보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( )발간등록번호( )
국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D / 19CTAP-C142865-02

취성파괴 특성이 개선된 FRP를 활용한 합성/RC 기둥의 내진/내화성능 확보 기술 개발 및 성능검증을 위한 실험적 연구 최종보고서

2020. 01. 31.

주관연구기관 / 서울시립대학교
공동연구기관 / ㈜액트파트너
공동연구기관 / ㈜희상리인포스
공동연구기관 / (재)한국건설생활환경시험연구원

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관 귀하

'취성파괴 특성이 개선된 FRP를 활용한 합성/RC 기둥의 내진/내화성능 확보 기술 개발 및 성능 검증을 위한 실험적 연구'(연구개발 기간 : 2018. 04. 17. ~ 2019. 12. 31.) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2020. 01. 31.

주관연구기관명 : 서울시립대학교 산학협력단 김 강 수 (인)
공동연구기관명 : ㈜액트파트너 고 수 진 (인)
공동연구기관명 : ㈜희상리인포스 노 광 근 (인)
위탁연구기관명 : (재)한국건설생활환경시험연구원 윤 갑 석 (인)

주관연구기관책임자: 최 성 모 교 수
공동연구기관책임자: 염 경 수 소 장
공동연구기관책임자: 노 광 근 대 표
위탁기관책임자: 민 정 기 선임연구원

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	19CTAP-C142865-02	해당 단계 연구 기간	2018. 04. 17 ~ 2019. 12. 31 (21개월)	단계구분	1/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명	취성파괴 특성이 개선된 FRP를 활용한 합성/RC 기둥의 내진/내화성능 확보 기술 개발 및 성능검증을 위한 실험적 연구			
	세부과제명	취성파괴 특성이 개선된 FRP를 활용한 합성/RC 기둥의 내진/내화성능 확보 기술 개발 및 성능검증을 위한 실험적 연구			
연구책임자	최성모	해당단계 참여연구원 수	총:13 명 내부:13 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부: 150,000천원 민간: 50,000천원 정부외: 0천원 상대국: 0천원 계: 200,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총:13 명 내부:13 명 외부: 명	총 연구비	정부: 210,000천원 민간: 70,000천원 정부외: 0천원 상대국: 0천원 계: 280,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	서울시립대학교 산학협력단 ㈜액트파트너 신공법연구소			참여기업명 ㈜액트파트너, ㈜희상리인포스	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명: (재)한국건설생활환경시험연구원			연구책임자: 민정기 선임연구원	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	연구개발성과의 보안등급: 일반 사유: 공고 안내서에 명시한 기준을 적용하여 일반 과제로 분류함

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명정보	생물자원	정보	실물
등록·기탁 번호	4	4									

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약

본 연구는 국토교통기술촉진연구사업 “취성파괴 특성이 개선된 FRP를 활용한 합성/RC 기둥의 내진/내화성능 확보 기술 개발 및 성능검증을 위한 실험적 연구”로 구조물의 내력 및 연성능력을 증가시켜 내진성능을 확보하고, 화재로부터 구조물의 손상을 막고 구조체로서 역할을 할 수 있는 난연성능 및 내화성능을 확보할 수 있는 FRP 소재를 활용한 내진/내화성능 확보기술을 개발한다. 본 연구는 창의도전연구로서 기술성숙도 2단계인 대상 기술의 기술적 개념 정립단계(TRL-2)에서 4단계 성능의 우수성 및 신뢰성 평가(TRL-4)단계에 도달하는 것을 목표로 한다. 본 연구과제에서는 7가지 핵심성과를 목표로 설정하였고, 각 핵심성과별 연구활동을 통해 최종 목표인 FRP를 활용하여 기존 내진보강이 가지고 있는 취성파괴 특성, 시공의 복잡성, 낮은 경제성 등 단범을 극복할 수 있는 합성/RC 기둥의 내진성능 확보 기술 개발 및 기존에 제시되고 있는 난연성능을 만족하며 동시에 기존 내진보강 기술로는 확보할 수 없는 일정 수준의 내화성능을 발휘할 수 있는 내화성능 확보 기술을 개발하였다. 또한 SCI논문, 국내 등재지 논문, 특허 출원등을 통해 본 연구개발 기술을 홍보하고 정량적 성과를 달성하였다.

보고서 면수

89

요약문

연구의 목적 및 내용	본 연구에서는 구조물의 내진성능을 증진시키고, 화재 시 구조물의 손상을 막으며 구조체로서 성능을 유지할 수 있는 내화성능을 확보할 수 있는 성능 개선된 FRP 소재를 활용한 내진/내화성능 확보기술을 개발한다. 본 연구는 창의도전연구로서 기술성숙도 2단계인 대상 기술의 기술적 개념 정립단계(TRL-2)에서 4단계 성능의 우수성 및 신뢰성 평가(TRL-4)단계에 도달하는 것을 목표로 한다. 성능 개선된 FRP 보강 시스템은 전단내력 및 연성능력 증대 효과를 갖는 FRP(Fiber Reinforced Platsic)와 화재로부터 구조물의 기둥과 FRP를 보호할 수 있는 내화도료재를 활용하여 내진/내화성능 향상을 동시에 만족시킬 수 있는 새로운 개념의 보강 기술이다. 먼저 보강 기술에 사용된 신소재의 물성치 특성을 파악하고 수치해석에 활용되는 모델을 개발한다. 성능 개선된 FRP와 내화도료재의 재료적 거동을 파악하기 위해 해석 프로그램을 사용하여 수치해석 방법으로 모사한다. 이후 시스템에 대한 역학적 거동 원리와 개념을 정립하고 이를 토대로 첨단 소재와 융합된 새로운 내진/내화성능 보강 기술을 개발한다. 개발된 내진/내화성능 보강 기술에 대한 물리적 성능을 검증하기 위하여 상세 설계를 실시하고 실험체에 대한 반복 하중 실험, 내화성능 실험으로 성능개선된 FRP와 내화도료재의 종류별 에너지 소산 능력, 화재 내화성을 평가한다. 이때 얻어진 실험 결과를 바탕으로 다양한 설계 파라미터별 유한요소해석 모델을 제작하고 해석결과를 바탕으로 최적의 설계 방식을 도출한다. 수치해석을 통한 기술의 요소적 성능 파악과 부가적 평가를 통하여 시스템의 우수성을 입증하고자 한다.
연구개발성과	**1.SCI논문(2건)** ① Lateral Cyclic Loading Experiment of Aramid FRP Reinforced Non-Sesismic Detailed RC Columns, Steel and Composites, 논문 개제 예정 ② Fire Resistance of Aramid Fiber Reinforced Concrete Columns with Cerak-wool Board, Steel and Composites, 논문 개제 예정 **2.국내논문(4건)** ① FRP 보강 RC기둥의 내진성능 향상에 관한 실험적 연구, 한국복합신소재구조학회 논문집, 2019년 2월호 ② FRP 보강 원형 CFT 기둥의 구조성능 실험평가, 한국복합신소재구조학회 논문집, 2019년 4월호 ③ 아라미드 FRP 보강 비내진상세 철근콘크리트기둥의 반복횡하중 가력실험, 한국복합신소재구조학회 논문집, 2019년 12월호 ④ 세라크울 보드를 적용한 아라미드 섬유 보강 철근콘크리트 기둥의 내화성능, 한국복합신소재구조학회 논문집, 2020년 2월호 **3. 국제학술발표(4건)** ① Study on Seismic and Fire Resistance Reinforcement of Piloti Structure Using FRP(1), 제 5회 요코하마 국립대학교-서울시립대학교 국제학술교류회, 2018 Aug. ② Study on Seismic and Fire Resistance Reinforcement of Piloti Structure Using FRP(2), 제 5회 요코하마 국립대학교-서울시립대학교 국제학술교류회, 2018 Aug. ③ Experimental Study of CFT(Concrete Filled steel Tube) Column Reinforced with Aramid and Polyester FRPs, 제 6회 요코하마 국립대학교-서울시립대학교 국제학술교류회, 2019 Aug. ④ Experimental Study of Circular CFT Column Reinforced with Aramid and Polyester FRPs, 10th International Symposium for Steel Structures, 2019 Nov. **4.국내학술발표(2건)** ① 연성능력 향상을 위한 FRP 보강 RC기둥의 반복하중가력 실험, 2019 한국복합신소재구조학회 학술발표대회, 2019년 4월 ② FRP로 보강된 콘크리트충전 원형강관(CFT)기둥의 중심축하중 실험, 2019 한국강구조학회 학술발표대회, 2019년 5월 **5. 특허출원(4건)** ① 10-2018-0136078 : 에프알피 시트 및 종방향으로 분절된 시멘트보드를 이용한 기둥 보강방법 ② 10-2018-0136077 : 내진보강 및 내화성 확보를 위하여 에프알피 시트 및 시멘트보드를 이용한 기둥 보강방법 ③ 10-2020-0006503 : 세라크울 보드 설치용 가설 유닛 및 이를 이용한 콘크리트 구조물의 불연내화 보강공법 ④ 10-2020-0006505 : 세라크울 보드 설치용 가설 유닛 및 이를 이용한 원형 콘크리트 구조물의 불연내화 보강공법 **6. 시제품제작(5건)** ① FRP로 보강한 RC 기둥 시제품 ② FRP로 보강한 CFT 기둥 시제품 ③ FRP로 보강한 I형 RC 기둥 시제품 ④ FRP로 보강한 RC기둥 시제품 ⑤ FRP로 내화 보강한 RC 기둥 시제품 **7. 학술기사(2건)** ① 포항지진 피해로 예상되는 필로티건물 기둥의 FRP 내진보강 공법, 한국복합신소재구조학회지, 2018년 9월호 ② 세장한 충전형 합성기둥의 FRP 보강 공법, 한국복합신소재구조학회지, 2018년 12월호
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	연구에서 개발된 성능 개선된 FRP를 활용한 내진/내화보강 기술은 기존 내진보강공법 및 내화보강공법에 비해 시공성, 경제성에서 우수성을 나타낸다. 국내 개발 초기 단계인 성능 개선된 FRP 보강기술의 현장 적용 가능성 여부를 판단하는 시도적인 연구를 통해 신소재인 성능 개선된 FRP의 제작 및 보급에 기여할 수 있다. 또한 지진/화재로 인한 구조물의 피해 최소화와 구조물의 지속적인 사용성 확보, 유지보수 비용의 절감효과를 기대할 수 있다. 개발된 성능개선된 FRP를 활용한 내진/내화성능 동시 확보 기술은 국내 도입에선 도전적인 역할을 할 것으로 기대하고 있으며 선진국과의 기술격차를 감소하는데 크게 이바지할 것으로 판단된다. 중소기업과 공동으로 수행 하여 얻어진 연구 성과물은 제품생산과 기술이전이라는 실용화 단계를 거치면서 최종적으로 사업화에 성공을 기대할 수 있다.

국문핵심어 (5개 이내)	신소재	FRP	내화도료재	내진/내화성능	피해복구
영문핵심어 (5개 이내)	New Material	FRP (Fiber Reinforced Plastic)	Fireproof Paint	Earthquake/Fire Resistance	Damage restoration

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1

가. 연구개발의 목적 및 필요성 ····· 1

나. 연구개발 대상 기술 설명 ····· 2

다. 연구개발 추진전략 및 방법 ····· 4

2. 연구수행내용 및 성과 ····· 11

가. 연구개발의 목표 및 내용 ····· 11

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 75

가. 연구개발 성과지표 및 목표 ····· 75

나. 핵심 연구 성과별 설명 및 성과 달성 ····· 76

4. 연구개발성과의 활용 계획 등 ····· 81

가. 성과의 활용방안 ····· 81

나. 연구개발 기대효과 ····· 81

다. 추후 연구를 통한 국내 기술의 경쟁력 향상과 시장 활성화 및 사업화 방안 마련 ····· 82

라. 연구성과 홍보 ····· 82

붙임. 참고 문헌 ····· 85

<별첨>

01-1. 주관연구기관의 자체평가 의견서

01-2. 집행실적 대비표

02. 성과점검기준표

03-1.연구성과목록

03-2. 연구목표대비 연구성과 비교표

03-3. 주요연구내용 및 최종 성과물

04. 연구개발성과활용계획서

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발의 목적 및 필요성

(1) 국내·외 지진, 화재 피해 현황 및 내진/내화성능 확보 기술의 필요성

20세기 이후 전 세계적으로 다양한 자연재해로 인한 막대한 인명 및 재산 피해가 발생되고 있는 가운데 그 중에서 지진으로 인한 피해가 가장 큰 규모를 나타내고 있다. 세계적으로 2008년 중국 쓰촨성 대지진(사망 7만여 명, 재산피해 약 160조원), 2010년 아이티 대지 진(사망 31만여 명, 재산피해 약 15조원), 2011년 동일본 대지진(사망 2만여 명, 재산피해 약 382 조원), 2015년 네팔 대지진(사망 9천여 명, 재산피해 약 4조원) 등과 같은 대규모 지진으로 인한 피해가 발생하였다.

또한 국내의 경우 최근 지진 발생 빈도와 규모의 증가함에 따라 내진현황의 문제점 해결과 국민의 안전에 대한 불감증 해소를 위한 내진 안전성 확보 대책 필요성이 국가적 문제로 확산되고 있다. 최근 한반도에서 지진 관측 이래로 최대인 규모 5.8에 경주지진, 규모 5.4에 포항지진을 포함한 크고 작은 규모의 지진이 발생하였고 앞으로도 진도 6.0 이상 규모의 지진이 추가적으로 발생할 것으로 예상된다. 지진 발생 시 1차적으로 구조물 붕괴와 2차 피해로 발생되는 인적·물적 피해를 직접적으로 예방하고 내진 안정성을 확보하기 위하여 근본적인 해결책이 되는 지진피해 저감 시스템에 대한 기초원천 기술개발에 집중적인 투자가 필요한 상황이다.



(a)2016년 경주지진 (b)국내 발생 지진 순위

그림 1.1 국내 지진 피해 사례 및 발생현황

국내 건축구조기준은 지진의 꾸준한 발생 빈도 증가에 따라 1988년 이후 내진설계 대상 건물에 대한 기준을 제시하고 있으며, 경주, 포항 지진 이후 2017년 개정을 통해 3층 이상, 또는 200㎡ 이상 건축물(창고, 축사 제외), 또는 높이 13m 이상, 또는 처마높이 9m 이상, 또는 기둥간 거리 10m 이상의 건축물들은 필수적으로 내진설계를 진행해야 한다. 하지만 개정 전 시공된 건축물들, 특히 다가구주택의 대부분을 차지하는 필로티 RC 구조물의 경우 내진설계가 되어있지 않으며, 이러한 건물들은 **지진 발생 시 기둥의 취성파괴 발생으로 인한 건물의 붕괴 위험 가능성** 등 큰 위험을 내포하고 있는 상황이다.

화재의 경우 인재(人災)로 인해 발생하는 것이 대부분으로서 한번 발생한다면 재산과 인명의 막대한 피해를 가져옴에 따라 내화성능에 대한 국민적 관심이 확대되고 있다. 국외의 경우 2017년 영국 그렌펠타워에서 발생한 대영 화재로 인해 사망자는 약 80여명, 재산 피해는 가늠하기 어려울 정도이며, 영국에서도 화재 발생 시 건물이 무너질 정도로 내화성능 보강은 중요하다. 또한 2016년 일본 니기타 현 이토이가오 시에서 발생한 대형 화재는 17여명의 사상자를 발생시켰고, 화재 진압에 10시간 이상이 소요되었다. 국내의 경우, 2015년 경기도 의정부시의 아파트에서 단독주택 등에서 화재가 발생하여 130여명의 사상자를 발생시켰으며, 충북 제천시의 스포츠센터에서 발생한 화재는 사상자 60여명을 발생시킬 정도로 대형화재가 빈번하게 발생하고 있는 상황이다. 이러

한 화재 발생으로 인한 구조물과 인적 손상을 막고, 화재이후 보수보강이 손쉽고 원활하게 이루어질 수 있는 내화성능 확보 기술 개발에 집중적인 투자가 증가하고 있는 추세이다.

하지만 현재 건물에 화재가 발생하였을 때 구조체가 스스로의 성능을 발휘할 수 있는 **내화성능 수준**과 **건물의 내화성능 기준 및 법 제도**의 제정이 필요한 상황이다. 대부분의 내진/내화보강 공법의 경우 보강 소재의 성능 기준은 불이 붙었을 때 연소할 수 있는 난연/준불연/불연 성능에 대한 기준만 존재하고 있는 상황이기 때문에 화재로 인하여 구조체에 열이 가해졌을 때 구조체의 성능을 파악하고 안전을 확보할 수 있는 **내화성능에 대한 연구**가 필요한 상황이다.

나. 연구개발 대상 기술 설명

(1) 기존 기술의 문제점 및 해결방안

지진에 저항하여 구조물의 붕괴를 막아 인적·물적 피해와 손상을 방지할 수 있는 지진피해 저감을 위한 내진설계의 세부기술로는 내진/면진/제진 방식이 있다. 먼저 내진구조 설계방식은 국내에 가장 많이 사용하는 방식이며 부재를 특정 규모의 지진 하중에 견디도록 설계하는 기술로 현행 건축, 토목 등의 설계기준에서는 내진설계가 의무화 되어 있다. 이러한 내진구조 설계방식은 구조물의 강도와 인성을 증가시켜 외력에 저항하는 방식으로 강진 발생 시 구조물에 발생되는 손상을 줄이기 위하여 부재의 단면적을 확보하여 설계하는 방식이다.

다음으로는 제진구조가 있다. 제진구조 설계방식은 구조물의 내부나 외부에 댐퍼와 같은 시스템 장치를 국부적으로 설치하여 지진이 발생하는 방향으로 직접적으로 대응하며 구조물의 진동을 저감시키고 변위를 감소시키거나, 구조물의 강성이나 감쇠 등을 변화시켜 구조물을 제어하는 방식이다.

