

구조설계기준 관점에서의 OSC

OSC in Terms of Structural Design Standards

문정호 Moon, Jeong-Ho
 정회원, 한남대 토목건축공학부 교수
 Professor, Hannam University
 mnjh@hnu.kr

이범식 Lee, Bum-Sik
 정회원, LH토지주택연구원 공공주택연구실 연구위원
 Senior Research Fellow, LH Land and Housing Institute
 bslee417@lh.or.kr

주거용 건축물에서 콘크리트를 주재료로 사용하는 현장시공 공법(on-site construction)은 점점 더 극복하기 어려운 한계를 경험하고 있기 때문에 대안으로서 OSC 공법(off-site-construction)에 대한 관심은 크게 증가하고 있다. OSC가 개념적으로는 선제작 후조립을 사용하는 공법들을 포괄적으로 포함하지만 구조적 관점에서는 PC(precast concrete) 구조에 적용되는 역학적 특성을 기반으로 한다. PC 공법은 부재와 부재가 접합부를 통하여 연결되는 방식이기 때문에 부재 자체만 본다면 CIP(현장타설) 공법과 거의 차이가 없고 오히려 부재의 품질이 더 좋아지는 장점이 있다. 그러나 접합부를 통하여 연결되는 특성으로 인하여 접합부의 구조적 성능은 매우 중요해진다.

OSC에서 부재는 전체 공정에 대한 검토 및 설계를 통해서 사전 제작되어야 하므로, DfMA(Design for Manufacture and Assembly)의 개념에서 보았을 때도 설계(구조설계 포함)는 전체 공정에 영향을 미칠 수 있다. PC 구조에서 부재 형상, 접합방식, 조립방법 등은 매우 다양해질 수 있기 때문에 제품 생산방식부터 조립 및 유지관리 등 전체 프로세스에 설계가 큰 영향을 미칠 수 있다는 것이다. 더구나 접합방식은 구조체의 안전성과 사용성 등에 지대한 영향을 미치게 되므로 PC 구조의 특성과 한계 속에서 가이드해줄 수 있어야 한다는 점에서 설계기준은 중요한 역할을 하게 된다.

“이러한 구조형식이 가능한가?”, “경제성 있는 대안은?”, 혹은 “법규에 저촉되지 않는가?” 등에 답해줄 수 있는 기준이나 가이드라인이 없다면 이는 기술 발전을 저해시키는 요인이 될 수 있다. 더구나 새로운 디자인, 공법 등을 시도하고자 한다면 설계기준 관점에서의 사전검토는 필수적 요소가 될 수 있다. 설계기준은 설계를 위한 규정의 의미도 있지만 사전 시뮬레이션이나 경제성 평가 등과

같은 분석을 위한 가이드라인 역할을 할 수 있기 때문이다. 이러한 설계기준의 필요성 및 역할의 관점에서 볼 때 현행 설계기준은 많은 면에서 부족하다. 우리나라의 경우를 예로 든다면 현재 PC 구조설계를 위한 별도의 설계기준이 마련되어 있지는 않고, CIP 설계기준 내에서 개괄적으로 다루지고 있는 정도이다. 그러나 설계기준이 CIP를 기반으로 하고 있기 때문에 PC 구조만의 독특한 특성을 반영하지는 못하고 오히려 기술발전을 저해하는 역효과를 내기도 한다.

역사적 배경

우리나라의 설계기준은 국가건설기준센터(Korea Construction Standards Center)에서 통합관리하고 있으며, 구조설계기준은 KDS(Korean Design Standard)라는 명칭으로 분류되는 설계기준코드에 포함된다. 이 때 구조설계기준에서의 세부기준(예를 들면 내진설계기준)들은 대부분 도입부(1.2절)에서 해당 기준의 적용 범위를 명시하고 있다. PC 구조 역시 동일한 방식을 사용하고 있는데 건축구조물(KDS 14 20 62 프리캐스트 콘크리트구조 설계기준)의 경우 1.2절에서 “프리캐스트 콘크리트 건물의 설계는 프리캐스트 콘크리트 조립식 건축구조 설계기준에 따를 수 있다”라는 조항 외에는 다른 내용이 없다. 표현도 적용 범위라고 보기에는 다소 거리감이 있으며, 여기서 “따를 수 있다”라고 인용하고 있는 설계기준은 1992년에 제정되고, 그 이후 개정이나 보완이 전혀 이뤄지지 않은 기준이다.

