

19TBIP
-C12504
7-03

100년
이상
지속가능
한 건축
구조물을
위한
프리
캐스트
압착구조
시스템
개발

최
종
보
고
서

2020

국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원

보안 과제(), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개()발간등록번호()

국토교통기술사업화지원 사업 제3차 연도 최종보고서

R&D /

19TBIP-C125047-03

‘100년 이상 지속가능한 건축구조물을 위한 프리캐스트 압착구조 시스템 개발’

최종보고서

2020. 02. 27.

주관연구기관 / (주)동양구조안전기술
공동연구기관 / 동서피씨씨(주)
공동연구기관 / 서울시립대학교

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관 귀하

‘100년 이상 지속가능한 건축구조물을 위한 프리캐스트 압착구조 시스템 개발’(연구개발 기간 : 2017. 04. ~ 2019. 12.) 과제의 최종보고서(보완본) 1부를 제출합니다.

2020. 02. 27.

주관연구기관명 : (주)동양구조안전기술 (대표자) 정 광 량 (인)

공동연구기관명 : 동서피씨씨(주) (대표자) 정 장 원 (인)

공동연구기관명 : 서울시립대학교 산학협력단 (대표자) 김 강 수 (인)

주관연구기관책임자: 정 광 량

공동연구기관책임자: 정 장 원

공동연구기관책임자: 김 강 수

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	19TBIP -C125047-03	해당 단계 연구 기간	2019. 01. 01. ~ 2019. 12. 31.	단계구분	3단계 / 3단계
연구사업명	중사업명	국토교통기술사업화 지원사업			
	세부사업명	중소기업 보유기술 및 아이디어 사업화분야			
연구과제명	대과제명	100년 이상 지속가능한 건축구조물을 위한 프리캐스트 압착구조 시스템 개발			
	세부과제명				
연구책임자	정광량	3차년도 참여연구원 수	총: 34 명 내부: 34 명	해당단계 연구비	정부: 654,000 천원 민간: 436,000 천원 계: 1,090,000 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 57 명 내부: 57 명	총 연구비	정부: 1,698,000 천원 민간: 1,132,000 천원 계: 2,830,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	(주)동양구조안전기술			참여기업명 ① 동서피씨씨(주) ② 서울시립대학교 산합협력단	
※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음					
연구개발성과의 보안등급 및 사유	-				

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허 (등록/ 출원)	보고서 원문	연구시설 ·장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호	6건 *	3건/ 4건 **	4건 ***	-	1건 ****	-	-	-	-	-	-

* 중빙자료 [중빙 1-6] 참조
** 중빙자료 [중빙 1-1], [중빙 1-2] 참조
*** 중빙자료 [중빙 1-9], [중빙 1-12] 참조
**** SMK 참조

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 ·장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월 일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번 호
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-

요약

보고서 면수 : p.110

이 연구에서는 기존 포스트텐션 시스템과 프리캐스트(PC) 시스템의 장점을 혼합함으로써, 내진성능, 사용성능 및 시공성이 향상된 ‘하이브리드 프리스트레스트 프리캐스트 콘크리트’ 시스템을 개발하였음. 각 차년도별로 단일 부재(1차년도), 보-기둥 접합부(2차년도), 2경간 골조(3차년도) 시스템의 구조성능을 해석적·실험적 연구를 병행하여 검증하였음. 또한 실제 현장에 적용 가능한 설계, 해석 및 시공기술을 개발하였음. 특히 해당 연구는 다양한 요소기술(PC 자중 감소를 위한 중공부 설치, 장경간 구조물의 내구성 저하 및 사용성 문제 해결, 구조물 적용 실시설계 방안 등) 개발을 포함함으로써, 우수한 구조성능, 시공성, 경제적인 최적화 설계 방법 등을 확보하였음. 또한, 이러한 연구결과 및 분석을 바탕으로 현장적용 및 건설신기술인증 신청을 진행하였음. 나아가 ‘하이브리드 프리스트레스트 프리캐스트 콘크리트’ 시스템의 사업화를 통하여 기업의 매출 극대화는 물론 PC 건설기술의 선진화에 이바지 하고자 하였음.

요약문

<p>연구의 목적 및 내용</p>	<p>이 연구에서는 포스트텐션 시스템과 프리캐스트(PC) 시스템의 장점을 혼합함으로써, 내진성능, 사용성능, 내구성 및 시공성을 향상시킨 ‘하이브리드 프리스트레스트 프리캐스트 콘크리트 (Hybrid Prestressed Precast Concrete, 이하 HPPC)’ 시스템을 개발하고, 성능검증 및 사업화를 추진하고자 하였음.</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1차년도 국내외 포스트텐션-프리캐스트 부재 설계 및 시공사례를 조사하고, 1차 구조성능 평가(부재별 성능검증실험)를 진행하였음. 또한, 목업(Mock-up)용 부재 설계와 더불어, 설계 매뉴얼을 토대로 최적화된 실무용 해석기술 개발을 진행하였음. • 2차년도 경제성 및 시공성 향상 방안 연구를 통해 사업화에 큰 이점을 가지도록 하였으며, 더불어 2차 구조성능 평가(접합부 내진성능 평가)와 설계 및 시공 매뉴얼을 토대로 최적화된 실무용 설계기술 개발을 진행하였음. • 3차년도 균열제어용 접합 상세를 개발하고, 3차 구조성능 평가 (골조시스템 특성 평가 실험 및 해석)를 진행하였으며, 최종적으로 실험형 목업(Mock-up) 실험체를 시공하고 이를 토대로 현장적용 및 건설신기술인증 신청을 진행하였음. <p>이러한 단계별 연구를 통해 구조성능 및 시공성을 검증하여 차별화되고 경쟁력 있는 기술을 확보함. 또한, HPPC 시스템의 제품화 및 사업화를 통하여 수익을 창출하고 건설 시장 활성화에 기여할 수 있도록 하였음.</p>
<p>연구개발성과</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 100년 이상 지속가능한 고내구성을 갖는 건축구조시스템 개발 • 대상기술의 구조성능 검증 • 대상기술의 설계·시공 매뉴얼 구축 • 대상기술의 현장적용 • 대상공법의 신기술 인증 추진
<p>연구개발성과의 활용계획 (기대효과)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 기술적 측면 <ul style="list-style-type: none"> - 포스트텐션 시스템의 현장타설 콘크리트가 가지는 품질에 관한 약점을 프리캐스트(PC) 시스템이 보완하고, 프리캐스트 시스템의 보-기둥 접합부에 존재하는 결함을 포스트텐션 시스템으로 제거 - 개발기술을 통해 균열제어를 통한 내구성 향상, 효율적인 장경간 모듈 구현, 공사비 절감 및 공기단축 실현 • 사회·경제적 측면 <ul style="list-style-type: none"> - 일반적인 철근콘크리트(RC) 공사시 대비 동등 또는 절감 가능 - 개발기술은 건물 구조체의 내력 및 내구성을 향상시킬 수 있는 기술로 모든 용도의 구조물에 적용이 가능 - 개발기술을 주차장 건물에 적용하는 경우 직접공사비 절감뿐만 아니라 유지관리비 저감을 통해 건축물의 생애주기비용(Life Cycle Cost) 감소 • 정책적 측면 <ul style="list-style-type: none"> - 대상기술은 학급당 소요면적이 정해진 학교건축물, 용도별 하중이 정해진 물류센터 및 지하주차장 구조물 등에 확대 적용 가능함 - 자연재해 등의 비상시에 제안기술을 활용한 급속시공 모듈러 주택 제안도 가능하므로 국가정책의 주요 이슈 중의 하나인 재난대응 시스템 수립에 활용가능

국문핵심어 (5개 이내)	고내구성	프리캐스트	프리스트레스	내진성능	시공성
영문핵심어 (5개 이내)	High durability	Precast	Prestress	Seismic Performance	Construct -ability

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	7
2. 국내외 기술 개발 현황	19
3. 연구수행내용 및 성과	24
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	83
5. 연구개발성과의 활용 계획	97
6. 연구개발성과의 보안등급	103
7. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황	104
8. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	105
9. 참고 문헌	108

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 목적

국내에 적용되는 콘크리트 시스템은 크게 현장타설 철근콘크리트(reinforced concrete; 이하 RC) 시스템과 프리캐스트 콘크리트(precast concrete; 이하 PC) 시스템으로 구분할 수 있다. RC 시스템은 매우 우수한 경제성을 바탕으로 현재 국내·외 건설시장에서 가장 널리 적용되고 있으며, 이에 비하여 고품질, 고내구성 및 빠른 공사기간을 주요강점으로 하는 PC 시스템은 국내·외 시장에서 그 점유율이 점차 높아져가는 추세이다. 다만, PC 시스템의 국내 수요는 여전히 제한적인 측면이 있으며, 이처럼 PC 시스템이 활성화되지 못하는 가장 큰 이유는 국내에서는 직접비를 근거로 건축공법을 선택하고 있어서 PC 시스템이 RC 시스템에 비하여 경제성 측면에서 불리하게 평가될 수밖에 없기 때문이다. 따라서 공기단축 및 우수한 품질을 제공하는 PC 시스템의 장점이 적절히 반영될 수 있는 노력이 절실한 상황이다. 이와 더불어, 과거 부족한 기술력 및 경험 부족으로 인한 PC 시스템의 부정적인 인식과 접합부의 일체성 및 내진성능의 부족 등이 PC 시스템을 활성화하는 데에 걸림돌이 되고 있다. 이러한 PC 시스템의 문제점을 해결하는 데에 기여하고자, 이 연구에서는 기존 PC 시스템에 포스트텐션(Post-tension; 이하 PS) 공법을 적용시켜 내진성능, 사용성능 및 시공성능을 향상시킨 **‘하이브리드 프리스트레스트 프리캐스트 콘크리트 (Hybrid Prestressed Precast Concrete, 이하 HPPC)’** 시스템을 개발하고, 성능검증 및 사업화를 추진하고자 하였다. 또한, 개발하고자 하는 시스템의 지상 및 지하 주차장 구조물, 물류창고, 학교 시설물, 아파트형 공장 및 장경간 구조물에 우수한 적용성을 기반으로 하여, 중약진 지역인 국내의 지진하중 수준에 적합하도록 개발하고자 하였다.

(1) 사업화 추진 배경

경제가 발전하고 그 규모가 커짐에 따라 소비자들의 삶의 질에 관한 관심이 증가하게 되고, 그 욕구를 만족시키기 위해 인간 생활에 밀접한 각 요소의 발전이 이루어지고 있다. 건축 또한, 재료 및 시공기술의 발달과 더불어 국내·외적으로 초고층 건축물을 비롯하여 친환경 건물, 지능형 건물(Intelligent Building) 등이 건설 또는 계획되면서 시장규모가 양적 및 질적으로 큰 성장을 이루었다. 국내 업계 및 학계에서도 다양한 연구 및 개발을 수행한 결과 최근에는 높이 400m가 넘는 초고층 건축물의 건설계획 및 시공이 진행되는 등 건축구조기술 측면에서도 큰 발전을 이루었다. 사무용 또는 주거용 건물의 경우에는 위와 같이 초고층 건축물 등의 건설을 통해 질적인 향상이 이루어지고 있지만, 초고층 건축물을 포함한 대부분 건축물의 저층 또는 지하에 위치한 주차장의 상황은 그렇지 못하다. 국내에 지하주차장이 본격적으로 도입된 지 약 20여 년이 지났으며, 현재에는 모든 아파트 건물의 주차장과 상당수 공공주차장이 지하주차장으로 건설되고 있다. 주차장은 용도 특성상 기타 건축공간에 비해 외기 및 외력에 지속적인 영향을 받는다. 그 결과, 초기 균열이 발생할 경우 차량 통행 등 반복적인 진동에 의해 수평부재 상하부 균열폭이 증가하게 되어, 방수층의 손상과 철근 부식을 가져오게 된다. 이러한 결함은 구조물의 내

구성에 치명적인 타격을 준다. 이러한 문제로, 현재 건설된 지 약 10여년이 지난 주차장들은 대부분 내구성에 대한 문제로 많은 유지관리비를 지출하고 있으며, 특히 누수에 따른 차량피해 등에 대한 민원도 제기되고 있다. 특히 최근에는 공기단축 및 시공의 편의성에 유리한 PC 시스템을 지하주차장에 대부분 적용하고 있으나, PC 시스템의 특성상 접합부의 일체성이 부족하여 균열이 집중되고 균열폭이 커지는 문제를 보인다. 결국, 이러한 문제점들은 그림 1.1에 나타낸 것과 같이 유지관리비를 상승시켜 건축물의 생애주기비용(Life Cycle Cost)을 증가시킨다. 앞서 지적한 PC 시스템의 문제점들은 비단 주차장 구조물에만 한정되는 문제가 아니며, PC 시스템을 통해 주로 건설되는 물류창고, 대형판매시설 및 아파트형 공장에서도 적절한 해결책이 요구되고 있다.



그림 1.1 새로운 골조 시스템 개발 필요성

(2) 연구개발의 필요성

현재 국내 보-기둥 골조 시스템은 RC 시스템과 PC 시스템이 양분하고 있으며, 이에 대한 각 시스템별 현황은 다음 표 1.1과 같다. 가장 일반적인 형식인 RC 시스템은 재료적인 특성상 건조수축 등에 의한 초기 균열이 필연적으로 발생한다. 그림 1.2의 물류창고 및 주차장 구조물과 같이 경간길이가 길고, 외부환경에 영향을 받는 경우에는 구조물의 내구성 및 사용성에 큰 손상을 야기하게 된다. PC 시스템은 조립식 구조의 특성상 일반적인 RC 시스템과는 달리 많은 접합부위를 가지게 되며, 시간이 경과함에 따라 이 부분에서 누수결함이 발생하므로, 추가적인 방수설계 및 시공방법이 검토되어야 한다. 즉, 그림 1.3과 같이 외부환경의 변화 및 외부하중 작용으로 인하여 하프 PC 슬래브간의 접합부와 보-기둥 접합부에서 높은 빈도의 결함이 발생하게 되는데, 이로 인해 균열이 발생하고, 누수, 철근의 부식 등과 같은 문제점이 발생한다. 따라서, RC 및 PC 시스템에서 모두 균열을 최소화하는 것이 매우 중요한 과제이며, 그러한 배경에서 프리스트레스트 콘크리트가 많이 주목받고 있다. 특히 PC 부재에서는 접합부에서 포스트텐션을 이용하여 균열을 최소화할 수 있을 뿐만 아니라 콘크리트의 일체성 및 보강재의 연속성을 확보할 수 있기 때문에 내진성능과 같은 구조성능까지 기대할 수 있다.

표 1.1 국내에서 사용되는 대표적인 보-기둥 골조 시스템 비교

철근콘크리트 (RC) 시스템		
	RC 보	RC 슬래브
<ul style="list-style-type: none"> 가장 일반적인 구조 시스템 슬래브는 균열을 감추기 위해 텍스 플레이트를 사용하는 경우 있음. 		
프리캐스트 콘크리트 (PC) 시스템		
	PC 보	하프 PC 슬래브 (Half Slab)
<ul style="list-style-type: none"> 공기 단축과 내구성 향상을 위해 도입 하프 PC 슬래브가 일반적임. 시공사에 따라 접합부 상세와 시공방법, 경간 모듈길이가 상이함. 		



그림 1.2 장경간 RC 시스템의 하부 균열에 의한 누수

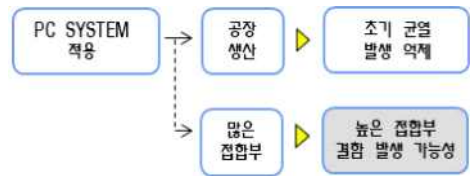
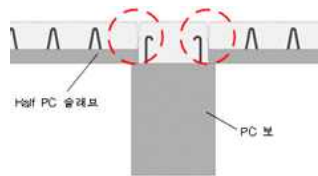


그림 1.3 PC 시스템의 접합부 누수 사례 및 균열 발생 양상

나. 개발기술의 우수성

이 연구에서는 기존의 공법들이 내재하고 있는 문제점들을 해결하기 위한 방안으로 PC 시스템의 우수한 재료 품질과 PT 시스템의 탁월한 단면 성능을 활용하고, 시공성을 크게 개선한 새로운 방식의 PC-PS (Precast-Prestress) 복합화 공법을 개발하고자 하였다. 국내에서는 PC 시스템이 건물 지하층에서 자주 사용되는데, HPPC 시스템에서는 포스트텐션을 적극 도입함으로써, 부재 깊이 감소를 통해 경제성을 높일 수 있게 하였다. 즉, 일반 RC 및 PC 시스템으로 장경간화 되어가는 상부 구조물의 모듈을 만족시키기 위해서는 구조 부재의 높이가 증가하게 되어 추가적으로 경제적인 손실이 발생하는데, HPPC 시스템의 경우 동일 또는 그 이하의 부재 높이로 상부 상황에 크게 구애받지 않으면서 경제적이고 안전한 구조물을 구현할 수 있으며, 감소된 단면으로도 RC 시스템의 문제점인 균열 발생에 의한 내구성 저하 및 진동에 의한 사용성 저하를 방지할 수 있다. 또한, 그림 1.4, 1.5와 같이 HPPC 시스템에서 부재에 도입되는 긴장력으로 기둥과 슬래브가 PC 보에 접합되는 경우라면, 기존 PC 시스템에 비해 뛰어난 슬래브-보, 보-기둥 접합부 성능을 얻음으로써, PC 시스템의 내재적 문제점인 접합부 일체성 문제를 해결할 수 있다.



그림 1.4 포스트텐션 주차장

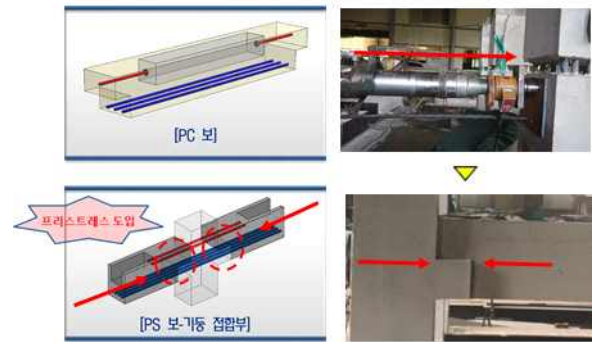


그림 1.5 HPPC 시스템의 긴장력 도입

(1) 사업화 대상기술 요약

2013년도에 (주)동양구조안전기술에서는 PC 기둥과 PC 보의 포스트텐션 압착식 접합 구조물 및 그 접합구조물의 시공방법에 관한 특허를 취득하였다. 이 연구에서는 주관 기관인 (주)동양구조안전기술에서 보유하고 있는 포스트텐션 PC 압착공법 특허기술에 대한 상세를 개발하고, 적합한 실무해석 및 설계법을 도출함으로써 최종적으로 현장에 즉시 적용하는 것을 목표로 하였다.

표 1.2 사업화 대상기술

구분	기존 보유기술 또는 이전받은 기술	사업화 기술
■ 과제명	-해당사항 없음	100년 이상 지속가능한 건축구조물을 위한 프리캐스트 압착구조 시스템 개발
■ 사업화 기술 및 분야	-해당사항 없음	<input type="checkbox"/> 공공기술 중소기업 이전 및 사업화 <input checked="" type="checkbox"/> 중소기업 보유기술 및 아이디어 사업화 <input type="checkbox"/> 국토교통 안전기술 사업화 <input type="checkbox"/> 서비스 R&D 융합기술 사업화
■ 사업화 대상이 되는 기술의 지식재산권 * 특허, 실용신안 등 유형별 기재	-해당사항 없음	(특허번호) 10-1289934 (특허명) PC기둥과 PC보의 포스트텐션 압착식 접합구조물 및 그 접합구조물의 시공 방법 (권리자) (주) 동양구조안전기술
■ 기존기술과 비교하여 성능 개선 등 차별화 내용	-해당사항 없음	- 기존의 PC보와 PC기둥을 무수축물탈 또는 에폭시수지와 같은 접착재로서 직접 접합하는 방법은 콘크리트의 건조수축에 의한 균열이 발생할 우려가 크고, 구조적인 안정성 확보가 미흡함. - PC 기둥과 PC보의 접합부에 포스트텐션을 도입함으로써 접합부의 일체성을 강화하고, 내진성능을 향상시킬 수 있는 방법을 개발하였음.

○ 사업화 대상기술의 개념도 및 제작과정

그림 1.6에 나타난 것과 같이, PC보의 경량화를 위하여 보 중간부에 중공부를 설치하는 방법을 강구하였으며, 중공부에 긴장재의 정착부를 배치함으로써 시공성을 크게 개선하였다. 또한, 단순화된 브라켓 형상을 갖는 일체식 PC 기둥 및 보를 설계함으로써 기둥 브라켓 설치 등의 불필요한 작업을 생략할 수 있도록 하였다. 그림 1.7에 나타난 것과 같이 쉬스관이 매립된 PC 보를 기둥에 설치된 코벨 위에 거치한 후, 긴장재를 삽입하고 긴장력을 도입하는 순서로 시공된다.

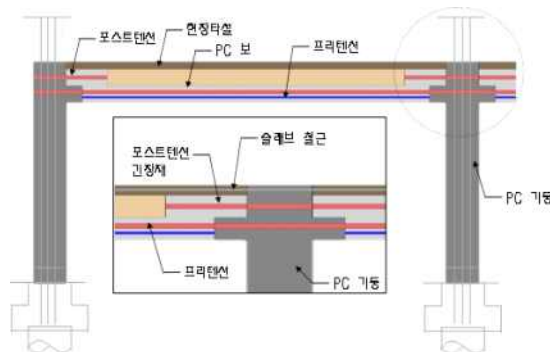
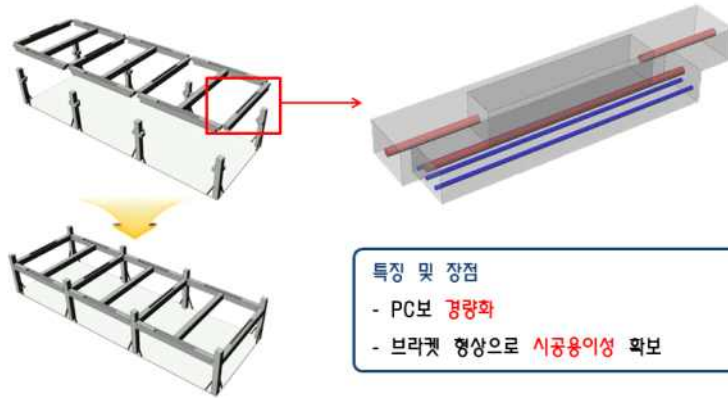
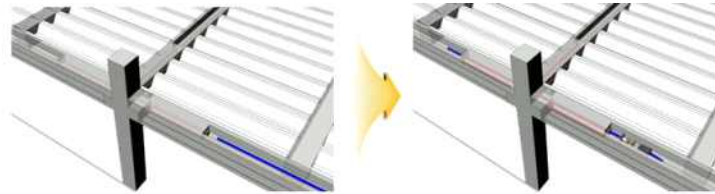


그림 1.6 HPPC 시스템 개념도



- 특징 및 장점
- PC보 경량화
 - 브래킷 형상으로 시공용이성 확보

(a) 보 설치



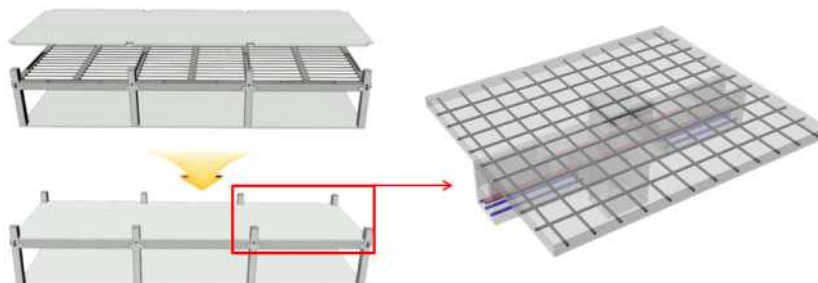
- 특징 및 장점
- 포스트텐션으로 접합부 일체성 확보 가능
 - 포스트텐션으로 접합부 및 보 부재의 균열 제어를 통한 내구성 확보 가능
 - 보 설치 과정에서 긴장 가능하므로 시공안전성 확보 가능

(b) 긴장력 도입



- 특징 및 장점
- 포스트텐션으로 슬래브 처짐 및 진동 개선
 - PT슬래브 ⇒ 장스팬 가능

(c) 상부근 배근, 데크 설치



(d) 콘크리트 타설

그림 1.7 HPPC 시스템 제작과정

(2) 국내외 유사기술과 수준 비교

구분	HPPC 시스템	철근콘크리트(RC) 시스템	포스트텐션(PT) 시스템	프리캐스트(PC) 시스템
기능/성능	포스트텐션 시스템과 프리캐스트(PC) 시스템의 장점을 혼합한 시스템	현장에서 거푸집을 제작하고 철근과 콘크리트를 이용하여 제작되는 시스템	현장에서 부재에 압축력을 도입함으로써 구조성능을 증진시킨 시스템	공장에서 각각의 부재를 제작하여 현장에서 조립하는 방식으로 시공되는 시스템
장/단점	프리캐스트 시스템 부재의 우수한 품질 성능과 포스트텐션 시스템의 우수한 사용성능 및 내진성능을 결합하여 기존 RC 및 PC 시스템의 단점을 보완한 효율적인 시스템임.	현장타설 콘크리트의 품질이 고르지 못하며, 재료 특성상 건조수축 등에 의한 초기 균열이 발생함. 초기 공사 비용이 가장 저렴하지만 추후 유지관리비용이 증가할 수 있으며 장경간 구현이 매우 어려움.	긴장력을 도입함으로써 콘크리트 구조물의 인장에 대한 취약점을 보완하고 내진성능과 사용성능을 증진시킬 수 있음. 국내의 경우 포스트텐션 시스템을 적용한 사례가 매우 드물며 설계 및 시공기술의 연구 개발이 부족함.	부재를 공장에서 제작함으로써 RC 시스템의 품질 저하 문제를 보완할 수 있음. 그러나 부재 접합부의 일체성 확보가 어려워서 접합부 영역에서 균열 및 누수 결합 등이 자주 발생됨.
경제성	<ul style="list-style-type: none"> ■ 공사비 양호 ■ 유지관리비 낮음 ■ 공사기간 빠름 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 공사비 낮음 ■ 유지관리비 양호 ■ 공사기간 느림 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 공사비 양호 ■ 유지관리비 낮음 ■ 공사기간 느림 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 공사비 높음 ■ 유지관리비 양호 ■ 공사기간 빠름

○ RC 시스템과 PC 시스템의 비교

☑ 시공성 (공기단축 및 안전성 포함)

현장에서 부재제작 및 철근조립이 전부 이루어지는 철근콘크리트(RC) 시스템과 달리 프리캐스트(PC) 시스템은 공장에서 각각의 부재를 제작하는 시스템이다. 표 1.3은 본 과제의 참여기관인 동서피씨씨(주)에서 기존 데이터에 근거하여 산정한 각 시스템별 공기를 비교하여 나타내었다. PC 시스템의 경우 거푸집 및 배근 공사의 공정이 최소화되기 때문에 약 45 % 수준의 공기단축 효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

표 1.3 RC와 PC 시스템의 공기 비교

RC 시스템			PC 시스템		
작업공종	소요일수	작업인원	작업공종	소요일수	작업인원
떡매김	1 일	2 명	떡매김	1 일	2 명
기둥 및 벽체 거푸집/철근 조립	3 일	17 명	PC부재 (기둥/보/슬래브) 조립	3 일	6 명
서포트 설치 작업	3 일	10 명	슬래브 철근 조립	2 일	15 명

슬래브 및 보 거푸집/철근 조립	4 일	25 명			
합 계	11 일	183 명	합계	6 일	50 명

다만, 공사 준비 시 RC 시스템의 경우 공사 자재 반입기간이 짧지만, PC 시스템은 몰드제작, 자재생산, 반입기간 등의 공종이 사전에 진행되어야 하기 때문에 다소 추가적인 사전 공기가 필요하다는 단점이 있다. 그러나, PC 공법에서 필요한 사전 공정은 다른 현장공정과 병렬적으로 수행될 수 있으며, 기상 불안정에 따른 공기 지연 요인이 RC 공법에 비해 낮기 때문에 공정계획을 치밀하게 준비함으로써 최소화 시킬 수 있다.

표 1.4는 S사에서 진행한 마곡지구 15단지의 RC 시스템 및 PC 시스템에 대한 실제 투입비용을 비교한 내용이며, 해당 금액에는 공종별로 공기에 대한 비용도 포함되어 있다. 결과적으로 PC 시스템의 경우 RC 시스템과 비교하였을 때, 약 83%정도의 비용절감 효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다. 공기와 경제적인 측면 이외에도, PC 공법의 경우 RC 공법과 비교하였을 때, 가설재 최소화 혹은 무지주 공법으로 인하여 넓은 개방감을 형성하며, 가설재 및 인원투입 감소로 안전관리가 용이하다는 점에서 우수한 공사 안전성을 가지고 있는 것으로 나타났다.

이 연구에서 개발한 HPPC 시스템은 기본적으로 PC 시스템으로 분류될 수 있으므로 앞서 언급된 PC 시스템의 우수한 시공성 (공기단축 및 공사 안전성 포함)과 유사한 수준의 시공성을 가지고 있다고 간주할 수 있다.

표 1.4 RC와 PC 시스템의 투입비용 비교

- RC 시스템

	슬래브	RC SLAB(THK200)
	보	B1 RC보(600×1,000)
		G1 RC보(600×1,000)
		G4 RC보(1,000×1,500)
	기둥	1,200×1,000
	경제성	₩41,884,600
	시공성	시스템 서포트와 거푸집을 사용한 재래식 공법 적용
사용성	처짐 및 균열의 발생으로 사용성에 취약	
친환경성	가설재 사용으로 인하여 건설폐기물 발생	

구분	물량	단위	단가	금액	비고
콘크리트	재료비	71.40	m ³	65,000	4,641,000
	타설비	71.40	m ³	15,000	1,071,000
	거푸집	266.88	m ³	45,000	12,009,600

	설치비					
	동바리 설치비	1,320	m ³	10,000	13,200,000	시스템 서포트
철근	재료비	9.93	ton	720,000	7,149,600	
	조립비	9.93	ton	380,000	3,773,400	
합 계					41,884,600	<u>100%</u> (기준액)

- PC 시스템

	슬래브	DMS SLAB
	보	PC보(1,900×700)
	기둥	1,000×1,000
	경제성	₩34,745,000
	시공성	조립식 공법과 무지주 공법으로 공기단축 가능
	사용성	PS강선을 사용하여 처짐 및 균열 을 제어하며 진동 성능도 우수함
	친환경성	내화피복 및 가설재가 없으므로 친환경적임

구분		물량	단위	단가	금액	비고
콘크리트	재료비	28.98	m ³	65,000	1,883,700	
	타설비	28.98	m ³	15,000	434,700	
	거푸집 설치비	-	m ³		-	
	동바리 설치비	-	m ³		-	시스템 서포트
철근	재료비	3.03	ton	720,000	2,181,600	
	조립비	3.03	ton	380,000	1,151,400	
PC공사	재료비	35.48	m ³	820,000	29,093,600	
합 계					34,745,000	<u>83%</u> (RC 대비 비용)

☑ 구조성능

일반적으로 PC 시스템은 RC 시스템과 비교하였을 때 우수한 품질관리 및 공사기

간 단축, 장경간 실현 가능성 등의 장점을 보유하고 있음에도 불구하고, 접합부의 일체성이 낮기 때문에 접합부 균열, 누수 등의 사용성능 및 내진성능 저하 등의 문제점이 있다. 이러한 접합부의 문제점을 해결하고자 많은 연구자들에 의하여 다양한 접합부 보강방안의 개발 및 연구가 진행되었다. 그림 1.8은 각 연구자별 PC 시스템의 접합부 보강방안을 나타낸 그림이다.

