wall panel	94	Steel wall panel	189
Tile	543	Tile	543		
Total	3,479	Total	1,110	Total	662

Table 11. Carbon emission by bathroom construction method

Conventional bathroom wall		Existed modular bathroom wall		Developed modular bathroom wall	
Material	Emission (kgCO ₂ eq)	Material	Emission (kgCO ₂ eq)	Material	Emission (kgCO ₂ eq)
Masonry	227	ALC block	13	ALC block	13
Water proofing	70	Stud wall	144	Stud wall	144
Mortar	120	PU wall panel	348	Steel wall panel	377
Tile	150	Tile	150		
Total	617	Total	654	Total	535

150kgCO₂eq, 방수재 70kgCO₂eq로 총 617kgCO₂eq으로 산출되었다. 기존 모듈러 욕실은 PU 벽패널(타일 포함) 498kgCO₂eq, 경량 벽체 144kgCO₂eq, ALC 13kgCO₂eq로 총 654kgCO₂eq이었다. 개발 모듈러 욕실은 컬러강판 벽패널(채움재 포함) 377kgCO₂eq, 그 외는 기존 습식욕실과 동일하여 총 535kgCO₂eq로 산출되었다.

개발 모듈러 욕실 벽체의 탄소배출량은 습식 욕실 대비 약 87% 수준이었고, 기존 모듈러 욕실 대비 약 82% 수준으로 나타났다. 기존 모듈러 욕실 벽체의 경우 기존 습식 욕실 대비 탄소배출량은 106% 수준으로 배출량이 더 높았는데, 이는 PU벽패널의 탄소배출량이 다른 자재 대비 상대적으로 높기 때문이었다. 개발 모듈러 욕실 벽체는 기존 모듈러 욕실 벽체인 PU벽패널과 타일을 대체해 컬러강판 벽패널을 사용함에 따라 탄소배출량을 저감시킬 수 있었으며, 기존 습식 욕실과 대비하여 시멘트 기반 자재를 대신해 철소재인 경량 철골 벽체 및 컬러강판 벽패널을 적용하여 탄소배출량을 저감시킬 수 있었다.

따라서 개발 모듈러 욕실 벽체는 경량화뿐만 아니라 탄소배출량 저감까지 동시에 확보할 수 있는 공법으로, 기존 습식 및 모듈러 욕실 대비 환경부하 저감에 효과가 있는 것을 알 수 있었다. 이는 컬러강판 벽패널을 모듈러 욕실에 확대 적용할 경우, 공동주택의 온실가스 저감에 도움이 될 것으로 판단된다.

5. 결론

국가 온실가스 감축과 건설 환경 변화에 따른 인력 수급의 어려움 및 시공성 개선을 위해 공동주택에 적용할 수 있는 모듈러 욕실 벽패널을 개발하여 성능을 검증하고 기존 공법들과 자재 생산 단계(A1-A3) 탄소배출량을 비교 분석하였다. 본 연구에서는 건축 자재 개발을 고려할 때 자재 생산 단계에 대한 LCA를 수행하여 자재 변경에 따른 탄소 저감 평가를 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

본 연구의 결론은 다음과 같다.

첫째, 기존 모듈러 욕실 벽체 개선을 위해서는 경량화된 대형 패널을 적용을 통한 시공성 개선이 필요하였다. 이를 위해 국내에서 유통되는 대형 마감패널 자재를 조사하여 성능을 검토하였으며, 최종 자재로 고내식 컬러강판이 선정되었다.

둘째, 개발된 벽패널의 적용성 검토를 위해 일반적인 소형 공동주택의 1.5m×2.4m 욕실 평면을 대상으로 설계 및 Mock-up Test를 KS규격에 맞춰 진행하였다. 변형 시험 및 충격 강도 시험에서 성능 수준을 만족하여, 실제 적용이 가능함을 확인할 수 있었다.

셋째, 습식 욕실 벽체, 기존 모듈러 욕실 벽체, 개발된 모듈러 욕실 벽체를 대상으로 물량 산출 및 자재 생산 단계(A1-A3) 탄소배출량 분석을 실시하였다. 물량 산출 결과, 개발된 모듈러 욕실 벽체는 기존 욕실 대비 19% 수준으로 경량화가 가능하였고, 기존 모듈러 욕실 대비 60% 수준으로 경량화가 가능하였다. 이는 시멘트기반 자재 사용 최소화하였고 마감재로 타일을 적용하지 않았기 때문이다. 이를 통해 개발 모듈러 욕실 벽체가 기존 공법 대비 하중을 줄일 수 있으며, 자재 운반 및 시공성 측면에서도 우수한 것을 확인할 수 있었다. LCA 결과, 개발된 모듈러 욕실 벽체는 습식 욕실 대비 87% 수준, 기존 모듈러 욕실 대비 82% 수준으로 탄소배출량이 저감되는 것을 확인하였다. 기존 시스템 욕실 벽체는 습식 욕실 대비 32% 수준으로 경량화는 가능하였지만 탄소배출량은 106% 증가함에 따라 환경부하 측면에서는 불리하였다.

본 연구의 한계점은 다음과 같다.

