



## 순환 경제 정책에 기반한 지속 가능한 캠퍼스 마스터플랜 구현 전략 - 네덜란드 TU Delft '에코(Echo)' 프로젝트의 사례 연구를 중심으로 -

*Implementation Strategies for Sustainable Campus Master Plan Based on Circular Economy Policy  
- Focusing on a Case Study of the 'Echo' Project at TU Delft, Netherlands -*

이승근\*

Seung Keun Lee\*

\* Registered Architect (BA, Netherlands / KIRA, South Korea), Associate & Senior Architect at UNStudio, Amsterdam, Netherlands (archi.leesk@gmail.com)

### ABSTRACT

**Purpose:** This study investigates the architectural implementation of national circular economy frameworks within a university campus as a strategic testbed. Focusing on the 'Echo' project at TU Delft, it explores the systematic translation of governmental sustainability mandates into physical educational platforms. The research defines a future-oriented architectural direction that bridges macro-level environmental goals with micro-level spatial adaptability. **Method:** The research adopts a case study approach incorporating comparative analysis and spatial typology frameworks. Grounded in N. J. Habraken's 'Support/Infill' and Stewart Brand's '6S Layers,' the 'Echo' building was examined through architectural design records analysis and correlation mapping with campus-level sustainability visions. Four integrated dimensions such as energy productivity, resource circularity, environmental control, and spatial flexibility were analyzed to evaluate the alignment between strategic objectives and structural execution. **Result:** The study finds that sustainable architecture achieves optimal performance through the synergy of structural reversibility and functional independence. Key mechanisms such as Design for Disassembly (DfD), dry joints, and plenum floor systems extend the building's life cycle while fostering social sustainability via agile, user-centered spaces. The research concludes by providing strategic implications for progressive campus master plans in South Korea. By proposing 'Korean Circular Architecture Guidelines' involving typological indexing and material-data-based design, this study supports the transition toward carbon-neutral and adaptable academic infrastructures.

### KEYWORD

순환 건축  
캠퍼스 마스터플랜  
해체 가능 설계(DfD)  
가변적 플랫폼

Circular Architecture  
Campus Master Plan  
Design for Disassembly (DfD)  
Flexible Platform

### ACCEPTANCE INFO

Received Apr. 7, 2026  
Final revision received Apr. 13, 2026  
Accepted Apr. 17, 2026

© 2026. KIEAE all rights reserved.

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경 및 목적

21세기 글로벌 건축의 패러다임은 단일 건축물로서의 에너지 효율화를 넘어서, 도시 및 지역 사회의 거점으로서 '탄소 중립(Carbon Neutral)'과 '순환 경제(Circular Economy)'의 시스템을 구축하려는 방향으로 진화하고 있다. 유럽에서 특히 지속 가능한 도시 구현에 관심이 높은 네덜란드 정부는 다가오는 2050년까지 천연자원의 소비를 완전히 배제하는 순환형 시스템의 구축을 목표로 설정하였다[1].

이를 실현하기 위한 실무적 전략으로는 '국가적 순환경제 프로그램(National Circular Economy Programme 2023-2030)'의 정부 프로그램으로서 건축물 자재의 수명 및 특성을 데이터화 하여 기록하는 '자재 여권(Material Passports)'의 제도화, 또한 건물의 해체 및 재조립을 권장하기 위한 '해체 가능 설계(Design for Disassembly, DfD)'를 제도적으로 설정하고 있다[2].

이와 같이 국가 차원의 정책을 설정하는 데에는 기술적으로 테스트 및 검증 가능한 통제된 환경이 필요하며, 따라서 혁신적인 지식

활동이 고도로 집약된 대학교 캠퍼스를 '테스트베드(Test-bed)'이자 '리빙 랩(Living Lab)'으로서 가장 적합한 대상으로 가정한다. 특히, 네덜란드에는 대학 도시라는 단어가 존재하듯 캠퍼스 자체가 도시의 기능을 압축적으로 수용하며, 최적화된 도시 정책 연구 환경을 제공한다. 이에 따라 본 연구는 델프트 공과 대학교(TU Delft)를 대상으로 살펴볼 예정이다. TU Delft는 '캠퍼스 비전 2040(Campus vision 2040)' 그리고 '지속 가능한 TU Delft(Sustainable TU Delft)'의 가이드라인을 통해 대학 내부의 시설물과 건물들은 지역 그리드와 자원 순환망에 자연스러운 흡수가 될 수 있다고 강조하고 있다[3]. 특히, 미래의 불확실한 교육 환경에 대응하고자 하는 공간 구조의 가변성을 극대화하는 '적응형 건축(Adaptive Architecture)'의 개념을 마스터플랜의 핵심 원칙으로 정립한다[4].