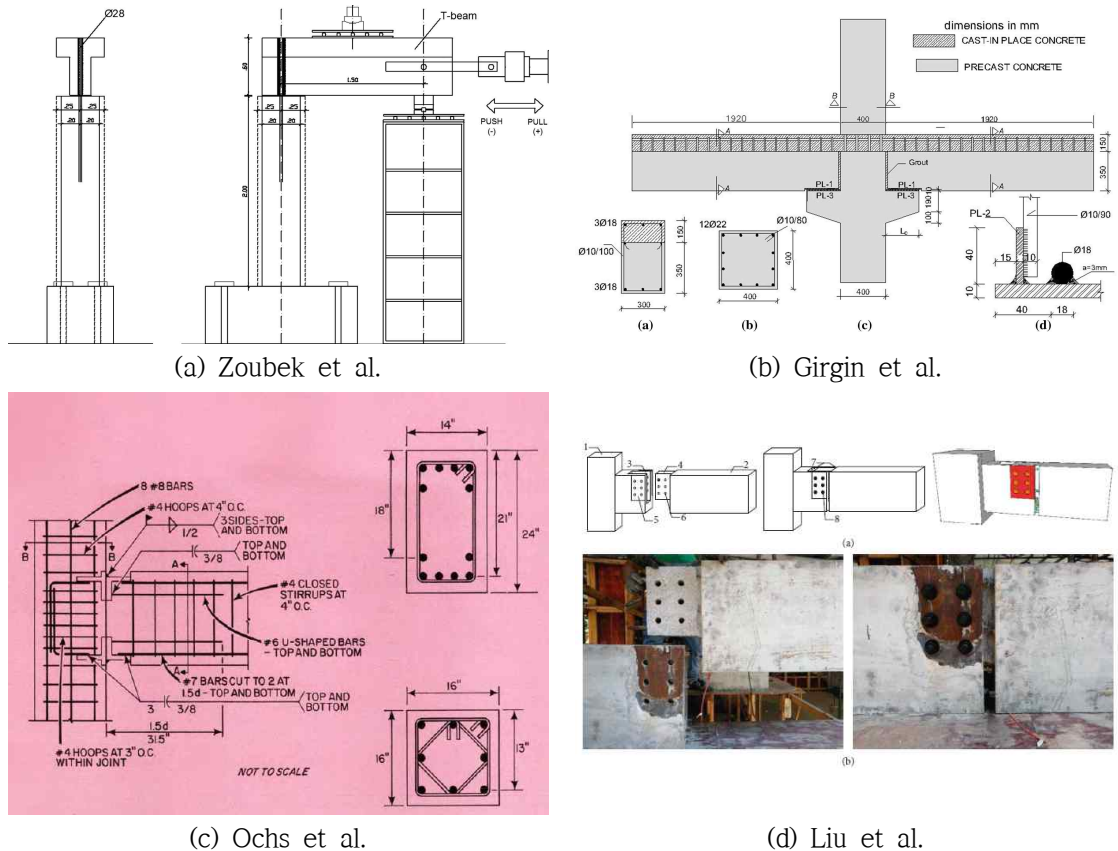


그림 1.8 PC 접합부의 보강방안

다만, 이러한 보강방안이 적용된 PC 접합부의 경우 외부하중에 대하여 최대변형능력, 하중 단계별 강도 및 강성 저감 측면에서 RC 접합부 대비 상당히 불리한 것으로 나타난 경우가 많으며, 현행설계기준에서 제시하는 모멘트저항 골조의 접합부로서 인정받기 어려운 경우가 적지 않다. 또한, 골조 제작단계에서 각 부재의 양중을 통한 조립과정이 필수적으로 선행됨에 따라 양중무게의 제한 등 시공 중에 발생하는 추가적인 제약사항이 존재한다. 이 연구에서 개발한 HPPC 시스템은 이 보고서의 [Chapter 3. 연구수행내용 및 성과]에서 나타낸 바와 같이 모멘트저항 골조의 접합부로서 RC 접합부에 준하는 충분한 강도, 강성, 변형능력을 보유하고 있는 것으로 나타났으며, 보의 길이방향 중앙부에 중공부를 배치함으로써 보의 양중무게를 최소화하여 원활한 시공이 가능하게 하였다.

○ HPPC 시스템 적용 주차장 평면과 기존공법의 비교

HPPC 시스템은 기존의 PC 구조가 주로 적용되던 PC 지상 및 지하 주차장 구조물, 대형판매시설, 물류창고, 아파트형 공장 및 장경간 구조물에 제한없이 범용적으로 적용될 수 있으며, 특히, HPPC 시스템을 기존의 PC 주차장 구조물에 적용할 경우에는

기존 주차모듈과 다른 획기적인 형태의 평면구성이 가능하다. HPPC 시스템의 장스팬 구현 능력을 토대로 가정한 주차공간기획(안)을 표 1.5에 나타내었다. 평면도에서 확인할 수 있듯이 기존 주차모듈에 비해 기둥 간격이 대폭 증가하여, 주차공간활용성 및 편의성이 확대된다. 또한, 기둥 개소와 보 개수가 감소함으로써 표 1.5, 1.6와 그림 1.9과 같이 경제적 이점을 갖는다. 주차장 구조물을 통해 예시한 것과 같이, 이 연구과제를 통해 실용화될 HPPC 시스템을 실제 현장에 적용하여 건설시장의 다변화와 질적 향상을 꾀하며, 국내에서 독자적으로 개발된 기술을 해외에 수출함으로써 국내 건설시장의 국제적 위상향상에 기여할 수 있다고 판단된다. 제안된 공법의 실무적용을 통하여 국내의 많은 중소 PC 생산업체들에게 새로운 활력소를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

표 1.5 HPPC 시스템 적용 주차장 평면과 기존공법의 비교

주차 모듈	
국내 (RC)	
	<p>기본모듈 8.0 m × 7.5 m</p>
국내 (PC)	
	<p>기본모듈 6.6 m × 7.5 m</p>
	<p>특 징 양방향 RC 보 적용</p>
	<p>특 징 PC 보 + Half PC 슬래브</p>

HPPC 시스템		
	기본모듈 6.0 m × 12.0 m	특 징 프리텐션 PC 보 + 포스트텐션 슬래브

표 1.6 주차장 평면 단위모듈 순수물량 비교

구분	HPPC 시스템		기존 RC 공법		
	모듈 : 6.0 m × 12.0 m		모듈 : 8.0 m × 7.5 m		
■ 단위모듈 ■ 경제성 (구조계획 상 동일한 조건에서, 순수물량 비교)					
		기둥	보		
		HPPC	RC	HPPC	RC
	콘크리트	1534.1 m ³ (100%)	1796.0 m ³ (117%)	2235.9 m ³ (100%)	2794.2 m ³ (125%)
	철근	274.2 ton (100%)	525.2 ton (192%)	265.5 ton (100%)	502.9 ton (189%)
	강선	-	-	37 ton	-

그림 1.9 주차장 평면 단위모듈 금액 비교

2. 국내외 기술 개발 현황

가. 기술 동향 분석

(1) 관련 분야의 국내외 연구동향 및 학술적 성과

(가) 국가연구개발사업 유사연구 검토

(단위 : 억원)

부처명	사업명	과제명	예산	비고
한국연구재단	지역혁신 창의인력양성	시공성과 구조일체성이 향상된 고성능 프리캐스트 콘크리트 골조부재 개발	1.6	

“시공성과 구조일체성이 향상된 고성능 프리캐스트 콘크리트 골조부재 개발”은 건물의 시공성과 구조일체성을 향상시킨 고성능 PC 골조 부재 및 시스템을 개발하는 것을 목적으로 한다. 중공 PC기둥과 Half PC보로 연결된 골조시스템을 제안하고 실험 및 해석을 통하여 구조성능이 향상된 시스템을 구축하고자 하였으며, 개발된 시스템의 설계 및 시공 프로세스를 구축하여 반도체 등과 같은 공장, 마켓, 지하주차장을 포함한 사무소건물 및 골조식 아파트 건물 등에 널리 활용될 수 있도록 하고자 하였다.

(나) 사업화과제의 차별화 방안

유사연구로 검토된 “시공성과 구조일체성이 향상된 고성능 프리캐스트 콘크리트 골조부재 개발”은 중공 PC기둥과 Half PC보로 시스템이 구성되어 있으며, 중공 PC기둥과 Half PC보로 연결되는 모멘트접합 상세를 개발한 것이 핵심 내용이라 할 수 있다. 이에 비해 본 과제의 경우 PC 시스템에 포스트텐션을 적용하여 접합부 내구성을 높이고, 분절형 PC 부재를 도입하여 양중부하를 감소시킨 시스템을 개발하는 점이 가장 큰 차이점이다.

(2) 국내외 관련 기술 특허 동향

표 2.1에 나타낸 것과 같이, 국내외적으로 본 과제에서 제안한 PC시스템의 보-기둥 접합부에 PT 시스템으로 보강하는 사례에 대한 연구 및 시공사례는 전무하다. 국내외 기존의 PC 관련 특허 조사결과에서도 유사한 지적재산권을 찾을 수 없었다. 기존의 특허는 PC보와 PC기둥의 접합에 관한 사항을 다루고 있으며, 이에 비해 본 과제는 보-기둥 접합부를 PT 시스템으로 보강하는 것에 초점을 두고 있어 향후 실용화 및 사업화시 지적재산권 및 연구 성과와 관련되어 분쟁이 예상되는 부분은 없는 것으로 판단된다.

표 2.1 기존의 국내외 PC 관련 특허 조사결과

등록(출원)일	등록(출원)번호	제목
2002.06.17	2002799180000	장스팬 프리캐스트 시스템의 기둥-보 접합구조
2002.06.24	10-0343369-0000	프리캐스트 철근콘크리트 보 및 프리캐스트 철근콘크리트 보의 접합방법
2005.06.16	20-0387926-0000	철근 볼트 접합에 의한 프리캐스트 콘크리트 기둥과 보의 건식 연결부 개발
2006.01.16	10-2004-0049377	프리캐스트 콘크리트 보-기둥 접합부 구조
2006.03.28	10-0567271-0000	프리캐스트 거더와 프리캐스트 빔의 조인트 시공방법
2006.04.12.	0128949	Precast reinforced concrete column and beam members
2006.05.19	10-0583687-0000	콘크리트 구조물에 있어서의 프리캐스트 콘크리트 기둥과 프리캐스트 보와의 접합방법
2006.11.03.	10-0644745-000	피씨 기둥-보 접합부 구조 및 그 시공방법
2007.04.20.	10-0712354-0000	지하주차장의 피씨 복합화 공법 및 그에 사용되는 장스팬피씨 보의 피씨 기둥-보 접합부 구조
2009.04.24	10-2009-0036134	프리캐스트 콘크리트 기둥을 이용한 건축물의 시공방법
2013.04.26	10-1260392-0000	저모멘트존에서 연결되는 PC기둥 및 보유닛의 조립식 구조
2013.11.06	14073465	Composite concrete framing system with precast composite concrete columns and precast composite concrete beams
2015.08.24	10-1548215-0000	보침이 높은 합성PC보, 이와 합성PC기둥과의 연결구조
2016.01.29	10-1591808-0000	합성PC보, 이와 합성PC기둥과의 연결구조

(국토교통기술 DAMOA, 특허청 한국특허정보원 참고)

(3) 국내외 시장분석 및 사업화 전망

통계청에서 발표한 2018년 공사종류별 건설공사액에 따르면 국내와 해외 건설공사액은 각각 259조원과 34조원이며, 이 중에서 건축분야의 공사액은 약 201조원에 달하는 것으로 나타났다[표 2.2]. 일반적으로 총 공사비에서 전기공사, 외장재공사 등을 제외한 건축공사비는 전체 공사비의 약 50~60 %정도이며 건축공사비 중 골조공사는 약 30 %로 추정된다. 따라서, 골조 공사 중 보 및 접합부 시스템이 차지하는 비율은 약 30~40 %로 생각되며, 개발시스템이 적용가능한 시장의 규모는 대략적으로 9.0조 ~ 14.5조 원으로 예상된다. 또한 그림 2.1에 나타난 바와 같이 프리스트레스트 콘크리트 강연선이 건축물에 상당히 많이 적용되고 있다. HPPC 시스템은 앞에서 언급한 경제성, 시공성 및 안전성을 모두 만족하는 획기적인 기술로써 점점 사용량이 증가할 것

으로 판단된다.

표 2.2 공사종류별 건설공사액

(단위 : 10억 원, %)

구 분	건설공사액				증 감		증감률	
	' 16년	' 17년	' 18년	구성비	' 17- ' 16	' 18- ' 17	' 17/' 16	' 18/' 17
합 계	277,593	291,224	292,560	-	13,631	1,336	4.9	0.5
국 내	232,243	259,047	258,853	100.0	26,804	-194	11.5	-0.1
건축	166,204	193,915	192,608	74.4	27,711	-1,307	16.7	-0.7
토 목	41,943	39,887	37,940	14.7	-2,066	-1,937	-4.9	-4.9
산업 설비	18,412	18,915	21,550	8.3	503	2,635	2.7	13.9
조 경	5,683	6,340	6,755	2.6	657	415	11.6	6.5
해 외	45,350	32,177	33,706	-	-13,173	1,529	-29.0	4.8

국내에서는 포스트텐션 시스템이 주로 교량에 사용되어 왔기 때문에, 대부분의 기술자들은 교량용 구조시스템으로 이해하고 있으나, 실제로 미국의 수요현황을 보면 건축 구조물에 사용되는 물량이 교량구조물보다 훨씬 많은 것을 알 수 있다. 그림 1.9에서 보는 바와 같이 포스트텐션 사용의 절반 이상을 주택의 지중슬래브와 토목공사(프리스트레스 앵커)가 차지하고 있다. 포스트텐션 공법의 다른 적용 사례로는 오피스 건물, 콘도미니엄, 호텔, 프리스트레스 물탱크, 지반 앵커, 방벽, 주차시설, 포장도로, 댐, 핵물질 저장시설, 스타디움, 사일로 등으로 그 사용범위가 급속도로 확대되고 있는 추세이다. 국내에서도 초고층 건물 및 장스팬 대공간 구조에서 사용범위를 확대하고 있는 추세이다. 이러한 추세는 향후 지하주차장으로 확대될 것으로 판단된다.

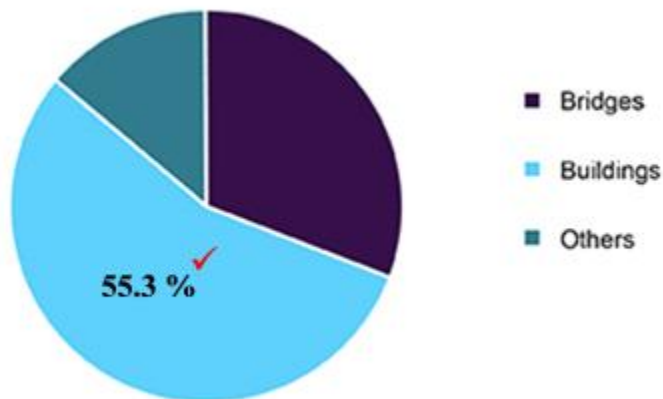


그림 2.1 2017년 EMEA지역 프리스트레스트 콘크리트 강연선 수요현황

해외에서는 1900년대 중반 이후부터 건축물에 포스트텐션을 적용해서, 현재에는 미서부의 경우, 신축건물 중 약 80%이상이 포스트텐션 공법으로 건설되고 있으며, 최근에는 강진(強震)지역인 샌프란시스코에도 약 60층에 달하는 초고층 건물이 포스트텐션 시스템으로 설계되어 시공 중이다. 또한, 유럽, 동남아, 호주 등지에서는 부착 방식 포스트텐션 공법이 활성화되어 있으며, 홍콩에 건설 중인 Nina tower(80층) 또한 포스트텐

선이 적용되었다. 주차장의 경우, 미서부에서는 대부분의 지상주차장을 포스트텐션으로 시공하였다. 또한, 최근에 들어서 PC와 PT를 혼합한 구조시스템에 대한 연구와 시공이 이루어지고 있다 (그림 2.2). 단, HPPC 시스템 및 지하주차장에 대한 기술은 해외에서도 최신 공법에 속하는 것으로, 국내 고유의 노하우를 터득한다면 포스트텐션 선진국으로의 시장 진출도 낙관적으로 볼 수 있다.



그림 2.2 PC 골조와 PT 슬래브를 혼합한 주차장 건물 시공 사례

나. 개발기술의 독창성

앞서 언급한 바와 같이, 국내에서는 90년대 말부터 PC접합부에 대한 연구 및 개발이 이루어지고 있다. 그러나 프리스트레스를 도입한 PC시스템에 대한 연구는 최근 몇 년 사이에 시작되었으며, 여전히 PT 시스템에 대해서는 특별한 연구결과가 없고 해외 기술을 그대로 적용하는 경우가 대부분이다. 표 2.1에 나타난 것과 같이, 이 과제에서 연구하고자 하는 PC시스템의 보-기둥 접합부를 PT(비부착 방식) 시스템으로 보강하는 사례는 (주)동양구조안전기술의 2012년 특허등록이 유일하다.

이 연구에서 제안된 HPPC 시스템의 보-기둥 접합부는 우수한 내진성능을 확보할 수 있으며, 그림 2.3에 나타난 것과 같이, 중심회기형 (Self-centering) 거동을 나타내기 때문에 하중이 제거되면 영구변형이 거의 없는 접합부를 구현할 수 있다. 또한, 손상이 발생하더라도 보의 단부에 대부분의 손상이 집중되기 때문에 기둥에 많은 손상이 발생하고 영구변형에 의해 기울어지게 되는 RC 구조와 비교하여 보강비용을 크게 줄일 수 있다. 특히,

중약진지역인 우리나라의 횡하중레벨에서는 매우 작은 손상을 경험할 것으로 예상된다. 또한, 기존의 PC 시스템은 물론이고, 내진설계된 RC 시스템과 비교하여도 더욱 향상된 내진성능을 보여줄 것으로 판단된다.

(a) 반복하중가력에 따른 이력거동

(b) HPPC 시스템의 파괴 양상

(c) RC 시스템의 파괴 양상

그림 2.3 HPPC 시스템과 RC 시스템의 보-기둥 접합부 거동 양상

3. 연구수행내용 및 성과

이 연구에서는 기존 RC 및 PC 시스템에 비해 내진성능, 사용성능, 내구성 및 시공성을 향상시킨 HPPC 시스템을 개발하고, 성능검증 및 사업화를 추진하는 것을 주요목적으로 하였다. 효율적인 연구수행을 위해 주관 및 공동연구기관의 역할분담 및 협력을 통해 부재의 개선 및 보완방안을 도출하였으며, 각차년도 별로 개별부재, 보-기둥 접합부, 2경간 골조의 구조성능 실험을 수행하였다. 1차년도에는 HPPC 시스템의 접합부에서 연속된 긴장재가 부재의 휨강도에 충분히 기여할 수 있는지 검증하고자 하였으며, 부모멘트 실험 결과를 통해 부재가 현행 설계기준의 강도를 모두 만족시킬 수 있음을 확인하였다. 2차년도에는 실대형의 보-기둥 접합부 실험체르 제작하여, 골조의 횡저항성능을 평가하고자 하였으며, HPPC 시스템이 특수모멘트골조로 적용이 가능한 것을 확인하였다. 3차년도에는 연속경간의 횡저항성능을 검증하고자 2경간 골조에 대한 횡가력 실험을 수행하였으며, 가력 후 손상정도를 평가한 결과 HPPC 시스템이 기존 RC 시스템과 비교하여 매우 우수한 내구성능 및 보수보강성능을 가지는 것을 확인하였다. 이를 토대로 최적의 HPPC 시스템 상세를 도출한 후, Mock-up 실험체 제작을 통해 시공성을 상세히 분석하였다. 정량적인 성과로는 특허 등록 2건, 출원 4건 논문(SCIE급) 2건, 논문(국내학술) 4건, 기술기사 1건, 학술발표 논문 5건, 신규고용인력 5명, 인력양성 6명, 설계·시공지침서 2건, 시작품제작 3건, 시작품제작(Mock-up) 1건, 기술실시계약 2건, 현장적용 2건, 건설신기술인증 신청 1건 등을 달성하였다.

가. 부재별 성능검증

(1) 현행 구조기준에 근거한 부재 및 골조설계

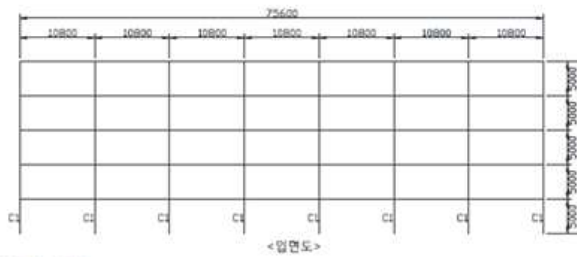
개발 HPPC 시스템의 실제 적용가능성을 파악하기 위하여 목표 구조물을 선정하였으며, 이를 바탕으로 그림 3.1과 같이 현행 구조기준에 따라 경간길이 10.8 m, 층 높이 5 m의 주차장 구조물을 대상으로 부재의 설계 및 제작을 수행하였다. 도출된 HPPC 시스템의 시공과정을 고려한 상세 설계를 수행하여, 프리캐스트 부재 제작업체와의 사전협의를 통해 제작방법 및 현장적용 시 발생할 수 있는 문제점을 파악하고, 이를 해결할 수 있도록 제작과정을 개선하여 기술의 완성도를 향상시켰다.

(2) 부재의 휨 성능실험

휨 성능 실험체는 보의 단면 크기 500×700 mm, 기둥의 단면 크기 700×700 mm로 제작되었으며, 슬래브가 있는 실험체의 경우 슬래브 폭은 1,500 mm, 슬래브 두께는 200 mm로 제작되었다. 보의 순경간은 8,000 mm로 계획되었다. 보의 하부에는 D25 철근을 3개씩 배근하였으며, 상부는 부착 강연선이 적용된 실험체에 D19 철근을 4개, 비부착 강연선이 적용된 실험체에는 D22 철근을 4개 배근하여 보의 휨 강도가 유사하도록 설계하였다. 현행 구조기준에서는 프리스트레스트 콘크리트 휨부재의 휨강도 계산시 강도 설계법을 따르되 강연선의 응력을 f_{py} 대신 f_{ps} 를 사용하고 있다. 이 때, f_{ps} 는 보의 파괴시 강연선 응력값이며, 정확한 값을 구하기 위해서는 적합조건에 의하여 구해야 한다. 다만, 설계기준에서는 각각 부착 강연선(식 3.1 참조)과 비부착 강연선(식 3.2 참조)

에 대해 근사값들을 제시하고 있다.

(a) 건물개요



2) 구조설계기준

2-1) 적용기준 : 건축구조설계기준 KBC 2016
 콘크리트구조설계기준 KCI 2017

2-2) 참고기준 : ACI 318-14, PCI DESIGN HANDBOOK

3) 구조재료의 규격 및 설계기준 강도

3-1) 프리캐스트콘크리트강도 : $f_{ck}=49\text{MPa}$

3-2) 철근 : $f_y=400\text{MPa}$

3-3) STRAND : SWPC 7연선 15.2mm
 f_{pk} (인장강도)=1860MPa

4) 구조해석 프로그램

4-1) 구조해석 - MIDAS GEN

5) 설계하중

5-1) 수직하중

고정하중 : 무근콘크리트 및 마감 ($t=100\text{mm}$), 슬래브 ($t=300\text{mm}$) - 9.6kN/m^2

활하중 : 적재하중 - 6kN/m^2

시공하중 : 시공시 추가 적재 및 충격하중 - 1.5kN/m^2

5-2) 지진하중 적용관련

- 지반계수 : Sd

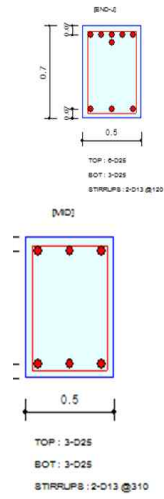
- 지역계수 : 0.22×0.8

- 중요도계수 : 1.0

- 반응수정계수 : 5.0(철근콘크리트 중간모멘트골조), 8.0(철근콘크리트 특수모멘트골조)

(b) 구조설계기준

stem : kN, m
 span : 8 m

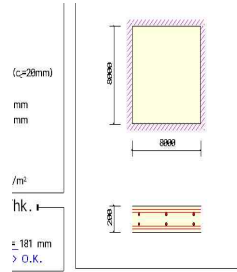


.9253
 9
 83.29
 18.06
 .8907
 .0028
 .0015

ND-3
 9
 72.48
 0.00
 93.78
 .0020
 D13 @120
 .9459

(c) 보 부재 설계

(d) 기둥 부재 설계



A _s (mm ² /m)	Spacing			
	D13	D13+D16	D16	D16+D19
757	Ø16@	Ø21@	Ø26@	Ø30@
562	Ø30@	Ø30@	Ø30@	Ø30@
820	Ø15@	Ø19@	Ø24@	Ø29@
392	Ø30@	Ø30@	Ø30@	Ø30@
400	Ø31@	Ø40@	Ø45@	Ø45@

1,750
kN/m → O.K.
kN/m → O.K.

(e) 슬래브 부재 설계



(f) 실험체 제작

그림 3.1 HPPC 시스템 설계 및 실험체 제작을 통한 제작공정 파악

$$f_{ps} = f_{pu} \left(1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \rho_p \frac{f_{pu}}{f_{ck}} \right) \quad (3.1)$$

$$f_{ps} = f_{pe} + 70 + \frac{f_{ck}}{100 \rho_p} \quad (3.2)$$

여기서 f_{pu} 는 강연선의 극한강도, f_{ck} 는 콘크리트의 압축강도, γ_p 는 강연선의 종류에 따른 계수, β_1 는 중립축의 깊이 c 에 대한 콘크리트 응력 분포 사각형의 깊이 a 와의 비, ρ_p 는 강연선 강재비이다. 최종적으로 프리스트레스트 콘크리트 휨부재의 휨강도는 식 3.3과 같이 산정할 수 있다.

$$M_n = A_p f_{ps} \left(d_p - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y \left(\frac{a}{2} - d' \right) \quad (3.3)$$

여기서 A_s , A'_s , A_p 는 각각 인장철근과 압축철근, 강연선의 단면적이며, d , d' , d_p 는 각각 인장철근과 압축철근, 강연선의 유효깊이이다. a 는 등가응력블럭의 깊이를 의미한다. 직경 15.2 mm의 강연선을 실험체별로 각각 상부와 하부에 4개, 2개씩 배치하였으며, 보의 하부 철근은 기둥에서 연속되지 않게, 보의 상부 철근 및 슬래브 철근은 접합부를 관통하여 배근하였다. 강연선 극한응력(f_{pu})의 약 0.6배에 해당하는 프리스트레스를 도입하였다. 모든 스테럽은 두 개의 다리를 갖는 폐쇄 스테럽을 사용하였다. 또한, 콘크리트 압괴에 의한 성능저하를 최소화하기 위하여 나선 철근(spiral bar)을 배근하였다.

그림 3.2와 같이 유한요소해석 프로그램을 사용하여 PC보 및 포스트텐션이 도입된 접합부의 역학적 거동을 연구하였으며, 이를 통해 최적화된 포스트텐션 도입길이를 산정하였다. 또한, 개발 HPPC 시스템의 경우에는 시공 시 작용하는 작업하중 및 콘크리트 타설하중에 대하여 동바리 없이 시공 가능하도록 계획하였기에, 시공단계와 합성단계를 나누어 휨 성능실험을 수행하였다. 표 3.1에 나타난 바와 같이, 총 8개의 실대형 실험체에 대하여 슬래브 유·무, 포스트텐션 도입길이, 그라우팅 유·무, 다발(multi) 강연선 및 단일(mono) 강연선 적용 등을 변수로 실험적 연구를 수행하였으며, 이를 통해 개발 HPPC 시스템의 부모멘트 성능을 검증하고, 최적 설계방안을 도출하고자 하였다. 그림 3.3 ~ 3.6는 각 실험체에 대한 상세도면을 나타내었다.

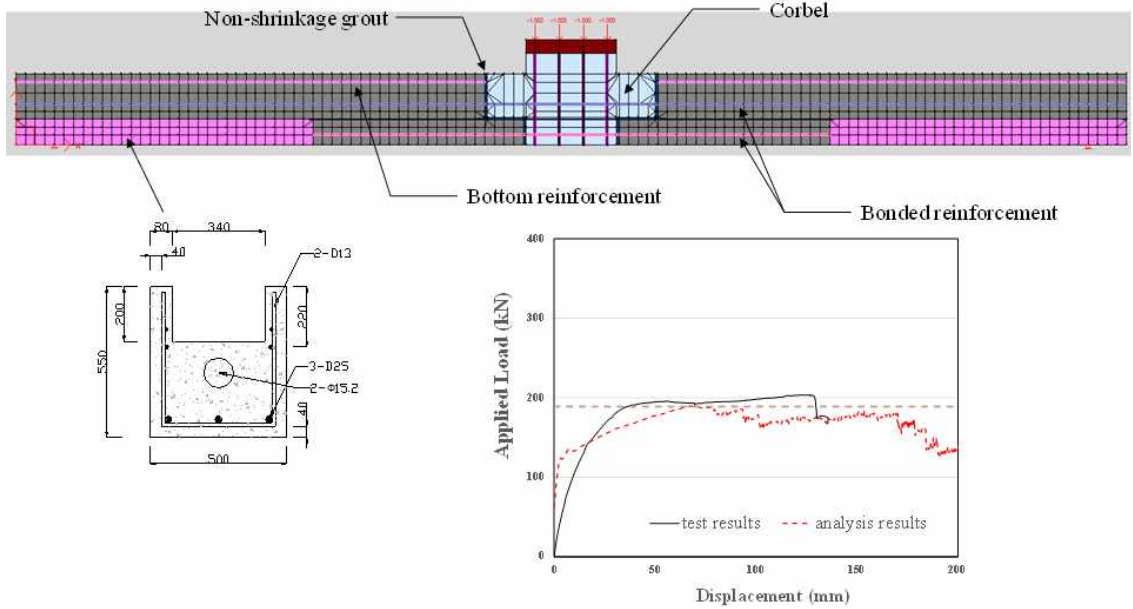
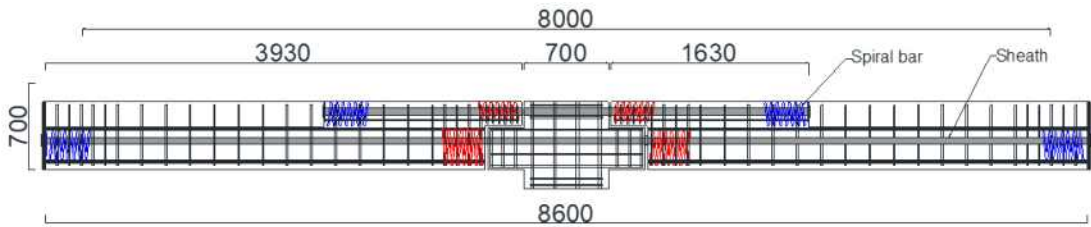


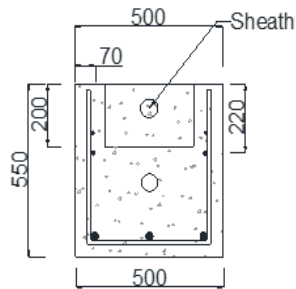
그림 3.2 유한요소해석을 이용한 HPPC 시스템의 역학적 거동 연구

표 3.1 휨성능 실험체 변수

Specimen	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP7	SP8
시공/합성 단계	시공	합성	합성	합성	합성	합성	합성	합성
경간 (m)	8.0							
기둥단면 (m)	0.7 × 0.7							
보단면 (m)	0.5 × 0.7							
포스트텐션 도입길이 (m)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	8.6	8.6
슬래브 유무	무	유	무	유	무	무	유	무
그라우팅	bonded			unbonded			bonded	
다발/단일 강연선	다발	다발	다발	단일	다발	단일	다발	다발
유효 프리스트레스	1,581							
콘크리트 압축강도 (MPa)	48.84	48.84	49.23	49.23	46.56	46.56	52.43	52.43
그라우팅 강도 (MPa)	58.46							
철근 강도 (MPa)	400							
강연선 강도 (MPa)	1,860							

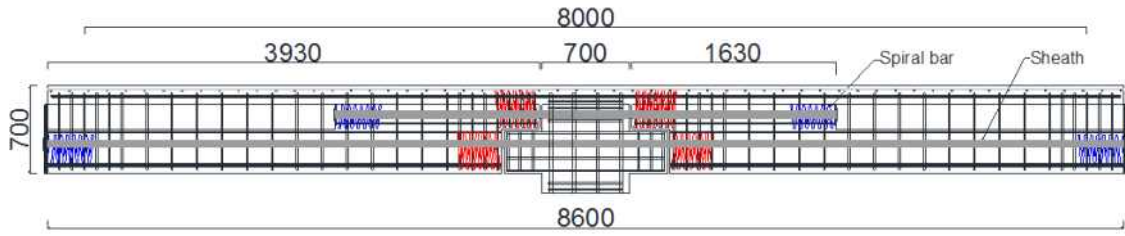


(a) 보 입면 철근상세

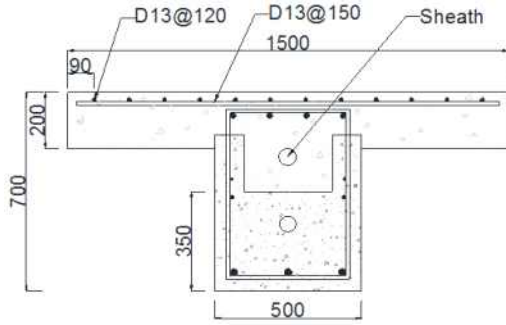


(b) SP1 보 단면

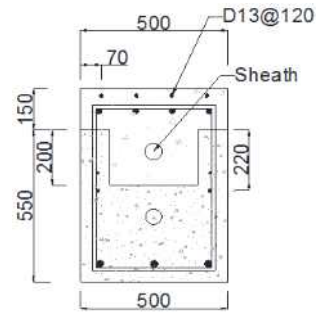
그림 3.3 SP1에 대한 상세도면



(a) 보 입면 철근상세

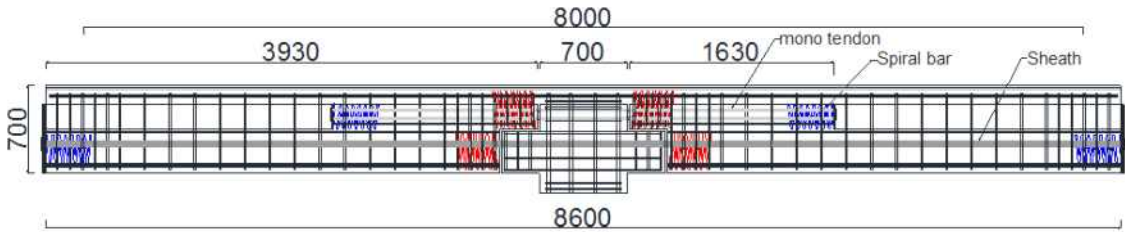


(b) SP2 보 단면

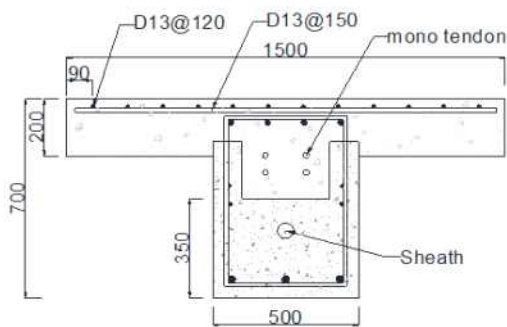


(c) SP3, 5 보 단면

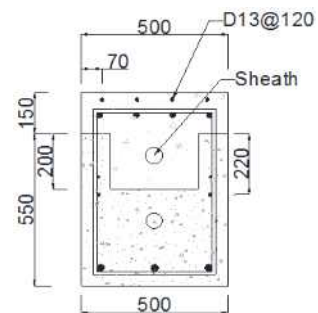
그림 3.4 SP2, 3, 5에 대한 상세도면



(a) 보 입면 철근상세

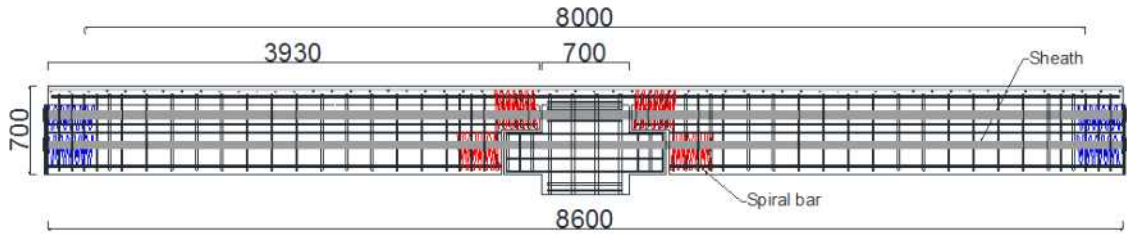


(b) 실험체 4 보 단면

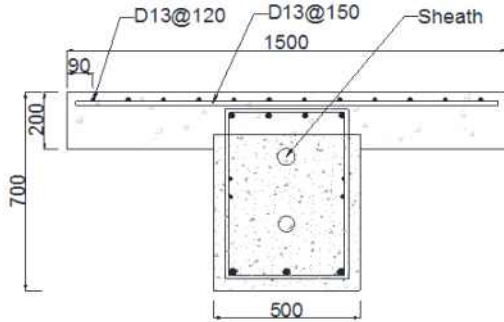


(c) 실험체 6 보 단면

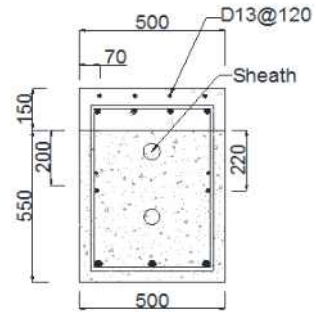
그림 3.5 SP4, 6에 대한 상세도면



(a) 보 입면 철근상세



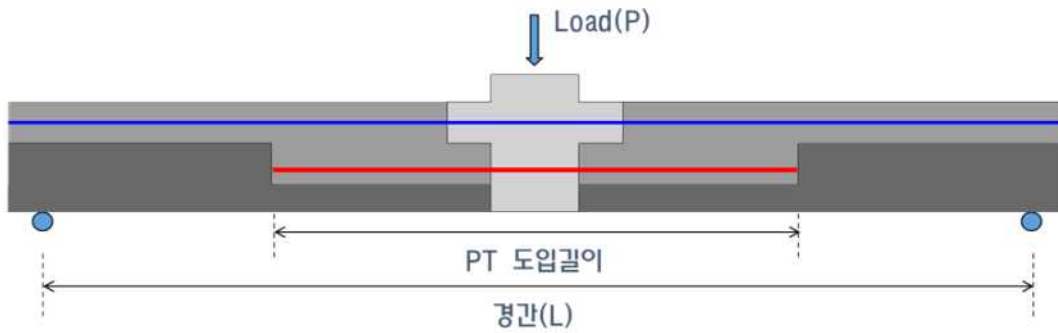
(b) 실험체 7 보 단면



(c) 실험체 8 보 단면

그림 3.6 SP7, 8에 대한 상세도면

실험은 계명대학교에 위치한 첨단건설재료실험센터에서 수행되었으며, 그림 3.7과 같이, 접합부 상부를 면으로 가력하여 진행하였다. 그림 3.8은 각 실험체별 파괴형상 및 하중-변위 관계를 나타내었다.