마지막으로 면진구조 설계방식은 구조물과 지반 사이에 전단변형 장치를 설치하여 지반과 건물을 격리(Base Isolation)시키는 방식으로 지진이 발생하는 경우 구조물의 고유주기를 길게 하여 지진과 구조물과의 공진을 막아 지진 하중의 영향을 감소시키는 방식이다.

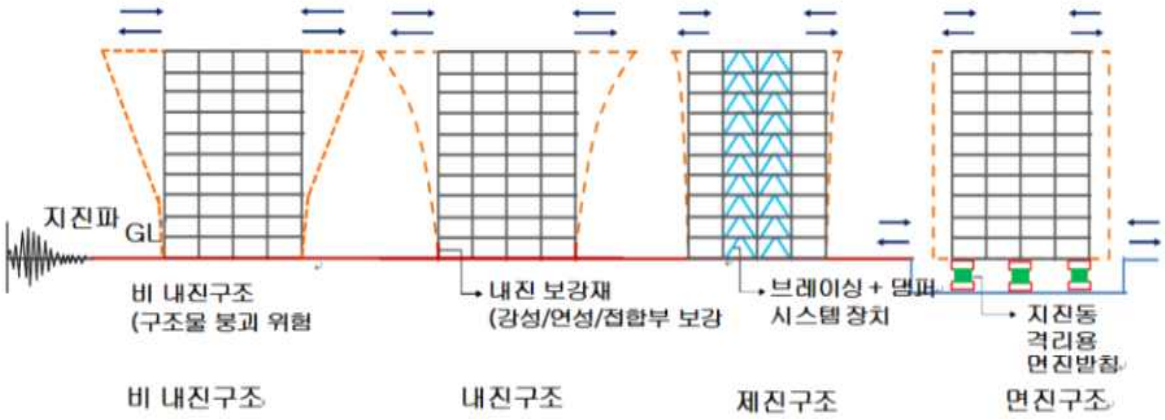


그림 1.2 지진피해 저감기술 (내진, 면진, 제진 설계 개념)

내진설계방식에서 주로 활용되는 강판보강공법은 일반적으로 4.5~6.0㎜ 정도의 것을 사용하는데, 접착된 강판이 기존 구조부재와 일체거동을 한다고 전제하에 구조계산을 적용하면 1~2㎜ 정도로 충분하나 작업성 및 강판의 부식을 고려하여 4~5㎜ 정도의 강판을 사용한다. 강판보강공법은 부재 단면크기의 변화가 거의 없고, 경화 후 수축이 없기 때문에 확실한 보강효과가 기대되나 보강재인 강판이 중량재이므로 취급이 불편하고 부식 및 내화성능이 취약하고, 확실한 시공이 보장되지 않는다면 구조물의 고정하중만 증가시키는 단점이 존재한다. 또한 강판보강의 경우 화재 발생 시 구조물을 보호할 수 있는 내화성능을 확보하기 어려운 단점이 있다. 따라서 **기존 내진보강, 특히 강판보강이 가지고 있는 취성파괴 특성, 시공의 복잡성, 낮은 경제성 등 단점을 극복할 수 있는 합성/ RC 기둥의 내진성능 확보 기술 개발**이 필요한 상황이다.

화재에 저항하여 구조물의 보호와 화재 이후 내화피복재의 보수보강을 위한 내화성능 보강 기술로는 내화페인트/내화보드/내화뿜칠 방식이 있다. 화염에 노출 된 경우 또는 부재 일부에 열화 현

상이 발생이 된 경우든 보수 보강을 위해서는 필연적으로 내화 피복재를 제거가 필수이다. 접합부위 피복제거는 매우 난해하며, 부재까지 손상, 변형 우려가 높다. 그럼에도 별도의 대안 없이 매년 반복적인 시공을 고수하고 있어 매우 비경제적인 상황이다. 내화페인트의 경우 제품 인증에 대한 결과와 성과는 매우 급성장 하는 반면, 열화 또는 중성화 된 내화도료제의 유지관리 측면에서는 그 어떤 자료, 실험, 분석이 없는 상태이다. 또한 내화보드 부착 공법은 공장에서 제작된 섬유 또는 보드 형태로 현장에서 손쉽게 시공이 이루어지는 장점을 가지는 반면, 내화성능 유지시간이 상대적으로 낮은 단점이 있다. 마지막으로 내화뿜칠 공법은 암면, 석고, 질석 및 퍼라이트 등과 시멘트를 혼합하고 무기질의 결합재를 첨가한 피복재를 보강을 요하는 구조물 표면에 뿜칠 시공하는 것으로 습식 및 반습식 공법으로 나뉜다. 내화뿜칠 공법은 가장 보편적으로 사용되는 내화보강 공법이지만, 유지관리 측면에 대한 연구가 진행이 되어있지 않고 일정 시간 동안만 구조물을 보호할 수 있는 기준이 정해져 있을 뿐, **구조물이 가열될 때 구조물의 열하중에 의한 성능 저하에 대한 기준 등 연구가 필요한 상황**이다.



(a)내화페인트 (b)내화보드 (c)내화뿜칠

그림 1.3 화재피해 저감기술

따라서 내진 성능을 확보하는 동시에 기존의 내진성능인 **취성파괴 특성을 개선**하고, 제시되고 있는 불연성능을 만족하며 동시에 **구조물의 내화성능까지 확보**할 수 있는 새로운 내진/내화성능 확보 기술개발이 필요하다.

(2) 취성파괴 특성이 개선된 FRF를 활용한 합성/RC 기둥의 내진/내화성능 확보 기술 개발

본 연구에서 제안하는 기술은 높은 강성과 강도라는 우수한 특성을 갖고 있으나, 최대하중 이후 취성적으로 파단되는 불리함으로 인해 적용에 한계를 갖는 FRP의 성능을 개선 또는 발굴하여 신축구조물의 합성기둥과 기존 건축물의 RC 기둥에 내진성능 보강재로 활용하기 위한 기술을 개발하고자 한다. 또한 화재로부터 구조물의 손상을 막고, 화재이후 구조물의 유지보수 능력이 뛰어난 내화도료재의 개발을 통해 FRP 보강기술의 내화성능을 개선시킬 수 있는 기술을 개발하였다.

새롭게 제안한 FRP를 활용한 보강 시스템은 구조물의 내력 및 연성능력 증가 효과를 갖는 FRP를 활용하여 합성기둥과 지진에 취약한 필로티 RC 기둥을 대상으로 지진 하중 발생 시 내진성능을 가질 수 있는 보강 기술을 개발하고, 동시에 난연/준불연/불연 기준만 만족하는 기존 내진보강 시스템보다 진보하여 불연/내화성능을 가진 FRP와 새로운 재료의 내화보드를 활용하여 화재 발생 시 합성기둥 및 필로티 RC 기둥이 가열되는 상황에서도 구조물의 구조성능을 유지할 수 있는 내화성능이 확보된 피복시스템을 개발하고자 한다.

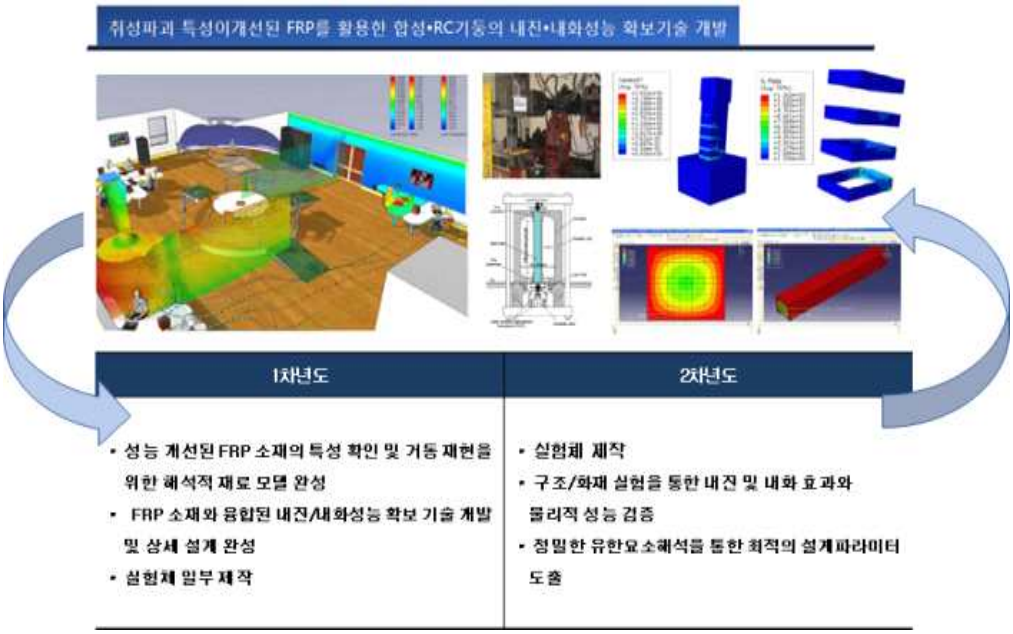


그림 1.4 성능 개선된 FRP를 활용한 보강 기술의 주요 연구내용

(3) 신소재를 활용한 합성/RC 기둥의 내진/내화성능 확보기술의 구성 및 작동 원리

성능 개선된 FRP를 활용한 내진/내화성능 확보 기술은 기능적으로 내진보강(Seismic Reinforcement)과 내화보강(Fire Resistance)으로 나눌 수 있다. 내진보강의 경우 국내 주택분야에서 많은 부분을 이루고 있는 다가구 필로티 구조물의 합성 또는 RC(Reinforced Concrete) 기둥의 내진보강을 위한 역할을 담당한다. FRP 소재는 고강도, 고강성을 갖고 있음에도 불구하고 건설 현장에 제한적으로 사용되었으나, 최근 기존에 주로 사용되고 있는 강판보강에 비해 보강 시 구조물의 연성거동을 확보 가능하고, 구조물의 면처리 후 접착제 및 FRP 도포로 이루어지는 간단하고 우수한 시공성을 가지며 저렴한 원자재로 인한 높은 경제성이 있고 내화학성, 내부식성이 뛰어나다는 장점을 인정받아 내진보강용으로 활발하게 사용되고 있다. 본 연구에서는 이러한 FRP의 장점을 활용하여 합성/RC 기둥의 내진성능 보강 기술에 사용하고자 한다.

내화보강은 화재 전, 후의 내화성능보강을 위한 역할을 담당한다. 화재 시 기존 제시되고 있는 수준의 난연/불연 성능을 발휘하며 합성/RC 기둥 및 내진보강을 위해 시공된 FRP에 열전달을 방지하여 구조체가 화재 상황 시에도 구조성능 및 내진성능을 발휘할 수 있도록 내화피복재를 사용하고자 한다. 시멘트보드, 세라크울 보드 등 다양한 소재의 내화보드를 FRP로 내진보강된 구조물의 외부에 설치하여 간단한 시공으로도 구조물의 내진/내화성능을 확보할 수 있도록 한다.

다. 연구개발 추진전략 및 방법

(1) 연구개발 핵심성과

본 연구를 효율적이고 체계적으로 진행하기 위하여 7가지의 연구개발 핵심성과를 정의하고, 각 핵심성과별 연구목표를 설정하였다.

(가) 핵심 1: 활용될 성능 개선된 FRP와 내화도료재의 물성치 특성 확인 및 거동 재현을 위한 해석적 재료 모델 완성 (1차년도)

연 차	주요 연구활동	세부연구내용
1차 년도	• 참고문헌 조사(전문가 자문 포함)	성능 개선된 FRP의 구성과 재료적 특성에 대한 자료를 수집하고 조사
	• 신소재의 물성치 특성 파악	파악된 FRP 소재의 특성을 파악하고 내진/내화보강에 사용하기 위한 FRP 소재 선정
	• 해석모델 제작 및 검증	선정된 FRP 소재를 활용하여 보강된 구조물의 유한요소해석을 통하여 내진보강효과 검증

(핵심 1)의 이론적 배경과 연구내용은 다음과 같다. 내진 보강재로서 가장 많이 사용되는 기존의 FRP 보강재는 높은 강성과 강도적 특성을 가지고 있으나 제한적으로 적용되고 있는 상황이다. 따라서 국내 및 해외의 다양한 FRP 소재에 관한 참고문헌 조사와 전문가 자문을 통해 다양한 소재의 FRP에 대한 물성치 특성을 파악하고 성능 개선된 FRP 보강 시스템에 적합한 모델을 제안하고자 한다. 또한 제안된 FRP를 활용한 보강 시스템 모델의 재료적 거동을 ABAQUS 프로그램을 사용하여 모델링하고 유한요소해석을 통해 검증하고자 한다.

(나) 핵심 2: 성능 개선된 FRP 소재와 융합된 내진성능 확보 기술 개발 및 상세 설계 완성 (1차년도)

연 차	주요 연구활동	세부연구내용
1차 년도	• 해외의 문헌조사 및 정보 수집	FRP 보강 시스템과 관련된 해외의 문헌 조사 및 정보 수집
	• 성능 개선된 FRP 보강기술의 개념 정립	성능 개선된 FRP 보강 시스템에 대한 원리와 개념을 정립하기 위하여 관련된 실험 논문들을 분석하고 선행연구에서 정립된 FRP 시스템에 대한 원리와 개념을 토대로 신소재와 융합된 보강시스템의 개념을 정립
	• 성능 개선된 FRP 보강기술의 상세설계 완성	개발된 성능 개선된 FRP 시스템의 작동 원리를 토대로 성능 개선된 FRP 시스템의 상세 설계를 완성함

(핵심 2)의 이론적 배경과 연구내용은 다음과 같다. 다양한 FRP 보강 시스템과 관련된 해외의 문헌 조사 및 정보 수집을 통하여 FRP 소재의 기본적 특성인 고강성, 고강도 특성을 최대한 활용하고, 기존 내진보강의 약점으로 지적된 취성적 파괴를 극복할 수 있도록 연성 능력이 확보되어 내진보강 효과를 극대화 시킬 수 있는 내진보강 시스템 장치의 개념을 정리하고자 한다. 또한 개념 정립된 성능 개선된 FRP 보강기술의 작동 원리를 토대로 성능 개선된 FRP 시스템의 상세 설계를 완성하고자 한다.

(다) 핵심 3: 실험을 위한 실험체 제작 및 구조 실험을 통한 지진피해 저감효과와 물리적 성능 검증 (1차년도, 2차년도)

연 차	주요 연구활동	세부연구내용
1차 년도	• 실험체 제작 및 실험 진행	상세 설계를 바탕으로 실험을 위한 실험체를 제작하여 성능 개선된 FRP를 활용한 내진보강 성능 확인
2차 년도	• 실험체 제작	상세 설계를 바탕으로 필로티 RC 기둥 및 합성기둥에 FRP를 내진보강 설계한 실험체 제작
	• 재료 실험 수행	필로티 RC 기둥 및 합성기둥의 실험 진행 후 결과 분석을 위한 실험체 재료 실험 수행
	• 구조 실험 수행 및 분석	상세 설계를 바탕으로 RC/합성 기둥 실험체의 내력 및 연성능력 증가 확인 실험을 수행하고 RC/합성 기둥 실험체의 내력 증가 및 연성능력 증가를 분석

(핵심 3)의 이론적 배경과 연구내용은 다음과 같다. 1차년도에는 내진성능 확인실험을 위한 성능 개선된 FRP를 활용한 내진성능 확보 기술의 실험체를 설계하고 RC/합성 기둥의 내진성능 보강 효과를 확인하고자 한다. 선정된 소재의 FRP의 보강 방법, 보강 면적, 두께 등을 파라미터로 산정하여 RC 기둥의 반복횡하중 가력 실험체 및 CFT 단주 기둥의 반복축하중 가력 실험체를 제작하여 실험으로 FRP 보강 시 구조적 성능을 검증하였다. 2차년도에는 실제 필로티 기둥을 분석하여 제작한 실험체에 반복적인 변위제어 하중을 가하여 구조 실험을 수행하고 준정적 시간 변위 하중 이력곡선을 사용하여 일정한 속도로 실험체에 하중을 가하고 성능 개선된 FRP 보강 기둥의 하중-변위 곡선을 확인하여 각 실험체별로 얻어진 하중-변위 곡선에서 항복강도 및 최대강도 연성능력 등을 측정하여 보강기술의 물리적 성능을 관측하고 평가하고자 한다. 또한 실제 주로 사용되고 있는 CFT 기둥 단면의 FRP 보강 시 내진성능을 분석하기 위하여 FRP를 보강한 CFT 기둥 실험체를 횡방향 가력하여 물리적 성능을 평가하고자 한다.

(라) 핵심 4: 정밀한 유한요소해석을 통한 최적의 설계 파라미터 도출

연 차	주요 연구활동	세부연구내용
2차 년도	• 유한요소해석 모델 제작 및 해석 수행	내진성능 확보를 위한 최적의 설계 파라미터를 도출하기 위하여 3차원 솔리드 요소를 사용해 유한요소 해석모델을 제작하고 유한요소 해석을 수행
	• 해석 결과의 분석	하중-변위 곡선에서 내력 및 연성능력을 모델별로 관측하고 거동에 대한 역학적 메커니즘을 확인함
	• 최적의 설계 파라미터의 도출	모델별로 관측한 하중-변위곡선을 토대로 최적의 설계 파라미터를 도출함

(핵심 4)의 이론적 배경과 연구내용은 다음과 같다. 경계조건을 고려하고 3차원 솔리드 요소를 사용하여 실제 실험 조건과 유사한 유한요소해석모델을 제작하고 해석을 수행하고자 한다. 이후 각각의 모델별로 성능 개선된 FRP 보강 시스템 하중-변위 등의 거동을 측정하여 내력 및 연성능력 등 역학적 메커니즘을 확인한 후 이를 토대로 보강 시스템 전체의 거동과 비교하여 최적의 설계 파라미터를 도출하고자 한다.