1990년대 공동주택의 활황기에 제정된 기준(주로 벽식구조)이지만 PC 공동주택에 대한 열기가 식은 후 우리나라 건설 시장에서 PC 공동주택은 전무한 시기를 맞게 되

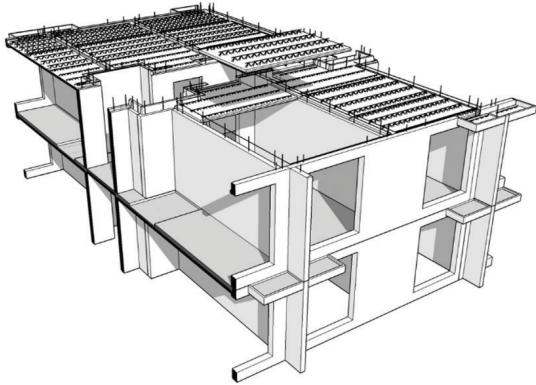


그림 1. 벽식구조의 개념도 (자료 출처: LH PC구조 공동주택 구조설계 및 시공 지침)

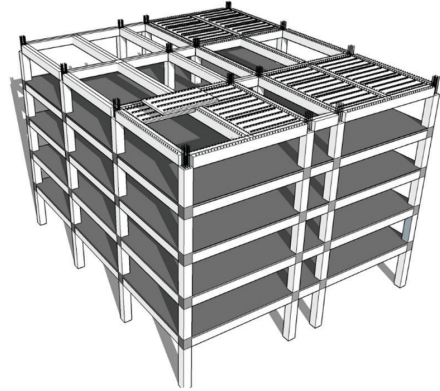


그림 2. 골조식 구조의 개념도 (자료 출처: LH PC구조 공동주택 구조설계 및 시공 지침)

었다. 당연한 귀결로 PC 구조에 대한 연구 및 기준 제정 등도 함께 침체되고 말았다. 2010년도 무렵부터 공동주택의 지하주차장, 지식산업센터, 반도체 공장 등에 PC 구조(주로 골조식 구조)가 부분적으로 도입되면서 근근히 명맥을 이어왔다. 최근 들어서 물류창고의 폭발적 증가로 인하여 PC 구조가 큰 인기를 끌고 있지만, 그 외의 구조물에 대해서는 크게 달라진 것이 없는 실정이다.

공동주택에 대한 CIP 공법은 크게 발전하여 시공성, 경제성 등의 측면에서 상당한 기술발전이 이뤄졌다. 따라서 PC 구조가 뒤늦게 공동주택에 진출하려다 보니 CIP 공법에 비하여 장점을 찾기 어려운 현실에 직면해 있기도 하다. 1990년대 이후 달라진 소비자들의 눈높이나 안전성 측면에서의 설계기술들을 따라잡으면서 시공성과 경제성이라는 여러 토끼를 한꺼번에 잡아야 하는 어려움에 직면하게 된다. 그럼에도 미래적 관점에서 보면 PC 구조를 더 이상 외면하기 어려운 것도 현실이다.

늦은감이 있지만 한국토지주택공사(LH)에서는 2018~2019의 기간 동안 연구를 통하여 자체 PC 구조설계지침을 제정하였고, 이를 기반으로 2개의 실제 프로젝트를 설계하기도 하였다. 벽식구조의 프로젝트는 김포한강 지구

(20.12 준공), 골조식 프로젝트는 아산탕정 지구(22.07 PC 골조 완료)에 시범적으로 적용되었다.

설계 철학

현행 기준에서 추구하는 PC 구조에서의 설계철학은 “일체성”과 “동등성”의 두 단어로 표현해 볼 수 있다. 일체성이란 단위 부재 혹은 부재의 일부들을 조립/완성했을 때 단일 구조체처럼 거동할 수 있어야 함을 의미한다. 즉 일체성은 연결부에서 불연속성이 발생하지 않아야 함을 의미한다. 예를 들어 여러 조각을 연결하여 하나의 바닥판 혹은 벽판을 구성하는 경우 하나의 부재(다이아프램이나 코아벽체)처럼 거동할 수 있어야 하며, 범위를 확대하여 1층 혹은 여러 층 사이에서도 연속성이 유지되어야 한다.