(a) 실험체 셋팅 개념도

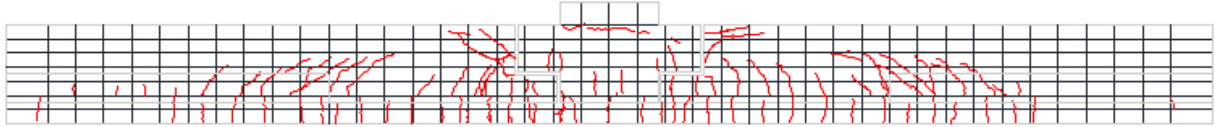


(b) 실제 실험수행 사진

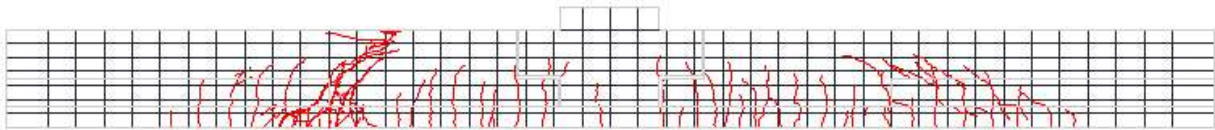
그림 3.7 실험체 셋팅



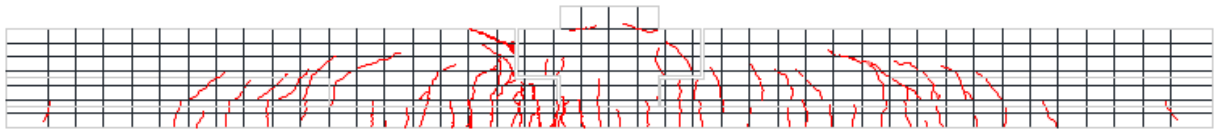
(a) 파괴형상(SP1)



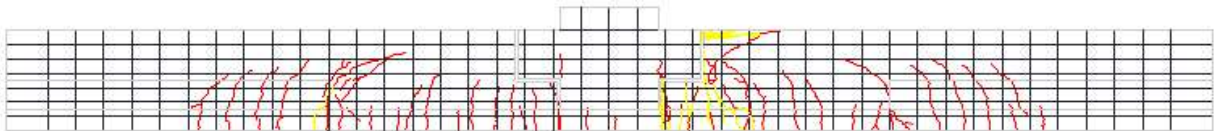
(b) 파괴형상(SP2)



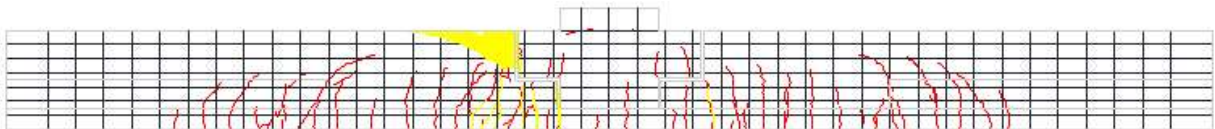
(c) 파괴형상(SP3)



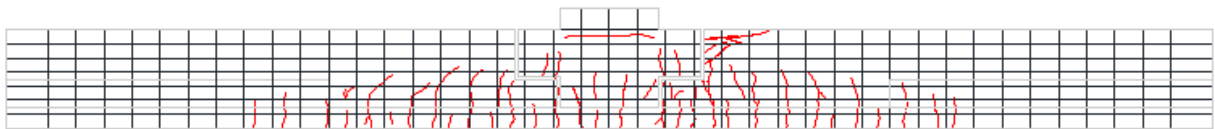
(d) 파괴형상(SP4)



(e) 파괴형상(SP5)



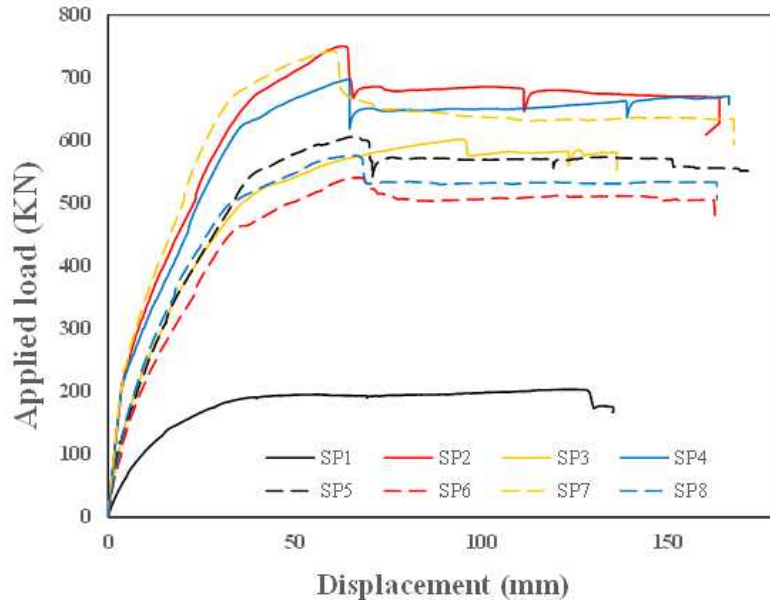
(f) 파괴형상(SP6)



(g) 파괴형상(SP7)



(h) 파괴형상(SP8)



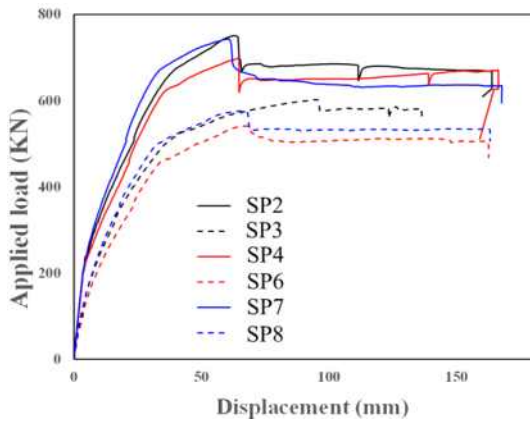
(i) 하중-변위 관계

그림 3.8 실험체의 파괴 형상 및 하중-변위 관계

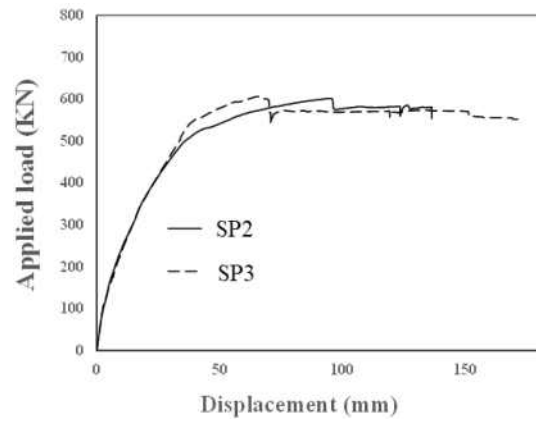
그림 3.9(a)는 슬래브 유무에 따른 거동을 비교하여 나타낸 것이다. 실선으로 표시되어 있는 것이 슬래브가 있는 실험체이며, 점선으로 표시되어 있는 것이 슬래브가 없는 실험체이다. 슬래브가 있는 실험체들이 슬래브가 없는 실험체들에 비해 약 28 % 더 높은 강도를 나타내었다. 그림 3.9(b)는 강연선 쉬스 내 그라우팅 충전 유무에 따른 실험체의 거동을 비교하여 나타내었다. 그라우팅이 충전된 부착(bonded) 실험체와 충전되지 않은 비부착(unbonded) 실험체는 유사한 최대강도와 거동을 나타내었다. 그림 3.9(c)는 다발 강연선과 단일 강연선이 적용된 실험체의 거동을 비교하여 나타낸 것이다. 다발 강연선이 적용된 실험체의 경우에 단일 강연선이 적용된 실험체보다 약 11 %의 강도 증진이 있었으며, 강성 또한 약간 높게 나타내었다. 그림 3.9(d)는 포스트텐션 도입길이가 4.0 m인 실험체와 8.6 m인 실험체의 거동을 비교하여 나타낸 것이다. 강성 및 강도를 포함한 전반적인 거동이 매우 유사한 것으로 나타났으며, 이를 통해 보 중앙에 중공부를 두어 제작함으로써 부재의 양중무게를 감소시키고, 경제성과 시공성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 실험 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 슬래브로 인하여 실험체의 강도 및 강성이 크게 증진되는 것을 확인하였으며, 추후에 접합부 설계 시 슬래브의 영향을 반영하여 보다 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.
- 부재의 양중무게 감소를 위하여 보 중앙부에 중공부를 두어 제작하고, 이를 통해 포스트텐션 도입길이에 차이를 둔 실험체의 거동을 비교한 결과 유사한 수준의 강도 및 강성을 확보하는 것으로 나타났다. 따라서 HPPC 시스템의 경우 부재의 양중무게 감소 및 경제적인 부재 설계를 가능케하기 위하여 중공부를 도입하는 것이 가능하다.
- 그라우팅 충전 유무 및 다발 강연선과 단일 강연선이 적용된 실험체의 거동을 비교하여 나타낸 결과 부착식 다발 강연선이 적용된 실험체가 비부착식 단일 강연선이 적용된 실험체에 비해 강도 및 강성이 일부 증진되는 효과가 나타났다. 따라서, 시공 시 편의에 따라 부착식 또는 비부착식 강연선 그리고 다발 및 단일 강연선에 대한 선택적

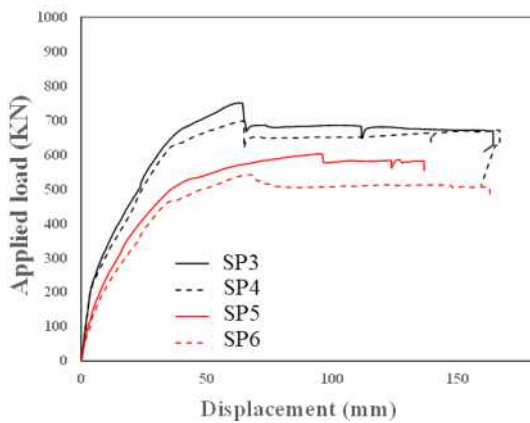
적용이 가능하다.



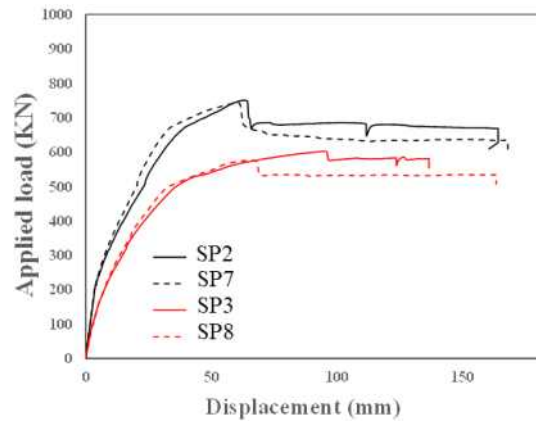
(a) 슬래브 유무에 따른 거동 비교



(b) 그라우팅 유무에 따른 거동 비교



(c) 다발/단일 강연선 적용에 따른 거동 비교



(d) 포스트텐션 도입길이에 따른 거동 비교

그림 3.9 변수별 실험체 거동 비교

나. 접합부 성능검증

(1) 현행 구조기준에 근거한 부재 및 골조설계

HPPC 시스템의 시공과정을 고려한 접합부 상세 설계는 부재 성능검증 단계(3.가)에서 수행한 현행 구조기준에 따른 부재 및 골조설계에 근거하였다. 부재 성능검증과 동일하게 프리캐스트 부재 제작업체와의 사전협의를 통해 제작방법 및 현장적용 시 발생할 수 있는 문제점을 파악하고, 이를 해결할 수 있도록 제작과정을 개선하여 기술의 완성도를 향상시켰다. 그림 3.10은 HPPC 시스템의 보-기둥 접합부 실험체 제작 과정 사진을 나타내었다.



(a) PC 보 제작

(b) PC 기둥 제작

(c) 보-기둥 조립

(d) 긴장력 도입

(e) 그라우팅

(f) 슬래브 타설

그림 3.10 보-기둥 접합부 제작사진

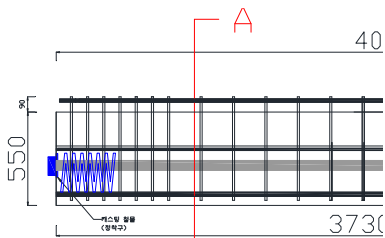
(2) 부재의 접합부 성능시험

(가) 시험계획

접합부 성능시험체는 부재의 휨 성능시험과 유사하게 표 3.2에 나타낸 바와 같이, 슬래브 유·무, 포스트텐션 도입길이, 그라우팅 유·무, 다발(multi) 강연선 및 단일(mono) 강연선 적용, 에폭시 코팅 유·무, 고강도 강연선 적용을 변수로 총 8개를 제작하였다. 기둥의 높이는 시험동 여건에 따라 상부 1,965 mm, 하부 1,365 mm로 계획하였으며, 12개의 D25 철근을 기둥 전체 높이에 연속되게 배근하였다. 기둥에서의 스테럽 간격은 150 mm로 하였으며, 나머지 상세는 휨 성능 시험체와 동일하게 하였다. 그림 3.11 ~ 3.16은 각 시험체별 상세 도면이다.

표 3.2 접합부 성능 실험체 변수

Specimen	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP7	SP8
경간 (m)	8.0							
기둥단면 (m)	0.7 × 0.7							
보단면 (m)	0.5 × 0.7							
포스트텐션 도입길이 (m)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	8.6	4.0
슬래브 유무	유	무	유	무	무	유	유	유
에폭시 코팅 유무	무	무	무	무	무	유	무	무
그라우팅	bonded		unbonded			bonded		
다발/단일 강연선	다발	다발	단일	다발	단일	다발	다발	다발
유효 프리스트레스	1,581							
콘크리트 압축강도 (MPa)	38.6	38	37	39.1	37	38.6	38	38.6
그라우팅 강도 (MPa)	45.8							
철근 강도 (MPa)	400							
강연선 강도 (MPa)	1,860							



(a) 보 입면 철근상세

(b) 기둥 단면

(c) 보 A-A 단면

(d) 보 B-B 단면

(e) 보 C-C 단면

(f) 콘크리트 타설 후 보 A-A 단면

그림 3.11 SP2, 4에 대한 상세도면

(a) 보 입면 철근상세

(b) 기둥 단면

4-D19

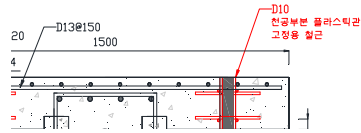
5-D19

6-D19

(c) 보 A-A 단면

(d) 보 B-B 단면

(e) 보 C-C 단면



(f) 콘크리트 타설 후 보 A-A 단면

그림 3.12 SP1, 6, 8에 대한 상세도면

(a) 보 입면 철근상세

(b) 기둥 단면

(c) 보 A-A 단면

(d) 보 B-B 단면

(e) 보 C-C 단면

(f) 콘크리트 타설 후
보 A-A 단면

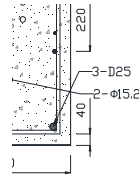
그림 3.13 SP5에 대한 상세도면

(a) 보 입면 철근상세

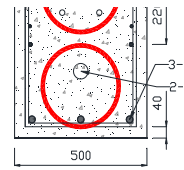
(b) 기둥 단면

550

(c) 보 A-A 단면



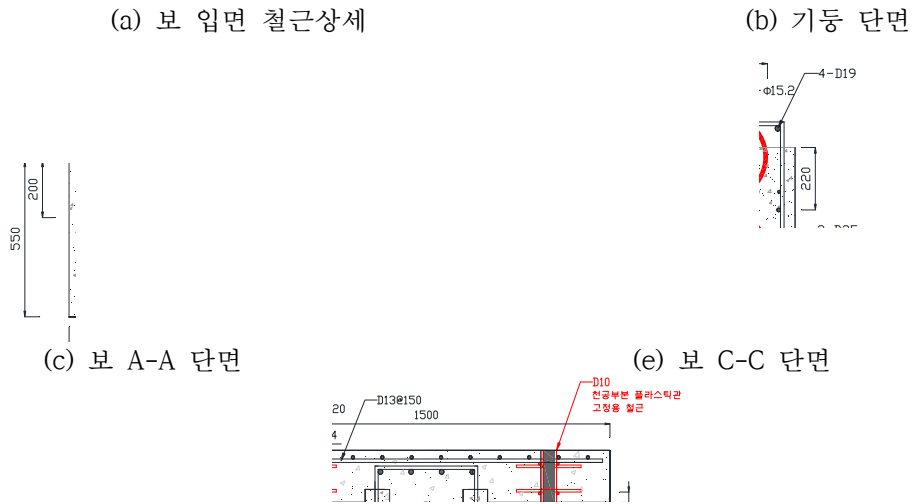
(d) 보 B-B 단면



(e) 보 C-C 단면

(f) 콘크리트 타설 후 보 A-A 단면

그림 3.14 SP3에 대한 상세도면



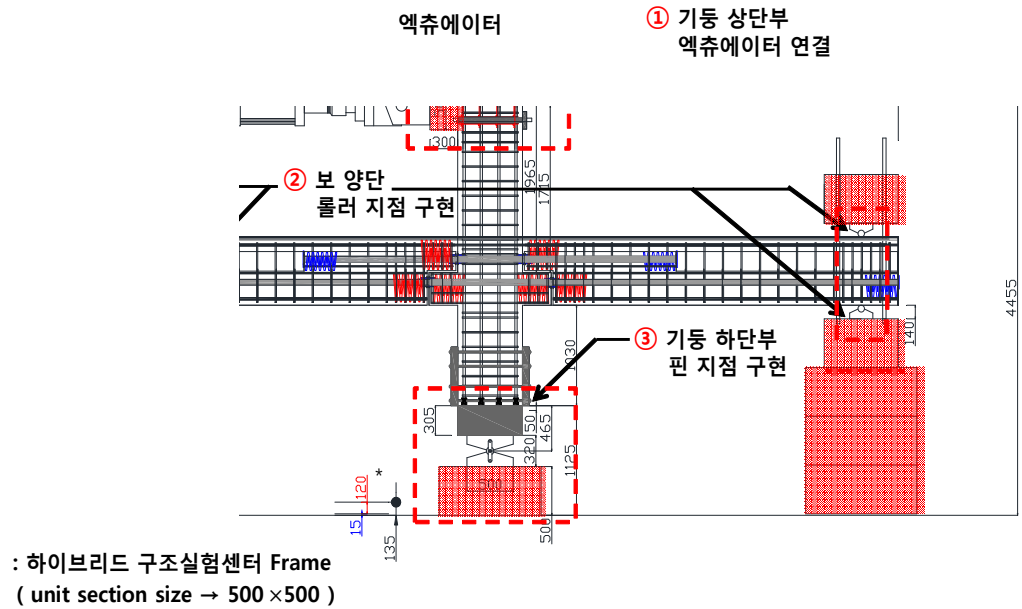
(f) 콘크리트 타설 후 보 A-A 단면
 그림 3.15 SP7에 대한 상세도면

그림 3.16 실험체 기둥에 대한 상세도면

HPPC 시스템의 접합부 성능 평가를 위하여 명지대학교에 위치한 하이브리드 시뮬레이션 센터에서 총 8개의 실험체에 대한 횡하중 반복가력 실험을 수행하였다. 실험은 그림 3.17에 나타낸 바와 같이 보 양단부를 롤러 지점으로 거동하도록 하였으며, 기둥 하단부는 힌지 지점으로 연결하고 기둥 상단부에 액츄에이터를 연결하여 가력하였다. 가력은 ACI 374 report에 준하는 방식으로 하여 층간변위비 0.2 %에서부터 6.0 % 까지 총 12개의 하중 단계로 각각 3회씩 반복가력하였다. 또한, 그림 3.18에 나타낸 바와 같이 실험체 가력은 액츄에이터 변위와 부속 철물에 의한 미끄러짐 등을

LVDTs(Linear Variable Differential Transformers)를 설치하여 계측한 후 이를 보정하여 산출된 유효변위 값으로 가력을 진행하였다.

* 기둥 유효높이 : 3,545 mm

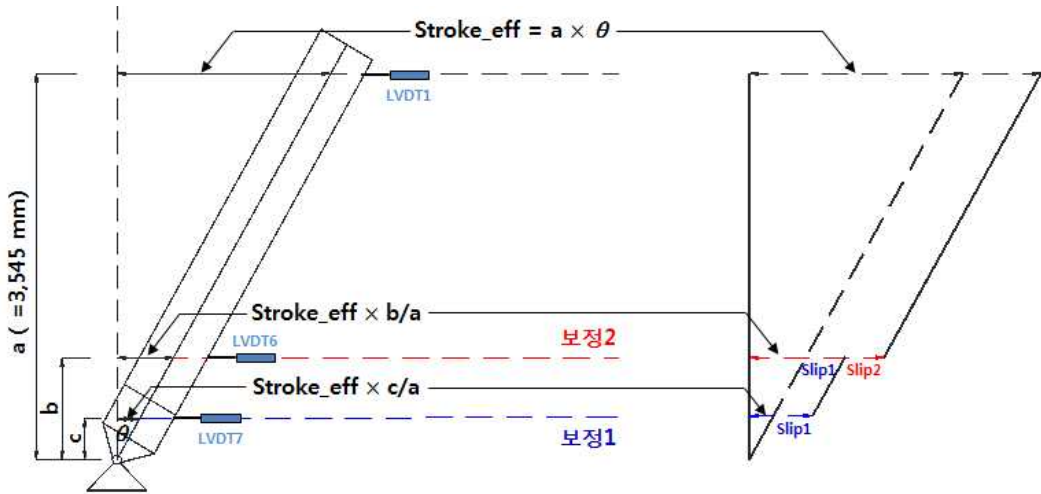


(a) 실험체 셋팅 개념도



(b) 실제 실험수행 사진

그림 3.17 실험체 셋팅



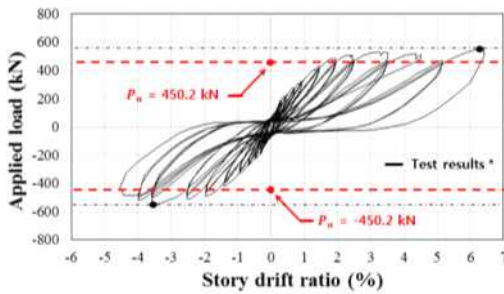
* 본 그림에서 $Stroke_{eff} = Stroke - Slip_1 - Slip_2$ 이다.

$$\therefore Stroke_{eff} = (Stroke - LVDT6 \text{ 측정값}) \times a / (a - b)$$

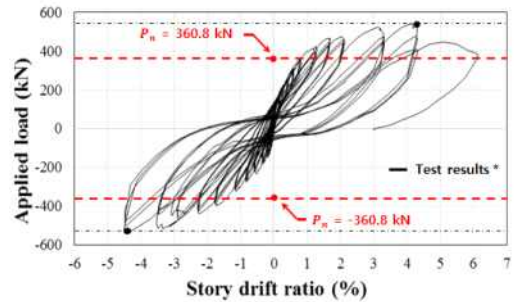
그림 3.18 실험체 데이터 보정 과정

(나) 하중-변위 관계

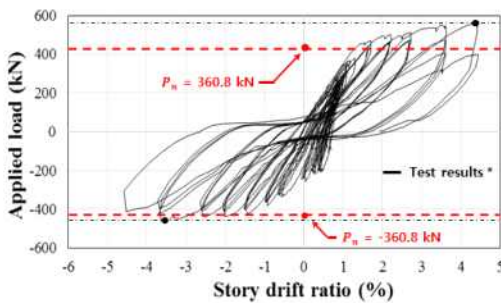
그림 3.19에는 각 실험체들의 하중-층간변위비 관계를 나타내었으며, 표 3.2에는 현행 구조기준을 이용하여 산정한 설계강도 값을 실험체의 실험강도와 비교하여 나타내었다. 설계강도는 실험체가 강기둥-약보의 설계철학에 따라 보의 휨 강도에 도달한 후 최종 파괴되었다고 가정하고, 보의 휨강도를 기둥 상부에 가해지는 횡력으로 치환한 값이다.



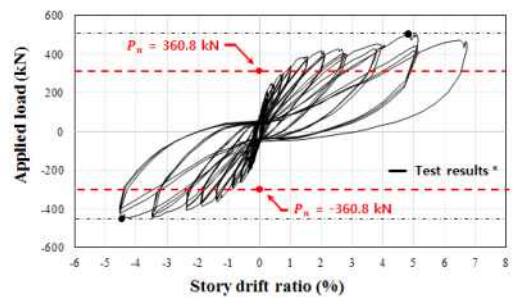
(a) SP1 실험체의 하중-층간변위비 관계



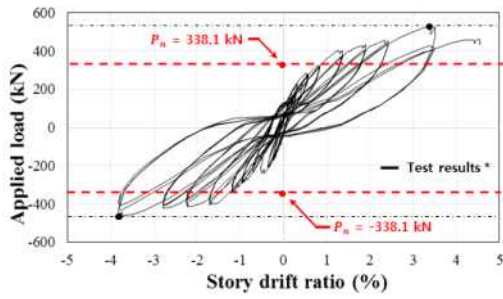
(b) SP2 실험체의 하중-층간변위비 관계



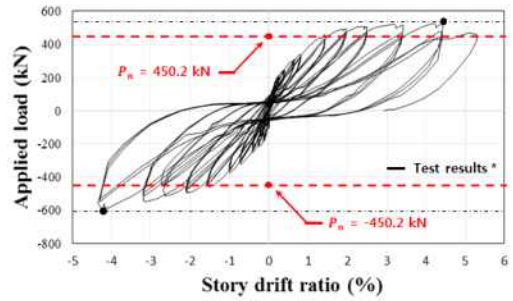
(c) SP3 실험체의 하중-층간변위비 관계



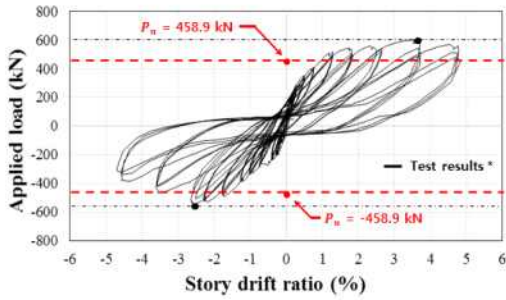
(d) SP4 실험체의 하중-층간변위비 관계



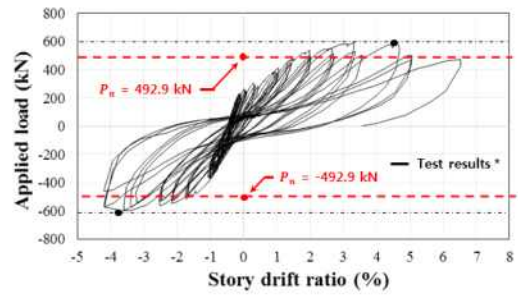
(e) SP5 실험체의 하중-층간변위비 관계



(f) SP6 실험체의 하중-층간변위비 관계



(g) SP7 실험체의 하중-층간변위비 관계



(h) SP8 실험체의 하중-층간변위비 관계

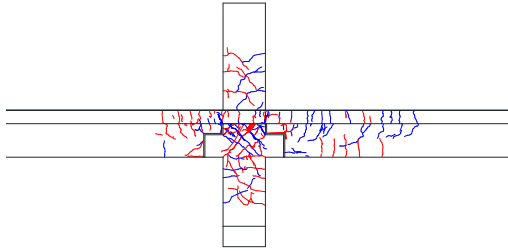
그림 3.19 각 실험체별 하중-층간변위비 관계

표 3.3 각 실험체별 설계강도와 실험강도의 비교

Specimen	설계강도 [kN] (Design strength, P_n)	실험강도 [kN] (Maximum strength, $P_{max, test}$)	강도비 (strength ratio, $P_{max, test} / P_n$)
SP1 정방향	450.2	558.7	1.25
부방향	-450.2	-546.5	1.21
SP2 정방향	360.8	542.1	1.5
부방향	-360.8	-535.8	1.49
SP3 정방향	427.6	558.8	1.31
부방향	-427.6	-461.3	1.08
SP4 정방향	306.8	505.4	1.65
부방향	-306.8	-453.4	1.48
SP5 정방향	338.1	532.1	1.57
부방향	-338.1	-464.2	1.37
SP6 정방향	450.2	532.2	1.18
부방향	-450.2	-595.8	1.32
SP7 정방향	458.9	615.2	1.34
부방향	-458.9	-550.9	1.2
SP8 정방향	492.9	593.0	1.2
부방향	-492.9	-614.4	1.25

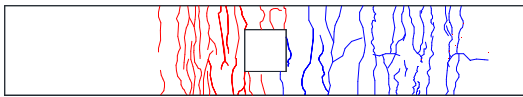
그림 3.20에는 각 실험체의 파괴형상을 나타내었다. 슬래브가 있는 실험체의 경우에는 슬래브가 없는 실험체와 비교하여 상대적으로 패널존에 많은 균열이 발생하였다. 슬래브가 없는 실험체는 보가 휨 강도에 도달한 후 압괴되어 최종적으로 파괴되는 특징을

나타내었다.