(마) 핵심 5: 성능 개선된 FRP 소재에 적합한 내화성능 확보 기술 개발 및 상세 설계 완성

연 차	주요 연구활동	세부연구내용
1차 년도	• 해외의 문헌조사 및 정보 수집	화재 저항성이 우수한 FRP 보강 시스템과 관련된 해외의 문헌 및 정보 수집하고 관련된 실험 논문들을 분석
	• 내화성능 보강 시스템의 개념정립	개발된 성능 개선된 FRP 시스템의 작동 원리를 이해하고 에폭시, 내화페인트, 내화보드 등의 요소 기술의 화재시 특성을 분석하여 보강 시스템의 개념 정립
	• 내화성능 보강 시스템의 상세설계 완성	선행연구에서 정립된 FRP 시스템에 대한 원리와 개념을 토대로 신소재와 융합된 보강시스템을 개발

(핵심 5)의 이론적 배경과 연구내용은 다음과 같다. FRP를 활용하여 내진보강을 진행한 합성기둥 및 필로티 RC 기둥의 내화 피복 시스템 개발을 위하여 국내 및 해외의 내화 피복 시스템에 대한 실험 논문들을 분석하여 내화피복 시스템의 개념을 정립하고 상세설계를 진행하고자 한다.

(바) 핵심 6: 실험을 위한 실험체 제작 및 내화 실험을 통한 화재피해 저감 효과와 내화성능 검증

연 차	주요 연구활동	세부연구내용
2차 년도	• 실험체 제작	상세 설계를 바탕으로 FRP 및 내화보드를 이용한 내화보강 실험체 제작
	• 재료 실험 수행	필로티 RC 기둥 내화성능평가 실험 진행 후 결과 분석을 위한 실험체 재료 실험 수행
	• 내화 실험 수행 및 분석	일반 RC 단주기둥의 내화성능을 측정하고 성능 개선된 FRP 내화성능 보강 시스템을 화재에 노출시킨 후 온도변화에 따른 실험체의 온도 곡선을 분석하여 성능 개선된 FRP 보강 시스템의 화재 피해 저감 효과와 내화재의 성능을 검증하고 화재 저항성능의 분석을 통해 보강성능의 우수성을 검증함

(핵심 6)의 이론적 배경과 연구내용은 다음과 같다. 내화성능이 확보된 성능 개선된 FRP 보강 시스템을 설계하고 단주 기둥 규모의 실험체 모델을 제작하여 화재시험 전문기관인 KCL의 내화가열로를 이용하여 표준화재 및 외부화재 온도상승곡선에 따른 성능 개선된 FRP 보강시스템의 내화성능 측정하고자 한다.

(사) 핵심 7: 열해석을 통한 성능 개선된 FRP보강 시스템의 화재 시 거동 메커니즘과 최적의 설계 파라미터 도출

연 차	주요 연구활동	세부연구내용
2차	• 유한요소해석 모델 제작	내화성능의 동시 확보를 위한 최적의 설계 파라미터를

년도		도출하기 위하여 3차원 솔리드 요소를 사용해 유한요소 열해석 모델을 제작함
	• 비선형 유한요소 해석 수행	(1)화재 이력곡선과를 사용하여 비선형 유한요소 열해석을 수행함 (2) 예측의 정확도를 높이기 위하여 실험결과에 해석 모델을 보정(Calibration)하는 작업을 실시함
	• 해석 결과의 분석	(1)화재온도별 하중-변위 곡선에서 극한강도, 온도에따른 하중저감율 등을 모델별로 관측함 (2)성능 개선된 FRP 보강 시스템의 구성 요소인 에폭시, 내화도료제 등의 열적 특성을 확인함
	• 최적의 설계 파라미터의 도출	모델별로 관측한 이력곡선을 토대로 최적의 설계 파라미터를 도출함

(핵심 7)의 이론적 배경과 연구내용은 다음과 같다. 성능 개선된 FRP 보강 시스템의 내화성능 분석을 위한 열해석 모델을 제작하고 열해석을 수행하고자 한다. 외부 화재로 인한 가열 시 구조물 및 FRP에 열전달을 차단할 수 있는 다양한 소재의 내화보드를 사용하여 설계법을 제안하며 다양한 파라미터에 대한 열해석을 통해 성능 개선된 FRP 보강 시스템 최적의 설계파라미터를 도출하고자 한다.

본 연구의 핵심성과의 성과유형, 연구기관, 해당연차, TRL을 정리하여 아래의 표로 정리하였다.

연번	핵심성과(CTE)	성과유형	연구기관	해당연차	TRL
1	활용될 신소재의 물성치 특성 확인 및 거동 재현을 위한 해석적 재료 모델 완성	재료자체유형	서울시립대학교	1차년도	4단계 (성능검증)
2	성능 개선된 FRP 소재와 융합된 내진성능 확보 기술 개발 및 상세 설계 완성	공법, 기법유형	서울시립대학교 /액트파트너	1차년도	2단계 (개념정립)
3	실험을 위한 실험체 제작 및 구조실험을 통한 지진 피해 저감 효과와 물리적 성능 검증	공법, 기법유형	서울시립대학교 /액트파트너/희상리인포스	1~2차년도	3단계 (기본성능검증)
4	정밀한 유한요소해석을 통한 최적의 설계 파라미터 도출	공법, 기법유형	서울시립대학교 /액트파트너	2차년도	3단계 (기본성능검증)
5	성능 개선된 FRP 소재에 적합한 내화성능 확보 기술 개발 및 상세 설계 완성	공법, 기법유형	서울시립대학교 /KCL	1차년도	2단계 (개념정립)
6	실험을 위한 실험체 제작 및 내화 실험을 통한 화재 피해 저감 효과와 열적 성능 검증	공법, 기법유형	서울시립대학교 /희상리인포스/ KCL	2차년도	3단계 (기본성능검증)
7	열해석을 통한 성능 개선된 FRP 보강 시스템의 화재 시 거동 메커니즘과 최적의 설계 파라미터 도출	공법, 기법유형	서울시립대학교 /KCL	2차년도	3단계 (기본성능검증)

(2) 연구개발 추진체계

주관연구기관인 서울시립대학교는 성능 개선된 FRP를 활용한 합성/RC 기둥의 내진/내화성능 확보 기술 개발 및 실험적 연구을 총괄한다. 이를 위하여 활용될 신소재 FRP의 특성 확인 및 해석모델을 완성하고, FRP를 활용한 RC/합성 기둥의 내진/내화 성능 확보기술에 대한 개념정리 및 상세설계를 진행한다. 또한 구조/내화 실험을 통한 물리적/열적 실험을 검증하고, 유한요소해석을 진행하여 설계파라미터를 도출하고자 한다.

공동연구기관인 ㈜액트파트너와 ㈜희상리인포스는 FRP를 활용한 합성/RC 기둥의 내진/내화성능 확보 기술의 실험적 검증을 진행하기 위하여 신소재 FRP 소재 및 내진/내화 실험체를 제작하고 실험에 대한 준비 업무를 수행한다. 또한 실험 진행 후 데이터 측정과 정리, 기술의 현장 적용성 검토 업무를 수행한다.

위탁연구기관인 (재)한국건설생활환경시험연구원에서는 합성/RC 기둥의 내화성능 확보 기술 개발을 위하여 내화성능 확보 기술 개발을 담당하고 이에 대한 상세 설계를 진행한다. 또한 FRP를 활용한 내화성능 확보기술의 실험적 검증을 진행하기 위하여 신소재 FRP 소재와 내화보드를 이용한 내화실험체의 열적 성능검증 실험을 수행하고, 본 기술의 내화성능을 평가한다.

본 연구개발의 연구수행 체계도는 다음과 같다.

연구개발과제	
과제명	취성파괴 특성이 개선된 FRP를 활용한 합성/RC 기둥의 내진/내화성능 확보 기술 개발 및 성능검증을 위한 실험적 연구

기관별 참여 현황			
구분	기관 수	인원 수	총인원 수
산업계	2	6	13
대 학	1	5	
국공립(연)			
출연 (연)	1	2	
기 타			

주관연구기관	공동연구기관	공동연구기관	위탁연구기관
서울시립대학교	㈜액트파트너	㈜희상리인포스	(재)한국건설생활환경시험연구원
참여연구원	**참여연구원**	**참여연구원**	**참여연구원**
주관연구책임자(최성모) 외 4명	공동연구책임자(염경수) 외 4명	공동연구책임자(염경수)외 0명	위탁연구책임자(민정기) 외 1명
담당연구개발내용	**담당연구개발내용**	**담당연구개발내용**	**담당연구개발내용**
-신소재 거동 특성 확인 -시스템의 원리 및 개념 정립 -성능 개선된 FRP 내진/내화성능 보강 기술 설계 -유한요소해석 수행 및 결과 분석 -최적 설계파라미터 도출 -해석 결과의 분석 및 부가적 평가 업무 수행	-실험체 제작 -실험에 대한 준비 업무 -구조성능실험 수행 -데이터 측정과 정리 -현장 적용성 검토	-실험체 제작 -실험에 대한 준비업무 -FRP 소재의 성능 개선과 구조실험 수행 -데이터 측정과 정리 -현장 적용성 검토	-재료와 구조실험 수행 -데이터 측정과 정리 -해석 및 실험방법에 대한 자문 -전문가 그룹과의 연구 공조 (※공동 세미나, 자문회의, 아이디어 도출 회의 등의 업무 수행)

(2) 연구개발 추진전략 및 일정

본 연구를 효율적으로 추진하기 위하여 핵심성과를 정리하고 추진체계를 설립하였다. 시스템과 관련하여 이론, 설계, 해석, 실험 등 연구의 전반적인 업무는 주관연구기관인 서울시립대에서 담당하였고, 실험체의 제작과 실험 수행의 업무는 공동연구기관인 ㈜액트파트너, ㈜희상리인포스, 한국건설생활환경시험연구원에서 담당하여 업무를 분담하여 효율적으로 연구를 수행하였다. 또한 자문에 대한 전반적인 사항은 학· 연 분야에서 종사하는 전문가 자문 그룹을 만들어 업무를 분담하고 체계적으로 연구를 수행하였다.

연차	연구목표 (최종성과물)	연구내용 (주요연구활동)	추진일정 (월별) 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1차년도	핵심1: 활용될 성능 개선된 FRP 소재의 물성치 특성확인 및 거동 재현을 위한 해석적 재료 모델 완성	참고문헌 조사 (전문가 자문 포함)				■								
		신소재의 물성치 특성 파악				■	■							
		UMAT 모델 제작 및 검증					■	■						
	핵심2: 성능 개선된 FRP 소재와 융합된 내진성능 확보 기술 개발 및 상세 설계 완성	해외의 문헌조사 및 정보 수집						■	■					
		성능 개선된 FRP 보강 기술의 개념 정립							■	■	■			
		성능 개선된 FRP 보강 기술 개발 및 상세설계완성									■	■		
	핵심3: 실험을 위한 실험체	실험체 제작											■	■

	제작 및 구조 실험을 통한 지진피해 저감효과와 물리적 성능 검증													
	핵심5: 성능 개선된 FRP 소재에 적합한 내화성능 확보 기술 개발 및 상세 설계 완성	해외 문헌조사와 정보 수집												
		성능 개선된 FRP 최적의 내화성능 보강 시스템의 개념 정립												
		성능 개선된 FRP 최적의 내화성능 보강 시스템의 개발 및 상세설계완성												
2차년도	핵심3: 실험을 위한 실험체 제작 및 구조 실험을 통한 지진피해 저감효과와 물리적 성능 검증	실험체 제작												
		재료 실험 수행												
		구조 실험 수행												
		실험결과의 분석												
	핵심4: 정밀한 유한요소해석을 통한 최적의 설계 파라미터 도출	유한요소해석 모델 제작 및 수행												
		해석결과의 분석												
		최적 설계 파라미터의 도출												
	핵심6: 실험을 위한 실험체 제작 및 내화 실험을 통한 화재피해 저감 효과와 내화성능 검증	실험체 제작												
		재료 실험 수행												
		내화 실험 수행												
		실험결과의 분석												
	핵심7: 열해석을 통한 성능 개선된 FRP 보강 시스템의 화재 시 거동 메커니즘과 최적의 설계 파라미터 도출	유한요소해석 모델 제작 및 수행												
		해석결과의 분석												
		최적 설계 차라미터의 도출												

2. 연구수행내용 및 성과

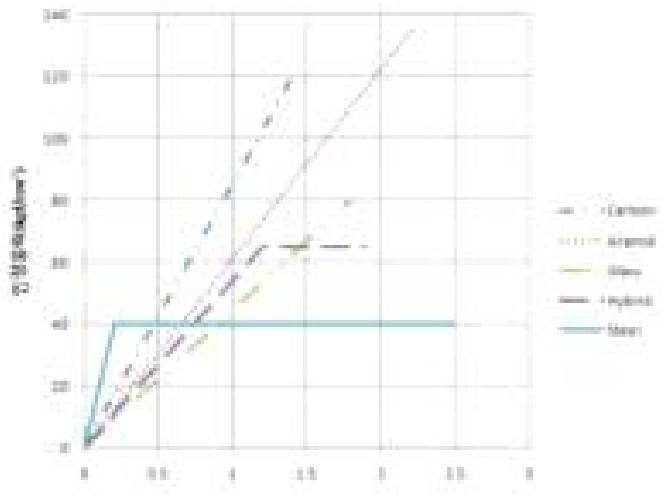
가. 연구개발의 목표 및 내용

(1) 연구개발의 최종 목표

본 연구개발의 최종목표는 FRP를 활용하여 기존 내진보강이 가지고 있는 취성파괴 특성, 시공의 복잡성, 낮은 경제성 등 단점을 극복할 수 있는 성능 개선된 합성/RC 기둥의 내진성능 확보 기술을 개발하며, 동시에 기존 제시되고 있는 불연성능을 만족하며 강판보강 등 기존 내진보강 기술로는 확보할 수 없는 일정 수준의 내화성능까지 발휘 할 수 있는 내화성능 확보 기술을 개발하고자 한다. 이를 위하여 1차년도에는 성능 개선된 FRP를 활용한 합성/RC 기둥의 내진/내화성능 확보 기술의 개념을 정립하고 상세설계를 완성하여 요소 기술을 적용한 실험체의 제작 및 실험수행과 실험결과 분석을 통한 내진/난연성능의 확인 목표로 하였다. 2차년도에는 실제 필로티 RC 기둥 및 합성기둥을 상정한 실험체를 제작하여 FRP 보강 시 구조체의 내력, 연성능력 증가에 따른 내진성능 확인 실험을 진행하고, 정밀한 유한요소해석을 수행하여 설계 파라미터를 제시하고자 한다. 또한 RC 단주 실험체에 FRP와 내화보드를 활용한 내화 피복 시스템 실험체를 제작하여 표준화제 및 외부화재 조건 시 내화피복 시스템의 내화성능을 분석하고 열해석을 통해 설계 파라미터를 제시하고자 한다.

(2) 연구개발 수행내용 및 성과

본 '취성파괴 특성이 개선된 FRP를 활용한 합성/RC 기둥의 내진/내화성능 확보 기술 개발 및 성능검증을 위한 실험적 연구'의 연구개발 내용은 다음과 같다.

구분 (연도)	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 내용 및 성과
1차년도 (2018)	활용될 성능 개선된 FRP 소재의 물성치 특성 확인 및 거동 재현을 위한 해석적 재료 모델 완성	활용될 소재의 구조적 특성 분석	(1)국내외 문헌 조사를 통한 Carbon, Aramid, Glass, Hybrid, Steel 의 인장-응력 변형률 특성 분석  (2) Aramid와 SRF 공법의 소재 선정 · Aramid: 화학저항성 우수, 연신율 우수, 비전도체성 소재 · SRF 소재: 내진관련 기술의 선진국인 일본으로부터 활성화, 강성보단 연성능력에 초점




(Aramid와 SRF 소재)

(3) 내화성능 확보를 위한 피복시스템 제안
· 불연소재인 CRC 보드를 활용한 피복시스템



(CRC 보드 불연테스트)

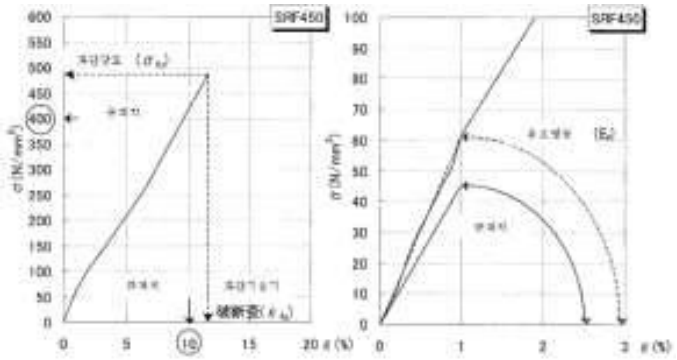
(4) [성과] 학술기사 발표 2건(한국복합신소재구조학회)
· 포항지진 피해로 예상되는 필로티 건물 기둥의 FRP 내진 보강 공법
· 세장한 충전형 합성원형기둥의 FRP 공법

거동 재현을 위한 해석적 재료모델 평가

(1) Aramid와 SRF 소재의 해석적 재료모델
(ASTM D3039-17a 시험방법)
· Aramid

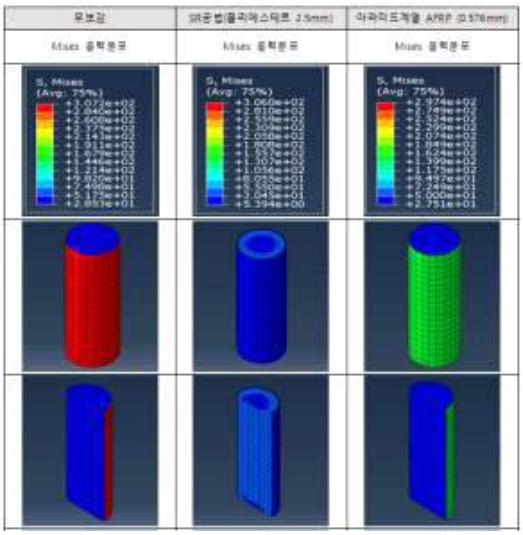
시험항목		단위	시험결과
Plate	인장강도	MPa	1638
	인장탄성율	GPa	93
Sheet	인장강도	MPa	2249
	인장탄성율	GPa	121