첫째, 분석 범위를 자재 생산단계(A1-A3)로 한정하였으므로, 시공(A4-A5) 및 폐기·재활용 단계를 포함한 전과정평가(LCA)가 이루어지지 못하였다. 따라서 향후 연구에서는 실증 프로젝트를 기반으로 A4-A5 단계의 시공 과정에서 발생하는 배출량과 폐기·재활용 단계의 환경영향을 통합적으로 분석할 필요가 있다.

둘째, 벽패널에 한정하여 Mock-up Test를 수행하였기 때문에, 추후에는 바닥 방수판 및 마감재를 포함한 모듈러 욕실 전체 시스템을 대상으로 내습성, 변형, 충격강도 등의 종합 성능 평가가 수행되어야 한다.

셋째, 본 연구는 탄소배출량 비교에 초점을 두었으므로, 경제성과

의 복합적 상관관계 분석이 포함되지 못하였다. 향후 연구에서는 LCA 결과를 LCC (Life Cycle Cost) 연계한 통합 평가 모델을 적용하여 경량화 및 탄소저감형 모듈러 욕실 시스템의 기술성, 경제성 측면에서 지속가능성을 검증하는 연구도 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00217322).

References

[1] UNEP (United Nation Environment Programme), Global status report for buildings and construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector (8th ed.), Nairobi: UNEP (United Nation Environment Programme), 2024, pp.5-6.

[2] 관계부처 합동, 2030 국가 온실가스 감축 목표(NDC) 상향안, <https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=4&boardNo=100&searchCategory=&page=1&searchType=&searchWord=&menuLevel=2&menuNo=12>, 2021.10.18. // (Jointly with Relevant Ministries, 2030 National Return Goal (NDC) return-final, <https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=4&boardNo=100&searchCategory=&page=1&searchType=&searchWord=&menuLevel=2&menuNo=12>, 2021.10.18.)

[3] ISO (International Organization for Standardization), ISO 14025:2006 Environmental labels and declarations—Type III environmental declarations—Principles and procedures (1st ed.), Switzerland: ISO (International Organization for Standardization), 2006, pp.4-13.

[4] European Committee for Standardization (CEN), EN 15804:2019 Sustainability of construction works—Environmental product declarations—Core rules for the product category of construction products (2nd ed.), Belgium: European Committee for Standardization (CEN), 2019, pp.20-22.

[5] D. Arslan et al., Carbon analysis, life cycle assessment, and prefabrication: A case study of a high-rise residential built-to-rent development in the UK, *Energies*, 16(2), 2023, 973.

[6] H. Jang et al., Analysis of embodied carbon emissions for a relocatable modular steel building in South Korea, *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 12(2), 2021, pp.204-214.

[7] T. Lützkendorf, M. Balouktsi, Embodied carbon emissions in buildings: Explanations, interpretations, recommendations, *Buildings & Cities*, 3(1), 2022, pp.964-973.

[8] World Green Building Council (WGBC), Bringing embodied carbon upfront, <https://worldgbc.org/article/bringing-embodied-carbon-upfront/>, 2025.10.08

[9] 성유경, 유위성, 한국 건설산업 생산성 분석 (초판), 한국건설산업연구원, 2022, pp.3-33. // (Y.K. Sung, W.S. Yoo, Productivity analysis of the Korean construction industry (1st ed.), Construction & Economy Research Institute of Korea, 2022, pp. 3-33.)

[10] 성유경, 박희대, 최수영, 건설현장 기술인력 변화 동향과 확보 방안 (초판), 한국건설산업연구원, 2025, pp.67-83. // (Y.K. Sung, H.D. Park, S.Y. Choe, Trends in technical workforce at construction sites and strategies for securing skilled labor (1st ed.), Construction & Economy Research Institute of Korea, 2025, pp.67-83.)

[11] 최은정, 나경연, 중기(2022-2024)년 건설업 외국인 근로자 적정규모 산정 (초판), 한국건설산업연구원, 2022, pp.5-14. // (E.J. Choi, K.Y. Na, Mid-term (2022-2024) estimation of the appropriate scale of foreign labor in the construction industry (1st ed.), Construction & Economy Research Institute of Korea, 2022, pp.5-14.)

[12] 염태준 외 4인, 공동주택 하자유형별·공종별·공간별 실태분석 연구—하자분쟁조정위원회 신청건수를 중심으로, 한국건축시공학회지, 제24권 제6호, 2024, pp.717-726. // (T.J. Yeom et al., Analysis of defects in multi-family housing by type, Construction work and space-focusing on applications to the defect review and dispute mediation committee, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 24(6), 2024, pp.717-726.)

[13] 국토교통부, 공동주택 하자 판정비율 및 건수 상위 20개 건설사 명단 공개, https://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?lcmepage=1&id=95090267, 2025.10.08. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Top 20 construction companies with the highest defect rates and cases in multi-family housing revealed, https://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?lcmepage=1&id=95090267, 2025.10.08.)

[14] 한국건설기술연구원, 모듈형 욕실유닛의 세대간 벽체부위 개선 및 모듈 기술개발, 한국건설기술연구원, 2020. // (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), Development and improvement of inter-unit wall structures for modular bathroom units, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), 2020.)

1) 한국생산성본부에서 분기별로 발표하는 지수로, 노동생산성지수 = 산출량지수(산업생산지수)/노동투입량지수×100로 산출됨.