반면에 동등성은 개념적으로 일체성과 유사해 보이지만 성능의 관점에서 CIP 공법의 구조체와 동등해야 함을 의미한다. 따라서 PC 구조라 할지라도 CIP 대비 동등



그림 3. 김포한강 프로젝트 (벽식 구조)



그림 4. 아산탕정 프로젝트 (골조식 구조)

이상의 구조 성능을 가져야 한다는 의미로 해석된다.

일체성 확보를 위한 설계기준

PC 구조에서 일체성 달성을 위해서 <KDS 14 20 62 프리캐스트 콘크리트구조 설계기준>에서 다루고 있으나, 주요 내용은 프리캐스트 콘크리트 벽판을 사용한 구조물에 대한 내용이다.

일체성 확보 요건(4.2.1절)으로 “일체성 확보를 위한 접합부는 콘크리트의 파괴에 앞서 강재의 항복이 먼저 이루어지도록 설계하여야 한다” 라고 규정하고 있으며, 접합부의 설계(4.2.3)로는 “접합부는 구조 일체성이 확보되도록 설계하여야 한다” 라고 규정하고 있다. 따라서 이 기준에 따르면 일체성이 확보되지 않은 접합부는 사용할 수 없으며, 그러한 접합부에서의 연결재는 강재를 사용하며 항복이 선행되어야 한다.

내진설계를 위해서는 <KDS 14 20 80 콘크리트 내진 설계기준>을 따라야 하며, “프리캐스트 및 ... 구조물은 일체식 구조물에서 요구되는 안전성 및 사용성에 관한 조건을 갖추고 있는 경우에 한하여 내진구조로 다룰 수 있다”로 규정하고 있다. 아울러 일체식과 다른 경우의 사용을 위해서는 “일체식 구조물과 다른 조립식 구조물의 경우 이 기준의 규정을 적용하여야 할 때는 적절한 물리적 증거와 해석에 따라 수정되어야 하며, 구조물에 따른 특별 내진설계는 해당 기준을 만족하여야 한다”와 같이 규정하여 사용 가능성을 열어 놓은 상태이다. 따라서 현재까지의 설계기준의 관점으로 본다면 접합부에서의 일체성은 필수이며 항복이 가능한 연결재를 사용하여야 한다고 요약해 볼 수 있다. 그러나 일체성에 대한 구체적 방법이나 이를 평가할 수 있는 공학적 방법 등은 아직 상당히 미흡하다고 할 수 있다.

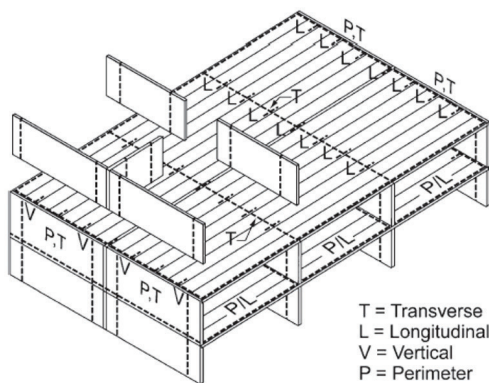


그림 5. 일체성 확보를 위한 배근 (자료 출처: ACI 318-19)

동등성 확보를 위한 설계기준

우리나라 기준에서는 동등성에 대한 명시적 표현은 나타나 있지 않지만 우리와 설계철학을 공유하는 미국 기준(ACI 318-19)의 경우 “이 기준은 일체식 구조물처럼 거동(to behave like monolithic building structures) 하도록 설계되는 구조물에 대한 ...”으로 규정하고 있다. 여기서 동등성이란 모든 면에서 CIP 구조와 동등해야 한다는 의미보다는 동등성을 추구해야 한다는 의미로 해석해야 할 것이다. PCI 문헌에서는 ‘CIP에 대한 모방’의 의미로 “emulation”이라는 표현을 사용하고 있기도 하다.