· SRF



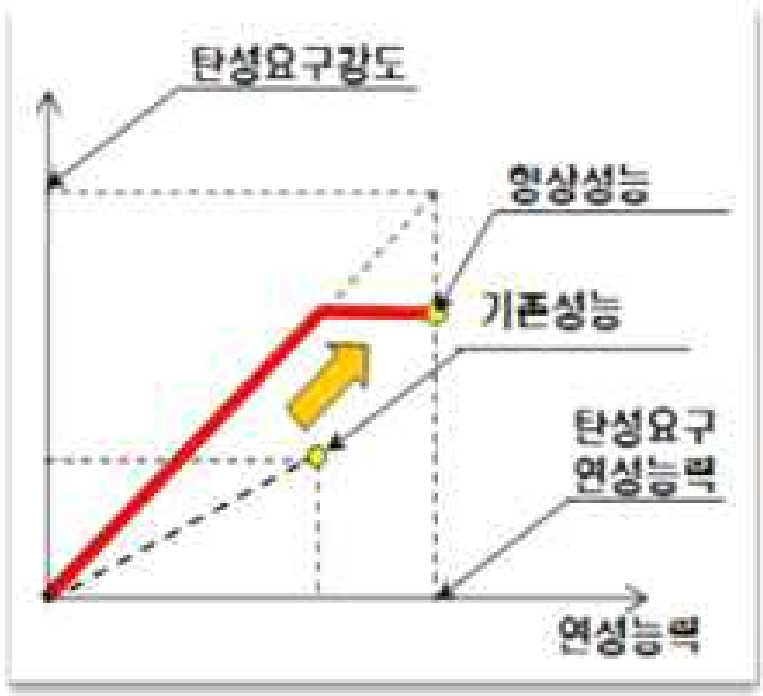
(SRF 소재 파단강도 및 탄성계수)

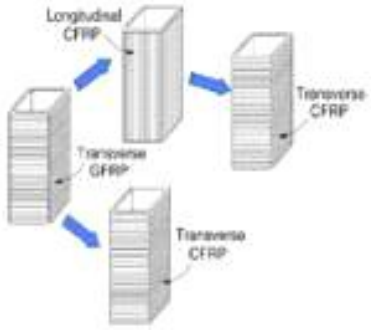
(2) Aramid, SRF 소재의 응력 분포

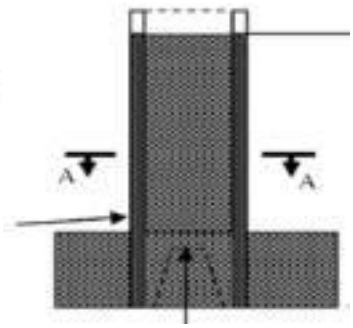


(3) CRC 보드 불연성능 특성

시험 종목	검사 방법	결과		
		S1	S2	S3
질량 감소율 (%)	KS F ISO 1182	18.2	18.1	18.1
최고와 최종 온도차 (불연)	KS F ISO 1182	1.4	2.0	2.5
평균행동 정지시간	KS F 2271	14분 15초	14분 24초	-

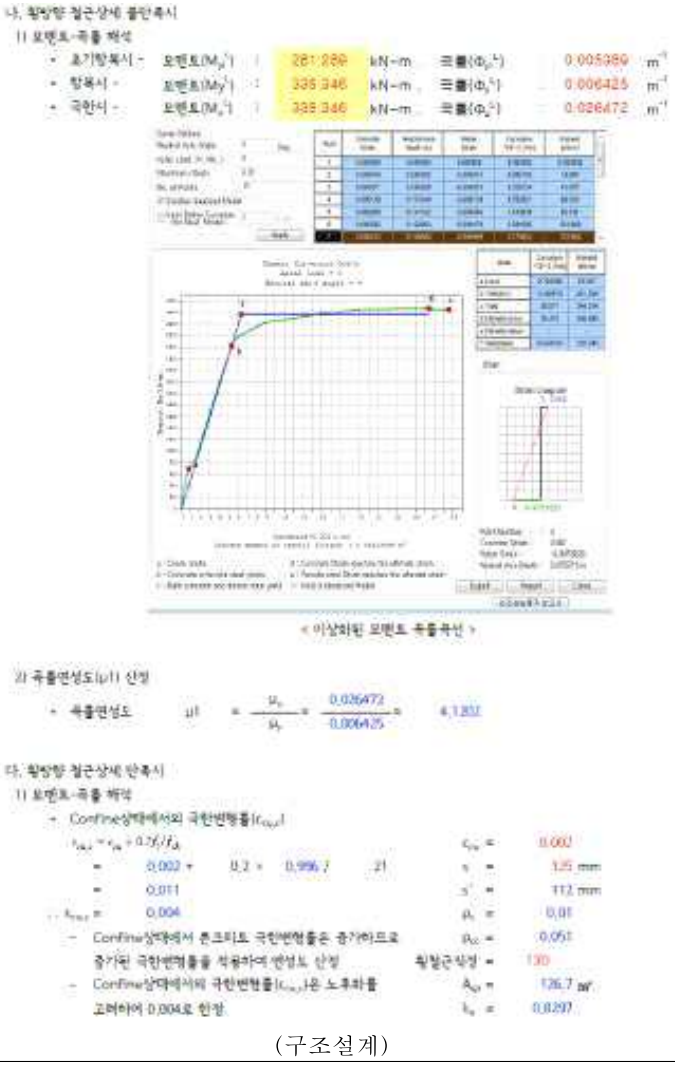
성능 개선된 FRP 소재와 융합된 내진성능 확보 기술 개발 및 상세 설계 완성	FRP 보강 시스템 개념 정립	(1) Aramid, SRF 소재 보강 개념 · 보유내력과 강성 확보를 통한 내진성능 향상 

<table>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td>


(휨 보강)


(전단 보강)

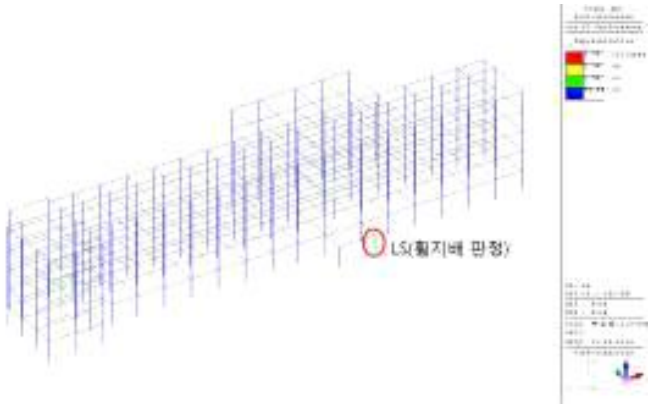
(2) <u>[성과] 학술기사 발표 2건(한국복합신소재구조학회)</u>
· 포항지진 피해로 예상되는 필로티 건물 기둥의 FRP 내진 보강 공법
· 세장한 충전형 합성원형기둥의 FRP 공법

(5) <u>[성과] 국제학술발표대회 2건(제 5회 요코하마 국립대학교-서울시립대학교 국제학술교류회)</u>
· Study on Seismic and Fire Resistance Reinforcement of Piloti Structure Using FRP (1)
· Study on Seismic and Fire Resistance Reinforcement of Piloti Structure Using FRP (2)</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td>내력 보강을 위한 FRP 적용 및 보강 설계</td>
<td>(1) Aramid 보강
· 상세설계를 통한 Aramid 보강 효과 검증

(구조설계)</td>
</tr>
</table>

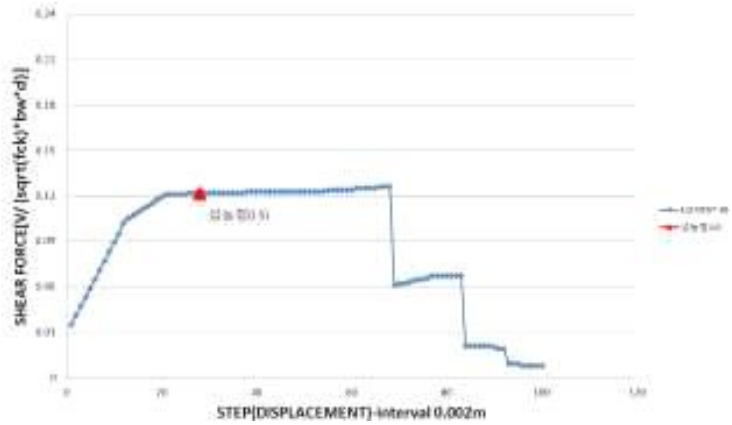
(2) SRF 보강

· 해석적 검토를 통한 SRF 보강 효과 검증_띠철근으로 가정, 변형도 증가

구분	전단력	항복변형도 [D1]	변위비 [D/D1]
보강 전	0.122	$9.8*10^{-5}$	0.515
띠철근 보강	0.122	$4.05*10^{-4}$	0.125



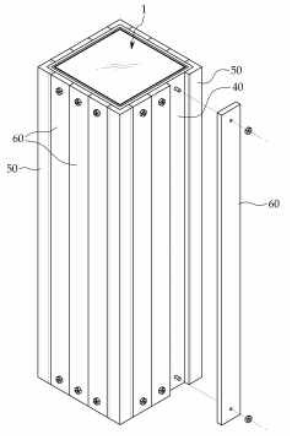
(보강이 필요한 부재 선정)



(보강을 통한 성능곡선)

(3) 특허 출원

· 개념 정리 및 상세설계를 통한 성능 개선된 FRP 소재와 융합된 내진성능 확보 기술에 대한 특허 출원



(특허 상세도)

			(4) **[성과] 특허출원 1건** · 10-2018-0136078
	실험을 위한 실험체 제작 및 구조 실험을 통한 지진피해 저감 효과와 물리적 성능 검증	성능 개선된 FRP 보강 시스템의 실험체 제작	(1) 소재 시험편 제작 · 강재 및 철근 두께별 각 3ea   (인장시편 및 철근 각 3ea) (2) FRP 보강된 CFT 기둥 실험체 · 실험체 제작 36ea 변수: FRP type, 폭두께비, 보강량, 기둥형상, Strip 보강   (원형, 각형 CFT 실험체 제작) (3) FRP 보강된 RC 기둥 실험체 · 실험체 제작 7ea 변수: FRP type, 보강위치, Strip 보강   (4) FRP 난연성능 및 부창성능 실험 · 실험체 제작 변수: FRP type, 접착면(일반강도, 고강도, 강재), 보강량





재료 및 구조 실험 수행 및 결과 분석을 통한 성능 검증

(1) 소재 실험 결과(평균)

· 강재

강종	두께 (㎜)	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	연신율 (%)
SM355	6.5	548	427	33
	9	560	419	35
	10	547	396	35

· 철근

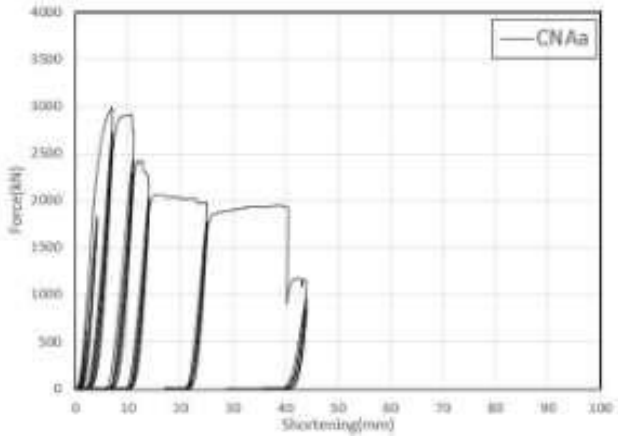
Type	직경 (㎜)	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	연신율 (%)
SHD	D10	586	494	10
	D13	692	567	10
	D16	667	547	13

(2) FRP 보강 CFT 기둥 축력실험 결과

· Aramid FRP 보강




(Aramid 보강 실험 전·후)

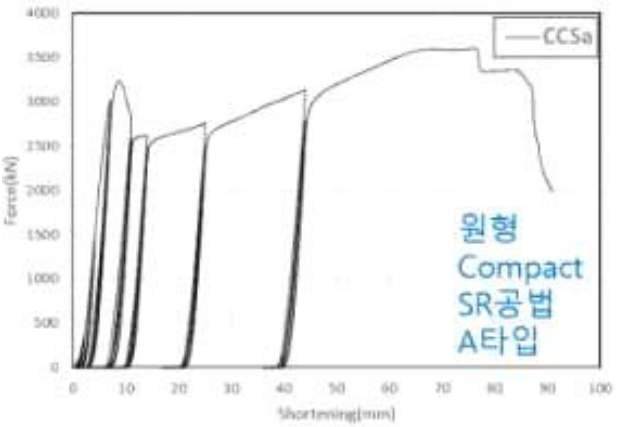


(실험 결과)

· SRF 보강



(SRF 보강 실험 전·후)



(실험 결과)

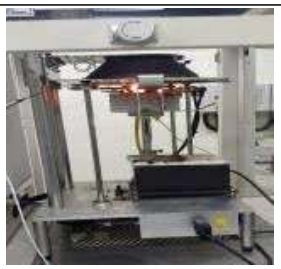
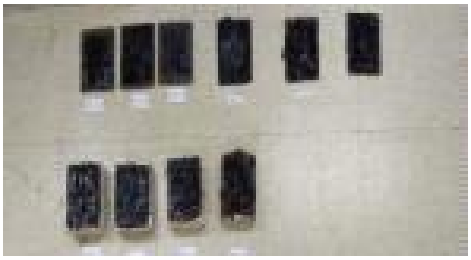
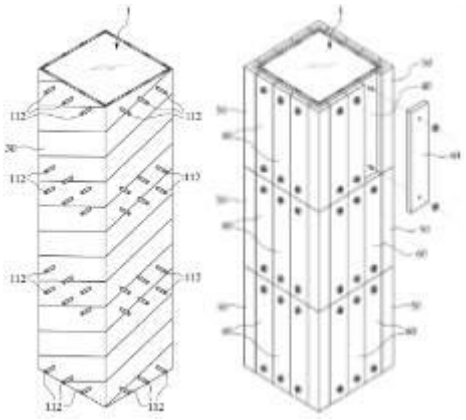
(3) FRP 난연성능 및 부착성능 실험

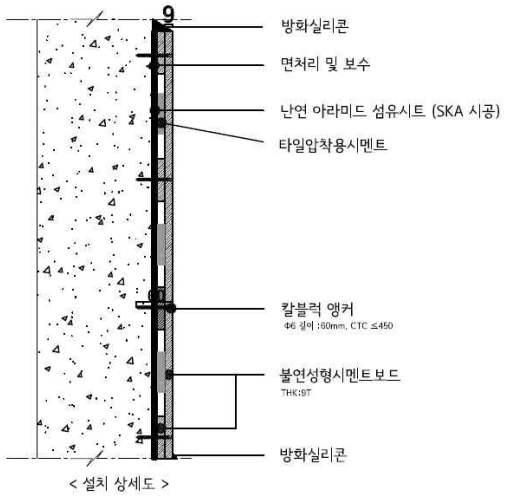
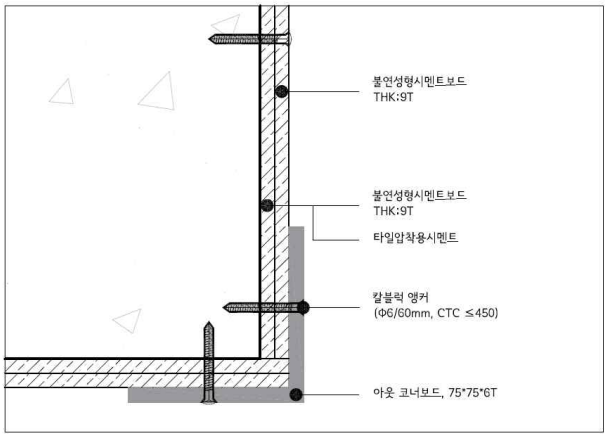
· Aramid

- 난연 성능 확보 가능
- 콘크리트에 비해 강재판의 성능 저하 확인
- 종류별 상온 및 화재 시 부착 강도 측정

· SRF

- 난연 성능 확보 어려움
- 콘크리트에 비해 강재판의 성능 저하 확인 및 추가적인 피복 필요성 확인
- 종류별 상온 및 화재 시 부착 강도 측정

			  (난연성능실험 모습과 결과)   (부착성능실험 모습과 결과) (4) **[성과] 논문 게재 2건 (한국복합신소재구조학회)** · FRP 섬유를 사용한 필로티 RC기둥의 내진 보강 · FRP 구속된 충전형 합성기둥의 중심축하중 실험 (5) **[성과] 국제학술발표대회 2건(제 6회 요코하마 국립대학교-서울시립대학교 국제학술교류회, The 10th ISSS)** · Experimental Study of CFT(Concrete Filled steel Tube) Column Reinforced with Aramid and Polyester FRPs · Experimental Study of Circular CFT Column Reinforced with Aramid and Polyester FRPs (6) **[성과] 국내학술발표대회 2건(한국복합신소재구조학회/한국강구조학회)** · 연성능력 향상을 위한 FRP 보강 RC기둥의 반복하중가력 실험 · FRP로 보강된 콘크리트충전 원형강관(CFT)기둥의 중심축하중 실험 (7) **[성과] 시제품 제작 2건** · FRP로 보강한 CFT기둥 실험체 · FRP로 보강한 RC기둥 실험체
	성능 개선된 FRP 소재에 적합한 내화성능 확보 기술 개발 및 상세 설계 완성	성능 개선된 FRP 내화성능 확보 기술 개발	(1) FRP 보강면을 열원으로부터 차단하는 피복시스템 개념 정립 · FRP 소재를 활용한 구조보강 후 내화성능 확보를 위한 피복 시스템 · 불연성능이 입증된 CRC 보드를 피복재로 활용  (피복 시스템 개념도)