본 연구는 TU Delft의 지속 가능한 마스터플랜 가이드라인이 실제 물리적 건축물로 어떻게 실증적으로 구현되는지 조사하기 위해, 최근 유엔스튜디오(UNStudio)에 의해 완공된 에코(Echo) 프로젝트를 분석 사례 대상으로 설정한다. 에코(Echo) 프로젝트는 에너지 자생, 가변 가능한 레이아웃, 생태적 외피 및 하이브리드 구조 등의 지속 가능한 설계 전략을 적용하여, 추상적일 수 있는 마스터플랜의 지표를 물리적인 설계로 구현한 선도적인 프로젝트 사례가 된다. 따

라서 본 연구는 사례 프로젝트에 적용된 설계 요소와 마스터플랜 간의 연계성을 분석하며, 향후 국내 대학 시설의 노후화 문제 해결과 지속 가능한 마스터플랜의 실질적인 가이드라인의 설정에 기여하는 데에 목적이 있다.

### 1.2. 연구의 범위 및 방법

본 연구는 네덜란드의 국가적 순환 경제 수립 전략이 대학 캠퍼스에서 구체적인 건축물의 사례를 통해 검증되는 것을 살펴보고, 그 연관 관계를 규명하기 위해 다음과 같은 범위와 방법을 제안한다.

#### 1) 연구의 범위

본 연구는 TU Delft 캠퍼스 내에 위치한, 2022년에 신축된 다목적 교육 공간 시설인 에코(Echo) 빌딩으로 한정한다. 이를 통해 네덜란드 국가 정책 및 캠퍼스 마스터플랜 가이드라인이 실제 건축 설계 전략에 적용되는 상관관계를 분석하는 데 중점을 둔다. 유엔스튜디오(UNStudio)가 제시한 설계 개념과 기술적 전략을 바탕으로 ‘에너지 생산성’, ‘자원 순환성’, ‘통합적 환경제어 시스템’, ‘공간의 가변성 및 사회적 지속가능성’의 4가지 분석 틀을 연구의 범위로 설정한다.

#### 2) 연구의 방법

연구의 방법은 추상적인 가이드라인으로 부터 건축물의 실증적 구현이 이루어지는 상관관계를 비교하기 위해, 문헌 분석과 기술적 설계 데이터 분석을 병행한다. 우선 네덜란드 정부의 ‘국가적 순환경제 프로그램(National Circular Economy Programme 2023-2030)’과 대학의 지속 가능한 마스터플랜을 검토하여 분석의 기준을 설정한다. 선정된 사례 연구 프로젝트를 유엔스튜디오(UNStudio)에서 확보한 공식 설계 주안점 및 기술적 솔루션을 통해 조사하고, 앞서 설정한 4대 분석 틀로 분석한다. 최종적으로 이러한 기술적 구현이 지속 가능한 국내 대학 시설 및 캠퍼스 마스터플랜의 개선을 위한 실질적인 시사점을 도출하고자 한다.

## 2. 이론적 고찰 및 배경

### 2.1. 네덜란드 순환 건축의 메커니즘과 제도적 확장

네덜란드 정부의 ‘국가적 순환경제 프로그램(National Circular Economy Programme 2023-2030)’은 건축 산업 전반의 벨류 체인(Value Chain)을 구축하기 위한 지속 가능한 기술적 메커니즘을 다루고 있다. 즉, 도시 공간 속의 건축물을 수명이 다하면 소모되는 대상이 아닌, 해체 후에도 그 가치가 회수 가능한 순환성 있는 유기체로 간주한다. 이는 ‘자재 은행(Material Bank)’의 개념의 플랫폼을 통해 건축물의 자산 가치를 증명하려는 시도로 해석된다. 순환경제 프로그램과 연관된 네덜란드의 연구 경향을 살펴보면, ‘Circular Construction Economy: Transition Agenda, Ministry of Infrastructure and Water Management’, ‘Implementing the Design for Disassembly (DfD) Principle in the Public Procurement Process of Buildings in the Netherlands’ 등과 같이 지속 가능한 순환 시스템 구축을 위한 전략 연구가 활발히 이루어지고 있다[5,6].

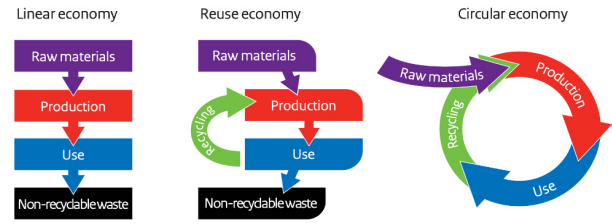


Fig. 1. From a linear to a circular economy (source: A circular economy in the Netherlands by 2050)

이러한 연구에서 주로 다루는 메커니즘은 네덜란드의 ‘R 전략(R-Strategies)’을 기본으로 한다. 이는 자원 및 자재가 지닌 가치를 체계적으로 정의하고 보존하기 위해 거절하기(Refuse), 다시 생각하기(Rethink), 줄이기(Reduce)를 최우선으로 하며, 재사용하기(Reuse), 수리하기(Repair), 재생하기(Refurbish) 등 10가지 전략을 단계별로 강조한다. 이를 통해 자원 순환의 루프(Loop) 형성 및 실천 방법을 제안한다[2].

본 연구에서 해체 가능 설계(DfD)는 위 ‘R 전략’ 중 재사용하기(Reuse)와 다시 만들기(Remanufacture)의 개념이 적용되어 건축 산업에서의 실무적 구현을 가능하게 하는 핵심 기술이다[5].

