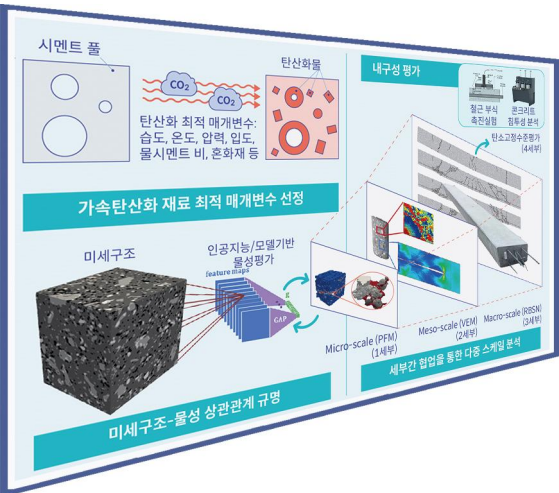


탄소고정 건설재료 및 구조시스템 연구실 소개

Construction Material and Structural System Laboratory for Carbon Sequestration



1. 연구배경

전 세계적으로 급증하는 기후변화 문제를 해결하기 위해 효과적인 탄소중립 실현 방안을 위한 기술 개발에 관한 관심이 높아가는 추세이며, 건설산업 분야에서도 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(Kurda et al., 2019; Chinzorigt et al., 2020; Li et al., 2021). 특히, 콘크리트는 가장 대표적인 건설재료로서 가속탄산화를 활용한 탄소고정에 관한 기술이 제안되고 있다. 그러나 현재 기술로는 생애주기비용을 고려한 긍정적인 순효과(net effect)를 달성하지 못하고 있어 비용절감 및 효과 향상을 위한 지속적인 연구가 요구되는 상황이다(Ravikumar et al., 2021). 본 연구실은 2022년부터 한국연구재단의 지원(NRF-2022R1A4A1-033925)을 받아 콘크리트에 효율적으로 탄소고정을 하는 기술과 탄소 고정량을 신속하게 평가하는 기술을 개발하여 탄소고정 건설재료 및 구조시스템 개발의 가속화 및 실용화를 실현하고자 연구를 진행 중이다.

2. 연구목표

본 연구실의 연구목표는 가속탄산화를 활용하여 탄소고정과 내구성 향상을 위한 콘크리트 제작기술을 개발하고, 이에 따른 콘크리트 부재의 탄소고정 수준을 정량적으로 평가할 수 있는 비파괴 평가기술 개발이다. 효율적인 탄소고정을 위해 콘크리트의 재료 준비 단계에서는 골재 및 혼화제를 가속탄산화하는 방법을 제안하고, 양생 과정에서는 현장적용성이 고려된 탄산화 양생 방법을 제안할 계획이다. 또한, 탄소고정 콘크리트의 정확한 성능 평가를 위해 실험-해석 연계를 통한 분석을 수행하고 이를 기반으로 탄소고정 콘크리트의 프리캐스트 부재를 제작하고자 한다. 이 과정에서 가속탄산화에 의한 탄소고정 콘크리트의 탄산화도를 평가할 수 있는 비파괴 기술을 개발하여 새로운 콘크리트의 탄산화도 평가기법을 제안하고 상호연계를 통해 탄소고정 콘크리트 제작기술의 검증을 진행한다. 이와 같은 연구목표의 성공적인 달성을 위해 4개의 세부과제를 구성하여 건설 재료, 구조(해석/설계/생산)공학 및 품질의 전문가들이 효율적이고 체계적으로 연구를 수행할 수 있도록 하였다. 연세대학교 건설환경공학과(한동석 교수, 임윤목 교수, 박경수 교수) 및 유니스트 도시환경공학과(김건 교수) 산하 4개의 연구실이 세부과제를 하나씩 담당하여 유기적인 협력을 통해 상호보완적 연구를