			(2) **[성과] 특허출원 1건** · 10-2018-0136077
		성능 개선된 FRP 내화성능 보강 시스템의 상세설계 완성	(1) FRP 보강 공법 설치 상세도 분석  (단면 설치 상세도)  (세부 상세도) (2) FRP 보강 내화피복 공법 분석 <table><tr><th>구 분</th><th>공 법</th><th>재 료</th></tr><tr><td>도장공법</td><td>내화도료공법</td><td>팽창성 내화도료</td></tr><tr><td rowspan="4">습식공법</td><td>타설공법</td><td>콘크리트 경량콘크리트</td></tr><tr><td>조적공법</td><td>콘크리트 블록 경량 콘크리트 블록 돌, 벽돌</td></tr><tr><td>미장공법</td><td>철망 모르타르 철망 펄라이트 모르타르</td></tr><tr><td>뿜칠공법</td><td>뿜칠 암면 습식 뿜칠 압면 뿜칠 모르타르 뿜칠 플라스터 실리카, 알루미나계열 모르타르</td></tr><tr><td>건식공법</td><td>성형판 붙임공법</td><td>무기섬유 혼입 규산칼슘판 ALC판</td></tr></table>

<table>
<tr><td></td><td></td><td></td><td>
<table>
<tr><td></td><td></td><td>무기섬유강화 석고보고
석면 시멘트판
조립식 패널
경량콘크리트 패널
프리캐스트 콘크리트판</td></tr>
<tr><td></td><td>휘감기 공법</td><td></td></tr>
<tr><td></td><td>세라믹울 피복공법</td><td>세라믹 섬유 블랭킷</td></tr>
<tr><td>합성공법</td><td>합성공법</td><td>프리캐스트 콘크리트판
ALC 판</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td rowspan="2">2차년도
(2019)</td><td>실험을 위한 실험체 제작 및 구조 실험을 통한 지진피해 저감 효과와 물리적 성능 검증</td><td>성능 개선된 FRP 보강 시스템 실험체 제작</td><td>(1) 소재 시험편 제작
· 강재 및 철근 각 3ea
 
(강재 인장시편 및 철근 각 3ea)

(2) FRP 보강된 필로티 RC 기둥 실험체
· 실험체 제작 4ea
변수: 휨/전단 보강, FRP 보강 두께
 
(필로티 RC 실험체 제작)

(3) FRP 보강된 CFT 기둥 실험체
· 실험체 제작 12ea
변수: CFT기둥 폭두께비, FRP 보강유무, 전단스팬비
 
(Aramid FRP 보강 CFT 기둥 실험체 제작)</td></tr>
<tr><td></td><td>실험체 제작과 재료 및 구조 실험 수행 및 결과 분석을 통한 성능 검증</td><td>(1) 소재실험 결과 (평균)
· 철근
<table>
<tr><th>Type</th><th>직경
(㎜)</th><th>항복강도
(MPa)</th><th>탄성계수
(MPa)</th></tr>
<tr><td rowspan="2">SHD</td><td>10</td><td>450</td><td>220473</td></tr>
<tr><td>19</td><td>478</td><td>220267</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

· 강재

강종	두께 (㎜)	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)
SM355	9	458.9	541.6	201308

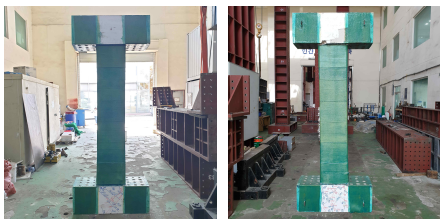
· 콘크리트(RC 기둥)

f_{ck} (MPa)	공시체1 (MPa)	공시체2 (MPa)	공시체3 (MPa)	평균 (MPa)
30	43.30	42.40	46.63	44.05

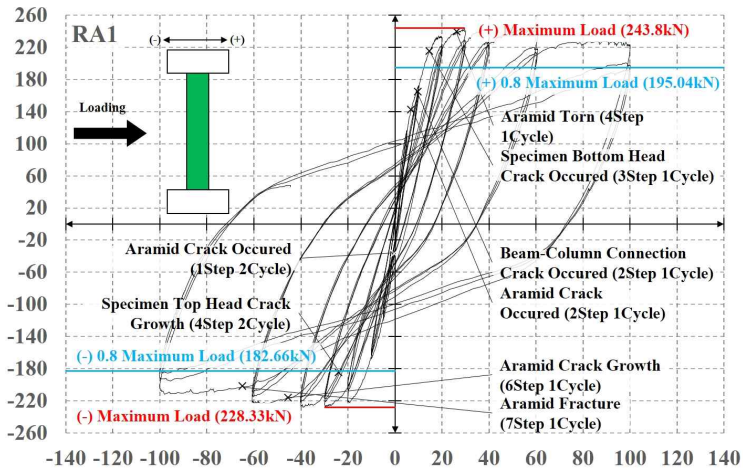
· 콘크리트(CFT 기둥)

f_{ck} (MPa)	공시체1 (MPa)	공시체2 (MPa)	공시체3 (MPa)	평균 (MPa)
30	34.14	40.11	42.22	38.32

(2) FRP 보강 비내진철근상세 I형 RC기둥의 반복횡하중 실험 결과



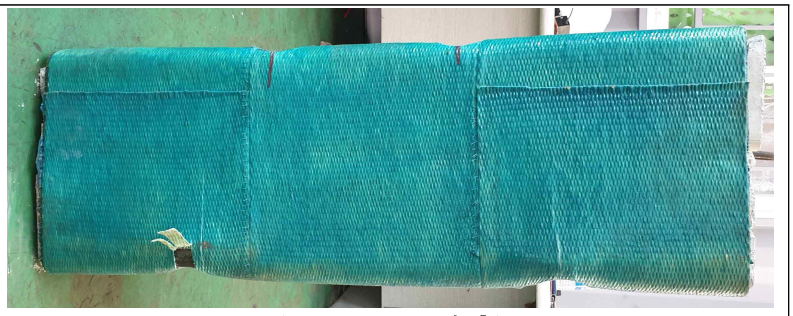
(반복횡하중 가력 실험 결과)



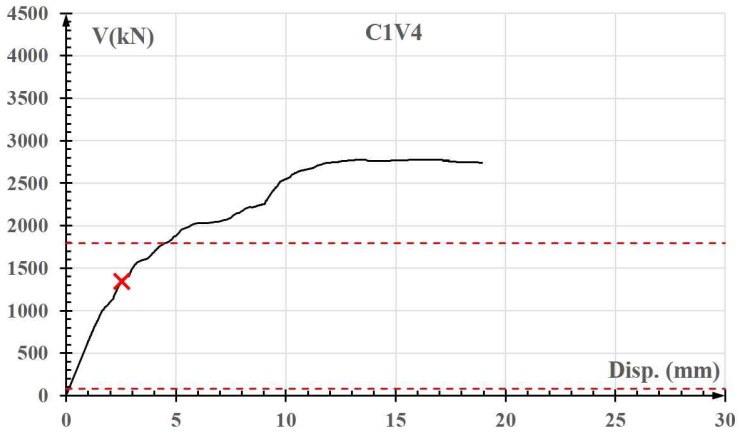
(실험 결과)

(3) FRP 보강 CFT 기둥의 전단내력 실험 결과





(Aramid 보강 전·후)



(실험 결과)

(3) **[성과] SCI 논문 투고 1건 (Steel and Composites)**

· Lateral Cyclic Loading Experiment of Aramid FRP Reinforced Non-Seismic Detailed RC Columns

(4) **[성과] 논문 개제 1건 (한국복합신소재구조학회)**

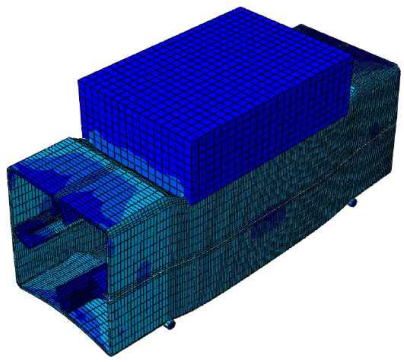
· 아라미드 FRP보강 비내진상세 철근콘크리트기둥의 반복횡하중 가력실험

(5) **[성과] 시제품 제작 2건**

· Aramid FRP로 보강한 RC기둥 실험체

· Aramid FRP로 보강한 CFT기둥 실험체

정밀한 유한요소해석을 통한 최적의 설계 파라미터 도출	유한요소해석 모델 제작 및 해석수행	(1) 용접조립각형 CFT기둥 해석모델 제작



(용접조립각형 CFT 기둥 해석모델 제작)

· Steel(SM355) Material Properties

강종	탄성계수 (MPa)	푸아송비	항복강도 (MPa)	소성변형률
SM355	201308	0.3	458.9	0.003

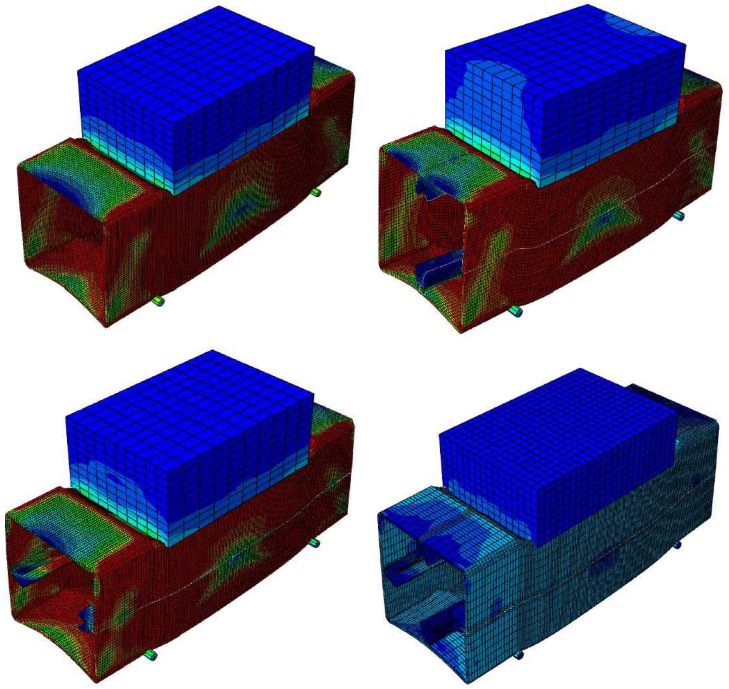
· Mesh

Model Type	Mexh Element	폭방향 크기	길이방향 크기
Solid	C3D8R	12㎜	5㎜

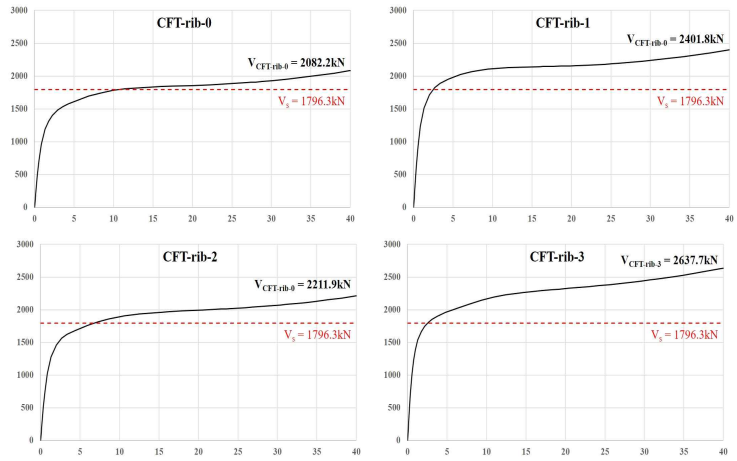
(2) 변수설정

해석모델	변수	비고
CFT-rib-0	리브의 위치에 따른 용접조립 각형 CFT 기둥의 전단내력 확인	일반 CFT (리브 존재 X)
CFT-rib-1		리브 플랜지 존재
CFT-rib-2		리브 웨브 존재
CFT-rib-3		리브 플랜지, 웨브 존재

(3) 해석결과



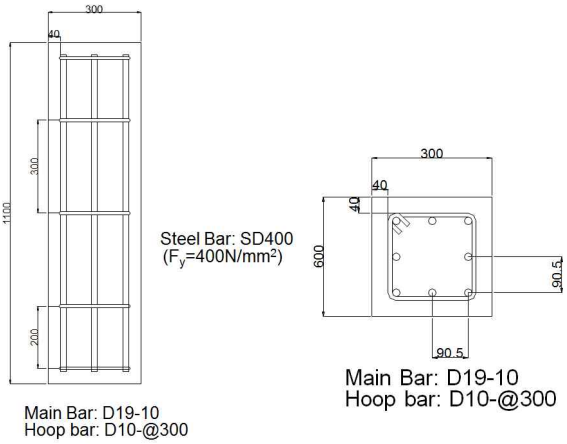
(해석 결과)



(하중-변위 그래프)

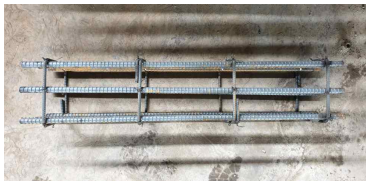
유한요소해석 결과로 최적의 설계방식 도출	(1) 현행 KBC내 CFT기둥의 전단내력 산정식 확인 · KBC의 CFT기둥 전단내력 산정식의 경우 강관 또는 콘크리트의 전단내력 중 큰 값으로 CFT기둥의 전단내력을 보며, 강관의 전단내력식은 AISC 기준과 동일

<table>
<tr><td></td><td></td><td></td><td>(2) KBC 강관 전단내력 산정식의 경우 강관 웨브의 면적에 따라 전단내력이 결정
Shear Strength of Interior Web Panels with $a/h \le 3$ Considering Tension Field Action
The nominal shear strength, V_n, is determined as follows:
(a) When $h/t_w \le 1.10\sqrt{k_v E/F_y}$
$V_n = 0.6F_y A_w$ (G2-6)
(b) When $h/t_w > 1.10\sqrt{k_v E/F_y}$
(1) When $2A_w/(A_{fc}+A_{ft}) \le 2.5$, $h/b_{fc} \le 6.0$ and $h/b_{ft} \le 6.0$
$V_n = 0.6F_y A_w \left[C_{v2} + \frac{1-C_{v2}}{1.15\sqrt{1+(a/h)^2}}\right]$ (G2-7)
(2) Otherwise
$V_n = 0.6F_y A_w \left[C_{v2} + \frac{1-C_{v2}}{1.15\left[a/h+\sqrt{1+(a/h)^2}\right]}\right]$ (G2-8)
(AISC 강관 전단내력 식)

· 용접조립각형 CFT기둥의 경우 전단내력 산정 시 AISC 기준에 따라 웨브의 면적만 포함
· 해석 결과, 웨브 및 플랜지에 있는 리브 역시 강관의 전단내력에 영향을 주는 것으로 판단, 따라서 용접조립각형 CFT 기둥의 전단내력 산정 시 리브의 면적 포함</td></tr>
<tr><td></td><td>실험을 위한 실험체 제작 및 내화실험을 통한 화재 피해 저감 효과와 내화성능 검증</td><td>성능 개선된 FRP 보강 시스템의 실험체 제작</td><td>(1) FRP 보강 내화 실험체 설계
 

RC 실험체의 재료 강도
<table>
<tr><th colspan="2">철근의 항복강도 (MPa)</th><th>Concrete fck (MPa)</th></tr>
<tr><td>D10</td><td>D19</td><td rowspan="2">44.05</td></tr>
<tr><td>450</td><td>478</td></tr>
</table>
아마리드 시트의 재료강도
<table>
<tr><th>아라미드</th><th>탄성강도 (MPa)</th><th>인장강도 (MPa)</th></tr>
<tr><td>Sheet</td><td>120000</td><td>2100</td></tr>
</table></td></tr>
</table>

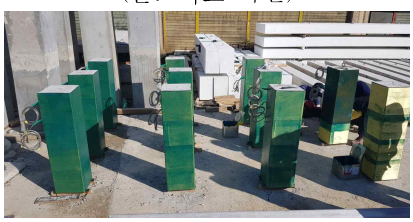
(2) FRP 보강 내화 실험체 제작




(철근 배근)



(콘크리트 타설)



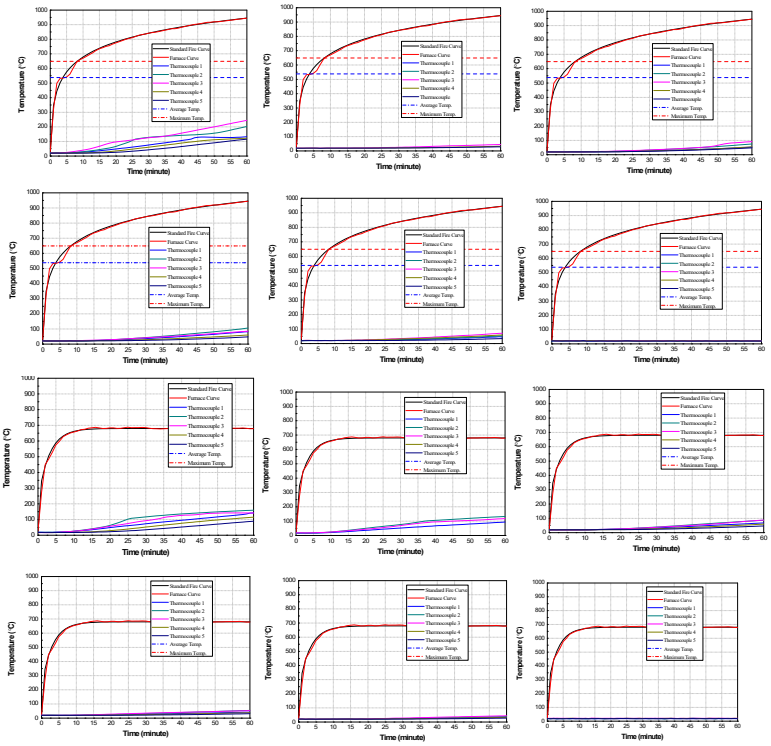
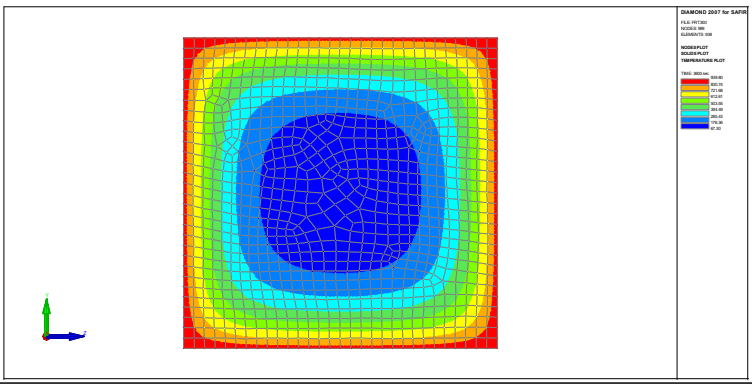
(아라미드 섬유 보강)

(시멘트 보드 및 세라크울 보드 적용)

재료 및 내화성능 실험 수행 및 결과 분석을 통한 성능검증

(1) 내화실험 수행(표준화재, 외부화재)




			(2) 내화실험 결과 정리 및 분석  (4) **[성과] SCI 논문 투고 1건 (Steel and Composites)** · Fire Resistance of Aramid FIber Reinforced Concrete Columns with Cerak-wool Board (5) **[성과] 논문 게재 1건 (한국복합신소재구조학회)** · 세라크울 보드를 적용한 아라미드 섬유 보강 철근콘크리트 기둥의 내화성능 (6) **[성과] 시제품 제작 1건** · FRP로 내화 보강한 RC기둥 실험체 (7) **[성과] 특허출원 2건** · 10-2020-0006503 · 10-2020-0006505
열해석을 통한 성능 개선된 FRP 보강 시스템의 화재 시 거동 메커니즘과 최적의 설계 파라미터 도출	유한요소해석 모델 제작 및 해석수행 및 유한요소해석 결과로 최적의 설계방식 도출		(1) 내화실험체에 대한 내화해석 수행 

(3) 연구개발 세부내용 및 결론

(가) 1차년도

①활용될 성능 개선된 FRP 소재의 물성치 특성 확인 및 거동 재현을 위한 해석적 재료 모델 완성

성능 개선된 FRP 소재의 물성치 특성을 확인하고 거동을 재현하기 위한 해석적 재료 모델을 완성하기 위해선 활용될 소재의 구조적 특징을 분석하고, 거동 재현을 위한 해석 모델을 완성하여야 한다. FRP 소재의 구조적 특징을 분석하기 위하여 국내·외 보고서, 논문 등 문헌 조사를 통하여 Carbon, Aramid, Glass, Hybrid, Steel 등 다양한 FRP의 구조적 특징을 확인하였다. 다섯 가지의 FRP소재의 구조적 특성을 그림 2.1에 정리하였다.

