

## 탄소배출 저감 및 저비용 제로에너지 건축 구현을 위한 모듈러 건축의 도입



**정찬우** 한양대학교 ERICA 환경·에너지연구원 산학협력중점교수, kujou1029@hanyang.ac.kr

### 1. 머리말

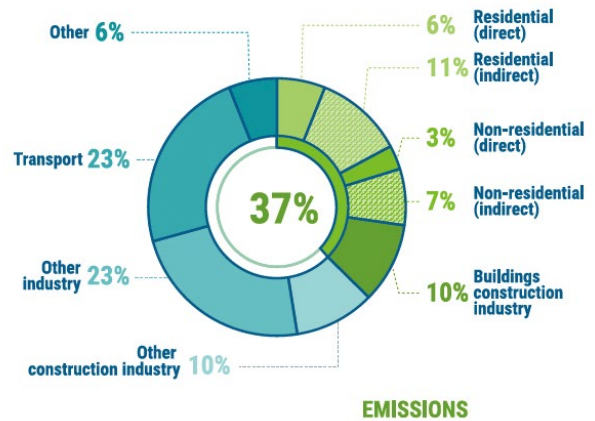
최근 지구온난화와 함께 이상기후 문제가 심각해지면서 온실가스 배출 감축이 주목받고 있다. 기후 변화에 관한 정부 간협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 발간한 6차 평가보고서(2021.8)에서는 인간 활동으로 인한 기후 변화가 지난 시기를 통틀어 전례 없이 빠르며, 2030년까지 온실가스 배출량을 2019년의 절반 수준으로 감축해야, 지구 대기 온도상승폭을 1.5°C 이내로 제한이 가능할 것으로 전망했다. 기온 1.5°C 상승은 1850~1900년 50년 동안 1번 발생할 정도의 극단적 폭염이 8.6배로 높아진다는 것을 의미한다. 국내에서는 기상청의 이상기후 보고서에서 2020년 태풍과 호우로 인해, 지난 10년(2010~2019) 연평균 피해의 약 3배(1조 2,585억)가 넘는 경제적 손실을 입었다고 보고하고 있으며, 21년과 22년 미국, 유럽 등 세계 곳곳에서도 초강력 폭우, 홍수, 폭염, 산불, 한파 등이 발생하고 있어, 기후위기가 우리에게 아주 가깝게 다가와 있음을 느끼게 된다.

### 2. 온실가스 감축을 위한 국내 정책 방향

수송, 화학, 열 생산 등 여러 분야에서의 산업 활동에서 이산화탄소가 배출되고 있는 가운데, 건축물의 건설 및 운영으로 인한 이산화탄소 배출량은 전 세계 탄소배출량의 37%(UN Environment Programme, 2021)를 배출하며 가장 많은 탄소를 배출하고 있다고 보고되고 있다. 우리나라 정부도 이에 대응하기 위하여, 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC)를 설정하고, 건물 부문의 탄소배출량을 2018년 52.1

백만 톤에서 2030년 35백만 톤까지 감축하는 목표를 수립하였으며, 주요 감축 방안으로 에너지 효율 향상, 고효율 기기 보급, 수요관리, 스마트에너지 관리, 청정에너지 보급 확대 등을 목표로 제안하였다. 여기서, 정부의 건물부문 탄소배출 감축방안은 건축물의 운영단계 에너지 사용량 저감을 통한 탄소배출량 감소에 무게중심을 두고 있다는 것을 알 수 있다.

관련된 국내 법·기준을 살펴보면, 먼저 건축물 부위별 단열 성능을 강화함으로써 건축물의 에너지 효율을 증가시키고 있음을 알 수 있다. 건축물 에너지절약설계기준을 살펴보면 2012년 대비 2018년에 창호 및 거실외벽에 대해 각각 50%, 59% 강화된 열관류율 성능 목표를 규정하였음을 알 수 있다. 또한, 제로에너지건축 의무화 강화로 건축물의 에너지자립률 향상을 추진하고 있다. 정부는 공공 공동주택은 2023년, 민간공동주택은 2024년부터 제로에너지 5등급(에너지



**그림 1.** Buildings and construction's share of global energy-related CO<sub>2</sub> emissions, 2020 (UN environment programme)