PC 구조에서 연결부(혹은 접합부)의 거동을 단순히 일체성 만으로는 정의하기는 어렵기 때문에 일체성이 확보되더라도 요구성능이나 등급이 다를 수 있다. 더구나 CIP 구조에 대한 설계기준에서도 구조시스템 별로 요구성능이 다르다. 내진성능에 관한 것이기는 하지만 표1에서 볼 수 있는 것처럼 구조시스템은 특수, 중간, 보통으로 구분하여 각각 다르게 설계하도록 하고 있다. 특수는 경우 강진지역, 중간은 중진지역, 보통은 약진지역 등과 같은 다른 등급의 성능을 요구한다. PC 구조 역시 유사한 개념으로 동등성을 달성하게 하고 있다. 미국 기준을 예로 동등성을 좀 더 설명해 본다면 PC 중간 전단벽이 CIP(RC) 보통 전단벽을 동등하게 본 것으로 여겨진다. RC 보통 전단벽의 반응수정계수 R이 4.0이지만 PC 중간 전단벽에서의 R이 4.0이며 PC 보통 전단벽은 3.0이다. 이는 PC 구조에 대해서는 보다 엄격한 동등성을 요구하고 있다고 볼 수 있다.

미국 기준(ACI)과는 다르게 우리나라 기준에서는 PC 구조에서 갖추어야 할 동등성이 별도로 명시되어 있지 않을 뿐더러 구조시스템에 대한 정의 역시 존재하지 않는다. 그렇다고 미국 기준을 있는 그대로 받아들이기도 어렵다. 예를 들어 내진설계범주 D에서 RC 보통 전단벽의 높이 제한은 60m인 반면에 이와 동등한 것으로 보여지는 PC 중간 전단벽의 경우 12m로 매우 제한적이다.

성능기준의 필요성

PC 구조에서 부재의 형상 혹은 접합부 디테일 등은 매우 다양해질 수 있다. 또한 공장에서 제품을 생산하기 때문에 효율성의 면에서 많은 변수가 존재할 수 있다. 설계기준이

지진력 저항 시스템	구조	내진성능	KDS				ASCE 7-16 (ACI)					PC 기준 -1992 R	
			계수			높이 제한(m)		계수			높이 제한(m)		
			R	Ω_o	C_d	C	D	R	Ω_o	C_d	C		DEF
내력벽 Bearing Wall	CIP	특수 전단벽	5	2.5	5			5	2.5	5		48~30	3.0
		중간 전단벽											
		보통 전단벽	4	2.5	4		60	4	2.5	4		X	
	PC	특수 전단벽	CIP 특수와 동일					CIP 특수와 동일					
		중간 전단벽						4	2.5	4		12	
		보통 전단벽						3	2.5	3	X	X	
건물 골조 Building Frame	CIP	특수 전단벽	6	2.5	5			6	2.5	5		48~30	4.0
		중간 전단벽											
		보통 전단벽	5	2.5	4.5		60	5	2.5	4.5		X	
	PC	특수 전단벽	CIP 특수와 동일					CIP 특수와 동일					
		중간 전단벽						5	2.5	4.5		12	
		보통 전단벽						4	2.5	4	X	X	
모멘트저항 골조 Moment-resisting Frame	CIP	특수 모멘트	8	3	5.5			8	3	5.5			4.5
		중간 모멘트	5	3	4.5			5	3	4.5		X	
		보통 모멘트	3	3	2.5		X	3	3	2.5	X	X	

표 1. 구조시스템별 내진설계 계수

이들 모두를 포함할 수 없는 어려움이 발생한다. 그 결과 내진설계 기준 (KDS 14 20 80 콘크리트 내진 설계기준)에서는 “이 기준에서 요구하는 사항을 만족하지 못하는 철근 콘크리트 구조 형식의 경우, 실험이나 해석에 의해 이 기준에서 요구하는 사항을 만족하거나 그 이상의 구조성능을 갖는 것이 증명된다면 이를 사용할 수 있다”로 규정하고 있다. 그러나 성능을 평가하는 방법이나 기준이 별도로 제시되어 있지는 않다. 성능 평가를 위한 가장 전형적인 방법으로 구조실험을 들 수 있겠지만 구조실험을 진행하는 방법에 대한 구체적 기준은 없다. 예를 들면 실험체 개수는 몇 개 이상, 실험체 스케일은 1/3 이상, 가력은 동일 사이클에서 3회 이상 등과 같은 구체적 방법이 필요하다.