또한, 건축물을 순환 가능한 대상으로 인식하여 모든 자재의 정보를 기록하는 ‘자재 여권(Material Passports)’ 제도는 건물의 해체 시 자재의 ‘탈부착 가능 지수(Detachability Index)’를 수치화하여 건축물이 유기적 체계로 정의될 수 있는 근거를 제공한다[7]. 이러한 가이드라인은 설계 초기 단계부터 고려가 요구되며, 순환 건축의 실현 가능성을 높이기 위한 구체적인 방법론을 제시한다.

### 2.2. TU Delft 캠퍼스 마스터플랜 가이드라인

TU Delft의 ‘캠퍼스 비전 2040(Campus vision 2040)’은 정부의 순환경제 프로그램을 대학 캠퍼스라는 특수 환경에 맞춰 구체화한 설계 지침이다[3]. 이 마스터플랜 가이드라인은 모든 신축 및 개보수 과정에서 충족되어야 할 정량적 기준과 방향성을 제시하며, 건축물은 교육 공간으로서의 목적을 만족하는 동시에 에너지를 생산하고 자원의 보존과 관리가 가능한 대상으로 정의된다. 이 지침에서 가장 핵심이 되는 지표는 건축물의 전 생애주기에서 발생하는 ‘내재 탄소(Embodied Carbon)’의 배출량 제한 및 관리에 있다. 즉, 건축물 자체의 생산부터 운반, 시공, 운용, 그리고 철거 단계에서 발생하는 ‘탄소 발자국(Carbon Footprint)’을 설계 단계에서부터 고려할 것을 강력히 제안하고 있다. 결과적으로 이러한 탄소 추적 지표의 도입은 재사용 가능한 부재의 선택, 효율적인 자재 운반, 건축물 구조체의 경량화, 시공 과정에서의 자재 낭비 최소화, 사용 중 발생하는 탄소 배출 최소화를 유도하는 제도적 장치가 된다. 또한, 캠퍼스 마스터플랜 가이드라인에서 개별 건축물은 캠퍼스 내 에너지 네트워크의 능동적인 ‘에너지 허브(Energy Hub)’로 작동할 것을 새롭게 규정하고 있다. 특히 TU Delft 캠퍼스 전역에는 대수층 축열 시스템(ATES)이 구축되어 있으며, 신축 건물들이 생산하고 남은 에너지를 그리드 내에서 공유 및 순환할 수 있는 시스템 구축을 의무화하고 있다[4].

이와 같이 TU Delft의 마스터플랜 가이드라인은 탄소 배출 관리

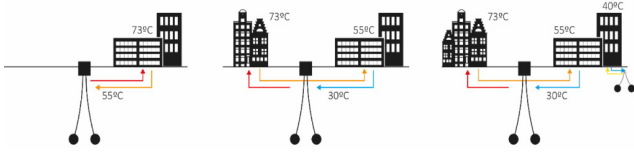


Fig. 2. Phases of a heat network powered by the geothermal well (ATES HT, MT, LT) (source: Sustainable TU Delft: Vision, ambition and action plan for a climate university, p.157)

및 에너지 공유 네트워크의 주요 개념을 구체화하여 설계 기준을 정립함으로써, 대학 시설이 미래 환경 변화에 대응할 수 있는 기술적 근거를 제공한다. 또한, 이는 국가의 정책과 맥락을 같이 한다는 점에서 큰 의미가 있다.

### 2.3. 지속 가능한 유연한 건축과 시스템 분리

지속 가능한 건축의 구현은 미래의 변화 및 사용자의 요구에 건축물 자체가 얼마나 능동적으로 대응하는지에 달려 있다. 이는 건물을 단일한 완성물로 보는 것이 아닌, 구조와 설비, 내외장재 등 서로 다른 생애주기를 가진 요소들의 집합체인 유기물로 해석하는 스투어트 브랜드(Stewart Brand)의 이론에서 학술적 근거를 찾을 수 있다[8]. 브랜드의 저서 'How Buildings Learn: What Happens after They're Built'에 따르면 대지(Site), 구조(Structure)와 외피(Skin)는 상대적으로 반영구적인 수명을 갖는 반면, 설비(Services), 내부 공간(Space plan), 가구(Stuffs) 등은 상대적으로 제한된 수명을 갖는다. 즉, 각 건물의 레이어(Layer)가 독립적으로 기능을 수행할 때 전체 건물의 수명이 극대화됨을 도출할 수 있다. 또한, N. J. 하브라켄(N. J. Habraken)의 '서포트(Support)와 인필(Infill)' 분리 개념을 통해 건축물의 가변성과 사용자 중심의 적응성을 확보하는 것이 지속 가능한 미래 건축 환경 조성의 핵심 조건이 될 수 있음을 알 수 있다[9].