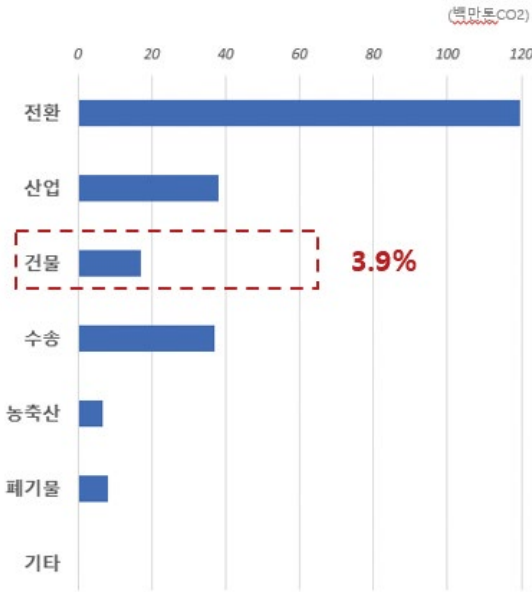


그림 2. 2030 국가 온실가스 감축목표('21.9)

자립율 30% 수준을 의무화하고 2050년에는 전 건축물을 1등급(에너지자립율 100%)으로 적용하는 국토교통 2050 탄소중립 로드맵을 2021년 12월 발표하였다.

### 3. 모듈러 공법의 탄소배출 저감 효과

영국왕립 건축가협회(RIBA)는 DFMA (Design for Manufacturing and Assembly)의 작업계획 적용에 대한 보고서(2021)에서 모듈러 공법이 전통적인 공법에 대비해 지속가능한 환경 구현에 아래와 같은 유리한 장점이 있음을 언급하였다.

- 1) 계획된 자재의 사용, 생산제어, 적은 오류를 통한 재료의 효율적 사용 및 낭비 최소화
- 2) 자재 운송비용의 저감과 함께 운송과정의 탄소배출 최소화
- 3) 시공현장에서의 에너지 및 물 사용 감소
- 4) 계획된 자재 사용 및 공장에서의 반복생산을 통한 폐기물의 최소화
- 5) 공장제작을 통한 균일한 에너지성능 확보
- 6) 공장제작 모듈의 하위 부품의 쉬운 재사용을 통해 탄소배출 저감 및 순환형 경제 활성화

이에, 본 연구진은 모듈러 공법 적용을 통한 탄소배출 저감 가능성을 생애주기 관점에서 검토해보았다.

### 3.1. 기존공법과 모듈러 공법의 탄소배출량 비교

탄소배출량의 정량적 비교분석을 위해 지상 7층, 2개동으로 이루어진 100세대의 공공임대주택을 기존공법(철근콘크리트공법, 이하 RC)과 모듈러 공법(철골구조)으로 설계하고, 전 생애주기관점에서 두 공법의 적용에 따른 탄소배출량의 증감을 분석하였다. 건축물의 사용기간은 30년 단기 사용과 30년 사용 후 이동 재설치 그리고 30년을 다시 사용하는 60년 시나리오를 <표 1>과 같이 설정하였다. 5년마다 내외장 도장을 하는 리모델링을 정기적으로 수행하며, 준공 후 15년차에는 내외장 마감재료의 50%를 교체하는 리모델링을 수행하고, 30년차에는 내외장 마감재를 전면 교체하는 전면 리모델링을 수행하는 것으로 가정했다. 분석에는 건축물에 투입되는 자재생산단계에서 시공단계, 운영단계, 폐기단계까지 포함하였으며, 모듈러 공법의 경우 폐기단계에서 순환하여 재사용이 가능한 부재에 대한 잠재적 탄소배출 감소를 반영하였다.

표 1. 분석 시나리오

Year	Scenario	
30	RC	신축(RC1) (30년 사용) / 폐기(RC1)
	모듈러	신축 (30년 사용) / 폐기 및 재사용 반영
60	RC	신축(RC1) (30년 사용) / 폐기(RC1) / 신축(RC2) (30년 사용) / 폐기(RC2)
	모듈러	신축 (30년 사용) / 이동/전면 리모델링 (30년 사용) / 폐기 및 재사용 반영

공법간 탄소배출량 비교에 대한 분석결과는 다음과 같이 간략히 정리할 수 있다.

- 1) 생산단계 : 모듈러 공법을 적용한 공동주택이 RC공법을 적용한 공동주택 대비 37% 탄소를 적게 배출하는 것으로 분석되었다. 모듈러 주택에서는 주요 구조 부재인 형강(철골)의 사용이 증가하지만, 이산화탄소배출이 큰 시멘트를 사용하는 레미콘 및 모르타르의 사용이 47%, 62% 수준으로 감소하기 때문이다.
- 2) 시공단계 : 자재운송 및 시공과정의 장비사용에 따른 탄소배출량이 비교되었으며, 모듈러 공법이 RC대비 약 72% 탄소를 적게 배출하는 것으로 분석되었다.
- 3) 운영단계 : 에너지사용으로 인한 탄소배출은 RC와 모듈러에서 유의미한 차이를 보이지 않았다. RC 공동주택은

내단열을 적용하고 모듈러 공동주택은 외단열을 적용하는 단열적용 방식의 차이가 설계에는 반영되었으나, 분석에 사용된 시뮬레이션 프로그램의 한계가 있어, 추후 보완연구가 필요할 것으로 보인다.