	Steel	Carbon	Glass	Aramid
인장강도 (MPa)	2,400	35,500	5,000	21,000
탄성계수 (GPa)	2,100	2,350	250	1,200
파괴변형율	0.2	0.01	0.02	0.02
접착재료	에폭시계 볼트	에폭시계	EPOS Fiber Anchor Strip	에폭시계

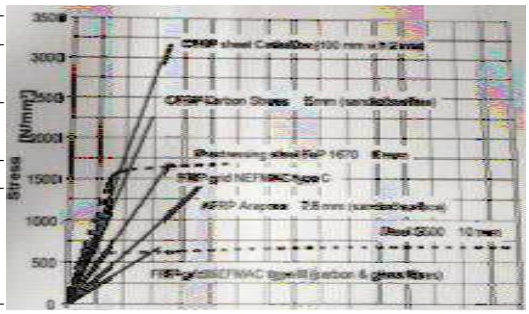


그림 2.1 FRP 소재의 구조적 특성

이러한 다양한 FRP 소재중 내진/내화 성능을 기대할 수 있는 구조적 특성을 지니면서, 동시에 단순한 시공으로 경제적 보강이 가능한 Aramid FRP 및 SRF 공법을 연구개발의 대상으로 결정하였다.

Aramid FRP는 압축 및 인장강도가 부족한 구조체 면에 시트를 에폭시 수지로 함침하면서 섬유시트층을 형성하여 합성/RC 기둥 표면을 보강하는 방법이다. 보강공법 예시 및 시공 순서를 그림 2.2에 나타내었다.

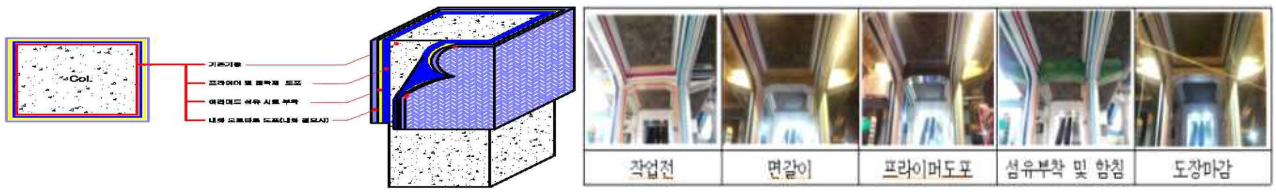


그림 2.2 Aramid FRP 보강공법 예시 및 시공 순서

SRF공법의 경우 친환경 우레탄 접착제와 고연성 섬유(벨트/시트)를 사용하여 기둥이나 벽체를 보강하는 공법으로, 대지진으로 콘크리트 구조물에 심각한 변형이 발생하더라도 붕괴메커니즘이 존재하지 않아 내진설계의 개념에 가장 충실한 보강 공법이다. 그림 2.3는 SRF 공법의 보강공법 예시 및 시공 순서이다.

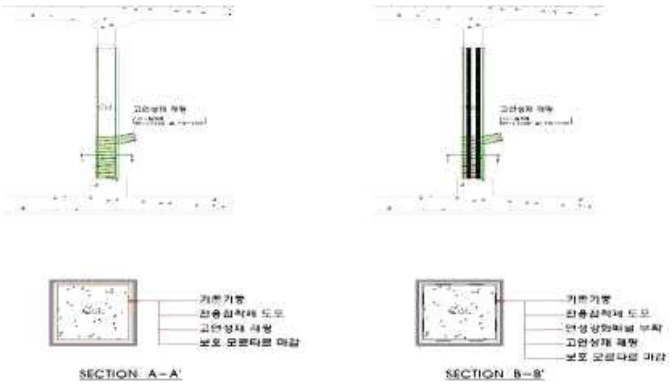




그림 2.3 SRF 공법의 보강공법 예시 및 시공 순서

또한 FRP의 내화성능 발현을 위하여 CRC 보드를 피복시스템으로 적용하고자 하였다. 불연성능 시험 결과를 통해 CRC 보드의 성능이 인정됨을 확인하였다. 그림 2.4는 불연성능 시험용 시험편 및 불연성능 시험 결과이다.

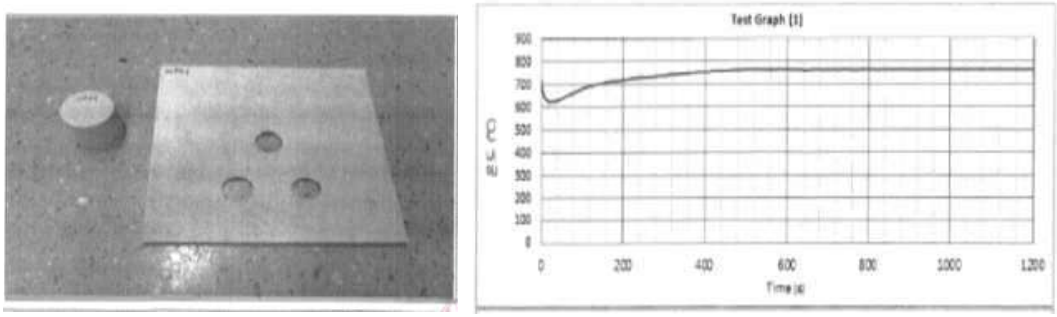


그림 2.4 불연성능 시험용 시험편 및 불연성능 시험 결과

이러한 선정된 성능 개선된 FRP 보강 시 구조거동을 재현하기 위하여 보강 대상 구조체 및 FRP 보강의 해석모델을 완성하였다. Aramid와 SRF 소재의 해석적 재료모델은 ASTM D3039-17a 시험방법을 참고하여 다음 그림 2.5에 정리하였다.

시험항목		단위	시험결과
Aramid Plate	인장강도	MPa	1638
	인장탄성율	GPa	93
Aramid Sheet	인장강도	MPa	2249
	인장탄성율	GPa	121
SRF	인장강도	MPa	476
	인장탄성율	GPa	15.2

그림 2.5 Aramid와 SRF 소재의 해석적 재료모델

Aramid, SRF 소재를 보강한 구조체 해석을 완성하여 보강효과에 대한 분석을 진행하였다. 요소해석프로그램인 Abaqus를 활용하여 그림 2.6과 같이 유한요소해석 모델링을 진행하고 Aramid, SRF 소재를 이용한 기둥 보강 효과를 해석적으로 확인하였다. 그 결과 기둥으로의 전이되는 응력에 대한 내력 보강 효과와 column shortening에 효과가 있는 것으로 분석되었다.

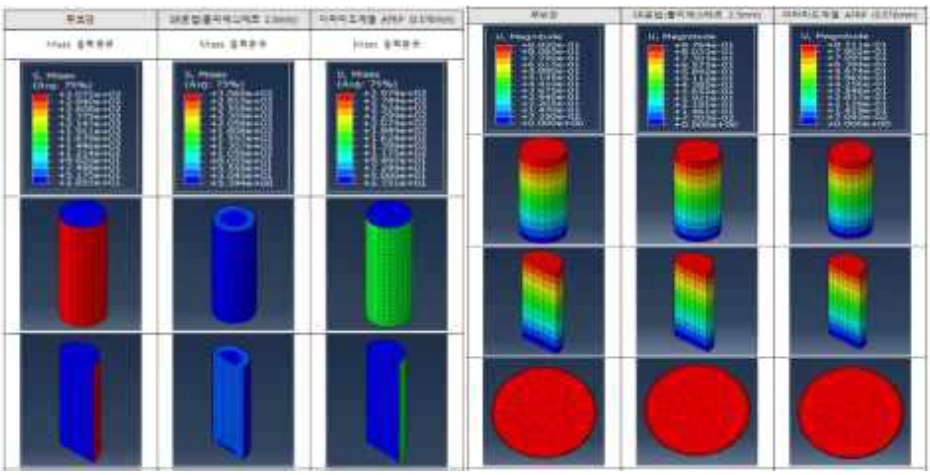


그림 2.6 성능 개선한 FRP보강 구조체의 해석 결과 (좌: 응력분포/우: 수직변위)

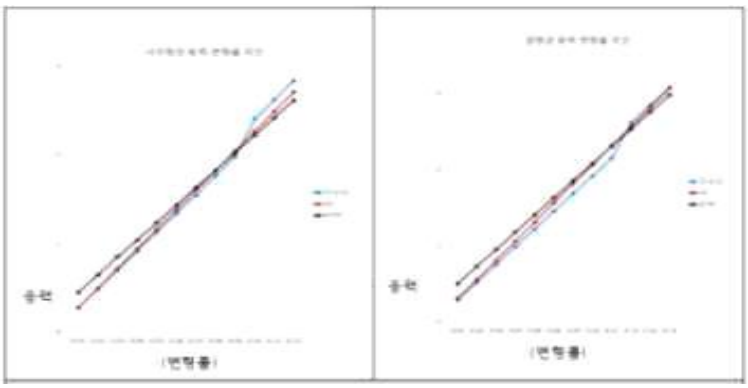


그림 2.7 Aramid 및 SRF공법 보강 구조체의 응력-변형률 곡선

②성능 개선된 FRP 소재와 융합된 내진성능 확보 기술 개발 및 상세 설계 완성

성능 개선된 FRP 소재를 활용하여 합성/RC 기둥의 내진성능을 확보하기 위한 기술을 개발하기 위하여 성능 개선된 FRP 보강 시스템의 개념을 정립하였다. 그림 2.8과 같이, 지진 피해로부터 건축물을 보호하기 위해서는 구조물의 내진 성능 향상이 이루어져야 하고, 이는 구조체의 보유내력, 보유연성, 에너지소산능력의 증가가 필수적이다.

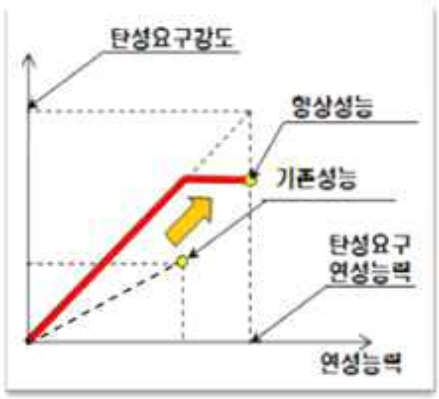


그림 2.8 FRP를 활용한 내진보강의 개념

Aramid FRP와 SRF공법의 경우 합성/RC 기둥의 소재인 강재나, 콘크리트에 비해 인장강도, 파단강도 등이 우수한 소재이다. 이러한 FRP를 활용하여 구조체를 보강할 경우 구조체의 보유내력, 보유연성, 에너지소산능력을 증가시켜 내진 성능 향상시킬 수 있다. 따라서 성능 개선된 FRP를 활용하여 구조물의 보강 시 휨, 전단내력 및 연성, 에너지소산능력을 증가시키는 개념을 정립하였다.

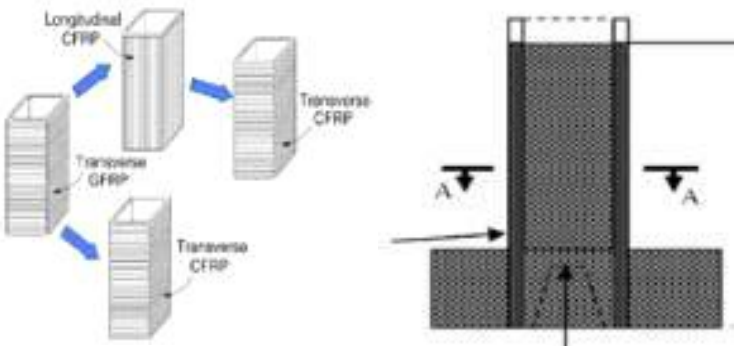


그림 2.9 성능 개선된 FRP를 활용한 휨·전단 보강 개념

③실험을 위한 실험체 제작 및 구조실험을 통한 지진피해 저감 효과와 물리적 성능 검증

㉮성능 개선된 FRP 보강 필로티 RC 기둥의 내진성능 향상에 대한 실험적 연구

국내에서 발생한 지진의 피해사례중 주요 피해사례로 저층 필로티 주택, 공동주택(아파트), 학교시설 등이 조사되었고, 그중에서도 특히 1층 필로티 기둥의 대규모 손상이 파악되어 필로티 구조건물의 지진 취약성이 크게 대두되고 있다. 필로티 건물은 하중을 전단벽 없이 건물 모퉁이의 기둥 만으로 지지하기 때문에 지진에 더욱 취약한 것으로 파악된다. 따라서, 성능 개선된 FRP를 활용하여 필로티 RC 기둥을 보강한 실험체를 제작하여 내진성능의 향상을 확인하였다.

앞선 연구개발을 통하여 정립한 성능 개선된 FRP의 보강방법을 적용한 실험체를 제작하였다. 이 때 RC 필로티 기둥 실험체는 기둥의 축방향 하중을 재현하기 위하여 실험체에 포스트-텐션 방법으로 축력을 가하였다. 또한 필로티 RC 기둥에 지진하중은 양 끝단에서 발생하기 때문에, 이를 모사하기 위하여 기둥의 중간에 가력부를 제작하였으며, 실험체 양 단을 실제 구조체의 중앙부로 설정하였다. 실험체 길이, 단면 및 실험체 게이지 부착 위치를 그림 2.11에 나타내었다.

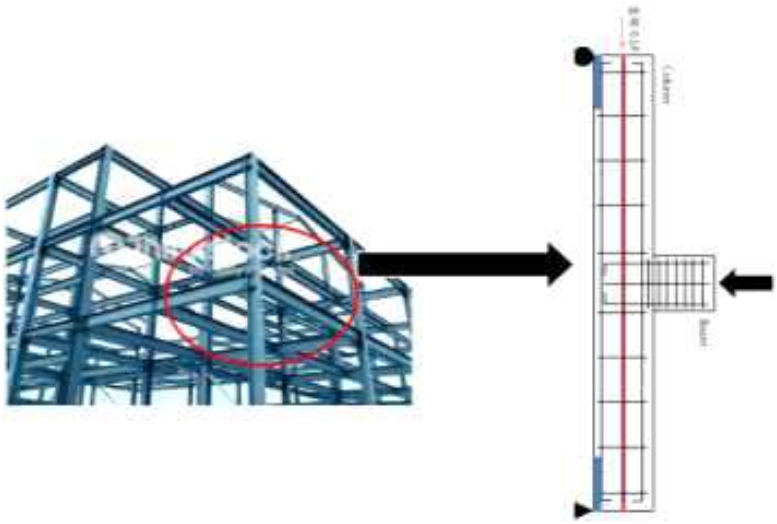


그림 2.10 실험체 설정 근거 및 형상

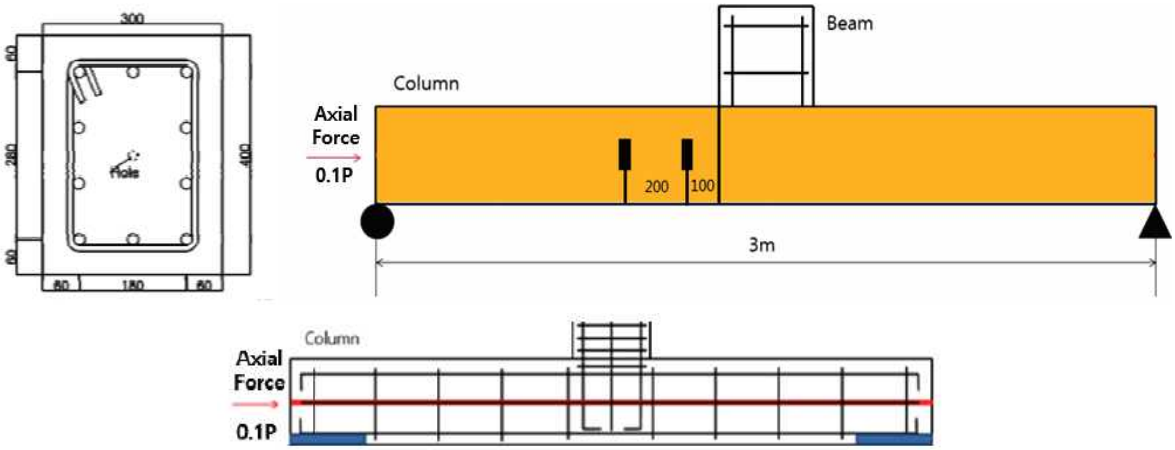


그림 2.11 성능 개선된 FRP를 활용한 휨·전단 보강 실험체 단면 및 개념도



그림 2.12 성능 개선된 FRP를 활용한 휨·전단 보강 실험체 제작 과정

실제 지진이 발생 할 경우 필로티 RC 기둥은 점진적으로 증가하는 반복 횡하중이 가력되는 상황으로 볼 수 있다. 따라서 성능 개선된 FRP를 활용하여 보강한 RC 필로티 기둥 실험체에 점진적으로 증가하는 반복 횡하중을 가력하여 내진 성능의 향상 효과를 확인하였다. 실험체에 가력한 점진적으로 증가하는 반복횡하중 프로토콜을 그림 2.12에 표현하였다. 또한 실험으로 각 FRP의 보강효과와 함께 시트의 두께를 증가시켜 보강량에 따른 보강효과를 파악하고자 하였으며, Aramid FRP의 경우 FRP Strip이 보강효과에 영향이 있는지 확인하고자 하였다. 본 실험을 진행하기 위한 실험체 리스트를 다음 그림 2.13에 나타내었다.