건축물의 유연성을 고려한다는 것은 단순히 건물의 물리적 수명을 연장하는 것에 그치지 않고, 궁극적으로 사회적 지속가능성(Social Sustainability)의 경계를 확장하는 것을 의미한다. 대학 캠퍼스처럼 교육 방식 및 학생의 요구가 급격히 변하는 환경에서 건축물이 고정된 형태를 고집하지 않고 사용자의 필요에 따라 공간이 자유롭게 변경될 수 있을 때, 최적의 학습 환경 조성 및 사용자 간의 진정한 소통이 가능해진다. 이는 건축물의 물리적 수명과 기능적 수명 사이의 간극을 좁힘으로써 순환경제 구현의 실천적 방법론이 되며, 변화하는 교육 현장을 '지속 가능한 플랫폼'으로 탈바꿈한다.

이와 같은 이론적 고찰을 바탕으로, 제3장에서는 건축물의 유연성과 시스템 분리 원칙이 적용된 TU Delft의 에코(Echo) 프로젝트를 통해 실현 과정을 구체적으로 살펴본다.

## 3. 지속 가능한 교육 플랫폼: 에코(Echo)의 건축 메커니즘 분석

### 3.1. 에코(Echo): 프로젝트 개요 및 지향점

네덜란드 TU Delft 캠퍼스 내에 위치한 에코(Echo) 건물은 유엔 스튜디오(UNStudio)가 설계한 다학제적 교육 시설로, 급증하는 학



Fig. 3. The 'Echo' building, TU Delft: An 'Evolving Platform' for inter faculty education (source: UNStudio/architectural record)

생 수와 변화하는 교육 형태에 능동적으로 대응할 수 있도록 '진화하는 플랫폼(Evolving Platform)'의 비전을 지향한다. 본 프로젝트는 TU Delft의 '2030 탄소 중립' 목표를 실현하기 위한 첫 번째 사례이며, 건축물 자체가 지속가능성의 가치를 지닌 '본보기가 되는 교육(Leading by Example)' 모델로 정의된다. 즉, 학생들이 건물 안에서 습득하는 이론적 지식뿐만 아니라, 에너지 생산과 자원 순환이 실제로 구현되는 건축 환경 자체를 직접 체험함으로써 지속가능성의 실천적 중요성을 학습하도록 유도하였다.

에코(Echo) 건물은 연면적 8,844m<sup>2</sup> 규모에 약 1,700명의 학생을 동시에 수용하며, 기존의 폐쇄적인 교육 시설에서 벗어나 캠퍼스의 공공 공간과 소통하는 투명성(Transparency)을 주요 디자인 원칙으로 갖는다. 내부적으로는 개방된 공간에서의 협업 및 소통을 촉진하는 사회적 지속가능성(Social Sustainability)을 강화하며, 이러한 활동은 시간적으로 캠퍼스 외부로 확장되어 내·외부가 상호작용하는 공공의 브리지(Bridge) 역할을 한다. 즉, 에코(Echo)의 설계 지향점은 건축물의 물리적 고착성을 극복하고, 미래의 교육 트렌드 변화에 따라 건물 스스로 진화할 수 있는 기술적-공간적 토대를 마련하는 데 목적이 있다.

### 3.2. 에너지 거점화: '에너지 플러스' 전략

에코(Echo) 건물은 운영 단계에서의 에너지 자립의 목표를 넘어서, 더 많은 전력을 스스로 생산하는 '에너지 플러스(Energy Plus)' 성능을 구현하여 전체 캠퍼스 에너지 네트워크에 능동적으로 기여하는 에너지 생산 거점으로 기능한다. 본 건물은 강의실 운용 전력뿐만 아니라, 약 1,700명의 사용자가 동시에 사용하는 노트북, 모바일 기기 등의 사용자 전력과 실내조명, 케이터링 설비에 소모되는 전력까지 100% 자급할 수 있는 용량을 확보하는 동시에 잔여 에너지를 캠퍼스에 제공한다.

이를 위해 건물 지붕 층에는 1,200개의 고효율 태양광 패널(PV Panel)이 밀집 설치되어 있으며, 이는 단순히 단일 건물의 전력 공급을 넘어 캠퍼스 전체의 대수층 축열 시스템(Aquifer Thermal Energy Storage, ATES) 및 지능형 스마트 그리드와 양방향으로 연동된다.

이는 TU Delft 마스터플랜의 '에너지 허브(Energy Hub)' 지침을 실질적으로 설계에 적용한 사례이며, 개별 건축물이 지역 그리드 내에서 에너지를 생산(Harvest), 저장(Storage), 공유(Sharing)하는 능동적 루프를 형성하고 있음을 보여준다.