- 4) 해체 및 재사용단계 : 모듈러 골조 및 단위모듈의 RC슬라브 부분을 재사용 가능한 부분으로 판단하였고, 그 물량은 건설단계 탄소배출량의 약 27%에 해당하고, 잠재적 탄소배출 저감량으로 적용하였다.
- 5) 전생애주기 관점에서의 탄소배출량은 30년 단기사용 시나리오에서는 모듈러 건축물이 RC대비 17.4% 탄소를 적게 배출하고, 60년 사용 시나리오에서는 20.7% 탄소를 적게 배출하는 것을 확인하였다.

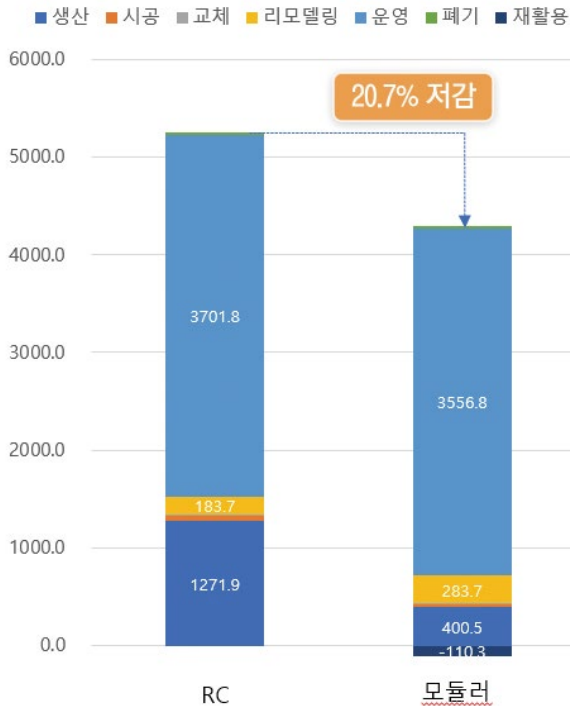


그림 3. 60년 시나리오 탄소배출량 비교

#### 4. 모듈러 공법을 통한 제로에너지 건축물의 구현

McKinsey 등의 보고서에 따르면 건축물의 사용기간 중 에너지사용으로 인한 탄소배출(이하 운영탄소)의 양은 전생애주기 관점에서의 탄소배출량의 약 30%를 차지하고 있다고 한다. 이러한 관점에서 제로에너지 건축물(Zero Energy Building, 이하 ZEB)의 구현은 건축물의 탄소저감에 중요한 실행이슈이기도 하다. 3장의 RC와 모듈러 공법을 적용한 공

동주택에의 탄소배출량 비교에서 운영탄소의 양은 전생애주기 관점에서 배출되는 탄소배출량의 약 70%, 83% 수준을 보였다. 본 챕터에서는 산업화된 공장제작 공법인 모듈러 공법을 통해 합리적인 ZEB의 구현을 모색하는 미국 국립재생에너지연구소(NREL)의 연구현황을 소개하고자 한다.

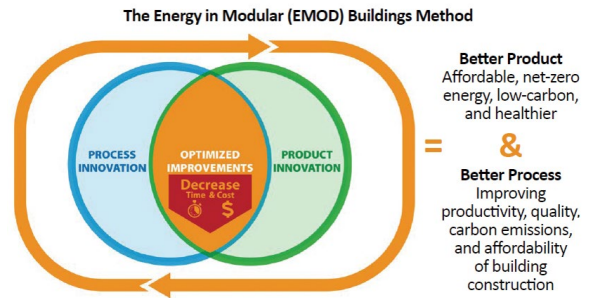


그림 4. 산업화된 건설을 통한 에너지효율화 접근방향(NREL)

#### 4.1. ZEB과 모듈러 공법을 논하는 이유

ZEB의 구현을 위해서는 기존 건축물보다 단열성능 등의 강화로 에너지요구를 저감하고, 각종 고효율 열원기기, 신재생에너지, 자동제어 장치 등을 도입하여 건축물의 에너지소요량을 최소화 할 필요가 있다. 이러한 과정에서 다음과 같은 여러 가지 새로운 문제들이 발생하게 된다. 아직 ZEB 적용기술이 보편화되지 않은 가운데 설계 및 시공 복잡성이