한 동 석

연세대학교 건설환경공학과 교수



김 세 윤

연세대학교 건설환경공학과 박사후과정

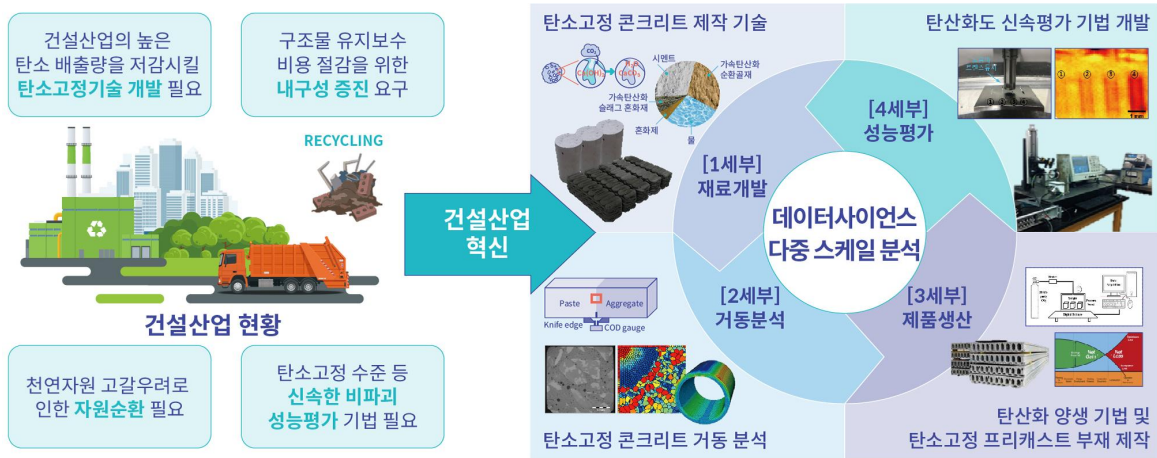


그림 1 기후변화 대응 및 건설산업 혁신을 위한 탄소고정 콘크리트 제작기술 개발 연구

수행하고 있다. 각 세부과제의 목표를 아래에 나타내었다 (그림 1).

- 세부과제 1: 가속탄산화 순환골재 및 슬래그를 활용한 탄소고정 콘크리트 제작기술 개발 (한동석 교수)
- 세부과제 2: 탄소고정 콘크리트 거동의 실험 및 해석적 분석 (박경수 교수)
- 세부과제 3: 탄산화 양생기법을 활용한 탄소고정 프리

캐스트 부재 개발 (임윤목 교수)

- 세부과제 4: 탄소고정 콘크리트 성능 및 수준 정량화를 위한 비파괴 평가기술 개발 (김건 교수)