Fig. 4. Energy generation via 1,200 solar panels on the rooftop of the 'Echo', TU Delft (source: UNStudio/architectural record)

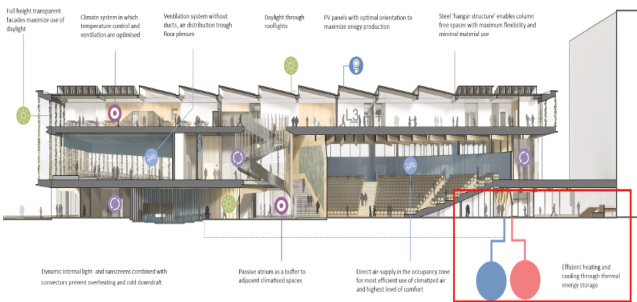


Fig. 5. Section diagram of the integrated energy system: Energy generation and seasonal storage through the Aquifer Thermal Storage (ATES) network (source: UNStudio/architectural record)

또한, 건물 내 가구의 90%를 재사용 가구(Reused furniture)로 구성하였으며, 이는 네덜란드의 'R 전략' 중 재사용하기(Reuse)와 재생하기(Refurbish)를 실천한 것으로, 자체 생산 단계에서의 내재 탄소(Embodied Carbon) 배출을 획기적으로 줄인 사례이다. 이와 같이 에코(Echo) 건물은 운영 에너지의 자생적 생산과 지역 그리드로의 공유를 통해, 단일 건축물이 캠퍼스 전체의 지속가능성을 견인하는 에너지 거점으로 기능할 수 있음을 증명한다.

### 3.3. 자원 순환을 위한 해체 가능 설계: 구조적 가역성

일반적으로 건축물의 골조는 완공 후에 변경이 불가능한 고정적 자산으로 인식된다. 그러나 에코(Echo)는 건축물의 생애주기가 종료된 후의 해체 과정을 설계의 시작점으로 다시 삼음으로써, 건축적 자원의 순환이 가능한 전략을 적용하였다. 이를 통해 건축물을 구성하는 자재들은 영구적으로 고정된 것이 아닌, 잠시 조립된 집합체로서 '자재 은행(Material Bank)'의 구성 요소로 재정의된다. 이러한 접근은 구조적 가역성(Structural Reversibility)이라는 탄력적인 개념으로 구현되며, 스투어트 브랜드(Stewart Brand)가 반영구적인 층위로 분류했던 구조(Structure)의 속성에 해체 및 재조립이 가능한 가변적 가치를 부여한 시도로 볼 수 있다. 특히 모든 주요 부재의 연결에는 건식 접합(Dry Joints)이 적용되었으며, 표준 규격으로 제작된 철골 트러스와 중공 슬래브(Hollow-core Slabs)는 향후 건물의 용도 변경이나 폐기 시 자재의 손상 없이 원형 그대로 회수될 수 있다. 이는 네덜란드 정부의 'R 전략' 중 재사용하기(Reuse)와 다시 만들기(Remanufacture)의 실천을 보장한다.

에코(Echo)의 구조 설계는 '대형 철골 포털 구조(Steel Portal Structure)'로 기둥을 외곽으로 배치하여 대경간의 무주 공간을 형

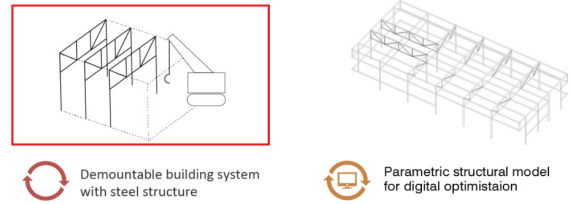


Fig. 6. Diagram of Structural reversibility strategy for dismantling and reassembly (source: UNStudio/architectural record)



Fig. 7. Structural system and central void with 'V-walls' (source: UNStudio/architectural record)

성한다. 이는 앞서 고찰한 하브라켄(N.J. Habraken)이 강조한 서포트(Support) 기능을 온전히 수행하며, 이와 완전히 분리된 인필(Infill) 요소들이 구조적 제약 없이 내부 기능을 자유롭게 변경할 수 있는 건축적 환경을 제공한다.

특히, 건물의 중심에서 시각적·구조적 중심을 잡는 사선형 구조체(V-walls)는 단순히 디자인 요소를 넘어서, 상층부의 표준 강의실 그리드와 하부의 대규모 무주 공간이라는 서로 다른 공간 체계를 유연하게 통합하는 구조적 전이(Transfer) 장치로 기능 한다. 이는 하중 경로를 최적화하여 부재에 가해지는 응력을 효율적으로 분산시킴으로써, 물리적인 강제 사용량을 기술적으로 절감하고 전체 시스템의 구조적 효율성을 확보하는 메커니즘을 갖는다. 또한, 이렇게 형성된 건물 중앙의 보이드(Void) 공간은 자연 채광과 환기를 건물 깊숙이 유입시키는 친환경적 기능을 동시에 수행한다. 이는 건축 디자인 초기 단계부터 탄소 발자국(Carbon Footprint)을 줄이는 전략이며, 결과적으로 순환 건축을 위한 친환경 통합 설계의 우수한 선례로 평가된다.

### 3.4. 환경 제어 시스템: 외피와 설비의 독립 설계

에코(Echo) 프로젝트의 환경제어 전략은 건물 외피(Skin)와 내부 설비 시스템(Services)을 하나의 유기체처럼 상호작용하게 기능적으로 통합을 하는 동시에, 각 요소가 구조체로부터 물리적으로 독립된 설계가 적용되었다. 이는 상대적으로 교체 주기가 빠른 외피 및 설비 레이어를 분리 구성하여 지속가능성을 극대화한 것으로 판단된다.