(a) SP1

(b) SP2



(c) SP3

(d) SP4

(e) SP5

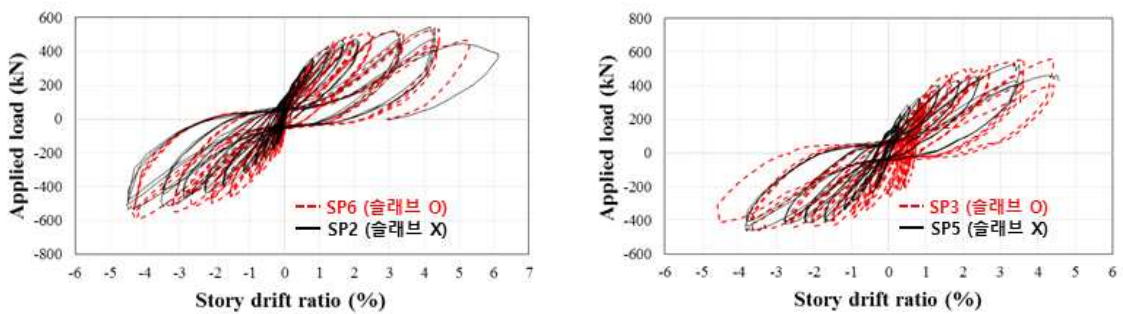
(f) SP6

(g) SP7

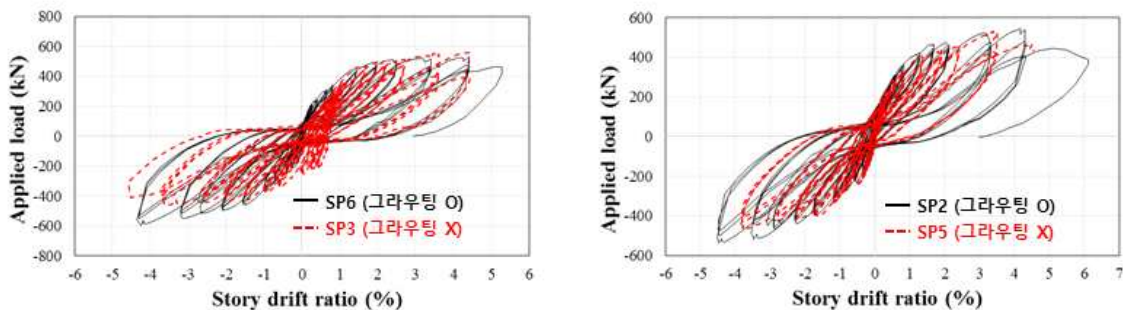
(h) SP8

그림 3.20 각 실험체별 파괴형상

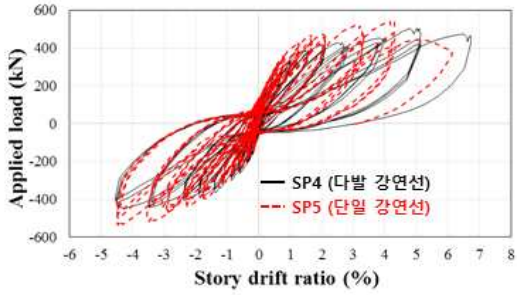
SP1 실험체와 SP6 실험체는 강연선의 에폭시 코팅 유·무를 제외하고 모든 상세가 동일하다. 에폭시 코팅의 효과는 추후에 시간이 경과한 후 내구성능으로서 나타나게 된다. 따라서 에폭시 코팅 여부에 따른 실험체의 구조성능 차이는 없다고 판단하였으며, 본 실험에서는 두 실험체의 거동이 동일하다고 간주하고 분석을 진행하였다. 그림 3.21(a)는 슬래브 유·무에 따른 거동을 비교하여 나타내었다. 슬래브가 없는 실험체(SP2, SP5)의 거동은 붉은색 실선으로 표시하였으며, 슬래브가 있는 실험체(SP3, SP6)의 거동은 검은색 점선으로 표시하였다. 슬래브가 있는 실험체들이 슬래브가 없는 실험체들에 비해 약 3.7 % 더 높은 강도를 나타내어 강도 증진 정도는 미미한 것으로 나타났다. 이는 슬래브가 있는 실험체의 경우 기둥의 강도에 비해 보의 강도가 상대적으로 높아 최종 파괴모드에서 패널존에서 손상이 발생하였으며, 슬래브가 없는 실험체의 경우에는 보의 압괴가 발생하였기 때문이다. 그림 3.21(b)는 강연선 쉬스 내 그라우팅 충전 유·무에 따른 실험체의 거동을 비교하여 나타내었다. 그라우팅이 충전된 부착(bonded) 실험체(SP2, SP6)와 충전되지 않은 비부착(unbonded) 실험체(SP3, SP5)는 최대강도를 포함하여 전반적으로 유사한 거동을 나타내었다. 그림 3.21(c), 3.21(d), 3.21(e)에서는 각각 다발 강연선과 단일 강연선이 적용된 실험체의 거동, 포스트텐션 도입길이가 4.0 m인 실험체와 8.6 m인 실험체의 거동, 2,400 MPa급 고강도 강연선이 적용 유·무에 따른 거동을 비교하여 나타내었다. 결과적으로 실험체들의 전반적인 이력거동은 모두 유사한 것으로 나타났다. 이는, 프리스트레스 전달길이가 포스트텐션 도입길이 4 m에서 힘을 전달하기 충분하며, 중공부 구간에서의 프리스트레스는 실험체의 거동에 기여하는 바가 미미하다는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 부재성능실험에서 언급한 바와 같이, 부재의 양중무게 감소를 위해 보 중앙에 중공부를 두어 제작함으로써 보다 경제적인 부재 설계가 가능할 것으로 보인다. 또한, 시공 시 편의에 따라 부착식 또는 비부착식 강연선 그리고 다발 및 단일 강연선에 대한 선택적 적용이 가능할 것으로 판단된다.



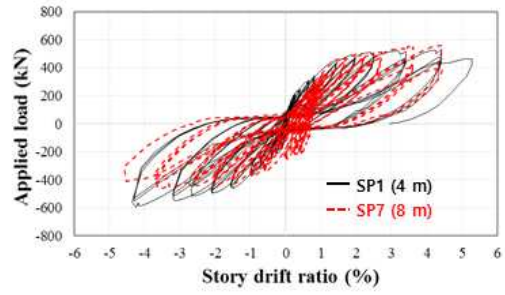
(a) 슬래브 유무에 따른 거동비교



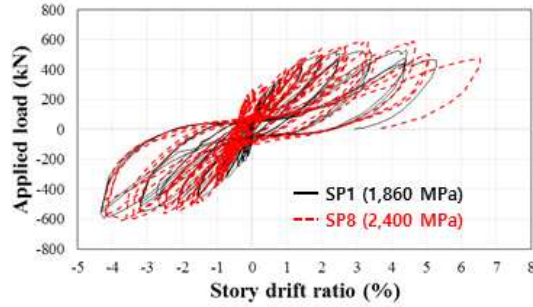
(b) 그라우팅 유무에 따른 거동 비교



(c) 다발/단일 강연선 적용에 따른 거동 비교



(d) 포스트텐션 도입길이에 따른 거동 비교



(e) 2,400 MPa급 고강도 강연선 적용 유무에 따른 거동 비교

그림 3.21 변수별 실험체 거동 비교

(다) ACI 374 허용기준

HPPC 시스템은 기존 PC 시스템과 달리 내진저항 골조로 사용되며, 개발 시스템을 특수모멘트 골조로서 사용하기 위해서는 반복하중에 대한 부재의 내진성능 검증이 필요하다. 현행 구조기준(ACI 318)에 따르면 RC 시스템의 부재 상세를 만족하지 못하는 복합적인 시스템에서 접합부의 실험결과가 ACI374 보고서의 허용기준(acceptance criteria)에 제시된 항목들을 모두 만족하는 경우 특수모멘트 골조로서 간주하여 설계할 수 있도록 하고 있다. 따라서 이 연구에서는 각 실험체의 실험결과가 ACI374 보고서의 허용기준을 만족하는지 여부를 평가하였다. 그림 3.22과 3.23에는 각각 ACI 374 보고서에서 제시하고 있는 허용 기준과 허용되지 않는 이력거동을 나타내었다.

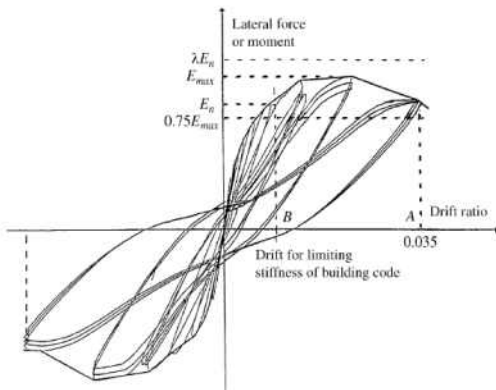


그림 3.22 ACI 374 보고서의 허용기준

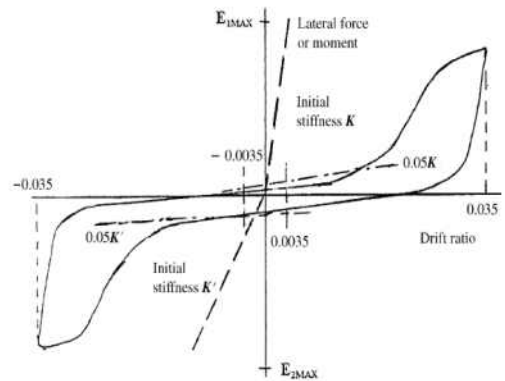


그림 3.23 허용되지 않는 이력거동 예시

(다-1) ACI374 보고서의 허용기준 9.1.1 항목

ACI374 보고서의 허용기준 9.11은 실험체가 설계강도에 도달하였을 때의 층간변위비가 IBC에서 제시하고 있는 허용층간변위비 2.0 %보다 작은 값을 가져야 한다는 규정이다. 이는 실험체의 설계강도가 현행설계기준에서 제시하고 있는 허용층간변위비 이전에서 발생되어야 한다는 의미이다. 표 3.4는 각 실험체별 ACI 374 보고서의 허용기준 9.1.1에 대한 결과값이며, 모든 실험체에서 해당 규정을 만족하는 것으로 나타났다.

표 3.4 ACI 374 보고서 9.1.1에 의한 실험결과 평가

Specimen	설계 강도 도달시의 층간변위비 [%] (Drift ratio at design strength, d_n)	허용층간변위비 [%] (Allowable story drift limit, d_{allow})	적합/부적합 여부
SP1 정방향	1.6	2.0	적합
부방향	-1.65		적합
SP2 정방향	0.82		적합
부방향	-1.45		적합
SP3 정방향	1.27		적합
부방향	-1.44		적합
SP4 정방향	0.81		적합
부방향	-1.02		적합
SP5 정방향	0.93		적합
부방향	-1.19		적합
SP6 정방향	1.54		적합
부방향	-1.51		적합
SP7 정방향	0.99		적합
부방향	-1.57		적합
SP8 정방향	1.64		적합
부방향	-1.53		적합

(다-2) ACI374 보고서의 허용기준 9.1.2 항목

강기둥-약보의 설계 철학을 만족시키기 위하여 실험체의 초과강도계수(specimen overstrength factor, $P_{test,max} / P_n$)가 보-기둥 강도비에 해당하는 설계시의 초과강도계수(design overstrength factor, λ)보다 작은 값을 가져야 한다는 규정이다. 실험체의 초과강도계수는 접합부 면에서의 기둥 단면 휨강도와 보 단면 휨강도의 합을 비로 산정할 수 있으며, 기본적으로 현행구조기준에서는 기둥의 축 하중을 무시하고 슬래브의 철근을 고려하였을 때, 그 값이 1.2를 넘어야 한다고 명시하고 있다. 표 3.5와 같이 슬래브가 없는 실험체들 뿐만 아니라 상대적으로 보에 대한 기둥의 강도비가 낮은, 슬래브가 있는 실험체에서도 해당 규정을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

표 3.5 ACI 374 보고서 9.1.2에 의한 실험결과 평가

Specimen	실험체의 초과강도계수 (Specimen overstrength factor, P_{max} / P_n)	설계시 초과강도계수 (Design overstrength factor, λ)	적합/부적합 여부
SP1 정방향	1.24	1.66	적합
부방향	1.21		적합
SP2 정방향	1.5	2.06	적합
부방향	1.49		적합
SP3 정방향	1.31	1.73	적합
부방향	1.08		적합
SP4 정방향	1.65	2.43	적합
부방향	1.48		적합
SP5 정방향	1.57	2.19	적합
부방향	1.37		적합
SP6 정방향	1.18	1.66	적합
부방향	1.32		적합
SP7 정방향	1.34	1.62	적합
부방향	1.2		적합
SP8 정방향	1.2	1.51	적합
부방향	1.25		적합

(다-3) ACI374 보고서의 허용기준 9.1.3 항목

위 규정과 동일한 조건에서, 층간변위비 3.5 %의 3번째 cycle에서 다음과 같은 규정을 만족해야 한다.

- ① 최대하중($P_{max, 3.5\%}$)이 실험최대하중(P_{max})의 0.75배 이상이어야 한다.
- ② 에너지소산 면적비(relative energy dissipation, β)가 0.125 이상이어야 한다. 여기서 에너지소산 면적비는 식 3.4와 같이 정의한다. 여기서 그림 3.24는 이에 대한 부가설명이다.

그림 3.24 ACI 374 보고서에서 제시하는 에너지소산 면적비

$$\beta = A_h / (E_1 + E_2) (\theta'_1 + \theta'_2) \quad (3.4)$$

- ③ 층간변위비 0.35 %으로부터 -0.35 %를 이은 할선 강선(secant stiffness, $K_{s, 3.5\%}$) 이 초기 강성(initial stiffness, K_i)의 0.05배 이상이어야 한다,

이는 허용규정을 검토하고자 하는 대상들이 층간변위비 3.5 %에서 강도, 강성 그리고 에너지소산 면적비가 유효한지에 대한 규정이다. 표 3.6 ~ 3.8은 각 규정에 대한 평가결과이며, 실험체 SP3의 경우 층간변위비 3.5 %에서의 최대강도가 실험체최대강도의 75 %에 비해 약 2.9 % 정도 미미하게 못미치는 결과를 제외하고는 모든 실험체에서 해당 규정을 만족하는 것으로 나타났다. SP3의 경우 그림 3.19(c)와 같이, 하부슬립에 의해 정방향으로 층간변위비 -0.5 %정도로 편향되어 가력되었기 때문에 다음과 같은 낮은 강도비를 보인 것으로 판단되며 정상적으로 실험이 진행되었다면, 실험체 SP3 또한 규정을 만족할 것으로 판단된다.

표 3.6 ACI 374 보고서 9.1.3-1에 의한 실험결과 평가

Specimen	실험최대강도 $\times 0.75$ [kN] (Maximum strength, P_{max})	층간변위비 3.5 %에서의 최대강도 (Maximum strength at drift ratio 3.5 %, $P_{3.5\%}$)	적합/부적합 여부 ($P_{3.5\%} \geq P_{max}$)
SP1 정방향	419.03	456.24	적합
부방향	-409.88	-487.11	적합
SP2 정방향	406.58	448.2	적합
부방향	-401.85	-442.83	적합
SP3 정방향	419.1	406.87	부적합
부방향	-345.98	-394.58	적합
SP4 정방향	379.05	420.62	적합
부방향	-340.05	-408.05	적합
SP5 정방향	399.08	399.08	적합
부방향	-348.15	-396.03	적합
SP6 정방향	399.15	442.25	적합
부방향	-446.9	-495.77	적합
SP7 정방향	461.4	486.01	적합
부방향	-413.18	-415.27	적합
SP8 정방향	444.75	504.31	적합
부방향	-460.8	-538.22	적합

표 3.7 ACI 374 보고서 9.1.3-2에 의한 실험결과 평가

Specimen	에너지소산 면적비 (Relative energy dissipation, β)	적합/부적합 여부 ($\beta \geq 0.125$)
SP1	0.190	적합
SP2	0.195	적합
SP3	0.197	적합
SP4	0.186	적합

SP5	0.196	적합
SP6	0.177	적합
SP7	0.212	적합
SP8	0.197	적합

표 3.8 ACI 374 보고서 9.1.3-3에 의한 실험결과 평가

Specimen	할선강성 [kN/mm] (Secant stiffness, K_s)	초기 강성 $\times 0.05$ [kN/mm] (Initial stiffness, K_I)	강성비 (Strength ratio, K_s / K_I)	적합/부적합 여부 ($K_s / K_I \geq 1$)
SP1	3.709	0.969	3.83	적합
SP2	5.694	1.406	4.05	적합
SP3	4.272	1.510	2.83	적합
SP4	3.467	1.536	2.26	적합
SP5	4.788	1.144	4.19	적합
SP6	4.755	1.807	2.63	적합
SP7	6.967	1.383	5.04	적합
SP8	6.849	1.564	4.38	적합

ACI 374 보고서의 허용기준에 따라 HPPC 시스템의 보-기둥 접합부 성능 검증을 실시한 결과 비정상적으로 가력된 실험체 하나를 제외하고 모든 실험체에서 이를 만족하였음을 알 수 있었으며, 이를 통해 HPPC 시스템이 변형능력, 강도, 강성면에서 모두 특수모멘트 골조로 준하는 수준의 성능을 보유하고 있는 것으로 나타났다. 현재 국내의 경우 2016년에 발생한 경주지진, 2017년에 발생한 포항지진으로 인하여 내진설계의 필요성에 대한 시민들의 경각심이 높아지고 있으며, 다양한 구조물의 내진성능 확보에 대한 수요가 높아지고 있다. 이와 맞물려 중·약진 지역에 해당하는 국내의 적합한 내진성능과 PC 시스템의 고질적인 문제점인 사용성능 및 내구성능 부족에 초점을 맞춘 시스템의 수요 또한 급증하고 있다. 위 실험결과에서 나타낸 바와 같이 HPPC 시스템은 내진 저항골조로서 우수한 성능을 보유하고 있다. 뿐만 아니라 특수모멘트 골조로서 HPPC 시스템을 적용시, 보다 경제적인 설계가 가능할 것으로 보이며, 이를 근거로 지하구조 뿐만 아니라 상부구조에서도 기존의 RC 시스템과 경쟁할 수 있을 것으로 판단된다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 모든 실험체에서 설계기준 및 강도를 만족함과 동시에 모든 변수에 대해서 약간의 강도 차이를 제외하고는 유사한 거동을 나타냈다. 따라서, HPPC 시스템의 시공 시에 현장 상황에 따라 각 변수에 대한 선별적인 사용이 가능할 것으로 판단된다.
- ACI 374 보고서에 준하여 HPPC 시스템 접합부의 성능검증을 수행한 결과 모든 실험체에서 대부분의 규정을 만족하는 것으로 나타났으며, 이를 통해 개발 HPPC 시스템이 특수 모멘트 골조로서 충분한 강도, 강성, 변형능력을 보유하고 있는 것으로 평가할 수 있다.

다. 골조 성능검증

1차년도와 2차년도에는 각각 HPPC 공법을 적용한 개별 부재 및 보-기둥 접합부의 성능을 검증하였다. 이러한 연구를 바탕으로 3차년도에는 2경간 골조 실험체를 제작하여 시스템 레벨에서 구조성능을 검증하고자 하였다. 특히, HPPC 시스템이 적용되지 않은 일반적인 RC 실험체에 대한 실험을 수행하고, HPPC 시스템을 적용한 실험체의 실험결과와 비교함으로써 구조성능을 정량적으로 검증하고 개발 시스템의 우수성을 입증하였다. 또한, 전체 골조에 대하여 접합부의 거동이 미치는 영향을 분석하기 위하여 하이브리드 시뮬레이션을 별도로 수행하였다.

(1) 현행 구조기준에 근거한 부재 및 골조설계(골조구조성능실험체)

많은 연구자들에 의해 각기 다른 형태의 골조구조성능 실험이 수행되었다. 일반적으로 많이 사용되는 골조구조성능 실험방법은 그림 3.24와 같이 보-기둥의 라멘 골조를 제작하고 기둥 하단부가 고정단으로 되어있는 상태에서 최상층 보의 층고와 동일한 위치에 액츄에이터를 연결한 후, 이를 횡방향으로 반복가력하는 방법이다. 이와 같은 실험방법은 일반 건물의 최하층을 기준으로 목표 시스템의 골조 성능을 판단하는 방법으로, 그림 3.25에 나타난 바와 같이 실험체는 기둥 하단부에서 가장 큰 모멘트 하중을 받게 되고, 이에 따라 기둥 하단부에서 소성 힌지가 우선적으로 형성된다. 이후에는 기둥의 내력이 떨어지게 되면서 하중의 재분배가 발생하는 거동을 보이게 된다.

그림 3.24 기존 골조구조성능실험방법

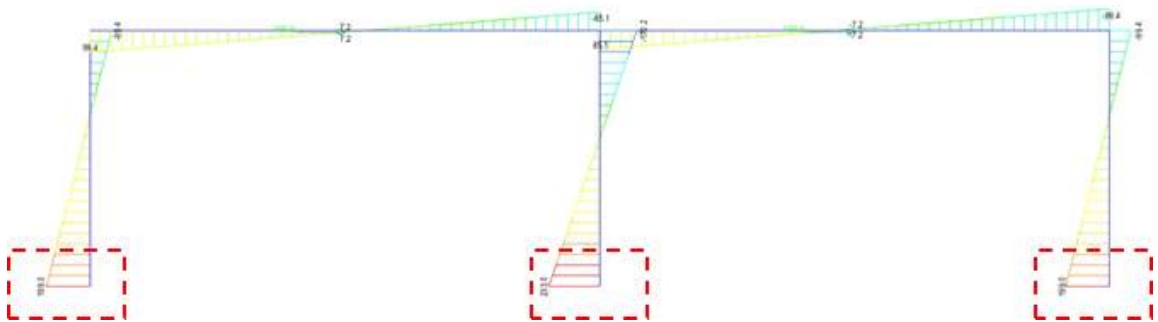


그림 3.25 탄성해석을 통한 골조의 모멘트 분포도

결과적으로 골조의 거동이 기둥에 의해 지배되는데, 이는 HPPC 시스템의 특징이라고 할 수 있는 접합부의 거동을 파악하고자 할 때 결과에 큰 간섭을 유발한다. 이 연구에서는 기존 PC 기둥을 그대로 사용하였기 때문에 HPPC 시스템의 전체 거동을 실험적으로 검증할 때에는 기둥의 거동이 HPPC 전체 시스템의 거동에 미치는 영향을 최소화할 수 있도록 실험을 계획하고자 하였다.

그림 3.26에는 이 연구에서 수행한 실험 셋팅 방법을 나타내었다. 골조가 횡방향으로 하중을 받게 되면, 각각의 기둥에서는 상, 하부에 반대방향의 최대 모멘트가 발생하게 되는데, 이 때 기둥의 중앙에서는 모멘트가 0이 되는 변곡점이 위치하게 된다. 즉, 최하층을 제외한 골조의 중간층에서는 기둥의 모멘트가 0이 되는 변곡점이 존재하게 되므로 그림 3.26에 나타낸 바와 같이 기둥의 변곡점 위치에 힌지 지점 철물을 배치하였다. 이러한 셋팅 방식은 골조의 거동이 기둥에 의해 지배되는 현상을 최소화 할 수 있으며, 접합부의 거동을 면밀히 관측할 수 있다는 장점이 있다. 1차년도와 2차년도 연구를 통해 HPPC 시스템의 부재 단위에서의 우수성 및 다양한 변수에 대해 개발 시스템의 적용성을 확인하였다면, 3차년도 연구에서는 골조 레벨에서의 전체적인 거동을 파악하고 이를 일반 RC 시스템과 직접적으로 비교함으로써 HPPC 시스템의 우수성을 입증하고자 하였다.

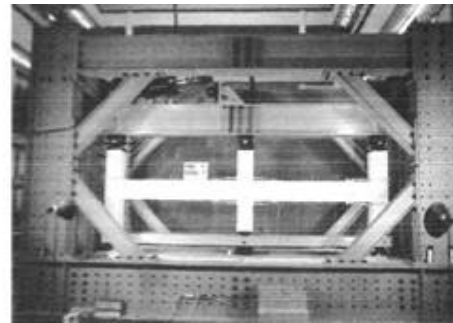
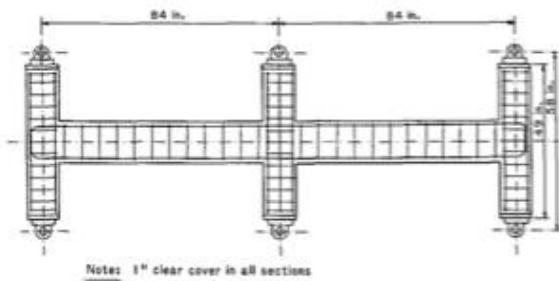


그림 3.26 기존 골조구조성능실험방법

현행 구조기준에서 제시하는 설계 방법에 따라 골조 설계를 수행하였으며, 프리캐스트 부재 제작업체와의 사전협의를 통해 제작방법 및 현장적용 시 발생할 수 있는 문제점을 파악하고, 이를 해결할 수 있도록 제작과정을 개선하여 기술의 완성도를 향상시켰다. 그림 3.27과 그림 3.28에는 HPPC 및 RC 시스템의 보-기둥 골조 실험체 제작과정을 나타내었다.



(a) PC 보 제작



(b) PC 기둥 제작



(c) 보-기둥 조립



(d) 긴장력 도입



(e) 토평 콘크리트 타설



(f) 제작완성

그림 3.27 골조구조성능실험체(PC) 제작사진



그림 3.28 골조구조성능실험체(RC) 제작사진

(2) 부재의 골조구조성능 실험

(가) 실험계획

표 3.9에 나타난 바와 같이 총 4개의 실험체를 제작하였다. 실험체는 실험실 여건에 맞추어 1/2 스케일로 제작하였으며, 사이즈 축소에 따른 영향을 고려하여 부재 사이즈 및 배근량을 결정하였다. 경간은 4.0 m이며, 기둥과 슬래브의 단면은 각각 0.35 m × 0.35 m, 0.25m × 0.35 m 이다.

표 3.9 골조구조성능실험체 변수

Specimen	PPP_A*	PPP_B*	PFP_A*	R_A**
경간 (m)	4.0			
기둥단면 (m)	0.35 × 0.35			
보단면 (m)	0.25 × 0.35			
슬래브	무			
포스트텐션	4.0			무

도입길이 (m)								
그라우팅	unbonded						무	
$\rho_{s+} (\rho_{s-})$	0.0029	0.0044	0.0029	0.0044	0.0016	0.0032	0.0067	0.01
$\rho_{p+} (\rho_{p-})$	0.0019	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0	0
M_c / M_b	2.75		1.64		2.39		2.04	
에폭시 코팅 유무	무		무		무		무	
콘크리트 압축강도 (MPa)	43		43		43		62	
그라우팅 강도 (MPa)	45.8							
철근 강도 (MPa)	400							
강연선 강도 (MPa)	1,860							

* HPPC 실험체

** RC 실험체

기둥의 유효 높이는 기존 층고(1/2 스케일 기준)의 절반에 해당하는 1,0 m로 제작하였다. PPP_A 실험체는 기존 실험체이며, PPP_B 실험체는 골조 레벨에서 기둥에 의한 보의 구속 영향을 파악하기 위하여 낮은 보-기둥 강도비(M_c / M_b)로 제작하였다. PPP_A, PPP_B 실험체의 보 하부에는 D13 철근을 2개 배치하였으며, 15.2 mm 강연선 1개가 기둥을 관통하도록 제작하였으며, 상부에는 D13 철근 3개와 15.2 mm 강연선 1개가 기둥을 관통하도록 제작하였다. PPP_A 실험체와 PPP_B 실험체 보의 배근 상세는 모두 동일하게 제작되었다. PFP_A 실험체의 보 하부에는 D10 철근을 2개 배치하였으며, 15.2 mm의 강연선 1개가 기둥을 관통하도록 제작하였다. 또한 상부는 D10 철근 2개와 15.2 mm 강연선 2개가 기둥을 관통하도록 하였다. PFP_A 실험체는 PPP_A 실험체와 비교하여 강연선과 철근의 비율을 변화시켜 강연선 양에 따른 구조거동 변화를 파악하고자 하였으며, 강연선은 모두 강연선의 극한응력인 1,860 MPa의 0.6배에 달하는 응력을 도입하였다. R_A 실험체는 일반적인 RC를 대표하는 실험체로서 보와 기둥이 일체로 타설되었다. 보의 경우 하부에는 D19 철근 2개, 상부에는 D19 철근 3개가 기둥을 관통하도록 배근하였으며, 설계기준에 준하여 250 mm 길이를 갖는 90도 갈고리로 기둥 콘크리트 내부에 정착되었다. HPPC 시스템을 적용한 실험체들의 경우에는 보의 하부에 철근이 관통되지 못하므로 R_A 실험체의 설계강도와는 약간의 차이가 발생되었다. 또한, 재료 실험결과, R_A 실험체의 콘크리트 강도 및 철근의 항복강도가 다소 높게 나타나서 R_A 실험체의 설계강도가 HPPC 실험체보다 높게 산정되었다. 스티럽은 기존 실험체들과 동일하게 모두 폐쇄스티럽으로 배치되었으며 접합부 부근에서는 100 mm 간격으로, 그 이외의 구간에서는 200 mm 간격으로 배근하였다. 기둥의 철근 상세는 A series(PPP_A, PFP_A, R_A) 실험체에서 12개의 D19 철근으로 기둥 전체 높이에 연속되게 배근하였으며, B series(PPP_B) 실험체에서는 8개의 D13 철근, 4개의 D16 철근이 기둥 전체 높이에 연속되게 배근하였다. 스티럽 간격은 접합부 부근에서는 50 mm 간격으로 그 이외의 구간에서는 100 mm 간격으로 배근하였다. 기둥의 상·하부에는 힌지지점철물과 연결할 수 있는 철판과 강봉이 연결되어 있으며, 기둥 및 보의 단부에는 압축력으로 인한 부재의 콘크리트 할렬파괴를 방지하고자 스파이럴 철근이 배근되었다. 그림 3.29 ~ 3.32에는 각 실험체별 상세 도면을 나타내었다.

(a) 보 입면 철근상세

(b) 보 A-A 단면

(c) 보 B-B 단면

(d) 콘크리트 타설 후
보 A-A 단면

(e) 좌측 기둥 및
코벨부 도면

(f) 중앙 기둥 및
코벨부 도면

(g) 우측 기둥 및
코벨부 도면

(h) 중앙 기둥 입면

그림 3.29 PPP_A에 대한 상세도면

(a) 보 입면 철근상세

(b) 보 A-A 단면

(c) 보 B-B 단면

(d) 콘크리트 타설 후
보 A-A 단면

(e) 좌측 기둥 및
코벨부 도면

(f) 중앙 기둥 및
코벨부 도면

(g) 우측 기둥 및
코벨부 도면

(h) 중앙 기둥 입면

그림 3.30 PPP_B에 대한 상세도면

(a) 보 입면 철근상세

(b) 보 A-A 단면

(c) 보 B-B 단면

(d) 콘크리트 타설 후
보 A-A 단면

(e) 좌측 기둥 및
코벨부 도면

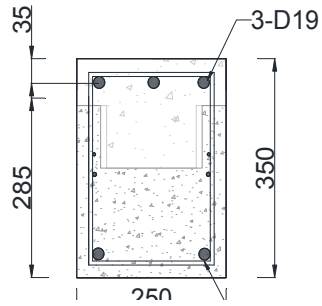
(f) 중앙 기둥 및
코벨부 도면

(g) 우측 기둥 및
코벨부 도면

(h) 중앙 기둥 입면

그림 3.31 PFP_A에 대한 상세도면

(a) 보 입면 철근상세



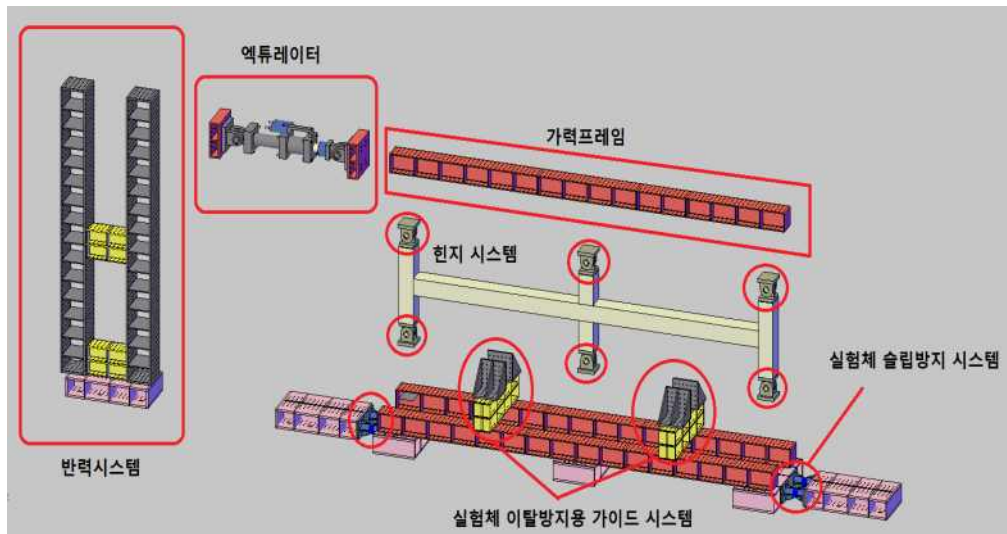
(b) 보 A-A 단면

(c) 기둥 단면

(d) 중앙 기둥 입면

그림 3.32 R_A에 대한 상세도면

실험은 한양대 에리카 캠퍼스의 초대형구조실험동에서 진행되었다. 실험 셋팅은 그림 3.33과 같이 모든 기둥의 상하부에 힌지 지점 철물을 연결하고 상단부의 힌지 지점 철물들의 변위를 동일하게 가력하기 위하여 각 철물을 높은 강성의 보조철물로 연결하였다. 가력은 접합부 성능실험과 동일하게 ACI 374 보고서의 가력 상세에 준하여 액츄에이터를 보조철물에 연결하여 수행하였다.