우리나라 기준에서는 별도로 언급하거나 인용하는 문헌이 없지만 미국 기준에서는 기준의 내용에서 이러한 참고문헌 혹은 위원회 보고서 등을 인용하고 있다. ASCE 41은 기존 건물에 대한 성능을 IO(즉시 사용), LS(인명안전), CP(붕괴방지) 등으로 구분하고 대상 구조물이 보여

야 하는 목표 성능을 표로 제시하고 있다. ACI 374.2R과 ACI 374.3R은 각각 실험과 해석을 통하여 특수 구조물의 성능을 평가하는 방법을 제시하고 있다. 이와 함께 강진 지역에서의 모멘트저항 골조를 대상으로 실험을 통한 성능 검증을 위한 ACI 374.1, 비부착 긴장재를 이용하는 PC 벽체의 성능 실험을 위한 ACI ITG-5 등이 있다. 따라서 성능에 대한 요구조건은 부족하나마 어느 정도 존재하지만 평가를 위한 실험방법 및 분석방법은 특수 모멘트골조와 비부착 긴장재를 이용한 특수 전단벽으로 한정되어 있는 실정이다. 그러나 중간 골조 혹은 중간 전단벽 등 오히려 일반적으로 더 많이 사용될 수 있는 구조에 대한 기준은 아직 없다.

연구과제의 진행

OSC 연구과제(20.04~23.12)의 1세부에서는 콘크리트 학회의 이름으로 연구단에 참여하여 설계기준(안)을 제시하는 연구를 진행 중에 있다. 5개 대학과 3개의 실무 설계사 등으로 구성된 연구팀은 편의상 2개 팀(골조구조, 벽식구조)으로 구분하여 실험 및 해석 연구를 수행 중에 있다. 총 4년에 걸친 연구기간 중 현재 3차년 연구가 진행 중이다.

연구 1차년에는 기존문헌 조사를 시작으로 2~3차년 실험 및 해석 연구를 위한 준비단계를 거쳤으며, 2021년도인 2차년 연구에서 1단계의 실험 및 해석 연구가 수행되었다. 1단계 실험에서는 현재 보편적으로 사용되는 구조시스템

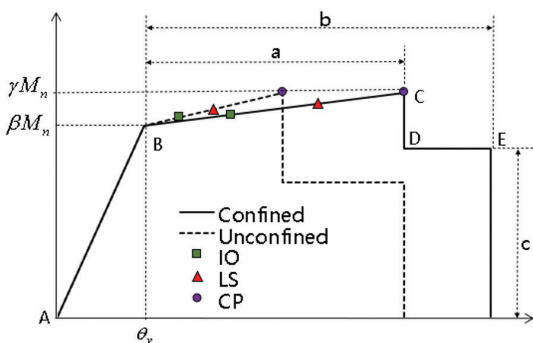


그림 6. 성능기반설계에서의 성능기준

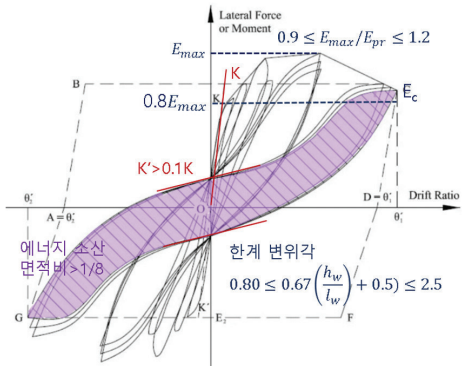


그림 7. 특수구조벽체 실험체의 요구성능

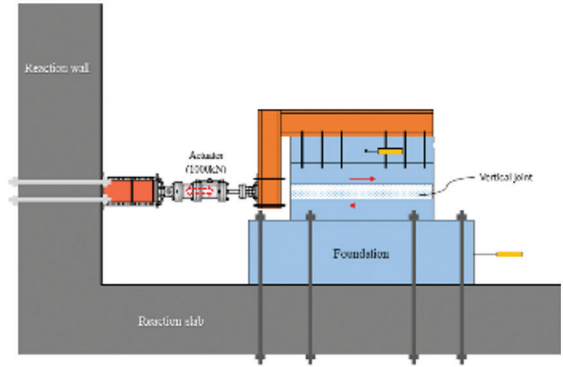


그림 8. 벽식구조 접합부에 대한 실험연구



그림 9. 골조식 구조 접합부에 대한 실험연구

을 선택하여 성능 평가를 하였다. 이는 종합적 관점으로 PC 구조를 평가하기 위한 실험 연구에 해당한다.