특히 건물 입면의 핵심 개념인 '리빙 파사드(Living Facade)'는 건축물을 고정된 구조물이 아닌, 시간의 흐름에 따라 변화하고 성장하는 유기체로 간주하는 유엔스튜디오(UNStudio)의 디자인 철학을 반영한다. 건물 전체를 감싸는 투명한 유리 파사드는 캠퍼스와의 시각적 연속성을 확보하여 사회적 지속가능성(Social Sustainability)에 기여 하는 한편, 태양열 부하를 제어하는 전략이 동시에 수반된다.

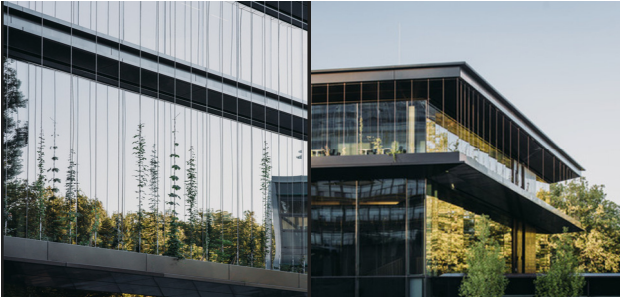


Fig. 8. 'Living Facade' at 'Echo': A parametric skin system aligning with natural life cycles (source: UNStudio/architectural record)

이를 위해 태양 고도와 일사량을 정밀하게 분석한 파라메트릭 데이터(Parametric Data)를 바탕으로 층별로 돌출된 알루미늄 차양의 규격이 결정되었으며, 차양 사이를 잇고 식물이 자랄 수 있는 와이어 케이블의 간격은 최적의 음영이 구현되도록 설계되었다. 이렇게 계산된 설계는 식물이 자라남에 따라 최적의 음영 밀도를 형성하여 실내의 열부하를 효과적으로 제어한다. 특히 계절의 순환에 맞춰 외피의 밀도와 투과율을 능동적으로 조절하는 이 시스템은 건축물의 생애주기를 자연의 순환 체계와 일치시킨 혁신적인 사례가 된다. 결과적으로 리빙 파사드(Living Facade)는 캠퍼스 녹지 축의 생태적 연속성을 건물 내부로 유입시켜, 인공 건축물이 캠퍼스 내에서 살아있는 유기체처럼 반응하도록 유도한다.

본 건물의 실내 공조 및 배선 시스템은 바닥 하부의 공간을 대규모 공기 공급 통로 및 전선 매립 공간으로 활용하는 '플레넘 플로어(Plenum Floor)' 방식이 도입되었다. 이는 천장에서 공기를 급-배기하는 기존 방식과는 달리, 바닥 디퓨저(Diffuser)를 통해 신선한 공기를 저속 상향 공급하여 실내 공기의 대류를 최적화하고 오염 물질의 확산을 방지함으로써 쾌적한 실내환경을 유지한다. 특히, 슬라브 구조와 물리적으로 완전히 분리되어 있어, 사용자 요구에 따라 환기구 및 배선함의 위치를 구조적 변형 없이 자유롭게 재배치할 수 있는 기술적 가변성을 제공한다. 이는 건축 구성 요소 중 교체 주기가 상대적으로 짧은 내부 공간 계획(Space plan) 및 가구(Stuffs)의 배치를 용도 변화에 맞춰 유연하게 재구성할 수 있게 하는 큰 장점이 있다. 따라서 이러한 설계 전략은 건축물의 기능적 노후화를 방지하고 건물 전체의 생애주기를 연장하는 핵심적인 디자인 전략으로 작동한다.

### 3.5. 공간의 가변성 및 사회적 지속가능성: 'Everything Anywhere'의 플랫폼

공간 구성 측면에서 에코(Echo) 프로젝트는 초 유연한 적응형 평면 계획을 통해 대학 공동체의 사회적 지속 가능한 캠퍼스 마스터플랜 전략으로 확장한다. 앞서 고찰한 순환 자원 활용 및 에너지 저감 전략이 환경적 지속가능성을 위협이라면, 사용자의 요구에 민첩하게 반응하는 유연한 공간 구조는 건물의 생애주기를 자연스럽게 연장하며 공동체의 결속을 유지하는 사회적 지속가능성(Social Sustainability)의 실천적 방안이 된다. 유엔스튜디오(UNStudio)의 'Everything Anywhere' 철학에 따라 건축물이 특정 기능에 고착되지 않고 학습, 협업, 휴식 및 소통의 경계가 없는 플랫폼으로서 지

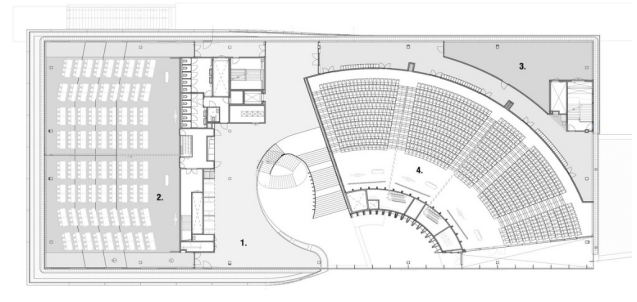


Fig. 9. Flexible space configuration of the large lecture hall via movable wall systems (source: UNStudio/architectural record)



Fig. 10. Integration of two lecture halls into a single large-scale event hall (source: UNStudio/architectural record)

이 있는 공공 광장(Covered Public Square)으로 구현된다. 이는 학문적 경계를 허물고 우연한 만남을 촉진하는 사이 공간을 창출하며, 개인을 공동체의 사회적 자산으로 성장시키는 기반이 된다.