실험체 가력실험은 5000kN급 액츄에이터(Actuator)에서 수행하였으며, 가력방법은 반복가력 방식이고, 5㎜/min의 속도로 실험체를 가력하였다. 초기에는 3㎜가력 후 0㎜ 지점으로 돌아오는 가력을 1Cycle로 한 Step에 3Cycle 씩 132㎜까지 8Step 반복가력을 진행하였으며, 8Step 실험 종료 후 실험체가 파괴되지 않았으면 단조가력을 진행하였다.

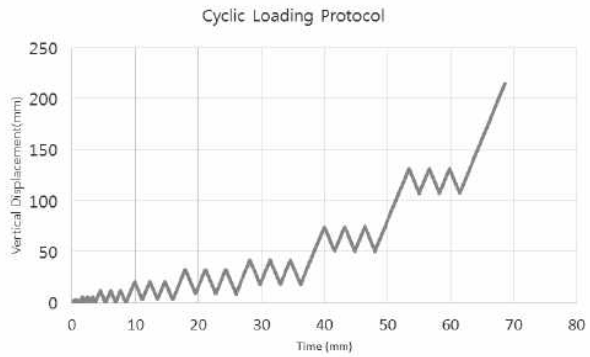


그림 2.12 실험체 가력 방법

NO.	Specimen	Reinforcement Method	Reinforcement Location	Reinforcement Thickness (㎜)		Loading Method	Area (㎜)	Steel Bar Distribution	Material Strength
1	RCN	-	-	-		Center Cycling Loading	300 x 400	Main Bar 10-D19 Stirrup D10 @300mm	Steel Bar SD400 Concrete f_{ck} 30MPa
2	RCAa	AFRP Hoop Type A	Full	0.288					
3	RCAb	AFRP Hoop Type B	Full	0.576					
4	RCAc	AFRP Hoop Type C	Both D from Loading Section	0.576					
5	RCAd	AFRP Hoop Type D (+ Strip Reinforcement)	Full	Sheet: 0.576	Strip: 1.4				
6	RCSa	SRF Method Type A	Full	2.5					
7	RCSb	SRF Method Type B	Full	4.0					

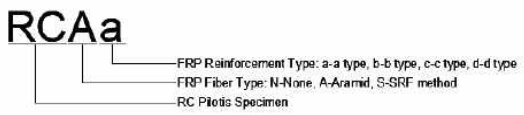


그림 2.13 Aramid FRP 및 SRF공법으로 보강한 실험체 리스트

실험체 제작에 사용된 철근은 SD400이었고, 콘크리트 압축강도는 30㎫이었다. 실제 철근 및 콘크리트의 물성치와 실험에 사용된 Aramid FRP, SRF 공법 보강에 사용된 FRP의 물성치는 다음 그림 2.14 ~ 그림 2.17과 같다.

Diameter	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation Percentage (%)
D10	516	587	10.3
D16	540.6	667.7	12.7

그림 2.14 실험체 제작에 사용된 철근 물성치

Strength	7Day (MPa)	14Day (MPa)	21Day (MPa)	28Day (MPa)
30MPa	24.22	27.04	29.74	32.45

그림 2.15 실험체 제작에 사용된 콘크리트의 7, 14, 21, 28일 강도

Product	Weight (g/㎡)	Thickness (㎜)	Tensile Strength (㎫)	Tolerance
SK-A415	415	0.288	2,060	±5%
SK-A830	830	0.576	2,060	

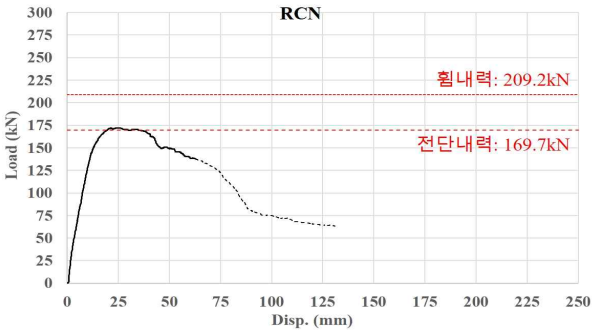
그림 2.16 실험체 제작에 사용된 Aramid FRP 물성치

Product	Material	Thickness (㎜)	Width (㎜)	Elasticity Modulus (N/㎟)	Strength (N/㎟)
SR2100	Poly -ester	2.5	100	4500	400
SR4100		4.0	100	4500	400

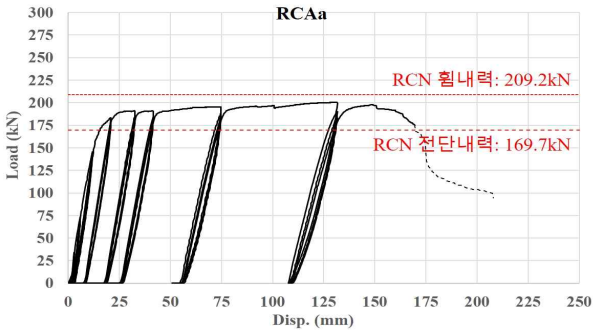
그림 2.17 실험체 제작에 사용된 SRF 공법 FRP 물성치

실험체의 내력 및 변위는 액츄에이터가 실험체를 가력 했을 때 측정되는 하중의 1/2배를 내력으로, 액츄에이터의 변위를 실험체 변위로 설정하였다.

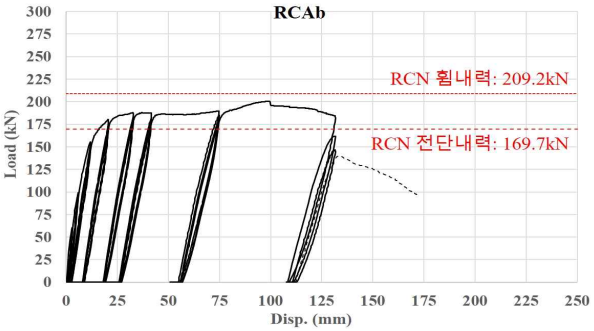
아래 그림 2.18은 무보강 실험체 및 Aramid FRP, SRF 공법으로 보강한 실험체들의 하중-변위 그래프이다. 무보강 실험체의 경우 항복하중 전 까지 내력이 증가하다가 강성이 감소한 후 최대하중 이후 급격하게 내력이 감소하였다. Aramid 섬유 보강 실험체들의 경우 33㎜까지 가력하는 5Step에서 내력이 일정하게 유지되다 8Step에서 급격하게 내력이 감소하는 경향을 보였다. SRF 공법 보강 실험체들의 경우 5Step에서 항복 후 내력이 계속 유지되었으며, 8Step까지 가력 후 실험체 단순가력을 진행하였으나 실험 종료 시점까지 실험체의 내력이 감소하지 않았다. 그림 2.19는 각 실험체의 파괴 모드 사진이고, 그림 2.20은 각 실험체의 Step 별 최대내력을 정리한 표이다.



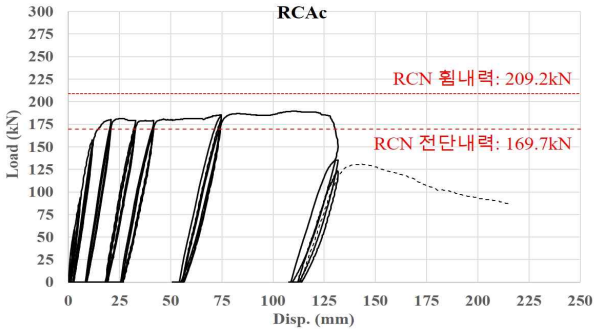
(a) RCN 실험체 하중-변위 그래프



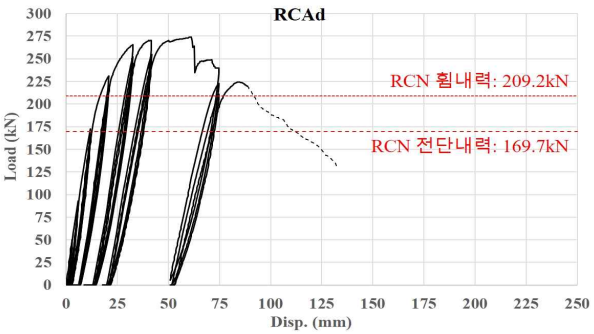
(b) RCAa 실험체 하중-변위 그래프



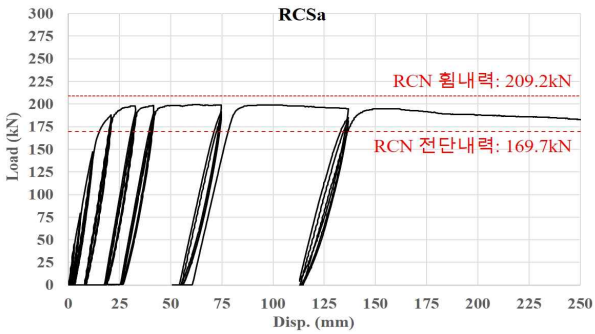
(c) RCAb 실험체 하중-변위 그래프



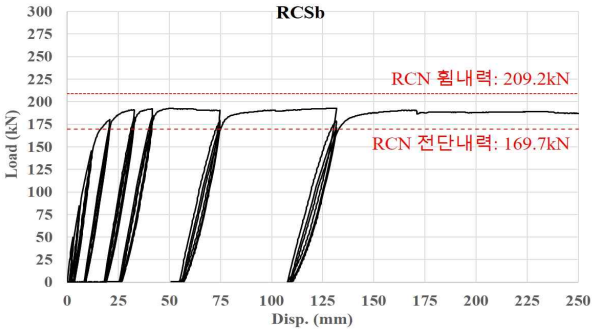
(d) RCAc 실험체 하중-변위 그래프



(e) RCAd 실험체 하중-변위 그래프

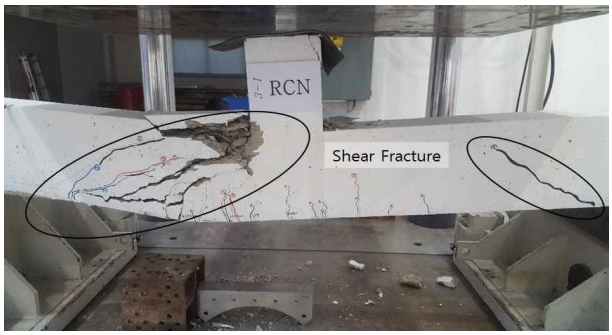


(f) RCSa 실험체 하중-변위 그래프



(g) RCSb 실험체 하중-변위 그래프

그림 2.18 실험체 제작에 사용된 SRF 공법 FRP 물성치



(a) RCN 실험체 파괴모드



(b) RCAa 실험체 파괴모드



(c) RCAb 실험체 파괴모드



(d) RCAc 실험체 파괴모드



(e) RCAd 실험체 파괴모드



(f) RCSa 실험체 파괴모드



(g) RCSb 실험체 파괴모드

그림 2.19 Aramid FRP 및 SRF공법으로 보강한 실험체의 파괴모드사진

무보강 실험체의 경우 반복가력을 진행하며 휨 균열과 전단 균열이 발생하였으며, 그림 2.19에 표시한 전단균열이 급격하게 성장하며 파괴되었다.

성능 개선된 Aramid FRP 및 SRF 공법으로 필로티 RC 실험체의 전단·휨 보강을 진행한 실험체들의 경우, 실험체 외부를 FRP로 감싸 보강하였기 때문에 실험체에 발생한 균열 및 파괴양상을 직접적으로 확인하기 어려웠다. 실험 종료 후 실험체 형상을 분석 한 결과 Aramid FRP를 사용하여 보강한 실험체 중 전단보강만 진행한 RCAa, RCAb, RCAc 실험체의 경우 실험체의 변형이 크게 발생하였지만, 휨보강도 함께 진행한 RCAd 실험체는 변형이 크게 발생하지 않았다. 또한 SRF 공법으로 보강한 RCSA 및 RCSb 실험체의 경우 마찬가지로 실험체의 변형이 매우 큰 것을 확인하였다.

Specimen		Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5	Step 6	Step 7	Step 8	Simple Forcing	Displacement
RCAa	Max. Load	35kN	74kN	145kN	184kN	191kN	191kN	196kN	201kN	-	209㎜
RCAb	Max. Load	61kN	95kN	156kN	181kN	189kN	188kN	191kN	202kN	-	172㎜
RCAc	Max. Load	59kN	92kN	159kN	181kN	182kN	180kN	186kN	190kN	-	212㎜
RCAd	Max. Load	50kN	93kN	173kN	232kN	266kN	272kN	275kN	-	-	132㎜
RCSa	Max. Load	50kN	85kN	146kN	180kN	191kN	192kN	193kN	193kN	191kN	312㎜
RCSb	Max. Load	45kN	79kN	147kN	188kN	198kN	199kN	199kN	199kN	199kN	318㎜

그림 2.20 Aramid FRP 및 SRF공법으로 보강한 실험체의 스텝별 최대내력

그림 2.21은 17㎜, 40㎜, 132㎜ 가력 시 에너지소산면적을 계산하여 비교한 표이다. 200㎜ 가력 이전 파괴된 실험체(RCAb, RCAd)를 제외한 실험체들의 에너지소산면적을 비교한 결과 최소 141.1배(RCAc)에서 최대 167배(RCSb) 증가함을 확인하였다.

Specimen		Displacement		
		17㎜	40㎜	132㎜
RCN	Result	2.81	8.75	18.5
	Incresement(%)	-	-	-
RCAa	Result	2.98	11.19	47.7
	Incresement(%)	6.0	27.9	157.8
RCAb	Result	2.92	11.33	45.6
	Incresement(%)	3.9	29.5	146.5
RCAc	Result	2.99	11.26	44.6
	Incresement(%)	6.4	28.7	141.1
RCAd	Result	3.60	14.94	48.1
	Incresement(%)	28.1	70.7	160.0
RCSa	Result	2.89	11.64	46.3
	Incresement(%)	2.8	33.0	150.3
RCSb	Result	3.03	11.90	49.4
	Incresement(%)	7.8	36.0	167.0

그림 2.21 Aramid FRP 및 SRF공법으로 보강한 실험체의 각 변위(17㎜, 40㎜, 132㎜)에서의 에너지소산면적

성능 개선된 FRP를 활용하여 전단 및 휨 보강한 필로티 RC 기둥 실험체의 반복 횡하중 가력 실험 결과, Aramid FRP 보강 실험체는 평균 16.5%, SRF공법 보강 실험체는 평균 13% 최대전단강도가 증가하였다. Aramid FRP 보강 두께를 변수로 보강 성능을 확인한 결과 Aramid FRP 보강 실험체는 두께에 따른 내력 증가의 변화를 파악할 수 없었으나, SRF공법 실험체의 경우 3.8% 증가함을 확인하였다. Aramid FRP Strip을 추가 보강하여 휨성능을 증가시킨 실험체와 전단보강만 진행한 실험체를 비교한 결과 최대내력이 36.3%증가하였다. Aramid FRP와 SRF공법을 사용하여 보강한 실험체 모두 무보강 실험체의 전단내력보다 실험체 내력이 상승하여 **전단보강에 효과가 있음을 확인**하였다. 마지막으로 무보강 실험체와 FRP 보강 실험체들의 에너지소산면적을 비교한 결과 아라미드 섬유 보강 실험체들은 평균적으로 약 151%, SRF공법 보강 실험체들은 약 159% 증가함을 확인하였다. 따라서 성능 개선된 FRP 보강 시 **필로티 RC 기둥의 연성능력을 증가시킬 수 있음을 확인**하였다.

따라서 본 연구 결과 **필로티 기둥을 상정한 RC 실험체**에 성능 개선된 FRP인 Aramid FRP, SRF 보강 공법을 이용하여 휨/전단 보강한 결과, **실험체의 최대 전단내력 및 연성능력이 증가함을 확인**하였다.