2022년의 2단계 실험연구는 RC 구조와의 동등성 평

가와 함께 성능평가를 위한 실험이 계획되고 있다. 아울러 이들 실험체에 대한 비선형 해석을 수행하여 실험과 해석적 연구를 병행하고자 하였다. 또한 기존 문헌의 데이터들을 수집하여 통계 분석도 진행중에 있다. 통계분석의 결과는 실험결과와의 비교를 통해서 PC 구조시스템의 성능에 대한 평가 방법을 제시하는 것을 목적으로 하고 있다.

기준(안)의 내용

구조설계기준(안)을 위한 연구에서 지향하는 주요 과제로 첫째는 PC 구조를 대상으로 보통, 중간, 특수 등과 같은 지진력 저항시스템의 구분을 위한 정의와 분류 방안을 제시하고자 한다. 이 때 그러한 구조시스템이 갖추어야 할 구조성능 역시 제시되어야 할 것이다. 설계기준은 보편적 구조물을 대상으로 해야 하는 반면에 PC 구조는 독창성과 효율성을 달성하기 위하여 다양한 가능성을 가질 수 있다. 따라서 이러한 가능성을 수용할 수 있도록 하기 위해서는 성능평가 지표와 이를 검증할 수 있는 실험이나 해석적 방법에 대한 가이드라인을 제시할 필요도 있다. 이와 함께 PC 구조의 PC 접합부 연결재 요구 성능 및

평가법 역시 기준(안)을 통해서 정리될 필요가 있다. 이성과 같은 “안”이 만들어진다면 이 “안”을 기반으로 정식의 설계기준을 위한 논의의 마당이 마련되고 궁극적으로는 PC 만의 독자적 기준이 마련될 수 있을 것이다. 도입부에서 언급된 것처럼 이러한 기준이 갖춰진다면 PC 기술발전 및 PC 나아가서는 OSC의 활성화에 큰 역할을 해줄 수 있을 것으로 기대해 본다.☐

참고문헌

1. 프리캐스트 콘크리트 조립식건축 구조설계기준 및 해설, 건설부, 1992.
2. KDS 14 20 62 “프리캐스트 콘크리트구조 설계기준”, 국가건설기준센터.
3. KDS 14 20 80 “콘크리트 내진설계기준”, 국가건설기준센터.
4. 한국토지주택공사, “LH PC구조 공동주택 구조설계 및 시공 지침”, 한국콘크리트학회, 2019.
5. ACI Committee 318, “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-19)”, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019.
6. ASCE/SEI 7-16, “Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures”, American Society of Civil Engineering, 2016.
7. ASCE/SEI 41-13, “Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings”, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2014.
8. ACI Committee 374.1, “Acceptance criteria for moment frames based on structural testing and commentary”, ACI 374.1_05, American Concrete Institute, 2005.
9. ACI Committee 374.2, “Guide for Testing Reinforced Concrete Structural Elements under Slowly Applied Simulated Seismic Loads”, ACI 374.2R-13, American Concrete Institute, 2013.
10. ACI Committee 374.3, “Guide to Nonlinear Modeling Parameters for Earthquake-Resistant Structures”, ACI 374.3R-16 American Concrete Institute, 2016.

필자 소개

문정호 교수는 한양대학교, 미시간주립대(앤아버), 텍사스주립대(오스틴)에서 학위(학사, 석사, 박사)를 취득하였으며, 현재 한남대학교 건축공학 교수로 재직중이며 마이디스아이티, 삼연PCE, (주)지산 등에서 기술자문 역할을 수행하고, PC 관련 다양한 주제에 대한 연구를 수행하였다.

이범식 연구위원은 병렬전단벽의 비탄성거동에 관한 연구로 성균관대학교에서 박사학위를 취득하였으며 92년 LH 토지주택연구원이사 이후 공동주택구조시스템 개발, 공동주택 생산성, 품질향상을 위한 공법개발 관련 연구를 수행하고 있다.