특히 에코(Echo) 프로젝트의 내부 레이아웃의 지속가능성 구현 전략은 대강의실 공간 구성에서 극명하게 확인된다. 700인을 수용할 수 있는 규모의 대강의실은 가변형 이동 벽체 시스템(Movable Wall System)을 도입하여, 단 15분 만에 3개의 독립된 실로 분리할 수 있는 탄력적인 디자인이 적용되었다.

이는 동 시간대 다양한 교육 이벤트를 수용하여 공간 가동률을 극대화하는 동시에, 필요시에는 대규모 행사가 가능한 통합 공간을 제공함으로써 사회적 소통의 장으로의 역할을 한다. 또한, 상층부의 모듈러 벽체 시스템은 3.4절에서 언급한 플레넘 플로어(Plenum Floor) 그리드와 연동되어 미래의 교육 트렌드 변화에 맞춰 즉각적인 평면 재구성을 가능하게 한다. 이는 '서포트(Support)'와 '인필(Infill)'을 완벽히 구분한 실증적인 시도로 판단되며, '인필(Infill)'의 조정만으로도 건축물의 철거 및 대규모의 리모델링 공사 없이 사용자 요구 변화에 즉각적으로 대응할 수 있게 한다. 이러한 민첩한 공간 전략(Agile Spatial Strategy)은 자원 낭비를 최소화하는 동시에 자원 순환의 원칙을 사회적 영역으로 확장한 사용자 중심의 지속 가능한 학습 생태계를 구현한다.

## 4. 분석 및 고찰

### 4.1. 순환 건축의 이론적 실증 및 정책적 시사점

본 연구의 이론적 배경이 되는 스템트 브랜드(Stewart Brand)의 '6S 레이어'와 하프라켄(N.J. Habraken)의 '서포트(Support)와

인필(Infill) 이론은 현대 건축의 지속 가능한 설계 전략과 높은 정합성을 보이며, 순환 건축 디자인 전략으로의 확장 가능성을 보여준다. 이는 각 건축 요소의 물리적 수명과 기능적 수명의 간극을 좁히며, 변화하는 교육 환경에 맞춰 건축물이 스스로 진화할 수 있는 학술적 근거를 제시하기 때문이다. 이러한 가능성은 네덜란드 정부의 '국가적 순환경제 프로그램'이라는 정책적 뒷받침이 있었기에 가능했다고 판단된다. 특히 '자재 여권(Material Passports)'과 '탈부착 가능 지수(Detachability Index)'의 제도적 도입은 건축 설계 초기 단계부터 자재의 해체와 재사용성을 정량적으로 평가하게 함으로써, 본 연구 사례 프로젝트에 건식 접합(Dry Joints)과 표준 규격 부재의 사용이라는 구체적인 건축 전략을 이끌었다. 이는 정책적 가이드라인이 건축가에게 제약이 아닌 창의적 설계의 기회로 작용할 수 있음을 시사한다. 결과적으로 에코(Echo) 프로젝트는 대학 캠퍼스라는 테스트베드(Test-bed) 환경에서 정책의 실효성을 성공적으로 검증하였으며, 이는 향후 국내 건축물의 탄소 중립 실현 및 노후 교육 시설 재생을 위한 실천적 정책 지침으로서 중요한 학술적 가치를 지닌다.

#### 4.2. 분석 요소 간의 상호 보완적 메커니즘

본 연구의 분석 대상인 에코(Echo) 프로젝트에 적용된 네 가지 설계 전략은 단편적인 지속 가능 디자인 기술의 나열이 아닌, 각 요소가 유기적으로 결합하여 단일 기술로는 도달하기 힘든 시너지 효과를 창출하는 통합적 메커니즘으로 작동한다.