(a) 실험체 셋팅 개념도



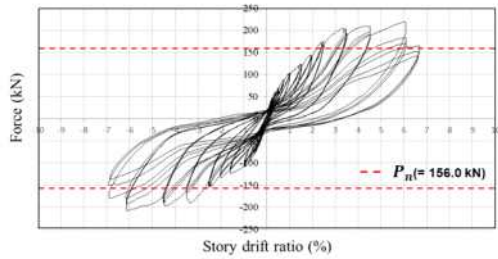
(b) 실제 실험수행 사진

그림 3.33 실험체 셋팅

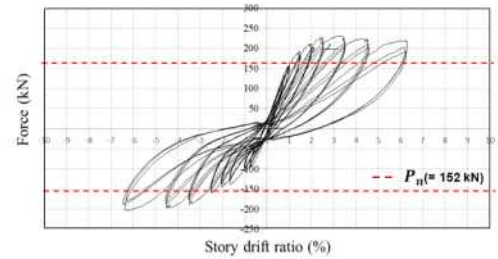
(나) 하중-변위 관계

실험체 변위는 기둥 3개에 대하여 부속 철물에 의한 미끄러짐 등을 실시간으로 보정하여 유효변위 값을 각각 산출하였고, 이에 대한 평균값으로 가력을 진행하였다. 그림 3.34는 각 실험체의 하중-층간변위비 관계를 나타내었다. 실험체의 설계강도는 강기둥-약보의 설계 철학을 실험체가 만족한다고 가정하고, 보의 휨 강도를 기둥 상부에 걸리는 횡력으로 치환하여 계산하였다. 모든 실험체의 최대실험강도는 현행설계기준에 준하여 계산한 설계강도보다 큰 값을 나타내었다. 그림 3.35 ~ 3.38에는 각 실험체별 파괴형상을 나타내었다. PPP_A 실험체는 층간변위비 0.5 %에서 다수의 휨 균열이 발생하였으며, 층간변위비 1.0 %에서 패널존 및 기둥의 균열이 관측되었다. 최종적으로는 층간변위비 6.0% ~ 7.0%에서 보의 단부에 순차적으로 압괴가 발생하였다. PPP_B와 PFP_A 실험체는 층간변위비 0.5 %에서 다수의 휨 균열이 발생하였으며, 층간변위비 0.75 %에서 패널존 및 기둥의 균열이 발생하였다. 또한 PPP_A 실험체와 유사하게 층간변위비 6.0% ~ 7.0%에서 보의 단부에 순차적으로 압괴가 발생하였다. R_A 실험체는 층간변위비 0.25 %에서 다수의 휨 균열이 발생하였으며, 층간변위비 0.5 %에서 다수의 기둥 균열이 관측되었다. 층간변위비 0.75 %에서 패널존의 균열이 발생하였으며, 층간

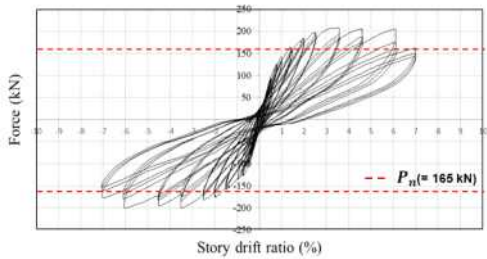
변위비 증가에 따라 지속적으로 패널존 및 기둥에서의 균열이 심화되었다. 최종적으로는 층간변위비 6.0 %에서 패널존 및 기둥에 심각한 손상이 발생하여 실험체가 파괴되었다. 패널존 및 기둥의 손상으로 인한 구조물의 파괴는 충분한 연성이 확보되지 않은 채로 갑작스런 건축물의 붕괴를 유발할 수 있기에 지양해야 되는 부분이다. R_A 실험체와 비교하여 HPPC series 실험체들(PPP_A, PPP_B, PFP_A)은 패널존 및 기둥의 손상이 상대적으로 작게 나타났으며, 충분한 연성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.



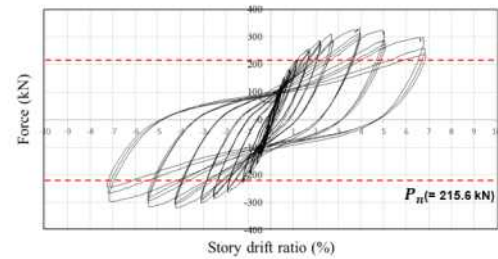
(a) PPP_A 실험체의 하중-층간변위비 관계



(b) PPP_B 실험체의 하중-층간변위비 관계

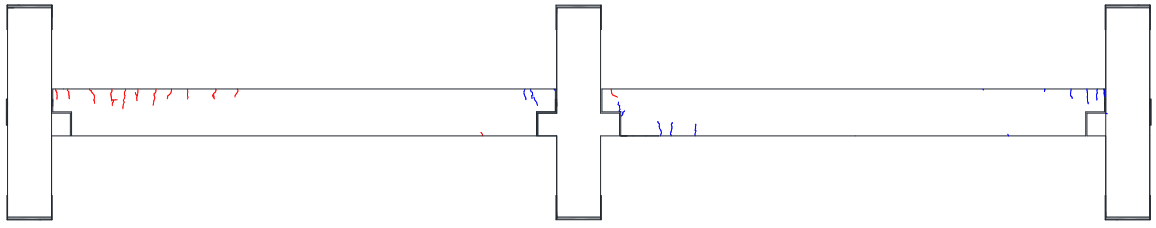


(c) PFP_A 실험체의 하중-층간변위비 관계

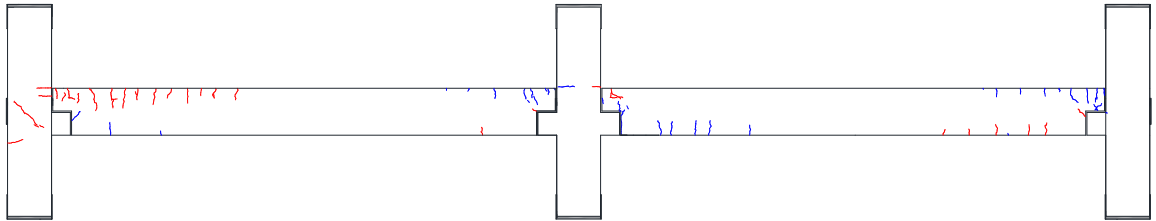


(d) R_A 실험체의 하중-층간변위비 관계

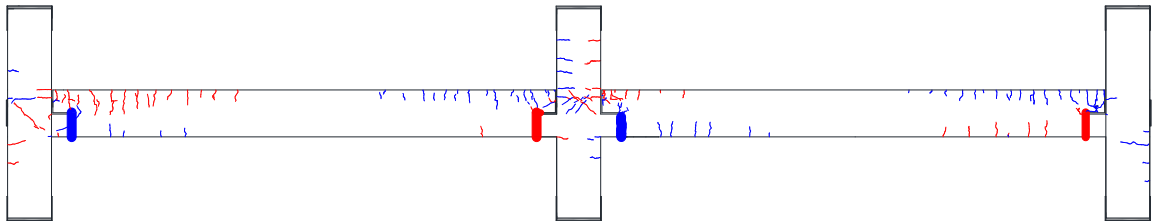
그림 3.34 각 실험체별 하중-층간변위비 관계



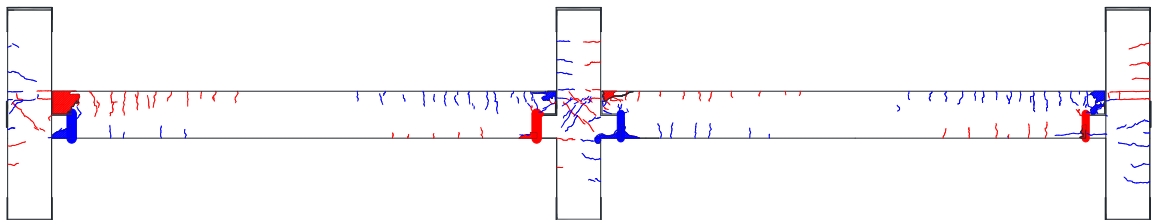
(a) 층간변위비 0.5 %



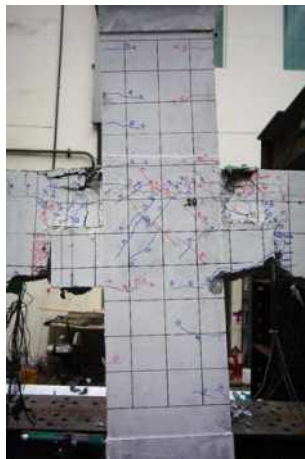
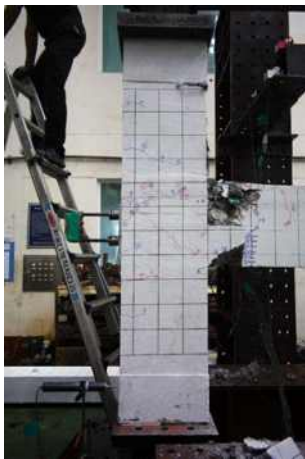
(b) 층간변위비 1.0 %



(c) 층간변위비 2.5 %

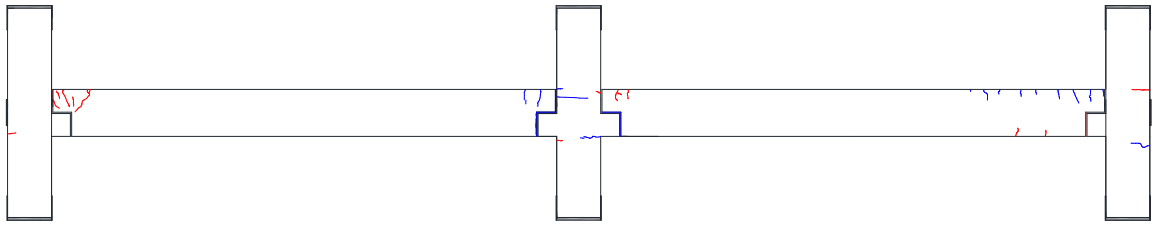


(d) 층간변위비 6.0 % ~ 7.0 %

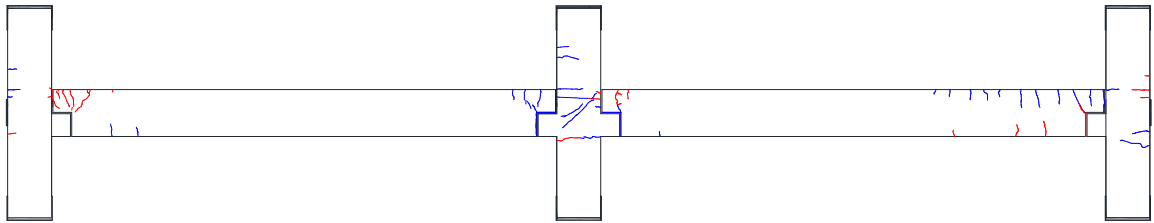


(e) 실제 파괴형상

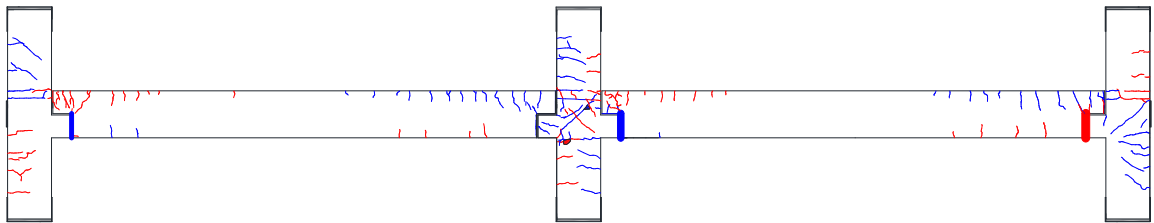
그림 3.35 PPP_A 실험체의 균열형상



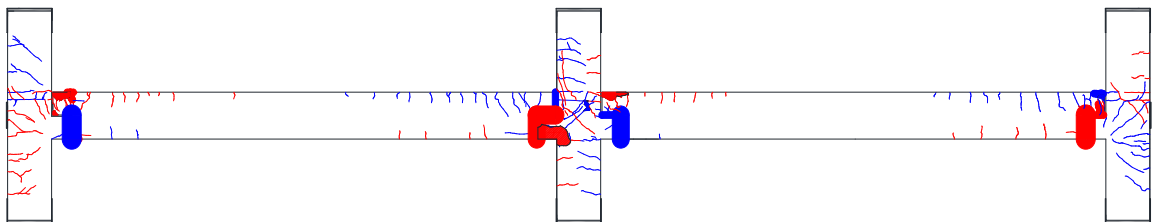
(a) 층간변위비 0.5 %



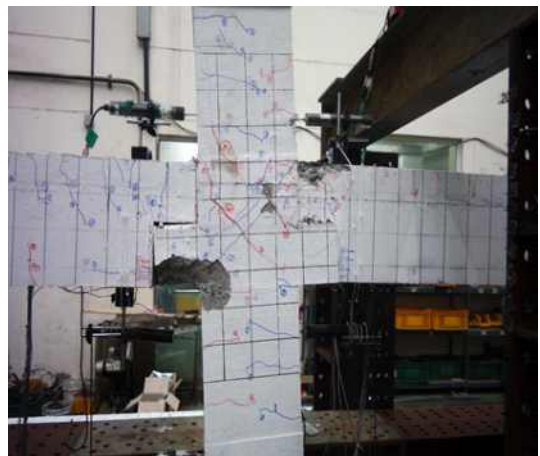
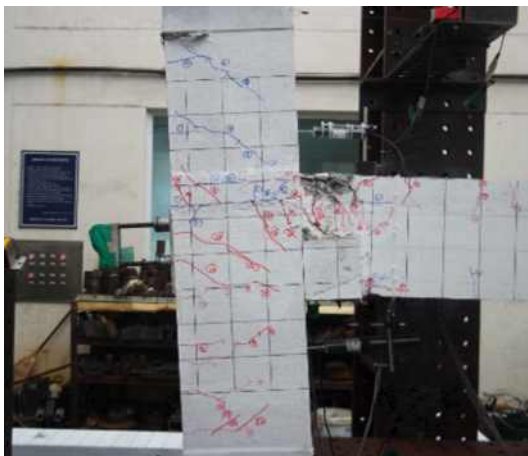
(b) 층간변위비 1.0 %



(c) 층간변위비 2.5 %

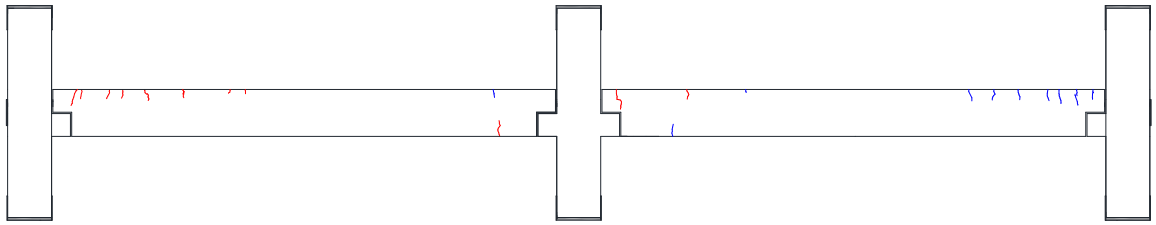


(d) 층간변위비 6.0 % ~ 7.0 %

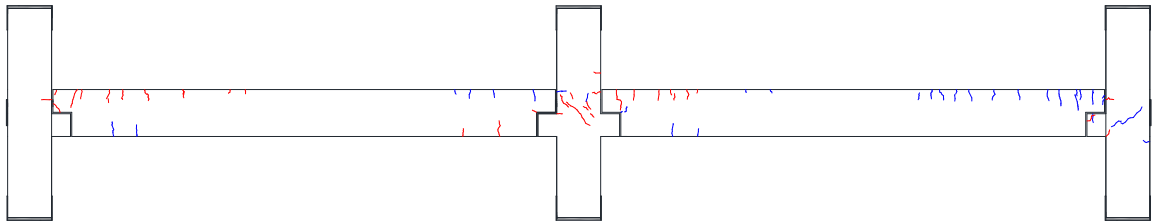


(e) 실제 파괴형상

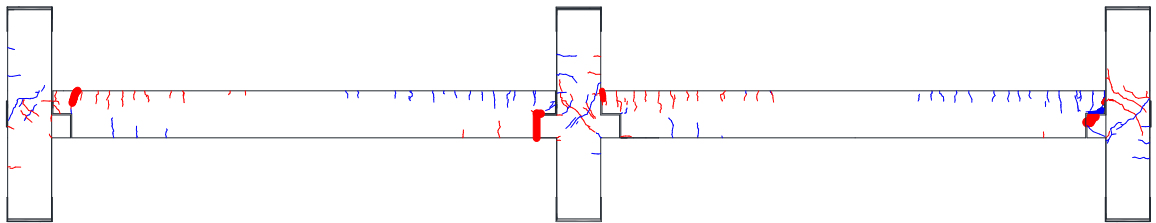
그림 3.36 PPP_B 실험체의 균열형상



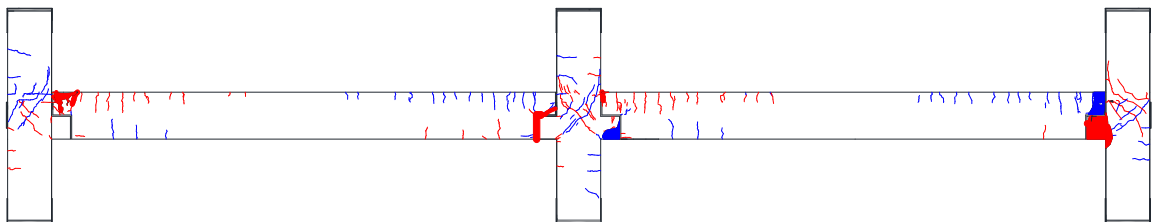
(a) 층간변위비 0.5 %



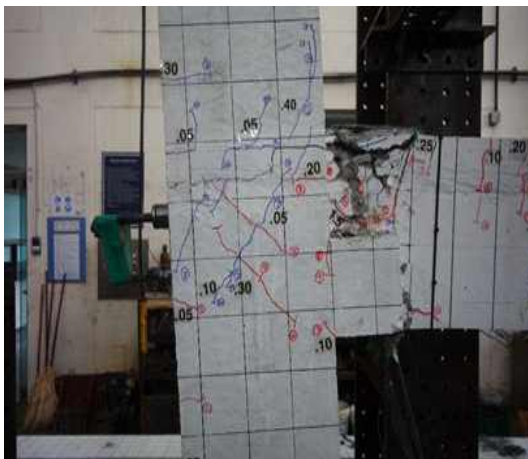
(b) 층간변위비 1.0 %



(c) 층간변위비 2.5 %

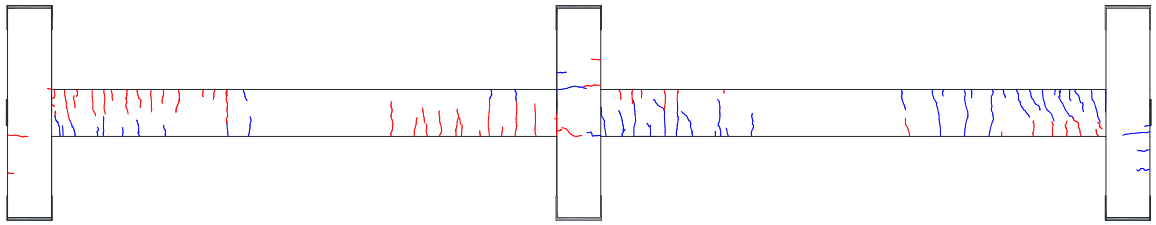


(d) 층간변위비 6.0 % ~ 7.0 %

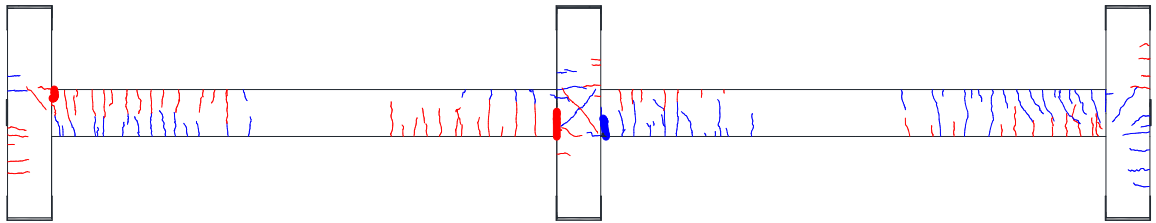


(e) 실제 파괴형상

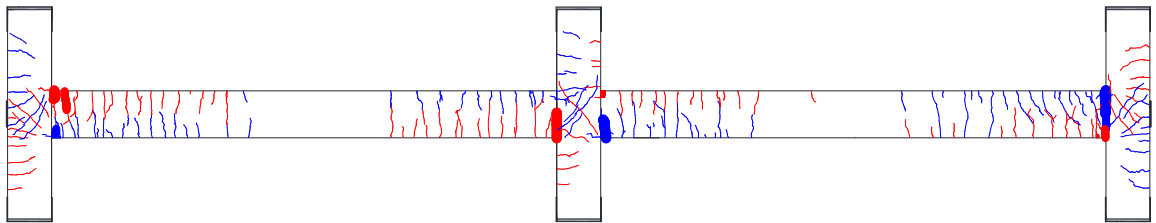
그림 3.37 PFP_A 실험체의 균열형상



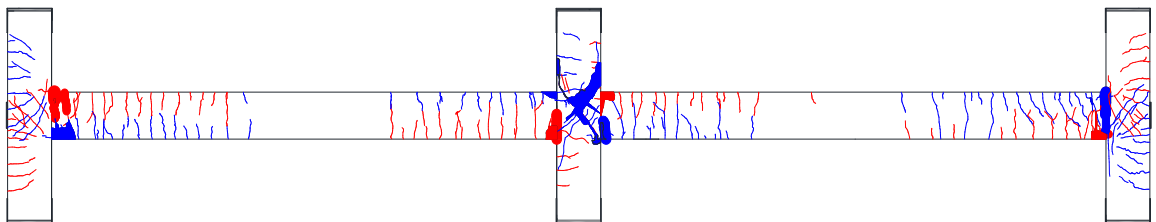
(a) 층간변위비 0.5 %



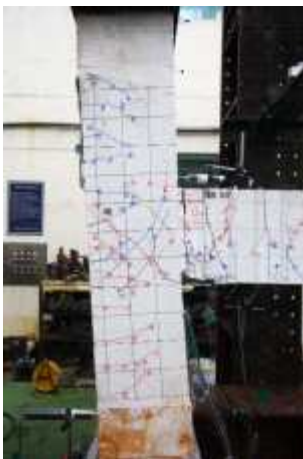
(b) 층간변위비 1.0 %



(c) 층간변위비 2.5 %



(d) 층간변위비 6.0 % ~ 7.0 %



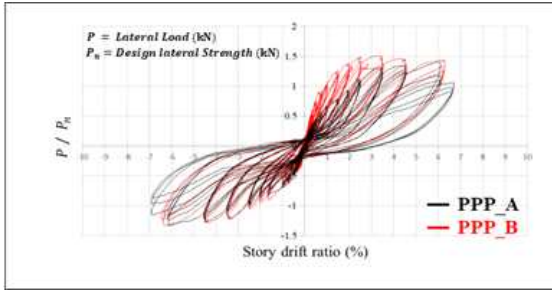
(e) 실제 파괴형상

그림 3.38 R_A 실험체의 균열형상

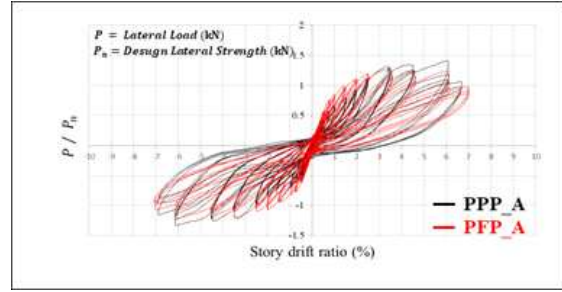
그림 3.39에는 각 실험체를 변수별로 비교하여 나타내었다. x축은 층간변위비이며, y축은 실험체의 실제 하중을 설계하중으로 나눈 값이다. 그림 3.39 (a)에 나타난 것과 같이, 보-기둥 강도비에 따른 거동 차이는 크지 않는 것으로 나타났다. 현행 구조기준에 따른 내진설계시 강기둥-약보의 설계철학을 만족시키기 위하여, 기둥-보의 강도비를 1.25 이상으로 할 것을 요구하고 있다. 통상적으로 실무에서는 기둥-보의 강도비가 1.25 이상 2.0 이하가 되도록 설계를 수행한다. 다만 전체 골조 시스템에서는 그 경간이 작을 경우, 양 단부에 있는 외곽 기둥이 보를 구속하게 된다. 보에서 소성힌지가 발생하고 난 이후의 거동에서, 보는 양쪽으로 팽창하고자 하지만 이를 기둥이 구속함에 따라서, 보의 길이방향 변형은 억제된다. 이러한 이유로 보는 기존의 설계강도에 비해 높은 강도 값을 가지게 되고, 기둥에는 더 많은 휨모멘트가 발생하면서 기둥의 손상이 커지게 된다. 다만, 이 실험에서는 기둥의 손상정도를 제외하고는 거동의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

그림 3.39 (b)에는 강연선 배근비에 따른 거동을 비교하여 나타내었다. 일반적으로 포스트텐션이 더 많이 도입되어 있는 PFP_A에서 그림 3.40와 같이 이상적인 원점지향변형 회복(self-centering) 거동을 나타낼 것으로 예상되었으며, 그림에서 보는 바와 같이 실험결과 또한 유사하게 나타났다. PFP_A 실험체는 PPP_A 실험체에 비하여 낮은 잔류변형 값을 보였으며, 그림 3.34(c)에서 나타난 바와 같이 PFP_A 실험체는 이상적인 원점회귀거동을 나타내었다. 다만, PFP_A 실험체는 상대적으로 많은 긴장력이 도입되었기 때문에, 패널존에서의 콘크리트 스트럿의 하중 부담이 다소 커진 것을 알 수 있었다.

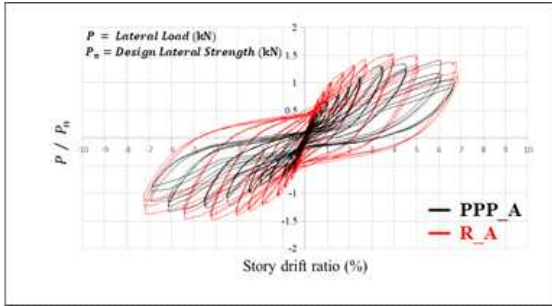
그림 3.39 (c)와 (d)는 HPPC 시스템과 기존의 RC 시스템을 비교하여 나타내었다. HPPC 시스템으로 구성된 실험체(PPP_A, PFP_A)는 낮은 하중 수준에서부터 높은 하중 수준까지 낮은 잔류변형 값을 나타내었다. 이와 달리 R_A 실험체는 낮은 하중레벨에서도 잔류변형 값이 큰 것으로 나타났다. 표 3.10은 층간변위비 3.5 %, 4.5 %, 6.0 %에서 각 실험체별 잔류변형 값을 나타내었다. 이 연구에서는 재하된 하중이 제거된 이후에 회복되는 과정에서 하중이 0에 근접할 때 남아 있는 변형을 잔류변형이라고 정의하였다. 강진지역에서 구조물이 잔류변형을 유발하는 국부적인 큰 변형을 경험하게 되면 부재의 에너지 소산 값이 높아지며, 이에 따라 구조물 전체가 우수한 내진성능을 가지는 것으로 평가한다. 이는 강진지역에서 큰 에너지 소산율이 구조물 전체의 변형을 억제하는 효과를 가지기 때문이다. 다만, 국내와 같은 중·약진지역에서는 적절한 내진성능과 더불어 우수한 사용성 및 복원성을 확보함으로써 피해복구 비용을 최소화할 필요가 있다. 이러한 사용성이나 복원성과 같은 내진성능목표는 적절한 잔류변형 제어를 통해 달성할 수 있다. 따라서, 이 연구에서는 국내에서 지향하는 내진성능목표와 부합하는지를 실험적으로 확인함과 동시에 사용성 및 복원성이 우수한지를 잔류변형의 크기를 통하여 판단하였다.



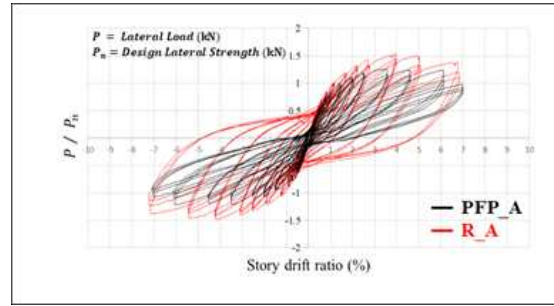
(a) 보-기둥 강도비에 따른 거동 비교



(b) 강연선 배근비에 따른 거동 비교



(c) HPPC 시스템과 RC 시스템의 거동 비교
(PPP_A vs. R_A)



(d) HPPC 시스템과 RC 시스템의 거동 비교
(PFP_A vs. R_A)

그림 3.39 변수별 실험체 거동 비교

그림 3.40 원점지향변형 회복(Self-centering) 거동

표 3.10 각 실험체별 잔류변형 값

Specimen	충간변위비 3.5 % 잔류변형 [%]		충간변위비 4.5 % 잔류변형 [%]		충간변위비 6.0 % 잔류변형 [%]	
	정방향	부방향	정방향	부방향	정방향	부방향
PPP_A	0.75	-0.6	1.25	-0.85	2.0	-1.44
PPP_B	0.72	-0.55	1.2	-0.82	2.3	-1.8
PFP_A	0.56	-0.3	0.67	-0.38	0.93	-0.55
R_A	1.95	-1.89	2.83	-2.72	4.27	-4.0

(다) 접합부 전단성능

일반적으로 구조물에 하중이 가해지면 구조물이 변형하게 되고, 이러한 변형이 구조물의 탄성구간 내에 존재하면 구조물은 하중 제거 후에 원래의 모습으로 복원되지만, 탄성구간을 초과하여 소성변형을 경험하는 경우에는 하중이 제거된 이후에도 구조물이 일정 이상의 변형이 회복되지 않는다. 이러한 변형을 구조물에서는 잔류변형이라고 정의한다. 일반적인 RC 시스템에서 강기둥-약보로 설계된다면, 보가 항복한 이후 기둥-보 접합부의 변형이 크게 증가하며 경사균열이 발생한다. 이와 같은 기둥-보 접합부의 손상은 보수·보강이 어렵고, 심한 경우 접합부 파괴에 의해 건물이 붕괴하는 경우가 발생하기도 한다. 기존 PC 시스템의 경우, 부재의 조립과정에서 발생하는 접합부들이 다수 존재하며, 이러한 접합부들에서 균열이 발생하는 경우가 많다. HPPC 시스템에서는 포스트텐션 공법을 적용함으로써 콘크리트에 도입되는 압축력으로 초기 균열을 억제하고, 하중 작용시 잔류변형을 감소시킬 수 있다는 장점이 있다. 표 3.10에 나타난 바와 같이 HPPC 시스템이 적용된 실험체의 잔류변형은 RC 실험체의 잔류변형에 비해 약 1/3 수준의 값을 나타내었다.

그림 3.41에는 RC 시스템과 HPPC 시스템의 내부 접합부 패널존에서의 전단 거동을 나타내었다. 패널존에 가해지는 전단력은 철근의 부착력으로 전달되는 힘과 기둥 하부에 작용하는 전단력의 차로 산정할 수 있으며, 이를 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다. 여기서 V_{jh} 는 패널존의 수평전단강도, T_1 은 우측 보의 하부철근의 인장력, T_2 는 좌측 보의 상부철근의 인장력, T_{f1} 와 T_{f2} 는 각각 상, 하부 강연선의 인장력, V_{col} 은 상부기둥에서 패널존으로 가해지는 전단력이다.