3. 연구내용

본 연구실에서는 실험과 해석을 융합하여 시멘트풀 및

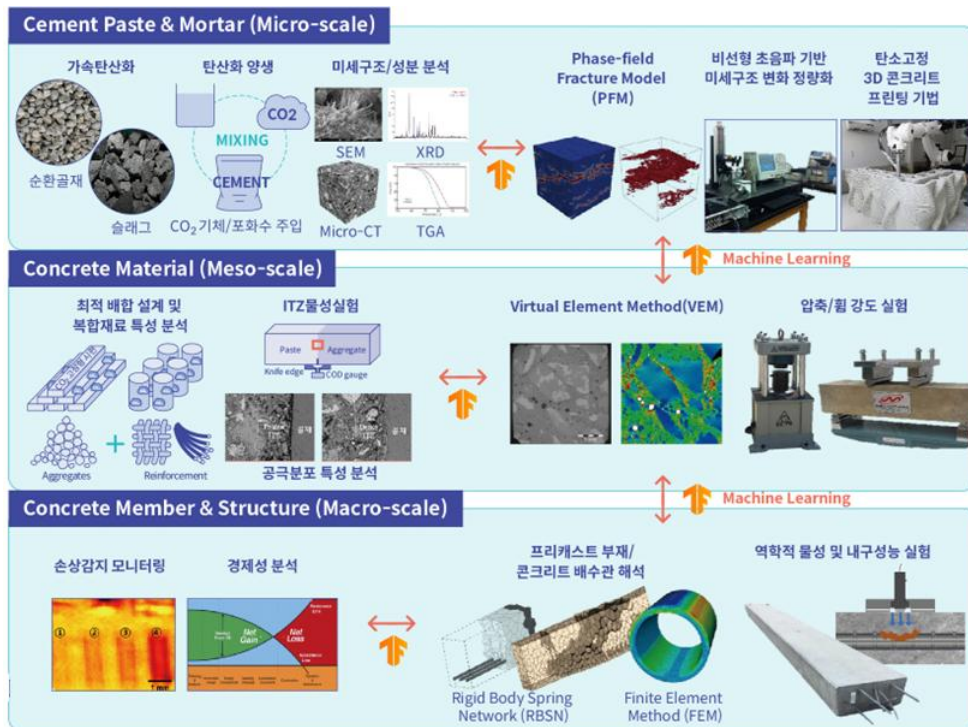


그림 2 데이터 사이언스 기반 다중 스케일 분석 연구

모르타르(micro-scale), 콘크리트 재료(meso-scale), 콘크리트 부재 및 구조(macro-scale)를 아우르는 형태의 데이터사이언스 기반의 다중 스케일(multi-scale) 분석 기법을 활용하여 연구를 수행한다. 이와 같은 방법을 통해 탄소고정에 의한 영향을 다양한 스케일에서 종합적으로 분석하여 가속탄산화 재료개발 단계부터 제품생산 방안까지 폭 넓은 영역에 걸쳐 국내 건설산업 혁신에 기여하고자 한다. 각 세부과제의 연구내용은 그림 2와 같다.

3.1 가속탄산화 순환골재 및 슬래그를 활용한 탄소고정 콘크리트 제작기술 개발

세부과제 1(책임: 연세대학교 한동석 교수)에서는 가속탄산화를 통한 콘크리트 재료의 성능향상에 중점을 두고 연구가 수행중이다. 골재는 페콘크리트를 파쇄한 순환골재를 사용하며, 혼화재는 슬래그를 대상으로 가속탄산화를 통한 효과적인 탄소고정 방법을 연구하고 있다. 가속탄산화의 조건을 다양하게 변화시켜가며 재료에 탄소고정을 시키고 이 과정에서 최적 탄산화 조건을 확립하고자 한다. 탄산화에 의한 재료 성분의 변화를 정확하게 확인하기 위해 TGA, XRD 등의 방법을 사용하며, 탄산화된 재료에 의한 콘크리트 내부 미세구조 변화를 분석하기 위해 SEM과 micro-CT를 활용한 데이터 사이언스 기반 상장균열모델(Miche et al., 2015) 재료해석을 수행한다(Han et al., 2023). 추가적으로, 가속탄산화된 순환골재를 3D 콘크리트 프린팅에 적용하여 탄소고정 콘크리트의 확장 가능성을 확인하고, 침투성 분석 및 철근 부식 촉진실험을 통해 내구성을 검증할 계획이다.

3.2 탄소고정 콘크리트 거동의 실험 및 해석적 분석

세부과제 2(책임: 연세대학교 박경수 교수)는 순환골재 및 혼화재의 사용에 따른 콘크리트의 부재 성능을 실험-해석 연계를 통해 분석한다. 가속탄산화된 순환골재의 혼입량에 따른 콘크리트의 물성뿐만 아니라 골재와 시멘트 풀사이의 경계영역(interfacial transition zone)의 역학적 물성을 정량적으로 도출하기 위해 파괴실험이 수행되었다. 이를 기반으로 콘크리트의 거동과 경계영역의 역학적 물성 간 상관관계를 확인하고 가상요소기법(virtual element method)을 활용한 수치해석을 통해 상호 검증된다(Brezzi

et al., 2013). 또한, 반복하중에 의한 탄소고정 콘크리트의 성능을 확인하기 위해 cohesive-zone 기반 피로 균열 수치해석이 수행되며, 콘크리트의 재료(meso-scale) 해석 과정에서 복잡한 내부구조를 나타내기 위해 다각형 요소기반 가상요소 기법을 적용할 예정이다. 최종적으로는 탄소고정 콘크리트의 부재 성능 평가를 위해 배수관을 대상으로 실험-해석 간 비교·검증을 수행하고자 한다.

3.3 탄산화 양생기법을 활용한 탄소고정 프리캐스트 부재 개발

세부과제 3(책임: 연세대학교 임윤목 교수)은 효과적인 탄산화 양생을 통한 탄소고정 콘크리트 프리캐스트 부재를 개발을 목표로 한다. 시멘트 수화반응 과정에 이산화탄소를 주입하는 적극적 탄산화(active carbonation)를 활용하기 위한 기술을 제안하고자 하며, 이를 위해 초임계이산화탄소(supercritical carbon dioxide) 혹은 이산화탄소 포화수를 활용하여 콘크리트 믹싱 및 양생 과정에 활용할 계획이다. 이 과정에서 탄산화 과정에 영향을 미치는 다양한 요인들을 분석하여 현장에 적용하기 가장 적합한 가속탄산화 기법을 제시한다. 제시한 탄산화 기법의 효과를 확인하기 위해 타 세부과제에서 개발된 가속탄산화 골재를 활용하여 탄소고정 극대화 프리캐스트 부재를 제작하고 실험을 통해 성능 검증을 하고자 한다. 프리캐스트 부재의 실험은 불규칙격자모델(rigid body spring network)을 사용하여 해석을 통해 비교·분석을 진행하고 있다.