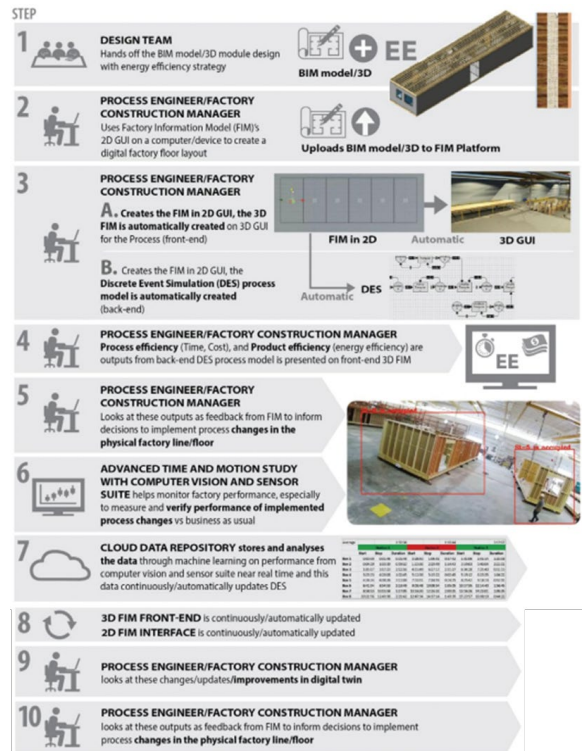


그림 5. 산업화 건설에서의 10단계 워크플로우

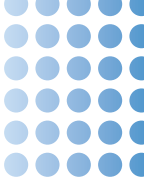


그림 6. 공장제작 모듈의 에너지 효율화 전략(최적화된 에너지 효율성 통합)

증가하게 된다. 그리고, 이를 수행하여야 할 설계자 및 숙련된 노동자가 부족하여 당초 계획한 것보다 낮은 시공품질을 보이는 경우도 있다. 또한, ZEB의 구현에 기존 대비 공사비가 상승하게 된다. SH도시연구원 에 따르면, 에너지 자립률 20~30% 달성을 요구하는 ZEB 5등급의 공동주택을 구현하는데 있어, 에너지사용량을 줄이는 패시브 기술요소와 신재생에너지 도입 등 액티브 기술요소 도입으로 약 10~15%의 공사비가 추가되고, 각종 인증, 공기연장, 자재생산(수입), 가설공사 추가설치 등 기술요소 외 공사비 인상요인도 발생한다고 보고하고 있다.

#### 4.2. 에너지 효율 기술의 모듈러 산업 통합 전략

NREL은 Off-Site 건설, Prefab 공법, 자동화 생산과 같은 산업화된 건설공법이 ZEB의 경제성, 노동력 부족, 품질확보 등의 문제를 해결할 수 있는 잠재력을 가지고 있다고 판단하고 가능성을 검토하였다. <그림 4>는 산업화된 건설을 통한 에너지효율화 접근방향을, <그림 5>는 설계자, 엔지니어, 공장 제작관리자가 참여하는 워크플로우를 보여준다. 모듈 설계에서 제작과정까지 BIM 모델 및 FIM Platform을 구축하며, 에너지 효율성을 가지는 제품(모듈) 설계와 함께 제작과정에서의 시간, 비용의 효율성도 동시에 추구하고 있다. 또한, <그림 6>과 같이 공장에서 제작되는 모듈에 적용 및 탑재 가능한 외피, 스마트 컨트롤, MEP, 신재생에너지 장치를 개발하고 시스템화함으로써, 공장생산의 장점인 반복생산, 품질확보, 원가저감을 구현하고, ZEB구현의 장애요소들을 극복하고자 하였다.

#### 5. 맺음말

현재까지 국내 모듈러 연구는 생산성의 향상, Off-Site 건축물의 안정성 및 품질확보에 초점이 맞추어져 있었고 할 수 있다. 앞으로는 ESG의 관점에서 안전성을 높이고, 탄소배출을 저감하며, 효율적이고 저비용인 제로에너지 건축물을 구현하는 수단으로서의 모듈러 공법에 대한 관심이 필요할 것으로 생각된다.

#### 참고문헌

1. 이홍일, 건설산업의 성공적 탄소중립 추진전략, 한국건설산업연구원, 2022.10
2. DfMA Overlay to the RIBA Plan of Work, RIBA, 2nd Edition, 2021
3. 김형근, 제로에너지건축물 인증등급별 설계수준 및 공사비 분석, SH도시연구원, 2018.11
4. Decarbonization During Predevelopment of Modular Building Solutions, NREL, 2021
5. The Energy in Modular Building Method (EMOD) : A Guide to Energy-Efficient Design for Industrialized Construction of Modular Buildings, NREL, 2022
6. Building Affordability by Building Affordably : Exploring the Benefits, Barriers, and Breakthroughs Needed to Scale Off-Site Multifamily Construction, Turner center for housing innovation, 2017