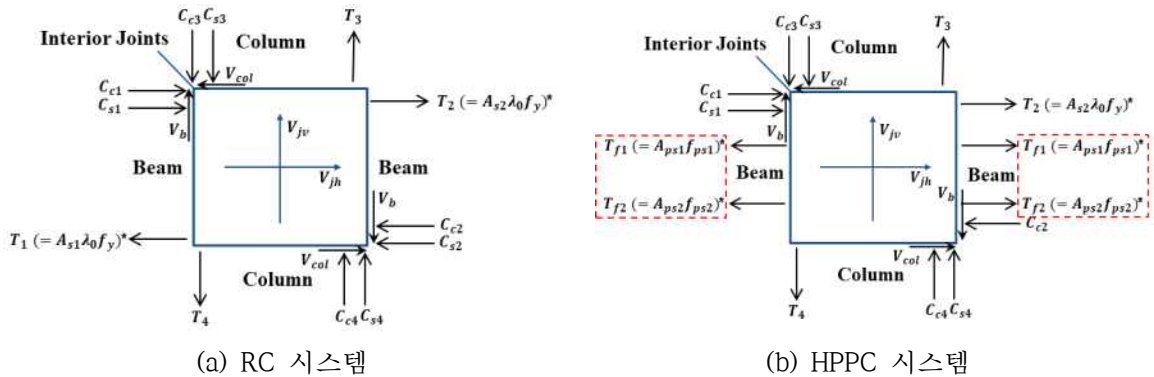
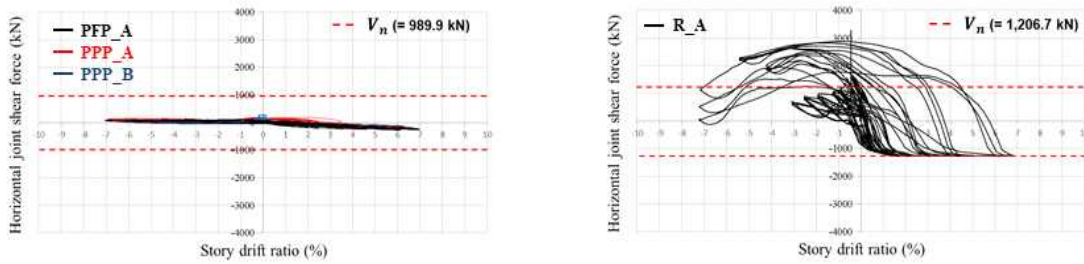


그림 3.41 내부 접합부 패널존에서의 전단 메커니즘

그림 3.42에는 실험체에서 패널존에 전달되는 전단력을 식 3.5 및 3.6을 통해 산정하여 나타내었다. 빨간색 점선은 현행설계기준에서 제시하고 있는 내부접합부에서의 설계 전단강도이다. RC 시스템에서는 HPPC 시스템에 비하여 큰 전단력이 작용하는 것으로 나타났으며, 이에 따라 그림 3.32와 같이 패널존에서 최종 파괴가 발생한 것으로 판단된다.

$$\text{RC에서, } V_{jh} = T_1 + T_2 - V_{col} \quad (3.5)$$

$$\text{HPPC에서, } V_{jh} = T_{f1} + T_{f2} + T_2 - V_{col} \quad (3.6)$$



(a) HPPC 시스템

(b) RC 시스템

그림 3.42 각 실험체별 내부접합부 패널존의 전단력

(라) 손상도(Damage Index)

HPPC 시스템과 RC 시스템에서 층간변위비 증가에 따른 손상정도를 정량적으로 파악하기 위하여 Damage Index(DI)를 산정하였다. 이 연구에서 사용한 DI 모델은 Cao et al. (2011)에 의해 제시한 모델로서, 그림 3.43에 나타난 것과 같이 하중-변위 관계를 토대로 산출한 에너지 값을 회복가능한 에너지(E_{rec})와 잔류되는 에너지($E_{non-rec}$)로 구분한 후, 이에 대한 관계식을 도출하여 DI 값을 산정하는 방법이다. DI 값을 산정하는 식은 아래 식 3.7과 같다.

그림 3.43 에너지 변수(E_{rec} , $E_{non-rec}$)

$$DI = \left[\frac{E_{non-rec}}{E_{non-rec} + E_{rec}} \right]^{\alpha(N-i)} \quad (3.7)$$

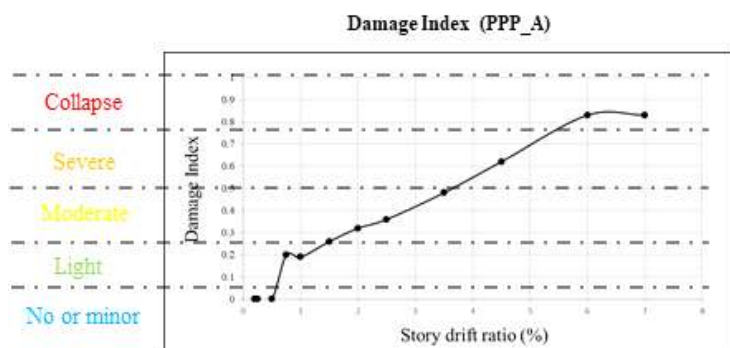
여기서 $E_{non-rec}$ 는 한 사이클에 대한 에너지량, E_{rec} 은 같은 사이클에서의 회복가능한

에너지량, α 는 반복가력 횟수에 따른 상수, N 은 파괴시에 발생하는 에너지량 ($E_{h, collapse}$)과 항복시에 발생하는 에너지량(E_y)의 비, i 는 $E_{non-rec}$ 와 E_y 의 비를 나타낸다. DI 값은 구조물의 탄성단계에 있을 때에는 0의 값을 가지고, 구조물의 붕괴시에는 1의 값을 가진다. 식 3.7의 지수에 표현된 $\alpha(N-i)$ 에 의해 항복단계부터 붕괴시점까지 점진적으로 손상정도가 증가하며, 중간 단계에서의 손상정도는 전체에너지에 대한 잔류에너지의 비율로 산정하도록 하고 있다. 즉, 잔류에너지가 높으면 높을수록 큰 손상이 발생한 것으로 판단할 수 있으며, DI 값을 토대로 구조물의 손상정도를 표 3.11과 같이 나타낼 수 있다.

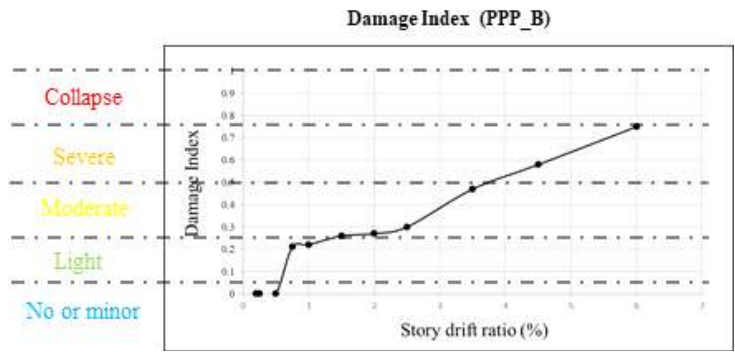
표 3.11 DI값에 따른 구조물의 손상정도

Damage index (DI)	Description
0 ~ 0.05	No or minor
0.05 ~ 0.25	Light
0.25 ~ 0.50	Moderate
0.50 ~ 0.75	Severe
0.75 ~ 1.00	Collapse

실험체의 하중-변위 곡선에 근거하여 식 3.7으로 산정된 실험체별 DI 값을 그림 3.44 및 표 3.12에 나타내었다. HPPC series 실험체(PPP_A, PPP_B, PFP_A)는 약 1 %의 층간 변위비에서 중간(Moderate)정도의 손상을 받은 것으로 나타났으며, 약 3~4 %의 층간 변위비에서 심각한 손상을 받는 단계로 넘어가는 것으로 나타났다. 반면 RC 실험체(R_A)는 1 % 층간변위비에서 중간 정도의 손상 단계로 넘어간 이후, 급격히 손상이 증가하면서 2 %의 층간변위비가 되기 전에 이미 심각한 손상단계로 넘어가는 것으로 나타났다. IBC, ASCE 및 국내 건축구조기준에서는 건물의 분류에 따라 허용층간변위비를 제시하고 있으며 설계단계에서 이 허용층간변위비를 넘지 못하도록 하고 있는데, 이 허용층간변위비의 최대값인 2.0 %에서 RC 실험체는 심각한(Severe) 손상 정도를 보이는 반면에, HPPC 실험체는 보통(Moderate) 수준으로 손상이 제어되는 것을 알 수 있었다. 또한, 파괴시점인 6.0 ~ 7.0 %의 층간변위비에서도 HPPC 시스템은 0.9 이하를 나타낸 반면, RC 시스템은 구조물의 완전한 붕괴에 해당하는 DI=1에 해당하는 값을 나타내었다. 마지막으로 그림 3.45는 각 실험체별 DI 값을 비교하여 나타내었다.

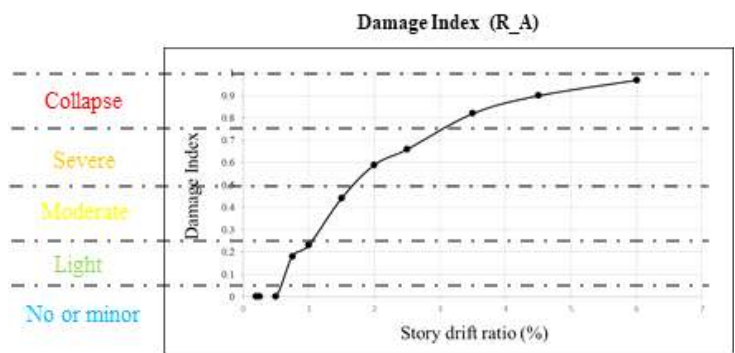


(a) PPP_A 시스템



(b) PPP_B 시스템

(c) PFP_A 시스템



(d) R_A

그림 3.44 각 실험체별 DI값

표 3.12 DI값에 따른 구조물의 손상정도

Drift ratio [%]		~ 0.75	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5	3.5	4.5	6.0	7.0
PPP_A	E_h [kN · m]	/	43	61	182	213	313	590	902	1440	1360
	E_{rec} [kN · m]		98	156	349	324	443	618	781	881	675
	DI		0	0.20	0.19	0.26	0.32	0.36	0.48	0.62	0.83
PPP_B	E_h [kN · m]	/	60	93	182	259	322	637	926	1395	/
	E_{rec} [kN · m]		134	197	349	497	580	725	862	939	
	DI		0	0.21	0.22	0.26	0.27	0.30	0.47	0.58	
PFP_A	E_h [kN · m]	/	76	114	236	313	404	631	820	1080	1137
	E_{rec} [kN · m]		137	183	334	483	620	828	1023	1165	1120
	DI		0	0.22	0.26	0.29	0.30	0.32	0.40	0.46	0.56
R_A	E_h [kN · m]	/	88	165	450	998	1332	2396	3087	4174	/
	E_{rec} [kN · m]		203	316	504	586	660	761	728	648	
	DI		0	0.18	0.23	0.44	0.59	0.66	0.82	0.90	

Collapse

Severe

Moderate

Light

No or minor

R_A
PPP_A
PFP_A
PPP_B

그림 3.45 각 실험체별 DI 값 비교

3차년도에 수행한 2경간 골조시스템의 해석적·실험적 연구를 통해 HPPC 시스템이 RC 시스템과 비교하여 접합부 손상 및 잔류변형과 같은 부분에서 우수한 구조성능을 나타냄을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 HPPC 시스템이 내진저항골조에 적용되기에 충분할 것으로 판단되며, 지하구조 및 상부구조에서 기존의 RC 및 PC 시스템과 비교하여 보다 선진화된 기술로서 자리매김할 수 있을 것으로 기대된다.

(3) 하이브리드 시뮬레이션

(가) 실험계획

하이브리드시뮬레이션은 부재 또는 일부 골조의 실험과 전체 골조의 해석을 동시에 수행함으로써 실제 부재의 거동을 전체골조에 직접적으로 반영할 수 있는 방법이다. 일반적으로 구조해석을 수행하고자 하는 골조에서 구조 거동에 가장 큰 영향을 미칠

것으로 판단되는 부재를 실제 실험 대상으로 하고, 나머지 부분에 대해서는 수치해석으로 진행하는 실험방법이다. 해석모델에 지진파 또는 반복하중을 가하여 주요 부재가 경험하는 변위를 얻게 되고 해당 변위만큼을 실제 실험에 재하한 후, 이 때 계측된 부재의 힘을 다시 해석모델로 전송한다. 이를 반복적으로 수행하면서 주요 부재 및 전체 건물의 거동을 관측할 수 있게 된다. 전체 골조를 지진파 또는 반복하중을 가하여 실험을 수행하기에는 매우 많은 비용이 필요함과 동시에 실험 수행이 매우 어려우며, 전체 골조를 수치모델로 만드는 경우에는 수치모델과 실제 부재의 거동 사이에 오차가 발생할 수 있다. 따라서 하이브리드 시뮬레이션은 기존의 골조실험과 비교하였을 때, 적은 비용으로 합리적인 구조물의 응답을 도출할 수 있다. 이 연구에서는 접합부에 적합한 하이브리드 시뮬레이션 방법을 개발하고, 1개의 철골 접합부 및 HPPC 시스템 보-기둥 접합부 3개를 제작하여 개발된 시뮬레이션 방법의 검증 및 HPPC 골조의 구조거동을 분석하였다. 실험체는 총 4개이며 예비 실험을 위한 철골 실험체 1개와 단순 반복가력을 위한 접합부 실험체 1개 그리고 하이브리드 시뮬레이션을 위한 접합부 실험체 2개로 구성되었다. HPPC 실험체의 경우에는 보-기둥 접합부 실험체의 경우에는 형상을 제외한 나머지 상세는 골조구조성능실험체의 PPP_B 실험체와 동일하다.

(나) 접합부 하이브리드 시뮬레이션 방법

접합부의 횡하중 저항 성능을 확인하기 위하여 일반적으로 십자가 형태의 내부 접합부 실험을 많이 수행한다. 구조물에 횡하중이 작용하면 보 및 기둥의 중앙부에 가까운 곳에 변곡점이 발생하며, 접합부 실험체는 접합부와 변곡점까지를 포함한 부재의 일부분을 제작한 것이다. 따라서 접합부 실험체의 각 지점은 힌지 및 롤러로 구현되어 휨모멘트에 저항하지 않는 형태로 실험을 수행하게 된다. 다만, 실제 구조물에서는 중력하중의 영향 및 비선형거동에 의한 강성비의 변화 등에 의해 변곡점이 달라지며, 이에 따라 부재의 휨모멘트 분포가 달라질 수 있다. 이러한 하중분포를 실험에서 반영하기 위해서는 각 지점에서 3개씩, 총 12개의 자유도를 제어할 수 있어야 하지만, 이는 매우 많은 실험비용을 필요로 하며 실험 셋팅이 매우 어렵기 때문에 현실적으로는 불가능하다. 따라서 이 연구에서는 그림 3.46에 나타난 것과 같이 접합부 주변의 거동을 회전스프링으로 대체하도록 모델링 한 후 회전스프링의 회전-휨모멘트 관계를 이용하여 실험과 해석 사이의 데이터를 통신하고자 하였다. 골조에서 휨모멘트는 접합부 주변에서 가장 크게 발생하기 때문에 대부분의 소성변형이 접합부 주변에서 발생하며, 그 이외의 부분은 탄성거동에 머무르게 된다. 따라서 회전스프링을 이용하여 비선형거동을 모사하고, 다른 부분은 해석모델에서 탄성 보-기둥 요소로 모델링함으로써 실제와 거의 유사한 모멘트 분포를 반영할 수 있다.

Moment at the joint (M) calculated from the lateral force.

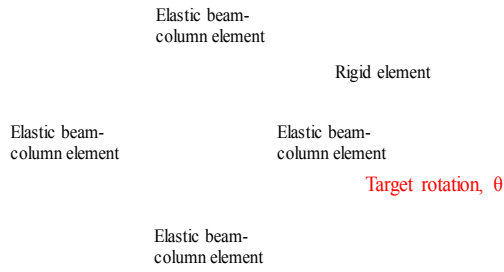


그림 3.46 회전스프링을 이용한 접합부의 하이브리드시뮬레이션

접합부 실험체를 이용한 하이브리드 시뮬레이션을 수행하기에 앞서, 접합부 실험체의 성능 검증 및 회전스프링 모델의 타당성을 분석하기 위하여 접합부 실험체의 반복가력 실험을 수행하였다. 반복가력실험에서 접합부 주변의 회전량을 계측하였고, 계측된 회전량과 휨모멘트의 관계를 해석모델의 회전스프링 거동으로 정의하여 해석을 수행한 결과, 그림 3.47과 같이 매우 유사한 결과를 도출하였다. 따라서 회전스프링을 이용한 모델링방법은 접합부의 거동을 대표할 수 있을 것으로 판단되며, 이를 이용하여 수행한 하이브리드 시뮬레이션이 합리적인 것으로 판단된다.

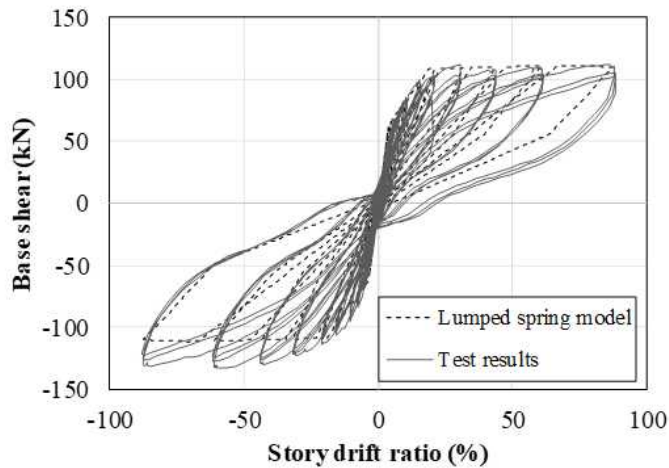


그림 3.47 반복가력 실험 결과 및 회전스프링 모델의 해석 결과

(4) 현행 구조기준에 근거한 부재 및 골조설계(Mock-up 실험체)

충청북도 괴산군 청안면 금신리 76-1에 위치한 공장 부지에 실대형 크기의 골조 시제품(Mock-up 실험체)을 제작하여 제작과정 상의 애로사항을 파악한 후 이를 해결하여 최적화된 실무용 해석 및 설계 기술을 개발하고자 하였다. 표 3.13와 같이, 국내 RC 공법 및 PC 공법, 그리고 개발 HPPC 시스템을 이용한 주차모듈을 비교하고 이를 바탕으로 실대형 크기의 구조물을 설계하였다.

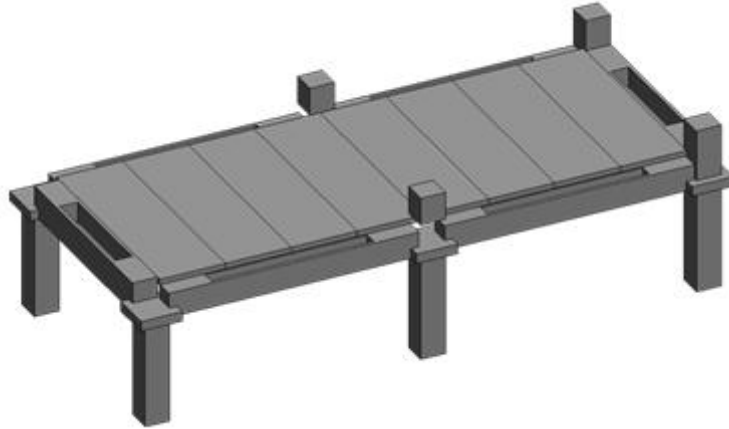


그림 3.48 Mock-up 실험체 3d 도면

표 3.13 Mock-up 실험체 상세

Mock-up 실험체	
경간 (m)	10.05 (8.14)*
층고 (m)	5.84 (1.0)**
기둥단면 (m)	0.9 × 0.9
보단면 (m)	0.7 × 0.84 (0.9 × 0.84)*
슬래브	유
그라우팅	bonded
포스트텐션	
도입길이(m)	5.55 (4.54)*
콘크리트 압축강도 (MPa)	49
도입 프리스트레스	$0.6 \times f_{pu}^{***}$

* A (B) = 장경간 (단경간)

** C (D) = 1층 (2층)

*** f_{pu} = 강연선의 극한응력

프로토타입 골조를 바탕으로 그림 3.49와 같이 기본적인 경간 및 층고를 결정한 후 이를 구조해석 프로그램인 MIDAS를 이용하여 구조설계를 실시하였다. 현행 구조기준에서 제시하고 있는 지하주차장 건물의 하중조건을 입력하여 보 부재에 작용하는 최대모멘트를 산출하였다. 하중 조합에 의하여 장경간의 보는 부모멘트에서 최대 1642.3 kN·m의 하중을 정모멘트에서 최대 693.9 kN·m의 하중이 작용하는 것을 확인하였다. 단경간의 보는 부모멘트에서 최대 956.3 kN·m의 하중을, 정모멘트에서 최대 712.2 kN·m의 하중이 작용하는 것으로 나타났다.

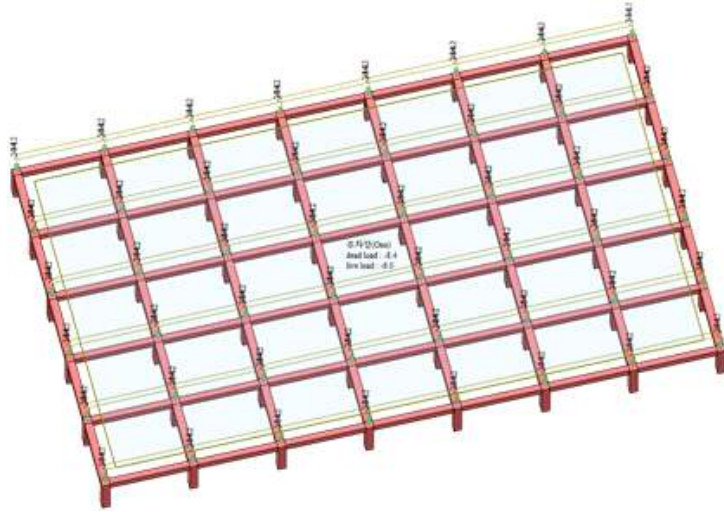


그림 3.49 Mock-up 실험체 MIDAS 모델링

이러한 설계조건을 바탕으로 그림 3.50와 같이 RC 단면에 대한 설계를 수행하고, 이와 등가의 강도 값을 갖는 HPPC 단면을 결정하였다.

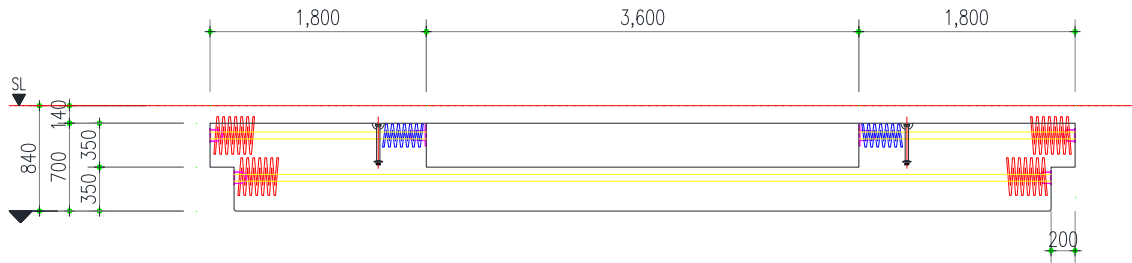
(a) 장경간 보 단면 설계

(b) 단경간 보 단면 설계

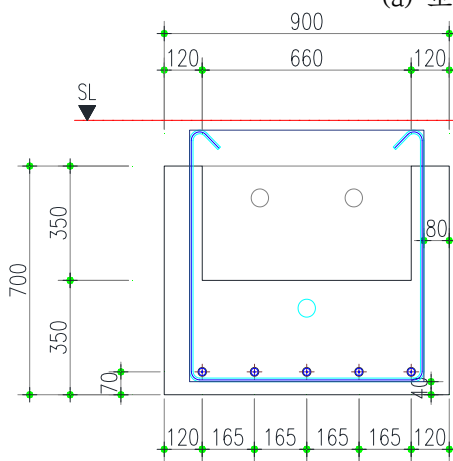
그림 3.50 주어진 하중에 따른 RC 부재 설계

장경간 보의 경우에는 상부에는 직경 15.2 mm의 일반강도 강연선을 2열로 4개씩 배치하였으며, D22 철근 9개를 배치하였다. 하부에는 직경 15.2 mm의 일반강도 강연선을 1열로 4개를 배치하였으며, D22 철근 4개를 배치하였다. 스티럽은 D13 철근에 2개의 다리를 갖는 폐쇄스티럽으로 구성하여 130 mm 간격으로 배근하였다. 단경간 보의 경우에는 상·하부에 D22 철근 5개를 배치하였으며, 강연선은 장경간 보와 동일하게 하부에는 1열로 4개, 상부에는 2열로 4개를 배치하였다. 스티럽은 D13 폐쇄스티럽으로 200 mm 간격으로 배근하였다. 기둥의 경우에는 4면에 등간격으로 D25 철근 16개가 배근되었다. 또한 그림 3.48에 표시되어 있는 바와 같이 특정 기둥에 대해서는 1층 1절 기둥을, 나머지 기둥에 대해서는 2층 1절 기둥으로 구성하여, 현장여건에 맞추어

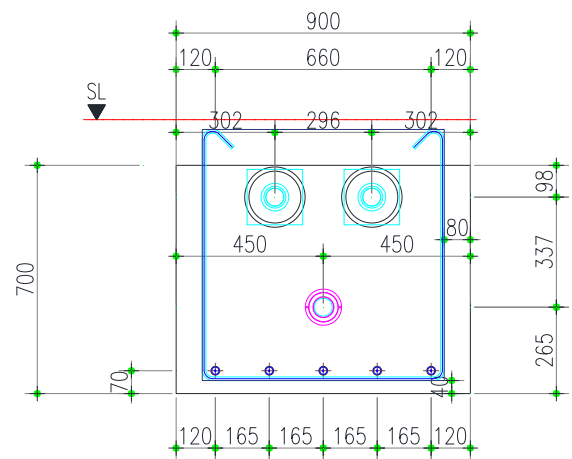
철주의 구획에 따라 기둥의 다양한 시공방법을 선택적으로 적용할 수 있도록 하였다. 코벨은 2방향으로 오는 보를 거치시키기 위하여 편의상 기둥 중앙부에 정사각형 단면으로 설계하였으며, 코벨 부 아래에는 시공 편의상 현치를 두었다. 그림 3.51과 그림 3.52는 Mock-up 실험체의 상세도면과 제작과정을 나타내었다.



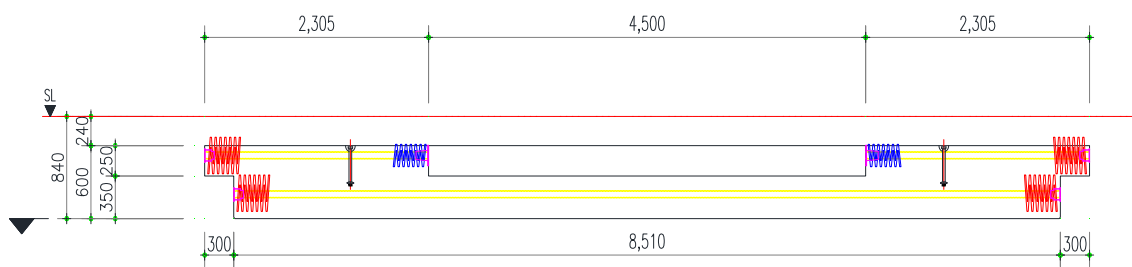
(a) 보 단면 (단변 방향)



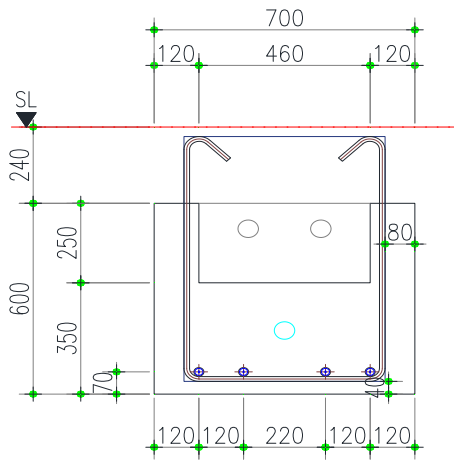
(b) 보 중공부 단면 (단변 방향)



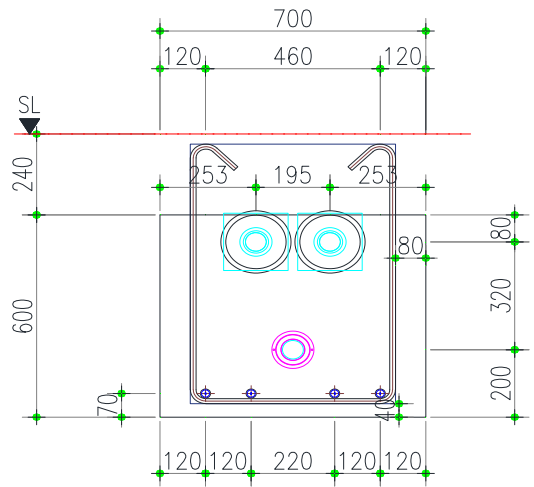
(c) 보 단부 단면 (단변 방향)



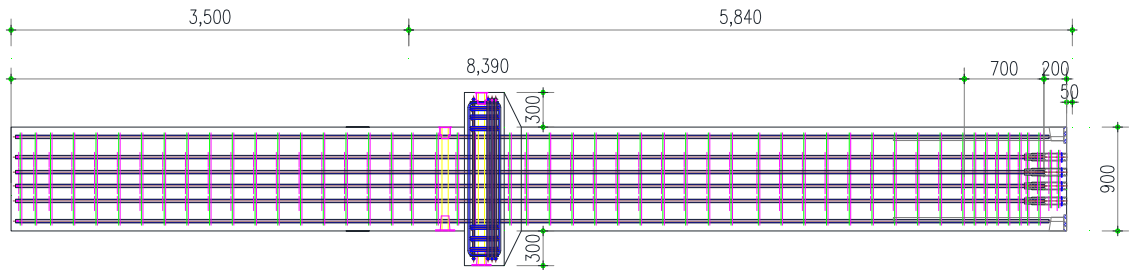
(d) 보 단면 (장변 방향)



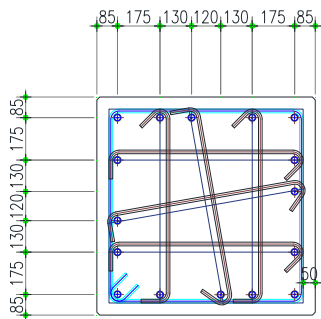
(e) 보 중공부 단면 (장변 방향)



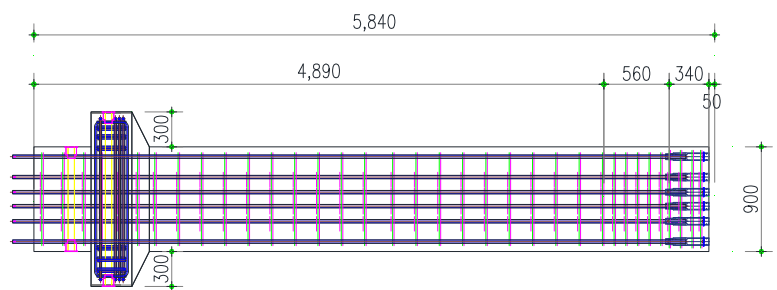
(f) 보 단부 단면 (장변 방향)



(g) 기둥 입면 (2층 1절 기둥)



(h) 기둥 단면



(i) 기둥 입면 (1층 1절 기둥)

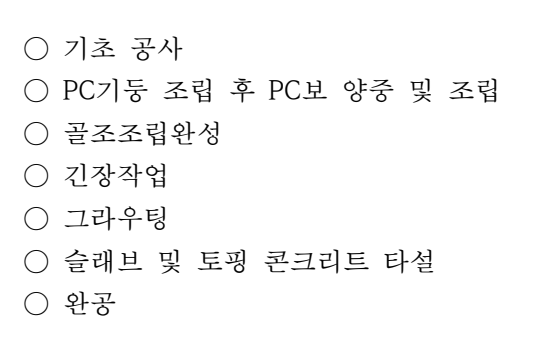
(j) 슬래브 입면

그림 3.51 Mock-up 실험체에 대한 상세도면



(a) PC 보 제작

(b) PC 기둥 제작



(c) 슬래브 제작

(d) 이후 공사 예정 사항

- 기초 공사
- PC기둥 조립 후 PC보 양중 및 조립
- 골조조립완성
- 긴장작업
- 그라우팅
- 슬래브 및 토핑 콘크리트 타설
- 완공

그림 3.52 Mock-up 실험체 제작사진

HPPC 시스템의 골조실험에 대한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 모든 HPPC 실험체에서 설계기준 및 강도를 만족하였다. RC 실험체와 비교하였을 때 뛰어난 잔류변형 제어능력을 보였으며, 패널존의 손상이 현저히 줄어드는 현상을 확인할 수 있었다. 또한, 강기둥-약보의 설계철학에 따른 바람직한 파괴형상을 보였다. DI를 토대로 각 실험체의 층간변위비 증가에 따른 손상정도를 정량적으로 분석하였으며, RC 실험체는 기준에서 제시하는 허용층간변위비(2.0 %) 내에서 심각한 손상이 발생하였으나, HPPC 실험체의 손상정도는 RC 실험체에 비해 미미한 것으로 나타났다.
- 제안된 하이브리드 시뮬레이션 방법은 보-기둥 접합부가 전체 골조의 횡저항 성능에 기여하는 부분을 평가하기에 적합한 것으로 판단되며, HPPC 시스템 전체 골조의 거동에 대한 상세 검증 수단으로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

- Mock-up 실험체 제작과정에서 실무적용이 가능한 구조해석방법론 및 설계기법을 토대로 디테일설계를 수행하였으며, 품질관리 및 생산과정의 애로사항을 개선하여 최적화된 시공방법을 도출함으로써 기술의 완성도를 높이고자 하였다. 또한 Mock-up 실험체 시공을 현장적용으로 확대함과 동시에 기술실시계약 및 매출실적을 달성하기 위한 지속적인 노력을 기울이고 있다.