3.4 탄소고정 콘크리트 성능 및 수준 정량화를 위한 비파괴 평가기술 개발

세부과제 4(책임: 유니스트 김건 교수)에서는 콘크리트 구조의 탄산화량을 정량적으로 평가할 수 있는 비파괴 검사 방법을 제안한다. 비선형 초음파 및 비선형 충격 공진 기법을 활용하여 탄소고정 콘크리트의 탄산화를 평가할 뿐 아니라 초기 양생, 수화반응 및 강도 발현 등의 과정을 정량화하는 기법을 개발 중이다. 비파괴 검사 방법은 데이터 사이언스 기반 분석을 사용하여 다중 스케일에서 손상상태 예측 모델을 구축하고, 비접촉식 표면파 및 확산 초음파 기술을 활용하여 철근 부식에 따른 내구성 평가에 대해 연구 중이다. 또한, 탄소고정 콘크리트의 정밀 품질제어를 위해

3D 초음파 스캐닝 시스템(C-scan ultrasonic imaging)을 적용하여 in-situ 분석을 수행할 계획이다.

4. 활용방안 및 기대효과

탄소고정 콘크리트는 탄소중립을 위해 이산화탄소 배출량을 줄일 수 있는 주요한 기술이다. 본 연구실에서는 순환 골재를 가속탄산화하여 국내 천연골재의 자원고갈 문제를 해결하고, 산업폐기물의 재활용을 통해 자원순환을 이룰 수 있도록 연구 방향을 설정하였다. 탄소고정 콘크리트를 다양한 스케일에서 분석하여 탄소고정 건설재료에 대한 심도 있는 분석을 수행하며, 이를 기반으로 다양한 실용 기술 및 후속 연구를 파생시킬 수 있는 영향력 발현이 기대된다. 또한, 탄소고정 콘크리트의 제작 기술뿐만 아니라 탄산화량 평가를 위한 비파괴 평가 기술을 제안함으로써 구조물에 대한 탄산고정량의 새로운 평가 방법 및 기준을 제시할 예정이다.

참고문헌

- Brezzi, F., Cangiani, A., Manzini, G., Marini, L., & Russo, A. (2013). "Basic principles of virtual element methods", *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, Vol. 23, 199-214.
- Chinzorigt, G., Lim, M., Yu, M., Lee, H., Enkbold, O., & Choi, D. (2020), "Strength, shrinkage and creep and durability aspects of concrete including CO₂ treated recycled fine aggregate", *Cement and Concrete Research*, Vol. 136, 106062.
- Han, T. Eum, D., Kim, S., Kim, J., Lim, J. H., Park, K., & Stephan, D. (2023). "Multi-scale analysis framework for predicting tensile strength of cement paste by combining experiments and simulations", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 139, 105006.
- Kurda, R., de Brito, J., & Silvestre, J. D. (2019), "Carbonation of concrete made with high amount of fly ash and recycled concrete aggregates for utilization of CO₂", *Journal of CO₂ Utilization*, Vol. 29, 12-19.
- Li, S., Liu, G., & Yu, Q. (2021), "The role of carbonated steel slag on mechanical performance of ultra-high performance concrete containing coarse aggregates", *Construction and Building Materials*, Vol. 307, 124903.
- Miehe, C., Schaezel, L., & Ulmer, H. (2015). "Phase field modeling of fracture in multi-physics problems. Part I. Balance of crack surface and failure criteria for brittle crack propagation in thermo-elastic solids", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.294, 449-485.
- Ravikumar, D., Zhang, D., Keoleian, G., Miller, S., Sick, V., & Li, V. (2021), "Carbon dioxide utilization in concrete curing or mixing might not produce a net climate benefit", *Nature Communications*, Vol. 12, 1-13. 