우선 3.3절에서 고찰한 대 경간 무주 공간을 위한 경량 철골 포터 구조(Steel Portal Structure)의 적용은 3.5절의 사용자 중심 가변적 공간 구성이 가능한 물리적 자유도를 극대화하는 토대가 된다. 이러한 구조 시스템 안에서 3.4절의 독립된 설비 시스템의 적용은 구조체와 물리적으로 완전히 분리되어, 배선 및 공조 장치 이동의 제약이 없는 인필(Infill)의 재배치로만 완성되는 핵심 시스템이다. 3.4절에서 적용된 파라메트릭 리빙 파사드(Parametric Living Facade) 설계는 능동적인 일사량 조절을 통해 실내 열부하를 근본적으로 제어하며, 이는 3.2절의 에너지 플러스(Energy Plus) 전략과 시너지를 형성한다. 외피 설계로 건물 자체의 에너지 소비를 절감함으로써, 태양광 패널로 생산된 에너지를 내부에서 모두 소모하지 않고 더 많은 잔여 에너지를 캠퍼스 그리드로 공유할 수 있는 전략을 완성하기 때문이다. 결과적으로 이러한 모든 기술적 요소의 상호 보완 효과는 단일 건축물의 성능 최적화를 넘어서, 사용자의 요구와 변화하는 교육 패러다임에 대응하는 사회적 지속가능성(Social Sustainability)의 구현으로 이어진다. 이는 공동체의 지속적인 성장을 촉진할 수 있는 진정한 미래형 캠퍼스 마스터플랜 모델로, 건축이 단순한 물리적 실체를 넘어 능동적인 교육 생태계로 진화해야 한다는 새로운 패러다임을 제시한다.

### 5. 결론

본 연구는 TU Delft의 에코(Echo) 프로젝트 분석을 통해 자원 순환형 설계가 미래형 캠퍼스 마스터플랜에 부여하는 학술적 가치 및

정책적 시사점을 도출하였다. 에코(Echo) 프로젝트의 설계 전략은 단순히 지속 가능한 기술 도입을 넘어, 급변하는 미래에 민첩하게 대응하는 건축의 새로운 사회적 역할이 중요함을 시사한다. 특히 이러한 결과는 학생 수 감소와 시설 노후화에 직면한 한국 대학 캠퍼스의 재생 전략으로서 중요한 사례 연구가 된다. 이는 기존의 경직된 국내 캠퍼스 조성 방식에서 벗어나, 국가적 순환 경제 정책과 연계된 가변적 건축 플랫폼(Platform) 구축의 시급함을 강조한다. 나아가 '자재 여권(Material Passports)' 및 '탈부착 가능 지수(Detachability Index)'와 같은 정량적 지표의 국내 도입은 건축가의 창의성을 제약하는 규제가 아닌, 데이터에 기반한 지속 가능한 설계를 가능하게 하는 새로운 기회로 기능할 수 있음을 시사한다. 결국, 건축물을 수명이 한정된 고착물이 아닌, 주변 환경과 상호작용하며 스스로 진화하는 유기체로 재정의할 때 건축물의 물리적·기능적 수명이 자연스럽게 연장될 수 있다. 더불어 이러한 개별 건축물의 수명 연장은 전면 철거와 재개발이라는 도시 맥락과의 단절을 최소화하며, 캠퍼스의 경계를 넘어 도시 전체의 생명력을 담보하고 수명을 연장하는 근본적인 해결책이 될 것이다.

이를 위해, 국내 대학 캠퍼스 환경에 적용 가능한 '한국형 순환 건축 가이드라인'은 다음과 같은 실천 전략을 포함해야 한다. 첫째, 캠퍼스 마스터플랜 차원에서 개별 건물이 에너지와 탄소 관리를 상호 공유하는 통합 에너지 네트워크 체계를 구축해야 한다. 둘째, 해체 가능 설계(DfD) 원칙에 따라 표준화 및 가변형 부재 사용을 의무화하여 교육 공간의 용도 변경 및 노후화로 인한 자원 낭비를 최소화해야 한다. 셋째, 자재 여권과 탈부착 가능 지수를 제도적 지표로 도입하여, 건축 자재의 자산 가치를 기록하고 회수 가능한 순환 루프를 보장해야 한다. 이러한 연구는 대학 캠퍼스가 시대적 요구에 대응하며 지역 사회와 공생하는 거점으로 진화하는 토대가 될 것이며, 나아가 공동체의 지속 가능한 성장과 도시의 회복 탄력성을 높이는 핵심 인프라로서 실질적인 방안이 될 것이다.

### References

- [1] Government of the Netherlands, A circular economy in the Netherlands by 2050: Government-wide Programme for a Circular Economy, Ministry of Infrastructure and the Environment, 2016.
- [2] Government of the Netherlands, National circular economy programme 2023-2030, Ministry of Infrastructure and Water Management, 2023.
- [3] Delft University of Technology, Campus vision 2040: Creating a vibrant, sustainable and inclusive campus, TU Delft, 2021.
- [4] Delft University of Technology, Sustainable TU Delft: Vision, ambition and action plan for a climate university, TU Delft, 2021.
- [5] Government of the Netherlands, Circular construction economy: Transition agenda, Ministry of Infrastructure and Water Management, 2018.
- [6] A.B. Ashokkumar, Implementing the Design for Disassembly (DfD) principle in the public procurement process of buildings in the Netherlands (Master's Thesis), Netherlands: Delft University of Technology, 2018.
- [7] K. Pal, Assessing data exchange of material passports between key stakeholders (Master's Thesis), Netherlands: Delft University of Technology, 2023.
- [8] S. Brand, How buildings learn: What happens after they're built, Viking Press, 1994.
- [9] N.J. Habraken, Supports: An alternative to mass housing, Architectural Press, 1972.