라. 시공성 및 경제성 분석

(1) 경제성 평가

HPPC 시스템이 적용된 건물과 기존 RC 시스템이 적용된 건물에 대하여 국토해양부 고시 건축구조기준에 따라 각각 지상 10층 높이의 창고시설을 설계하였고 이를 토대로 경제성 평가를 수행하였다. 그림 3.53과 같이, 건물의 형상을 단순화하여 LCC 비용을 제한 자재비용만을 비교하였다. 표 3.14에 나타난 바와 같이, 포스트텐션 공정이 추가되어 노무비가 증가함에도 불구하고, 재료 절감으로 인해 RC구조 대비 103 % 정도의 공사비가 소요되는 것으로 나타났다. 앞서 언급한 바와 같이, HPPC 시스템의 가장 큰 특징은 내구성능 및 보수보강성능이다. 이를 토대로 공기단축과 품질 및 유지 보수비용을 고려하게 된다면 RC 시스템에 비해 획기적으로 경제성을 높일 수 있을 것이라 판단된다.

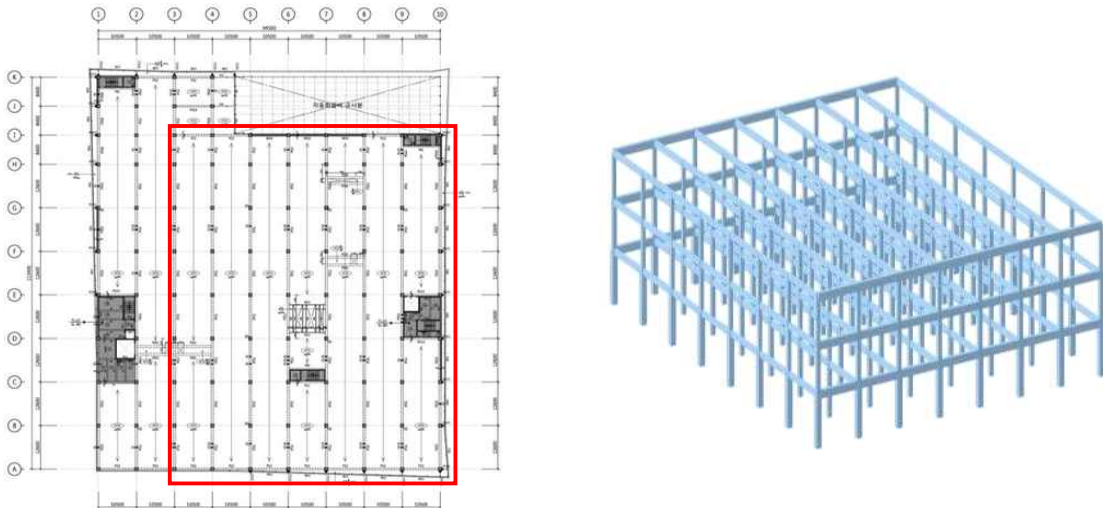


그림 3.53 경제성 평가 대상 건물

표 3.14 각 비목별 금액 비교

자재 비용

자재 비용	기둥		보	
	PSC (HPPC)	RC	PSC (HPPC)	RC
콘크리트	111,989,300 원	120,332,000 원	53,744,670 원	187,211,400 원
철근	191,940,000 원	367,640,000 원	185,850,000 원	352,030,000 원
몰드	39,235,124 원	-	13,808,331 원	-
유로폼	-	114,400,000 원	-	65,366,000 원
강선	-	-	28,830,000 원	-
합계	343,164,424 원	602,732,000 원	282,233,001 원	604,607,400 원

노무비 및 인건비

노무비 및 인건비	PSC (HPPC)	RC
콘크리트 타설	32,399,380 원	39,448,179 원
철근 현장가공 & 조립	198,740,747 원	378,590,628 원
유로폼		346,071,474 원
PSC 보 제작	372,975,512 원	
PC 기둥/보 제작	543,583,321 원	
운반비용	268,194,502 원	
합계	1,415,893,462 원 (185%)	764,110,282 원 (100%)

공사비 합계 (자재비 + 노무비 및 인건비)

공사비	PSC (HPPC)	RC
합계	2,041,290,887 원 (103%)	1,971,089,682 원 (100%)

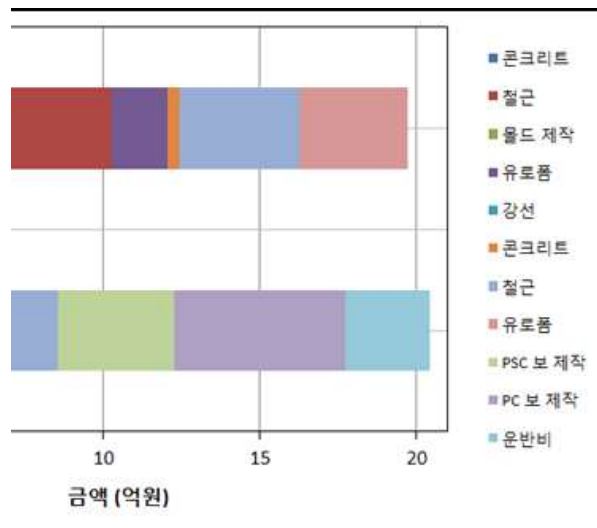


그림 3.54 각 비목별 금액 비교

(2) 생애주기비용(LCC) 평가

이 연구에서는 ‘미래경영연구원’에 의뢰하여 기존 RC 시스템 대비 개발기술의 원가조사를 통한 객관적인 경제성분석을 수행하였다. 여기서는 공사비용 뿐만 아니라 생애주기비용(Life Cycle Cost, LCC)을 고려하여, 공법의 시공에서 시공된 구조물의 생애 전체에 대한 모든 비용을 포함하여 비교하였다. 원가계산은 제시된 제반자료를 참조하여, 예정가격작성기준(계약예규 제 380호, 2018..6.4)에 의거하여 작성하였고, 간접비, 일반관리비 및 이윤을 제외한 직접원가만을 계산하였다. LCC 분석결과는 표 3.15에 나타난 바와 같으며, 기존의 RC 시스템에 대비 HPPC 시스템은 기둥, 벽체 수를 줄일 수 있어, 평면계획 자유도가 높고 과도한 하중으로 균열이 발생하여도 하중을 제거하게 되면 회복됨에 따라 개수가 용이한 측면을 가지고 있다는 특징을 갖는다. 이러한 특징을 근거로 HPPC 시스템의

수명기간 중 총비용은 RC 시스템에 비해 최대 55.87 %로 감소하였으며, 높은 경제성을 확보하는 것으로 분석되었다. (자세한 사항은 ‘원가계산서 (경제성분석 보고서)’ 참조)

표 3.15 LCC 원가분석총괄표

구분	HPPC 시스템 (A)	RC 시스템 (B)	대비 (%) (A/B)	
규격	6.0 m × 12.0 m	8.0 m × 7.5 m		
제품수명 (내용년수)	100 (년)	50 (년)		
원가 항목	취득원가	505,301,801	978,540,757	51.63
	사용원가	505,301,801	978,540,757	51.63
	폐기원가	441,113,519	1,332,131,431	33.11
	합계	1,451,717,121	3,289,212,945	44.13

마. 현장적용

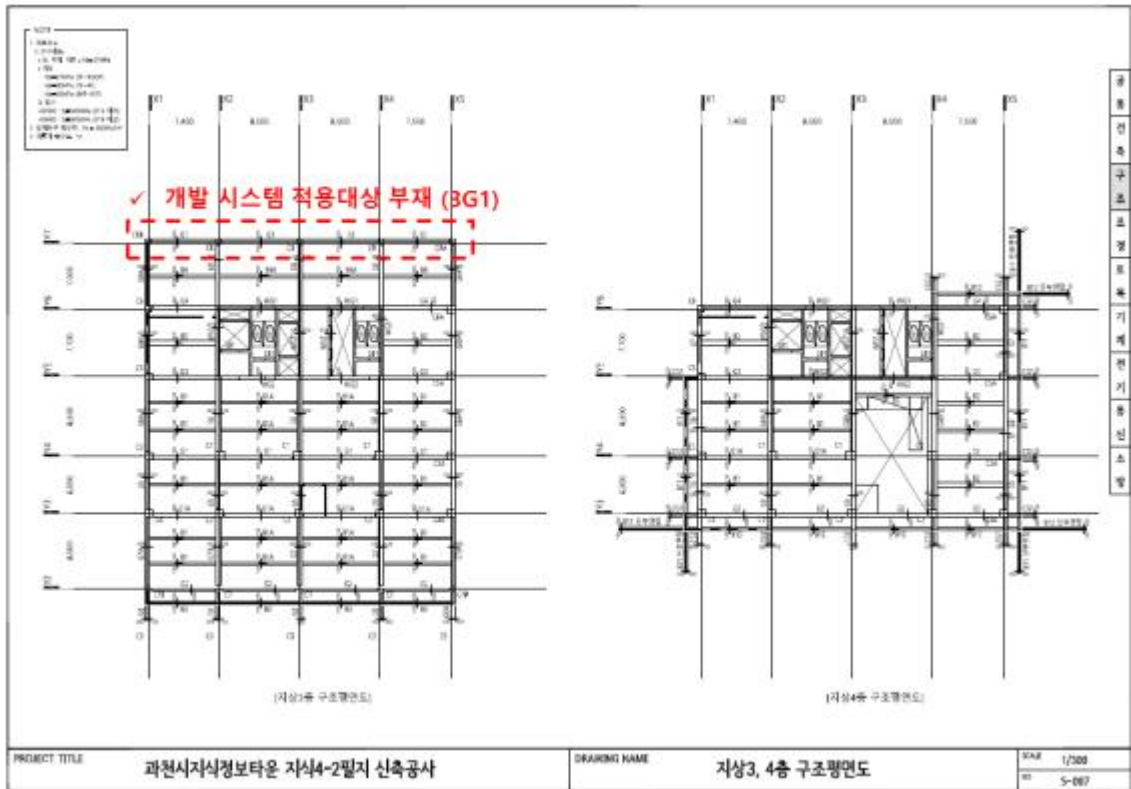
이 연구를 통해서 개발된 HPPC 시스템은 현재 충청북도 괴산군 청안면 금신리 76-1번지 위치에 식당시설 건축물의 골조로서 적용되었다. 건축물의 면적은 163.61 m² 이며, 세부적인 건축물의 상세개요와 조경도는 각각 표 3.16와 그림 3.55에 나타난 바와 같다. 적용된 시스템은 장경간, 단경간 길이는 각각 10,500 mm, 8,140 mm 이며, 최고 높이는 6,840 mm이다. 보의 단면 크기는 장경간, 단경간 각각 700 mm × 840 mm, 900 mm × 840 mm이다. 또한, 2020년 9월에 과천시식정보타운 4-2필지 신축공사에서 개발 시스템이 적용된 부재(그림 3.56)의 제작 및 시공이 진행될 예정이다, 현재 기술보유기관인 (주)동양구조안전기술과 동서피씨씨(주), (주)목양종합건축사무소가 현장적용을 위한 기술실시계약을 체결한 상태이다. ([증빙 1-13] 참조)

표 3.16 개발기술이 적용된 현장개요

대지위치	충청북도 괴산군 청안면 금신리 76-1번지		
대지면적	8,246 m ²		
	계획	법정	비고
주용도	식당	없음	적법함
건폐율	1.98 %	40	
용적율	1.98 %	100	
최고높이	6.84m	없음	
규모	1층	없음	
건축면적	163.61 m ²		
연면적	163.61 m ²		
구조	프리스트레스트 프리캐스트 콘크리트		



그림 3.55 현장적용건물의 조경도



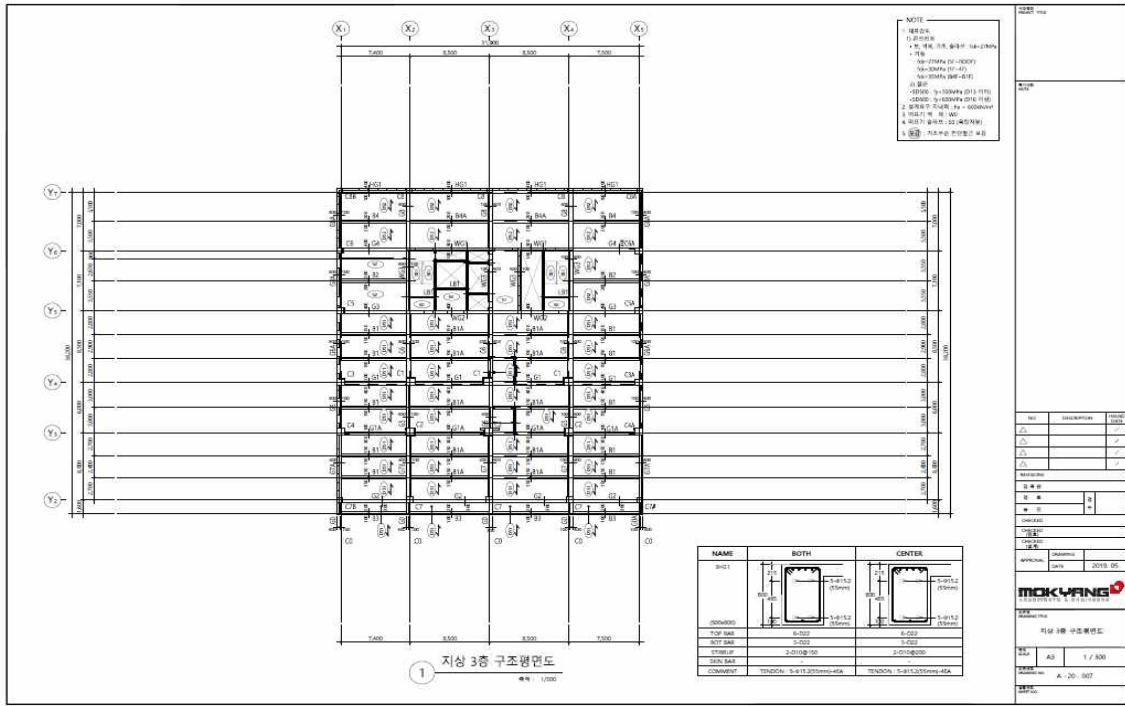


그림 3.56 HPPC 시스템 적용대상 구조평면도

4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표 달성도

정량적인 목표 성과로는 특허 출원 3건, 특허 등록 1건, 설계·시공지침서 2건, 학술지 논문 게재 5건, 시제품 제작 3건, Mock-up 제작 1건, 기술실시계약 1건, 현장적용 1건, 매출실적 5,000 만원, 신규고용인력 5명, 인력양성 4명, 건설신기술인증신청 1건이다. 과제 종료시점에서 특허 출원 4건, 특허 등록 2건, 설계·시공지침서 2건, 학술지 논문 게재 6건, 시제품 제작 3건, Mock-up 제작 1건, 신규고용인력 5명, 인력양성 6명, 기술실시계약 2건, 현장적용 2건, 건설신기술인증 신청 1건의 실적을 달성하였으며, 이 밖에도 7건의 홍보부스 작업과 5건의 학술발표, 1건의 기술기사 실적을 추가적으로 달성하였다.

(1) 제안 성과계획

구분	핵심연구성과 (level1)		단위 성과 (level2)		총괄 실적 성과					해당 기관	예산 (백만)	총괄 양적 목표		
					질적 성과지표		목표치	측정방법	검증방법			가중치	목표치	가중치
총괄	A	부재단위의 성능검증 및 시공성 개선안 도출	A-1	포스트텐션 부재의 구조성능에 관한 실험연구	①	강도	100%	KCI2012 9.5 (KBC2016 0503)	보고서	2	동양구조안전기술, 서울시립대학교	456.2	학술지 논문: 1건 시제품: 1건 신규고용인력: 2명	5 10 5
					②	강성	100%	KCI 2012 4.3	보고서	1				
					③	변형능력	100%	KCI 2012 3.4.2	보고서	1				
			A-2	분절형 부재의 상세 및 제작방법과 관련된 설계· 시공 지침 구축	①	설계·시공 지침서 작성	1건	KCI2012 9.5 (KBC2016 0503)	보고서	2	동서피씨씨	133.8	특허: 출원 1건 설계·시공지침서: 1건	5 5
B	접합부 성능검증 및 실무용	B-1	보-기둥 접합부의	①	강도	100%	KCI2012 9.5 (KBC2016 0503)	보고서 및 공인시험성적서	2	동양구조안전기술 · 서울시립대학교	842	학술지 논문: 3건	5 10	
			②	강성	95%	ACI374 report	보고서 및	1						

		설계기술개발	구조성능에 관한 실험연구	③	변형능력	95%	Acceptance criteria ACI374 report 및 KCI 2012 3.4.2	공인시험성적서 보고서 및 공인시험성적서	2			시제품: 1건 신규고용인력: 2명	5
			B-2	접합부의 상세 및 제작방법과 관련된 설계·시공 지침 구출	①	설계·시공 지침서 작성	1건	건축공사표준시방서 05000 콘크리트 표준시방서	보고서	2	동서피씨씨	308	특허: 출원 1건 설계·시공지침서: 1건 신규고용인력: 1명
C	골조레벨 성능검증 및 실대형 Mock-up 실험	C-1	개발 시스템의 현장적용을 통한 사업화	①	기술실시 계약	1건	계약서	보고서 증빙	3	동양구조안전기술, 동서피씨씨	420	기술실시계약: 1건 현장적용: 1건 매출실적: 5,000만원	5 5 5
			C-2	개발시스템의 설계반영 및 실험을 통해 도출된 문제점 개선방안도출	①	요구 구조성능 확보	95%	KCI2012 9.5 (KBC2016 0503)	공인시험성적서 및 전문가 자문결과서	2	동양구조안전기술 서울시립대학교, 동서피씨씨	670	특허: 출원 1건 특허: 등록 1건 학술지 논문: 1건
		②			제작과정 개선	95%	시작품제작(mock-up)	시제품 및 보고서	2	시제품: 1건 인력양성: 4명 Mock-up 제작: 1건 건설신기술인증신청: 1건			3 2 3 3
		계							20		2,830	특허: 출원 3건 특허: 등록 1건 설계·시공지침서 2건 학술지 논문: 5건 시제품: 3건 Mock-up 제작: 1건 기술실시계약: 1건 현장적용: 1건 매출실적: 5,000만원 신규고용인력: 5명 인력양성: 4명 건설신기술인증신청: 1건	100

(2) 성과달성현황

(가) 1차년도

구분	핵심연구성과 (level1)		단위 성과 (level2)		1차년도 질적 성과					해당 기관	예산 (백만)	1차년도 양적 목표			증빙자료		
					성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법			가중치	목표치	가중치		달성치	
총괄	A	부재단위의 성능검증 및 시공성 개선안 도 출	A-1	포스트텐션 부재의 구조성능에 관한 실험연구	①	강도	100%	100%	KCI2012 9.5 (KBC2016 0503)	보고서	2	동양구조 안전기술 , 서울시립 대학교	456.2	학술지 논문 : 1 건 시제품 : 1 건 신규고용인력 : 2 명	5 10 5	학술지 논문 : 1 건 학술발표 논문 : 1 건 시제품 : 1 건 신규고용인력 : 2 명 인력양성 2 명	증빙자료 : [증빙 1-3] [증빙 1-4] [증빙 1-6] [증빙 1-7] [증빙 1-9] [증빙 1-10] 최종보고서 : pp. 21~31 p. 87
					②	강성	100%	100%	KCI 2012 4.3	보고서	1						
③	변형능력	100%			100%	KCI 2012 3.4.2	보고서	1									
			A-2	분절형 부재의 상세 및 제작방법과 관련된 설계· 시공 지침 구축	①	설계·시공 지침서 작성	1건	1건	KCI2012 9.5 (KBC2016 0503)	보고서	2	동서 피씨씨	133.8	특허 : 출원 1 건 설계·시공지침서 : 1 건	5 5	특허 : 출원 1 건 설계·시공지침서 : 1 건	증빙자료 : [증빙 1-1] [증빙 1-5]
계											6	590	특허 : 출원 1 건 설계시공지침서 1 건 논문 : 1 건 시제품 : 1 건 신규고용인력 : 2 명	30	특허 : 출원 1 건 설계시공지침서 1 건 학술지 논문 : 1 건 학술발표 논문 : 1 건 시제품 : 1 건 신규고용인력 : 2 명 인력양성 : 2 명		

(나) 2차년도

구분	핵심연구성과 (level1)	단위 성과 (level2)	2차년도 질적 성과					해당 기관	예산 (백만)	2차년도 양적 목표			증빙자료	
			성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법			가중치	목표치	가중 치		달성치
총괄 B	접합부 성능 검증 및 실무 용 설계기술 개발	B-1 보-기동 접합부의 구조성능에 관한 실험연구	① 강도	100%	100%	KCI2012 9.5 (K B C 2 0 1 6 0503)	보고서 및 공인시험성 적서	2	동양구조 안전기술 , 서울시립 대학교	842	학술지 논문 : 3 건 시제품 : 1 건 신규고용인력 : 2 명	5 10 5	학술지 논문 : 3 건 학술발표 논문 : 2 건 시제품 : 1 건 인력양성 1 명	증빙자료 : [증빙 1-3] [증빙 1-4] [증빙 1-6] [증빙 1-7] [증빙 1-9] [증빙 1-10] 최종보고서 : pp. 31~46 p. 87
		② 강성	95%	100%	ACI374 report Acceptance criteria	보고서 및 공인시험성 적서	1							
③ 변형능력	95%	97.5%	ACI374 report 및 KCI 2012 3.4.2	보고서 및 공인시험성 적서	2									
		B-2 접합부의 상세 및 제작방법과 관련된 설계·시공 지침 구출	① 설계·시공 지침서 작성	1건	1건	건 축공사표준시 방서 05000 콘 크리트 표준시방 서	보고서	2	동서 피씨씨	308	특허: 출원 1 건 설계·시공지침서 : 1 건 신규고용인력 : 1 명	5 5 5	특허: 출원 1 건 특허: 등록 1 건 설계·시공지침서 : 1 건 신규고용인력 : 1 명	증빙자료 : [증빙 1-1] [증빙 1-2] [증빙 1-4] [증빙 1-5] 최종보고서 : p. 87
계								7		1,150	특허: 출원 1 건 설계·시공지침서 : 1 건 학술지 논문 : 3 건 시제품 : 1 건 신규고용인력 : 3명	35	특허: 출원 1 건 특허: 등록 1 건 설계·시공지침서 : 1 건 학술지 논문 : 3 건 학술발표 논문 : 2 건 시제품 : 1 건 신규고용인력 : 1 명 인력양성: 1 명	

(다) 3차년도

구분	핵심연구성과 (level1)	단위 성과 (level2)	3차년도 질적 성과						해당 기관	예산 (백만)	3차년도 양적 목표			증빙자료			
			성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치			목표치	가중치	달성치				
총괄	C	골조레벨 성능검증 및 실대형 Mock-up 실험	C-1	개발 시스템의 현장적용을 통한 사업화	①	기술실시 계약	1건	0건	계약서	보고서 증빙	3	동양구조 안전기술, 동서피씨 씨	467	기술실시계약: 1건 현장적용*: 1건 매출실적*: 5,000 만원	5 5 5	기술실시계약: 3건 현장적용: 2건	증빙자료: [증빙 1-13] [증빙 1-14] 최종보고서: pp. 77~78
			C-2	개발시스템의 설계반영 및 실험을 통해 도출된 문제점 개선방안도출	①	요구 구조성능 확보	95%	100%	KCI2012 9.5 (KBC2016 0503)	공인시험성적 서 및 전문가 자문결과서	2	동양구조 안전기술, 서울시립 대학교, 동서피씨 씨	623	특허: 출원 1건 특허: 등록 1건 학술지 논문: 1건 시제품: 1건 인력양성: 4명 Mock-up 제작: 1건 건설신기술인증신청: 1건	3 3 3 3 2 3 3	특허: 출원 2건 특허: 등록 2건 학술지 논문: 2건 학술발표 논문: 2건 기술기사: 1건 시제품: 1건 인력양성: 3명 Mock-up 제작: 1건 건설신기술인증신청: 1건	[증빙 1-1] [증빙 1-2] [증빙 1-3] [증빙 1-6] [증빙 1-7] [증빙 1-8] [증빙 1-9] [증빙 1-10] [증빙 1-12] [증빙 1-15] 최종보고서: pp.47~69 pp. 69~75 p. 87
					②	제작과정 개선	95%	63%	시작품제작(mock-up)	시제품 및 보고서	2						
계										20		1,090	특허: 출원 1건 특허: 등록 1건 학술지 논문: 1건 시제품: 1건 Mock-up 제작: 1건 인력양성: 4명 기술실시계약: 1건 현장적용*: 1건 매출실적*: 5,000만원 건설신기술인증신청: 1건	35	특허: 출원 2건 특허: 등록 2건 학술지 논문: 2건 학술발표 논문: 2건 기술기사: 1건 시제품: 1건 Mock-up 제작: 1건 인력양성: 3명 기술실시계약: 3건 현장적용*: 2건 건설신기술인증신청: 1건		

* 현장적용 & 매출실적:5000 만원 진행현황

- 현재 현장적용 2건(공사명1 : 과천지식정보타운 4-2필지 신축공사, 공사명2 : 충청북도 괴산군 청안면 금신리 76-1번지 식당시설)의 진행을 위한 기술실시계약 체결을 완료하였음. ' 충청북도 괴산군 청안면 금신리 76-1번지 식당시설 ' 건에 대해서는 현재 시공이 완료된 상태이며, ' 과천지식정보타운 4-2필지 신축공사 ' 건은 개발 시스템이 적용된 부재의 내용을 포함하는 설계도서의 작업을 진행중에 있으며, 개발 시스템을 적용한다는 내용이 기재된 활약서를 작성하였음.([증빙1-13] 참조) 2020년도 9월에 개발 시스템이 적용된 부재의 제작 및 시공이 진행될 예정임.

(3) 연구개발성과

(가) 논문게재 성과(학술지 논문) (증빙자료 : 증빙 [1-6] 참조)

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일
1	2400MPa 긴장재가 적용된 포스트텐션 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 접합부의 반복가력실험	대한건축학회 논문집	황진하	제 33권 제 12호 (2017년 12월호)	대한민 국	대한건축학 회	비SCI	2017.12
2	Experimental Study on an Optimized-Sect ion Precast Slab with Structural Aesthetics	<i>Applied Sciences</i>	주현진	Vol. 8 No. 8 (2018년 7월호)	스위스	MDPI	SCI	2018.7
3	하이브리드 프리스트레스 트 프리캐스트 콘크리트 구조시스템의 부모멘트 영역 휨거동	대한건축학회 논문집	최승호	제 34권 제 10호 (2018년 10월호)	대한민 국	대한건축학 회	비SCI	2018.10
4	비부착 포스트텐션 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 접합부의 반복하중 거동	한국콘크리트 학회논문집	황진하	제 30권 제 6호 (2018년 12월호)	대한민 국	한국콘크리 트학회	비SCI	2018.12
5	포스트텐션-프 리캐스트 압착구조 시스템 접합부의 휨방향 구조거동	한국콘크리트 학회논문집	김재현	제 31권 제 3호 (2019년 7월호)	대한민 국	한국콘크리 트학회	비SCI	2019.7
6	Seismic behaviour of post-tensioned precast concrete beam-column connections	<i>Magazine of Concrete Research</i>	황진하	2019 (Article ID:190008 3)	영국	THOMAS TELFORD PUBLISHING	SCI	2019.9

(나) 논문게재 성과(학술발표 논문) (증빙자료 : 증빙 [1-7] 참조)

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	한국콘크리트학회 2017년 가을 학술발표대회		2017년 11월 2일	안동 그랜드호텔	대한민국
2	한국콘크리트학회 2018년 봄 학술발표대회		2018년 5월 2일	창원 컨벤션센터	대한민국
3	한국콘크리트학회 2018년 가을 학술발표대회		2018년 11월 7일	평창 알펜시아 리조트	대한민국
4	한국콘크리트학회 2019년 봄 학술발표대회		2019년 5월 8일	제주 신화월드	대한민국
5	한국콘크리트학회 2019년 봄 학술발표대회		2019년 11월 7일	변산 대명리조트	대한민국

(다) 특허 성과 (증빙자료 : 증빙 [1-1], [1-2] 참조)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록				기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록번호*	등록인	등록일	등록번호	등록번호	
1	PC기둥과 분절형 PC보를 이용한 포스트텐션 압착공법 시스템 및 이의 시공방법	대한민국	서울시립대학교 산학협력단 (주)동양구조안전기술 동서피.씨.씨 주식회사	2017년 10월 26일	10-2017-0140402	10-2072043	서울시립대학교 산학협력단 (주)동양구조안전기술 동서피.씨.씨 주식회사	2020년 1월 23일	10-2072043	10-2072043	100%

2	PC 접합부에 그라우트 주입의 인입을 차단하는 포스트텐션 압착 공법	대한 민국	서울시 립대학 교 산학협 력단 (주)동 양구조 안전기 술 동서피 .씨.씨 주식회 사	2018년 12월 7일	10-2018- 0156628	-	-	-	-	-	100 %
3	피씨기등의 접합구조와 이의 시공방법	대한 민국	(주)동 양구조 안전기 술	2017년 11월 29일	10-2017- 0161199	10-18487 27	(주)동 양구조 안전기 술	2018년 5월 24일	10-18487 27	10-18487 27	100 %
4	고효율 개량 정착부 구조	대한 민국	(주)동 양구조 안전기 술	2018년 9월 4일	10-2018- 0105325	10-19396 76	(주)동 양구조 안전기 술	2019 년 1월 17일	10-19396 76	10-19396 76	100 %

5	힌지모듈로 강연선의 긴장력을 도입하는 다각도 잭킹장치	대한민국	서울시립대학교 산학협력단	2019년 10월 30일	10-2019-0136574	-	-	-	-	-	100%
6	단부 압착형 프리캐스트 콘크리트 보 및 이를 이용한 바닥슬래브의 시공방법	대한민국	서울시립대학교 산학협력단 (주)동양구조안전기술 동서피.씨.씨 주식회사	2019년 10월 31일	10-2019-0137815	-	-	-	-	-	100%

(라) 기술기사 (증빙자료 : 증빙 [1-8] 참조)

번호	기사명	학회지명	주저자명	호	국명	발행기관	게재일
1	프리스트레스트 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 접합부	한국콘크리트 학회지	김강수	제 31권 제 4호 (2019년 7월호)	대한민국	한국콘크리트학회	2019.7

(마) 전문 연구 인력양성 (증빙자료 : 증빙 [1-3] 참조)

번호	분류	기준 연도	현황										
			참여연구원		성별			지역별					
			이름	여부	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타	
1	박사 학위	2017		○		1			1				
2	박사 학위	2017		○		1			1				
3	석사 학위	2018		○				1	1				
4	박사 학위	2020		○		1			1				
5	석사 학위	2020		○		1	1		2				
6	학사 학위	2020		○		1			1				

(바) 신규고용인력 (증빙자료 : 증빙 [1-4] 참조)

번호	분류	기준 연도	현황					소속
			직위		성별			
			이름	직위	기타	남	여	
1	사원	2017 - 2018		사원		1		(주) 동양구조안전기술
2	사원	2017 - 2018		사원			1	(주) 동양구조안전기술
3	사원	2018		기사		1		동서피씨씨(주)

(아) 기타성과(홍보부스, 시작품 제작, 설계·시공 지침서)

- 홍보부스



2018.5.3.~4.

2018년도 봄 한국콘크리트학술대회 홍보전시회
참가사진



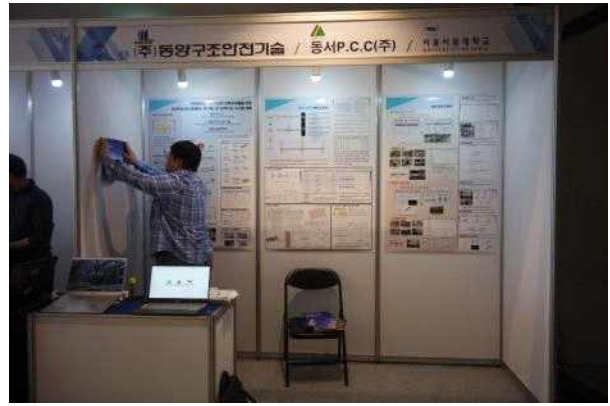
2018.6.7.~8.

2018년도 국토교통기술대전 참가사진



2018.11.8.~11.9.

2018년도 가을 한국콘크리트학술대회 홍보전시회 참가사진



2019.5.9.~5.10.

2019년도 봄 한국콘크리트학술대회 홍보전시회 참가사진



2019.5.29.~5.31.

2019년도 국토교통기술대전 참가사진



2019.11.06.~11.08.

2019년도 가을 한국콘크리트학술대회 홍보전시회 참가사진



홍보 패널 사진



홍보 브로슈어 사진

- 시제품 제작 (증빙자료 : 증빙 [1-9], [1-12] 참조)

No.	시제품명	수량	단면크기(mm)	비고
1	HPPC 보	8	SP1 보 단면 500 × 550, 경간 8600 SP3,5,6,8 보 단면 500 × 700, 경간 8600 SP2,4,7 보 단면 1500 × 700 × 200 × 500 경간 8600	부재 성능검증 실험체
2	HPPC 보-기둥 접합부	8	SP2, 4, 5 보 단면 500 × 700, 기둥 단면 700 × 700, 경간 8800, 높이 3545 SP1, 3, 6, 7, 8 보 단면 1500 × 700 × 200 × 500 기둥 단면 700 × 700, 경간 8800, 높이 3545	접합부 성능검증 실험체
3	HPPC 2경간 골조(3개) RC 2경간 골조(1개)	4	PPP_A, PPP_B, PFP_A, R_A 보 단면 250 × 350, 기둥 단면 350 × 350, 경간 9090, 높이 2420	골조 성능검증 실험체

4	HPPC Mock-up 실험체	1	보 단면 (장경간) 700 × 840, 경간 (장경간) 10,050, 보 단면 (단경간) 900 × 840, 경간 (단경간) 8,140, 기둥 단면 900 × 900, 높이 (1층) 5,840, 높이 (2층) 1,000	Mock-up 실험체
---	---------------------	---	--	-------------

- 설계·시공 지침서 (증빙자료 : 증빙 [1-5] 참조)

No.	구분	작성일	비고
1	개발 HPPC시스템의 설계 지침서	2017.10	
2	개발 HPPC시스템의 시공 지침서	2018.10	

나. 관련 분야 기여도

(1) 과학기술적 측면

HPPC 시스템은 내구성 및 보수보강성능 등에 강점을 가지며, PC 시스템과 마찬가지로 공장제작에 의해 높은 품질의 부재를 얻을 수 있다. RC 시스템의 가지는 품질에 관한 약점을 PC 시스템으로서 보완하고, PC 시스템의 보-기둥 접합부에 존재하는 결함가능성을 포스트텐션 공법을 도입함으로써 제거하였다. 본 과제에서 개발한 HPPC 시스템은 RC 및 PC 구조로 형성된 건물을 대체하는 경제성 및 안전성 모두를 향상시킬 수 있는 차세대 구조 시스템이다. 이 시스템은 주차장구조물, 지하구조물, 학교건물, 물류센터 및 모듈러 주택에도 적용이 가능하며, 기존 공법보다 부재 크기를 줄일 수 있으므로 이산화탄소 발생량을 저감시키는 친환경공법이다. 또한, 예폭시-코팅된 강연선을 도입하여 기존의 공법에서 실현할 수 없었던 100년 지속가능한 내구성을 실현할 수 있으며, 이를 통해 국내는 물론, 해외에서도 HPPC 시스템의 충분한 경쟁력을 가지고 적용이 가능하다고 판단된다. 추가적으로 제안된 HPPC 시스템은 기둥식 구조형식으로 현대의 건축시장에서 요구하는 가변적 평면 구성 또한 가능할 것으로 보이며, 이 같은 독창적 기술을 통해 기존의 높은 진입장벽을 넘어 새로운 시장개척이 가능할 것으로 기대된다.

(2) 사회·경제적 측면

미국의 경우 포스트텐션 공법을 적용하여 일반 RC 시스템 대비 공사비의 약 20 %를 절감하고 있다. 이는 주차장 건물에서도 예외는 아니며, 지하 주차장과 같이 특수한 경우에도 약 10 %이상의 비용절감이 예상된다. PC 기둥과 보를 적용함으로써 공기단축의 효과도 얻을 수 있고, 주차모듈의 확장으로 사용자 편의성과 보안성 또한 향상시킬 수 있을 것으로 보인다.

주차장 건물에 본 시스템을 적용할 경우, 굴토량과 구조체 높이 감소 및 내구성 향상

등에 의한 직접공사비 절감, 유지관리비 등의 저감을 통해 건축물의 생애주기비용(Life Cycle Cost)을 감소시킬 수도 있으며, 향후 해외와의 기술교류를 통해 미국, 유럽 등 기술 선진국으로의 기술 수출도 가능할 것으로 사료된다. 본 과제에서 개발된 HPPC 시스템은 건물 구조체의 내력 및 내구성을 향상할 수 있는 기술로 비단 주차장뿐만 아니라, 모든 구조물에 적용이 가능하다. 특히, 학교건축물 및 물류센터와 같은 규모 및 하중을 예측할 수 있는 건축물에 적용성이 높다. 또한, 일본의 지진재해와 같은 비상시를 대비한 조립식 모듈러 주택개발에도 적용이 가능하다. 따라서, 본 과제를 통해 입증한 구조물의 성능 특성, 확립된 구조설계, 시공 및 유지관리 지침 등은 향후 일반 건축물에 응용하여 적용할 수 있다. 또한, 주차장에 한정하여 적용하는 것에 비교해 일반 건축물에 적용할 경우 직접공사비 절감, 유지관리비 저감 등의 기대효과도 향상될 것으로 전망된다.

(3) 정책적 측면

HPPC시스템을 개발함으로써, 향후 본사에서 수주하는 PC 주차장에 본격적으로 적용할 수 있으며, 이를 바탕으로 일반 건축물의 확대 적용에도 가능하다. 또한, 연구과제의 결과를 적극적으로 활용하여 보다 경제적이고 안전한 포스트텐션 공병의 건축물 구조 설계를 수행할 수 있다. 특히, 학급당 소요면적이 정해진 학교건축물, 용도별 하중이 정해진 물류센터 등에 확대 적용할 수 있다. 비상시 이재민을 수용하기 위한 주택은 짧은 공기와 저렴한 비용이 핵심이며, 이에 대응할 시스템으로 본 연구에서 개발된 기술을 활용한 모듈러 주택 제안도 가능하므로, 국가정책의 주요 이슈 중의 하나인 재난대응 시스템 수립에도 크게 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 연구개발성과의 활용 계획

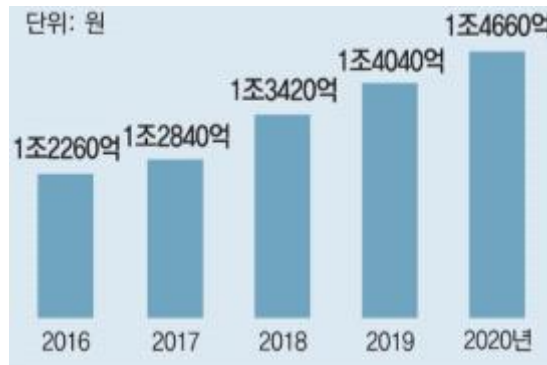
가. 개발기술의 활용성

HPPC 시스템은 기존의 공법들이 가진 내구성, 접합부 결함 등의 문제점들을 해결하기 위하여 PC 시스템과 포스트텐션 시스템을 활용한 새로운 개념의 PC 구조이다. 최근 포스트텐션을 적용한 사례가 증가하고 있으며, PC 구조도 재료의 발달과 시공기술의 발전으로 그 적용범위를 넓혀가고 있는 추세이다. 저층부 및 지하부를 구성하는 주차장에 HPPC 시스템 기술이 적용된다면 국내 건설 시장의 기술 수준을 한 단계 올릴 수 있는 계기가 될 것이다. HPPC 시스템은 내구성 및 장경간 확보가 가능하며, 지하주차장, 물류센터 뿐만 아니라 학교건물, 모듈러주택에도 적용이 가능하다. 또한, 본 과제의 기술이 적극적으로 실용화된다면 해외 시장까지도 진출 가능할 것으로 기대된다. 2000년대에 들어서면서 플랫폼 슬래브를 통한 층고절감 및 시공성 향상에 대한 관심이 증대하면서 각 건설업체에서 포스트텐션 시스템 도입에 대한 움직임이 나타나고 있다. 이러한 건설흐름에 따라 지하주차장에서의 HPPC시스템의 적용 수요는 낙관적이라고 할 수 있다. 표 5.1은 국내 주요 포스트텐션 적용 건축물 사례를 나타낸다.

표 5.1 국내 주요 포스트텐션 적용 건축물 사례

시공연도	공사 명	스팬	발 주 처	위 치
1985년	김포공항 신청사	18.0 m	교통부	김 포
1986년	대전 한밭 도서관	15.0 m	대전시	대 전
1988년	목동 실내빙상경기장	30.9 m	체육부	목 동
1989년	영등포 국민투자신탁 사옥	21.5 m	국민투자신탁	서 울
1991년	헌법재판소	16.0 m	헌법재판소	서 울
1994년	한진그룹 종합연구원	19.0 m	한진건설	대 전
1995년	경기 체육고등학교	30.0 m	경기 체고	수 원
1995년	분당 정보통신센터	27.0 m	한국통신	분 당
1996년	흥국생명 사옥	16.0 m	흥국생명	일 산
1996년	영락교회 기념관	30.0 m	영락교회	서 울
1997년	강릉 아이스링크	39.0 m	강릉시	강 릉
1999년	국제 청소년 센터	17.0 m	문화관광부	서 울
2002년	안산 청소년 수련원		안산시	안 산
2003년	일산 문화센터	22.0 m	고양시	일 산
2003년	허준 기념관		강서구	서 울
2004년	국민대학교 종합 복지관		국민대학교	서 울
2004년	삼성 남가좌 제8구역 (래미안)		삼성건설	서 울
2004년	김해 농산물 종합유통센터	8.1 m	경상남도	김 해
2005년	서초 Trapalace II	8.7 m	삼성건설	서 울
2006년	울산 파크폴리스	10.8 m	코오롱건설	울 산
2010년	서울 트윈 트리		한일건설	서 울
2011년	삼성엔지니어링 사옥	11.6 m	삼성엔지니어링	서 울
2011년	제주 다음커뮤니케이션	12 m	현대산업개발	제 주
2013년	광주국립아시아문화전당		문화관광부	광 주
2016년	파르나스 타워	12 m	GS 건설	서 울
2017년	래미안 프리미어팰리스	7~8 m	삼성물산	서 울

앞서 언급한 바와 같이 개발 HPPC 시스템을 적용하고자 하는 주요 대상 건물은 주차장, 학교, 물류센터이다. 그림 5.1에 나타난 바와 같이, 도심을 중심으로 주차공간이 부족한 상황에서 주차장의 페러다임이 무인화로 변화함에 따라 전체 주차장 운영시장 규모가 매년 증가하고 있다.

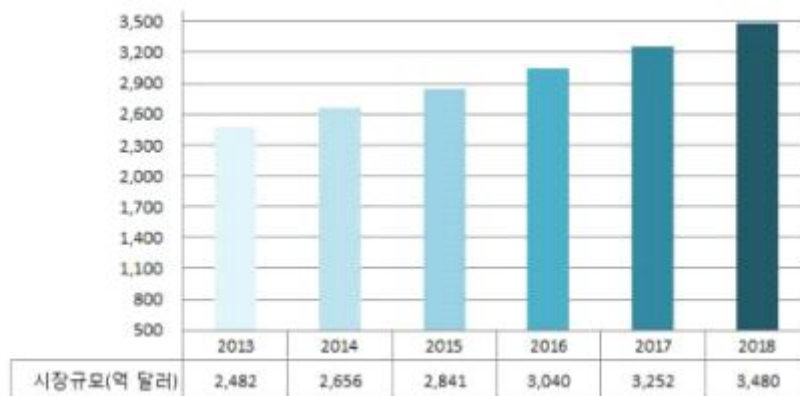


(자료 : VIG파트너스 국내 주차장 운영시장 규모 추이)

그림 5.1 국내 주차장 운영시장 규모

이러한 시장의 흐름과 맞물려, 주차장 구조물의 구조부재 감소 및 장경간 구현을 통한 주차 공간 활용성 및 편의성을 최적화하는 방안에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 개발 HPPC 시스템은 PC 구조물 및 장경간 구조물에 제한없이 적용되는 범용성이 있다. 표 1.3 ~ 1.4와 그림 1.8에서 언급된 바와 같이 HPPC 시스템을 주차장 구조물에 적용하게 되면 기존 RC 및 PC 시스템과 비교해 기둥 간격이 대폭 증가하여, 주차공간 활용성 및 편의성이 확대되고 기둥 개수와 보 개수가 감소함으로써 보안관리 효율성도 증대된다. 또한, 기존 RC 및 PC 구조의 내구성 및 일체성문제로 인한 유지관리비 등의 절감이 가능할 것으로 판단되며, 이러한 근거로 수익 대비 투입 물량을 획기적으로 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

물류창고의 경우에도 그림 5.2와 같이, 국내 물류 산업 시장이 매년마다 끊임없이 증가하고 있는 추세이다.



(자료 : 통계청/신세계유통산업연구소, NICE평가정보 재가공)

그림 5.2 국내 물류 산업 시장 현황

이는 온라인 쇼핑몰과 같이 별도의 물류 창고시설을 요하는 산업의 시장규모가 지속적으로 증가하는 것과 더불어 대규모 물류 자본이 등장하고 있기 때문이다. 이로 인하여 물류센터 임대료가 활성화됨에 따라 대형 물류센터에 대한 수요가 크게 증가하고 있다. 대형 물류센터는 다른 공사에 비해 전체 공사비 중 골조 부분의 차지하고 있는 비율(약 50%)이 상대적으로 높다. 대형 물류센터에 적용되는 골조시스템은 장경간, 높은 층고, 큰 활하중에 대하여 충분한 내력을 지녀야 하며, 물류 자본을 외부하중에 의한 진동과 누수에 대하여 보호할 수 있도록 충분한 내구성능 및 사용성능을 보유하여야 한다. 앞서 언급한 실험 결과와 같이, 개발 HPPC 시스템은 포스트텐션 공법을 통해 장경간 구현이 가능하며, 큰 활하중에 대하여 충분한 내력을 보유하고 있다. 또한, 대형 물류창고에 일반적으로 적용되는 PC 구조물의 접합부에서 발생하는 누수 문제를 획기적으로 해결할 수 있기 때문에, 개발 HPPC 시스템의 대형 물류창고 적용에 대한 수요는 꾸준히 증가할 것으로 예상된다.

최근 들어 경주 지진(2016), 포항 지진(2017)을 비롯하여 국내 지진발생의 빈도수가 급증하고 있다. 표 5.2에 나타낸 바와 같이, 국민안전처가 마련한 ‘기존 공공시설물의 내진 보강기본계획’에 의하면, 2015년 12월을 기준으로 하여 현재 내진보강이 요구되는 전국의 공공 시설물은 전체 공공 시설물의 약 54 % 이다. 특히 학교시설의 내진 성능 확보율은 약 23.7 %에 불과하다. 학교 건물의 경우, 다른 공공시설물에 비하여 전반적으로 노후도가 높으며 이에 따라 대다수의 건물이 현행설계기준에서 요구하는 내진성능을 만족하지 못하는 실정이다. 국내의 경우에는 환태평양 지진대에 위치하는 주변국보다 그동안 지진에 대해 비교적 안전한 지역으로 인식되었으나, 앞서 언급한 경주, 포항 지진과 같이, 가까운 미래에 인명 및 재산 피해를 줄 수 있는 지진이 추가적으로 발생할 가능성이 점차 높아지고 있다. 개발 HPPC 시스템의 경우 [3-나]에서 나타낸 바와 같이, 내진저항골조로서 충분한 성능을 보유하고 있다. 이러한 근거로 HPPC 시스템은 노후된 학교 건물의 개축 또는 신축 등의 조치에 필요한 시스템으로서 충분한 경쟁력을 보유할 수 있을 것으로 판단된다.

표 5.2 국내 주요 공공 시설물의 내진 성능 확보율

(단위 : 개소)

대상 시설	계	내진 성능 확보	내진 보강 필요	내진 성능 확보율(%)
계	116,768	53,206	63,562	45.6
공항시설	441	264	177	59.9
도로시설물	32,210	20,305	11,905	63.0
가스시설	426	424	2	99.5
도시철도	1,075	867	208	80.7
송유관	5	0	5	0.0
수도시설	2,568	1,462	1,106	56.9
어항시설	1,249	318	931	25.5
원자로 등 관계시설	247	243	4	98.4
전력시설	4,273	3,745	528	87.6
철도시설	3,994	1,644	2,350	41.2
고속철도	274	184	90	67.2
항만시설	705	430	275	61.0
학교시설	31,900	7,573	24,327	23.7
유기시설	77	10	67	13.0

병원시설	2,823	1,833	990	64.9
전기통신시설	76	27	49	35.5

(자료 : 국민안전처)

나. 활용계획

연도별 판매계획은 그림 5.3과 같다. 2020년 ~ 2021년도에는 개발기술의 주요 목표시장인 주차장을 목표로 현장적용을 진행하고자 한다. 본 과제의 참여기관인 동서PCC(주)는 연간 회사 매출액이 평균 300억 ~ 350억이며, 지하주차장 시공을 연간 약 5 ~ 6건을 수행하고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 HPPC 시스템이 지하주차장에 적용된다면, 장경간 구현에 따른 기둥 감소로 인하여 공간효율이 극대화될 수 있으며, 기존 PC 접합부의 누수로 인한 경제적인 손실을 최소화할 수 있다는 강점을 가지고 있다. 본 과제에서 수행한 제안공법의 성능평가, 기술적인 연구, 신기술인증신청, Mock-up 시공, 현장적용 사례를 근거로 적극적인 홍보를 통해 최소한 연 2건 이상의 HPPC 시스템을 지하주차장 현장에 적용할 것으로 기대된다. 예상 매출액은 “미래경영연구원”에서 2019년 건설공사 표준품셈을 근거로 결정된 HPPC 시스템의 지하주차장 골조 공사비용을 토대로 산정하였으며, 기술료 수입은 현장적용의 매출실적에 대하여 경상기술료(매출액의 1%)로 산정하였다. 매출액 증가 시기에 해당하는 2022년도에는 HPPC 시스템의 우수한 성능을 바탕으로 적용 시장이 확대될 것으로 예상되며, 지하주차장 뿐만 아니라 물류창고 건물에 대해서도 최소한 연 1건 이상이 적용 가능할 것으로 기대된다. 물류창고 또한 지하주차장과 마찬가지로 물류 자본을 외부하중에 의한 진동과 누수에 대하여 보호할 수 있도록 충분한 내구성능 및 사용성능을 보유하여야 한다. 이러한 취지는 HPPC 시스템의 개발 취지와 부합하므로 적용을 위한 진입장벽이 다소 낮을 것으로 예상된다. 더 나아가 프로그램을 통한 합리적인 설계 프로세스가 정립된다면, 물류창고 뿐만 아니라 높은 내진등급을 요하는 공공시설에서도 다방면으로 HPPC 시스템의 적용이 가능할 것으로 기대된다. 매출액 안정화 시기에 해당하는 2023년도에는 HPPC 시스템의 적용을 국내뿐만 아니라 해외시장까지 개척 가능할 것이며, 본격적으로 영업이익을 극대화 할 수 있을 것으로 기대된다.

표 5.3 HPPC 시스템의 예상 현장적용 개소

(단위 : 개소)

현장적용 대상 시설		2020	2021	2022	2023
국내	주차장 (연면적 7,000m ² /개소)	2	3	4	5
	물류창고 (연면적 21,000m ² /개소)	-	1	2	3
	공공시설 (연면적 5,000m ² /개소)	-	-	1	2
해외	주차장 (연면적 7,000m ² /개소)	-	-	-	2

연구중료 (2020년)	2021년	2022년	2023년
기술 완성화 시기 1. 사업화 모델구축 2. 현장적용[기술검증]	시장개척시기 1. 구조설계 반영 2. 기술홍보[발주서]	매출액 증가 시기 1. 설계 프로세스 정립 2. 공법적용 안정화	매출액 안정화 시기 1. 해외시장 개척
사업화 목표	사업화 목표	사업화 목표	사업화 목표
<ul style="list-style-type: none"> 매출액 : 10.1억원 기술료 수입 : 0.1억원 	<ul style="list-style-type: none"> 매출액 : 32.9억원 기술료 수입 : 0.3억원 	<ul style="list-style-type: none"> 매출액 : 61.6억원 기술료 수입 : 0.6억원 	<ul style="list-style-type: none"> 매출액 : 94.5억원 이상 기술료 수입 : 0.9억
판매계획 <ul style="list-style-type: none"> 협력사와 기술계약 → 설계 및 시공에 반영 기술인증 으로 기술홍보 → 녹색기술&건설기술인증 	판매계획 <ul style="list-style-type: none"> 기술사업화 성과 홍보 → 시장 개척 설계 반영으로 공법 활성화 → 설계반영 	판매계획 <ul style="list-style-type: none"> 설계 프로세스 정립 → 설계반영 공법적용 안정화 → 용도 확대 	판매계획 <ul style="list-style-type: none"> 해외시장 개척 → 국제특허출원, 시장진출마련

그림 5.3 연도별 판매계획



그림 5.4 사업화 전략

핵심원재료의 경우에는 현재와 동일하여 조달에는 특별한 특이 사항이 없는 것으로 사료된다. 또한, 동서PCC(주)의 경우에는 기존 PC 구조물 접합 시공 방법 개선 및 다양화를 추구 혹은 다양한 형태의 PC 부재를 개발하기 위해 많은 국가 및 기업 R&D 과제를 수행하고 있으며, 당사의 사업제품이 PC 부재인 것을 감안하였을 때, 추가 재료나 설비가 필요하지 않고, 개발된 제품을 적용하기 위한 인프라가 적절히 구축되어 있어서 본 과제와의 연관성이 매우 높다고 볼 수 있다. 따라서 본 과제에서 개발한 HPPC 시스템이 성공적으로 사업화에 착수될 경우 매출상승 효과에도 충분히 기여할 수 있을 것이라고 판단된다.

다. 국내·외 시장규모 및 전망

국내에서는 지난 수년간 다양한 구조시스템이 개발되었으나, 많은 건설현장에서 여전히 전통적인 철근콘크리트 및 PC구조를 사용하고 있다. 다만, HPPC 시스템의 경우에는 기존 건설시장에서 큰 부담없이 사용할 수 있고, 앞서 증빙한 바와 같이 경제성 및 구조성능이 뛰어나므로, 즉시 적용이 가능하다. 또한, 부재 중량의 경량화로 인하여 양중이 용이하여, 대형 물류창고, 지하주차장 등 대형 부재가 필요한 건축구조물에 광범위하게 적용될 수 있다. 이러한 장점을 바탕으로 해외에서는 현장건설인프라가 적절히 확보되지 못한 제3세계 및 개발도국에서 보다 더 효율적으로 적용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 100년이상 지속가능한 내구성능을 바탕으로 HPPC 시스템의 친환경성을 장점으로 저탄소 녹색성장을 기본모토로 차용하고 있는 선진국에서도 충분히 경쟁력 있는 시스템이라고 판단된다.

라. 최종제품의 경쟁력 수준

제품설계 슬림화 내지 최적화로 원가는 낮추고, 향상된 구조물 부재간의 접합성능을 토대로 전반적인 기술의 성능을 개선시켜 기술 경쟁력을 확보하였다. 기존의 PC 구조시스템은 접합부 성능을 확보하기 어렵고, 접합면에 발생하는 균열로 인해 내구성능도 취약하다. 앞서 언급한 바와 같이 HPPC 시스템은 접합부 성능의 확보뿐만 아니라 내구성능 및 보수보강성능도 우수하기 때문에 기존공법에 비해 제품 경쟁력이 매우 뛰어나다고 볼 수 있다. 아래는 HPPC 시스템의 강점 및 기회요인을 정리하여 나타내었다.

- 포스트텐션 공법이 적용된 PC 구조물 설계 및 시공에 대한 노하우를 보유함.
- 포스트텐션 전문 시공업체의 포함으로 연구개발과 관련된 시공적, 기술적인 부분에 대한 지원이 가능함.
- 해외 지사에 의한 기술 지원이 용이함.
- 국내외 포스트텐션 지하주차장 연구 및 적용 사례가 적음.
- 이를 바탕으로 시장에 대한 빠른 선점이 가능함.



그림 5.5 사업화 전략

6. 연구개발성과의 보안등급

- 해당사항 없음.

7. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
-------	----------------	-------------	----	--------	---------------	---------------	---------------	-----------------

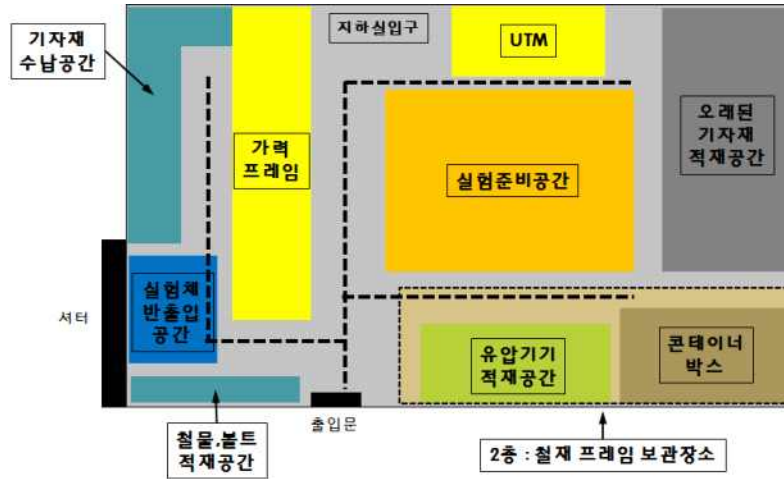
- 해당사항 없음.

8. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

가. 연구실 안전조치 이행계획

1) 실험실 안전 점검 체계

○ 실험이 수행되는 실험동은 아래 그림과 같이 안전구획에 따라 관리함.



○ 실험동 사용 시 사용계획을 수립하고 실험동 사용 안전사항 및 수칙을 숙지하며, 정해진 관리 및 출입 대장을 작성함.

실험실 사용 계획서	
건축학부 건축공학전공 건축구조실�험동	담당관리자(명) : 김광수 교수(부) : 연선영 조교
소 속	[연 학 과]
실 실험	담당인원 : 명
주요사용장비	
특이사항	
작업내용	
사용장소 (내부위치 또는 교시)	
* 관련 세부설정은 첨부자료 참조.	
위와 같이 실험실 및 장비 사용을 신청합니다. 2011 년 월 일	
신청자	(인)
실험실 담당교수:	박 일 국 (인)
	박 기 년 (인)
지도교수:	(인)
* 실험실 사용신청서는 실험실 사용이전에 제출되어야 함. 확인받은 사본을 필적으로 함.	

[입부기록] 1. 세부동향			
일차(요일)			
내용			
일차(요일)			
내용			
일차(요일)			
내용			
일차(요일)			
내용			
* 실험동 무인화 또는 종료 후 유지보수 가능			
2. 실험 동역 및 사용 기자재			
No.	사용기자재	관련 동역 항목	비고
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
* 기록용인 상여자가 사용기자재 주요정보를 기록함.			

건축실험동 관리대장 안전수칙 이행 각서			
성 명		소 속	
직 위		연 락 처	
사 용 목 적			
<p>위 문장은 서울시립대학교 구조실험동을 사용함에 있어 실험실 사용 안전수칙을 지켜고 관리자 지시사항을 철저히 이행하여야 하며, 만약에 발생하는 안전사고와 실험 장비 손상에 대한 모든 책임은 본인에게 있음을 인지하고 이를 서약합니다.</p>			
20 년 월 일			
위 문 인 :		(인)	
대 리 인 :		(인)	
서울시립대학교 건축실험동 관리자		귀하	
* 실험실 안전수칙 이행 각서는 실험실 사용하기 이전에 작성하여야 실험동 담당교수에게 제출			

- 연구개발과정과 교과과정에서 직접 필요한 시험, 실험, 측정, 분석 등 이와 유사한 활동 중의 손해
- 연구실험용 기계, 기구, 장치, 실험재료의 구입, 설치 및 건설 폐기 등 이와 유사한 활동 중의 손해
- 상해에는 유독가스 또는 유독물질을 우연하게도 일시에 흡입, 흡수 또는 섭취 하였을 때에 생긴 중독증상을 포함
- 타 대학·연구기관·산업체등에서 상기 활동 중 발생 한 손해

2) 보험(공제 제안 내용)

○ 보장내역 및 한도

구분	지급사유	보장 한도
사망	사망 및 치료 중 사망	1억원
후유장해	교육과학기술부 장관이 최근 고시한 「연구실사고에 대한 보상기준」 지급	1억원
부상	교육과학기술부 장관이 최근 고시한 「연구실사고에 대한 보상기준」 지급	1천만원

○ 보장내역별 제안내용

- 타 제도에 의한 보상과 관계없이 중복 보상
- 실제 발생한 의료비 보상
- 국민건강보험에서 본인부담금 및 모든 비급여 보상

○ 지급제한(면책사항)

- 계약자나 피보험(공제)자의 고의. 다만 계약자가 피보험(공제)자의 교육·연구 활동 목적상 의도적인 활동으로 발생하는 손해는 보상
- 피보험(공제)자의 자해, 자살, 자살미수, 형법상의 범죄행위 또는 폭력행위(다만, 형법상 정당방위, 긴급피난 및 정당행위로 인정되는 경우에는 보상)
- 피보험(공제)자의 질병. 다만 보장하는 상해가 원인이 되어 질병에 걸렸을 경우에는 보상
- 피보험(공제)자의 임신, 출산(제왕절개 포함), 유산 또는 외과적 수술, 그 밖의 의료 처치. 그러나 보험사(공제회)가 부담하는 상해로 인한 경우에는 보상

○ 기타 사항은 「연구실 안전환경 조성에 관한 법률」 및 표준 보험(공제)약관에 따름.

○ 위 사항에 명시되지 않은 사항은 학교 의견에 따르며, 계약내용에 대하여는 쌍방 간 협의를 통해 변경할 수 있음.

나. 유전자변형생물체(LMO) 연구시설 및 수입 신고 현황

- 해당사항 없음.

시설 번호	제LML00 - 00호	안전 관리 등급	○등급
수입 신고(최근 1년간)		제LMI00-00	

9. 참고 문헌

- [1] ACI Committee 318, 2014, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318M-14), American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 519 p.
- [2] ACI Committee 374, 2005, Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary (ACI 374.1-05), American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 9 p
- [3] Korean Concrete Institute, 2012, Design Codes for Concrete Structures (KCI 2012), Kimundang, Seoul, (Korean).
- [4] Kim, J. H. (2019) Structural Performance of Post-Tensioned Precast Concrete Beam-Column Connections (Masters dissertation). University of Seoul, Seoul, Korea.
- [5] Kim, J. H., Choi, S. H., Hwang, J. H., Kim, K. S., and Woo, W. t. (2019) Structural Behavior of Beam-Column Joints of Post-Tensioned Precast Concrete System, *Journal of the Korea Concrete Institute* 31(3), 277-284. (In Korean)
- [6] BaBA, N., and Nishimura, Y. (2000) Seismic Behavior of RC Columns-Beam Moment Frames, 12WCEE 2000
- [7] Choi, C. S., Kim, S. H., Choi, Y. C., and Choi, H. K. (2013) Analytical Study on Hybrid Precast Concrete Beam-Column Connections. *Journal of the Korea Concrete Institute* 25(6), 631-639. (In Korean)
- [8] Choi, S. H., Hwang, J. H., Heo, I., Kim, K. S., and Woo, W. T. (2018) Flexural Response of Negative Moment Region of Hybrid Prestressed Precast Concrete (HPPC) System. *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 34(10), 3-10. (in Korean)
- [9] Hikmat, E. Zerbe., and Ahmad J, Durrani. (1989) Seismic Response of Connections in Two-Bay R/C Frame Subassembled, *J. Struct. Eng.*, 115(11), 2829-2844.
- [10] Lee, D. J., Lee, J. D., Oh, T. S., and Kang, T. H. K. (2014) Seismic Experiment of Precast Concrete Exterior Beam-Column Joint Using Bolt Type Connection and Prestressing Method. *Journal of the Korea Concrete Institute* 26(2), 125-133. (In Korean)
- [11] Priestley, M. N., and Tao, J. R. (1993) Seismic Response of Precast Prestressed Concrete Frames with Partially Debonded Tendons. *PCI Journal*, 38(1), 58-69.
- [12] Vui V. Cao., Hamid R, Ronagh, Mahmud Ashraf., and Hassan Bji. (2011) A New Damage Index for Reinforced Concrete Structures Subjected to Seismic Loads, International Postgraduate Conference on Engineering, 090506, 194-199.
- [13] Wada, A., Sakata, H., Nakano, K., Matsuzaki, Y., Tanabe, K., & Machida, S. (2006, June) Study on Damage Controlled Precast-Prestressed Concrete Structure with P/C MILD-PRESS-JOINT-Part 1: Overview of P/C Mild-Press-Joint Building Construction and its Practical Applications. In Proceedings of the 2nd FIB Congress (Vol. 400).
- [14] Hwang, J. H. (2017) Seismic Performance of Precast Concrete Beam-Column Connection Tightened by Post-Tensioning Method (Doctoral dissertation). University of Seoul, Seoul, Korea.
- [15] Hwang, J. H., Choi, S. H., Lee, D. H., Kim, K. S., Woo, W. T. (2017, Dec) Reversed Cyclic Loading Test of Post-Tensioned Precast Concrete Beam-Column Connections with 2,400 MPa Prestressing Strands, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 33(12), 45-52.
- [16] Hwang, J. H., Choi, S. H., Kim, J. H., Kim, K. S., and Woo, W. T. (2018) Reversed Cyclic

Behavior of Post-Tensioned Precast Concrete Beam-Column Connections with Unbonded Tendons, *Journal of the Korea Concrete Institute* 30(6), 657-664. (In Korean)

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술사업화지원사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술사업화지원사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.