㈏성능 개선된 FRP 보강 CFT 기둥의 내진성능 향상에 대한 실험적 연구

Concrete Filled steel Tube(이하 CFT)기둥은 강재와 콘크리트 두 가지 재료로 구성되어 강관 내부에 콘크리트를 충전한 합성구조이다. CFT기둥은 콘크리트의 구속효과와 강재의 국부좌굴 지연효과로 인해 기둥 내력이 두 부재의 합보다 증가되는 장점을 가지고 있다. 하지만 강관 두께가 얇은 CFT기둥은 구속효과의 감소와 강재의 국부좌굴이 발생되어 부재의 내력이 급격하게 저하되며 파괴될 수 있다. 따라서 지진 작용 시 반복 축하중을 받는 얇은 두께를 가진 CFT 기둥에 성능 개선된 FRP인 Aramid FRP 및 SRF 공법을 보강하여 압축 성능 및 연성능력 등 내진성능의 증가 효과를 확인하였다.

성능 개선된 FRP를 사용하여 보강한 CFT 실험체를 제작하여 반복 축하중 가력 실험을 진행하였다. 원형 CFT 기둥 실험체의 직경은 220㎜, 각형 CFT 기둥 실험체의 직경은 200㎜로 통일하고, 강관 두께를 2.3㎜, 3.2㎜, 4.5㎜로 변수로 하여 원형과 각형 CFT 기둥 실험체 모두 강관 두께 2.3㎜ 실험체는 7개, 강관 두께 3.2㎜ 및 4.5㎜ 실험체는 4개씩 제작하였다. 강관 두께 2.3㎜ 실험체는 Aramid FRP의 두께, 보강 겹수, Strip 유무 및 SRF공법 보강의 보강두께를 변수로 하였다. 강관두께 3.2㎜ 및 4.5㎜ 실험체의 경우 Aramid FRP 및 SRF 공법의 보강 두께를 변수로 하였다. Aramid FRP 및 SRF 공법 보강 각형 및 원형 CFT 기둥 실험체의 리스트를 다음 그림 2.22에 나타내었다.

Specimen	Steel Tube Diameter (㎜)	Steel Tube Shape	Steel Tube Thickness (㎜)	D/t	f_{ck} (MPa)	Reinforcement Type	Reinforcement Layer	Reinforcement Thickness (㎜)
C2N	Φ 220	Circular	2.3	96.7	55.38	FRP Unreinforced		
C2Aa						Aramid Hoop	1	0.288
C2Ab						Aramid Hoop	1	0.576
C2Ac						Aramid Hoop	2	0.576
C2Ad						Aramid Hoop+Strip	1 100mm	0.576 5
C2Sa						SRF Hoop	1	2.5
C2Sb						SRF Hoop	1	4.0
C3N			3.2	68.8		FRP Unreinforced		
C3Aa						Aramid Hoop	1	0.288
C3Ab						Aramid Hoop	1	0.576
C3Sa						SRF Hoop	1	2.5
C4N			4.5	48.9		FRP Unreinforced		
C4Aa						Aramid Hoop	1	0.288
C4Ab						Aramid Hoop	1	0.576
C4Sa						SRF Hoop	1	2.5
S2N	200×200	Rectangular	2.3	86.9		FRP Unreinforced		
S2Aa						Aramid Hoop	1	0.288
S2Ab						Aramid Hoop	1	0.576
S2Ac						Aramid Hoop	2	0.576
S2Ad						Aramid Hoop+Strip	1 100mm	0.576 5
S2Sa						SRF Hoop	1	2.5
S2Sb						SRF Hoop	1	4.0
S3N			3.2	62.5		FRP Unreinforced		
S3Aa						Aramid Hoop	1	0.288
S3Ab						Aramid Hoop	1	0.576
S3Sa						SRF Hoop	1	2.5
S4N			4.5	44.4		FRP Unreinforced		
S4Aa						Aramid Hoop	1	0.288
S4Ab						Aramid Hoop	1	0.576
S4Sa						SRF Hoop	1	2.5

그림 2.22 Aramid FRP 및 SRF공법으로 보강한 원형/각형 CFT 실험체 리스트

실험체 제작에 사용된 강관의 강종은 모두 SM275이었고, 내부 충전 콘크리트의 설계 압축강도는 50㎫이었다. 강관, 콘크리트 및 Aramid FRP 및 SRF 공법 FRP의 소재 특성을 다음 그림 2.23 ~ 그림 2.26에 정리하였다. Aramid FRP 및 SRF 공법 FRP의 소재 특성의 경우 앞서 설명한 그림 2.16, 그림 2.17의 소재 특성과 동일하다.

Thickness	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation Percentage (%)
2.3t	360.67	416	24.67
3.2t	348.67	467.67	27.33
4.5t	355.67	488.33	23.67

그림 2.23 실험체 제작에 사용된 강관 물성치

Strength	7Day (MPa)	14Day (MPa)	21Day (MPa)	28Day (MPa)
50	44.11	46.57	51.23	55.00

그림 2.24 실험체 제작에 사용된 콘크리트 물성치

Product	Weight (g/m^3)	Thickness (㎜)	Tensile Strength (MPa)	Elsastic Modulus (MPa)
SK-A415	415	0.288	2,060	1,200
SK-A830	830	0.576	2,060	1,200

그림 2.25 실험체 제작에 사용된 Aramid FRP 물성치

Product	Material	Thickness (㎜)	Width (㎜)	Elsastic Modulus (MPa)	Strength (MPa)
SR2100	Poly-ester	2.5	100	4,500	400
SR4100		4.0	100	4,500	400

그림 2.26 실험체 제작에 사용된 SRF 공법 FRP 물성치

실험체는 5,000kN급 시험기(UTM)에서 수행되었으며 가력방법은 중심반복가력으로 진행되었다. 압축 시 가력속도는 5㎜/min이었다. 일정 변위 가력 후 다시 초기점으로 이동 하는 패턴을 1Cycle로 하여 3Cycle이 1Step으로 구성하였다. 초기 1㎜ 가력하는 1Step부터 최대 81㎜까지 가력하는 8Step 반복가력을 실행하였으며, 8Step 이후 또는 압축강도가 예상 내력의 50% 이하가 될 경우 반복가력을 정지하고 실험체 파괴 시 까지 단조가력을 진행하였다. 그림 2.27은 실험체 가력 방법을 나타낸 표이다.

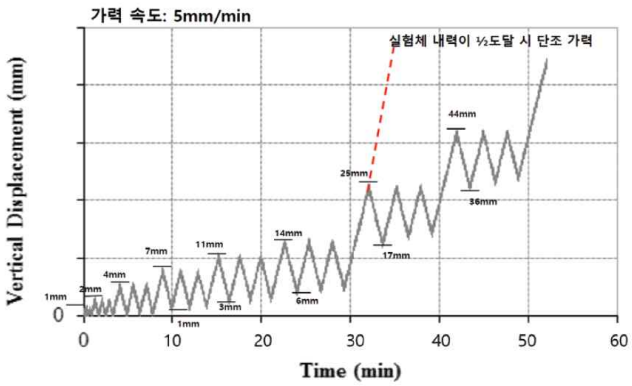
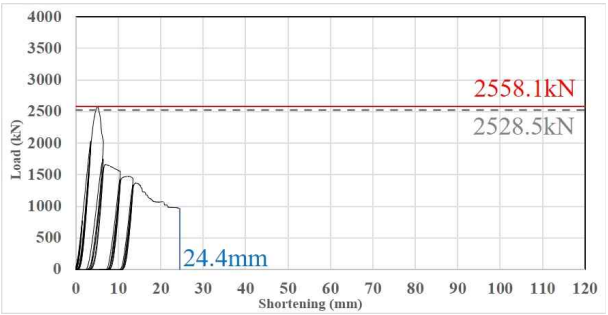


그림 2.27 실험체 가력 방법

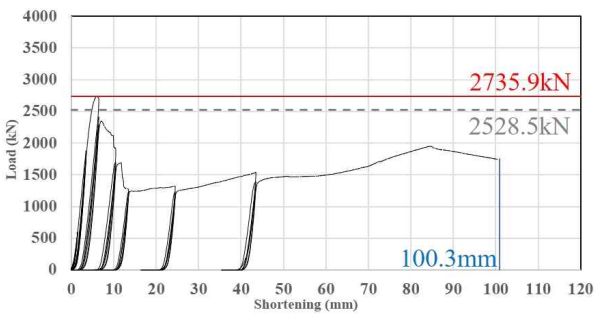
실험 결과 실험체는 모두 최대내력에 도달한 이후 강재에 좌굴이 발생했다. 강관의 국부좌굴 발생 이후 Aramid FRP를 보강한 실험체의 경우 큰 소리가 발생하며 FRP가 찢어지는 현상이 발생하였다. SRF 공법 실험체의 경우 국부좌굴 발생 시점에서 FRP의 부착이 떨어지는 현상이 발생되었으며 FRP 벨트의 파괴까지는 평균 2Cycle의 시간이 소요되었다. 강재에 좌굴이 추가적으로 발생되며 접합부위 용접면이 갈라지며 콘크리트가 쏟아지며 실험이 중단되었다. 그림 2.28는 원형 CFT 실험체들의 최대하중, 항복변위, 최대변위를 정리한 그림이고, 그림 2.29는 각형 CFT 실험체들의 최대하중, 항복변위, 최대변위를 정리한 그림이다. 실험체들 모두 최대내력에 도달한 이후

강재에 좌굴이 발생하였다. 대부분의 실험체들이 4Cycle (가력 변위량 최대 7㎜)에서 최대 내력에 도달하고 국부좌굴이 발생하였다. 강재의 국부좌굴에 의해 수평방향의 변위가 발생하면서 FRP의 찢어짐 또는 접합부위의 탈락에 의해 파괴되었다.

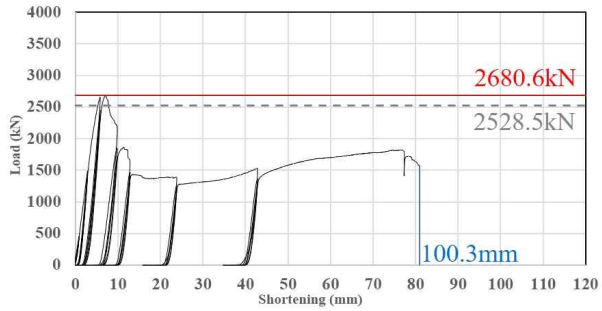
성능 개선된 Aramid 및 SRF 공법 FRP를 보강한 원형 및 각형 CFT 실험체들의 실험 종료시점의 최대변위를 항복변위로 나눈 변위연성비를 비교한 결과, 강관의 두께가 2.3㎜, 3.2㎜인 실험체들의 변위연성비는 모두 증가하였고, 강관 두께 4.5㎜ 실험체도 아라미드 0.288㎜ 보강한 실험체를 제외하고 모두 증가하였다. 그림 2.30은 원형 CFT 실험체들의 연성지수를, 그림 2.32는 각형 CFT 실험체들의 연성지수를 정리·비교한 표이다.



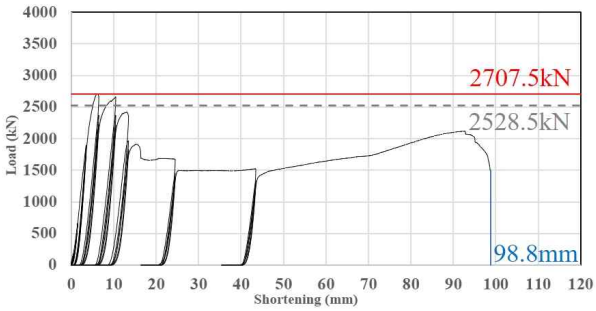
(a) C2N



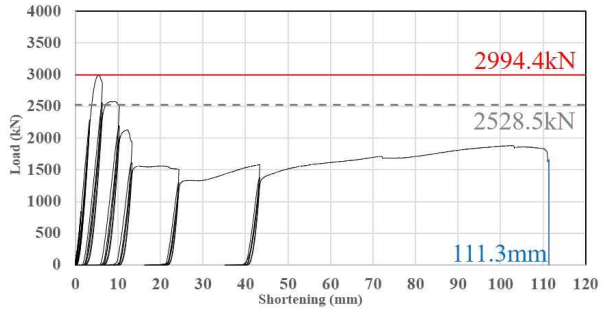
(b) C2Aa



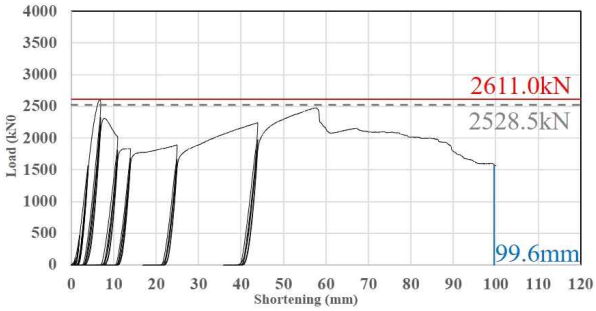
(c) C2Ab



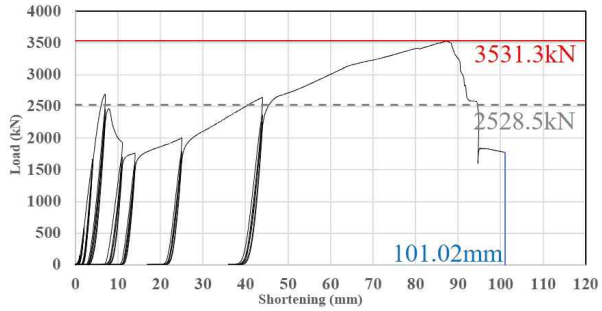
(d) C2Ac



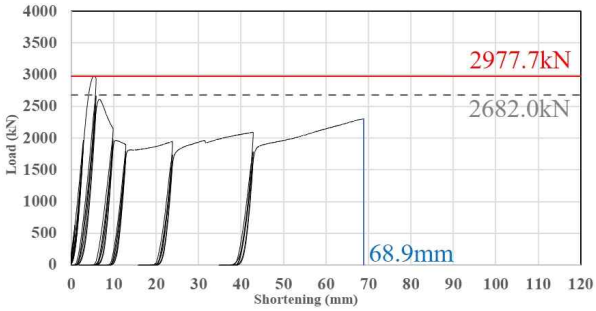
(e) C2Ad



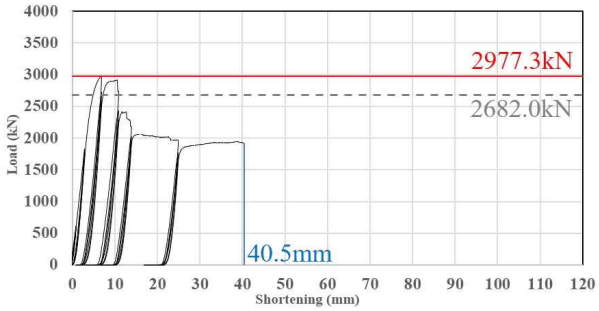
(f) C2Sa



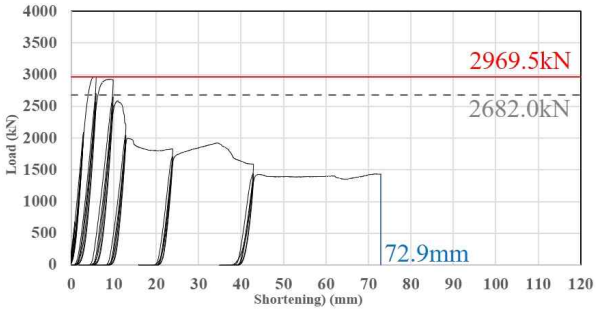
(g) C2Sb



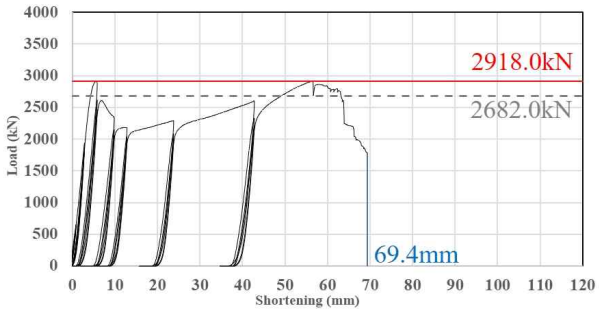
(h) C3N



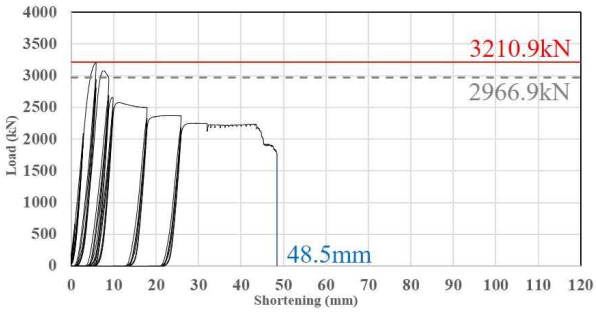
(i) C3Aa



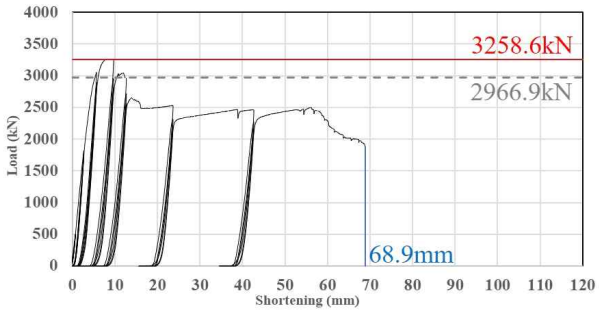
(j) C3Ab



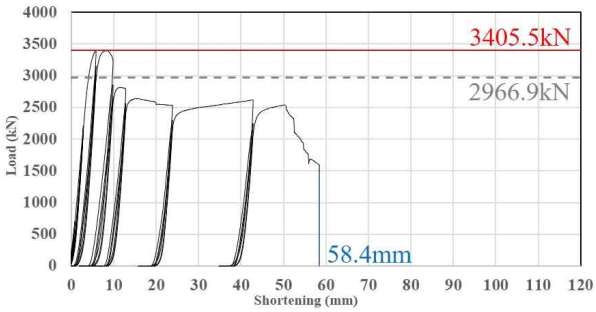
(k) C3Sa



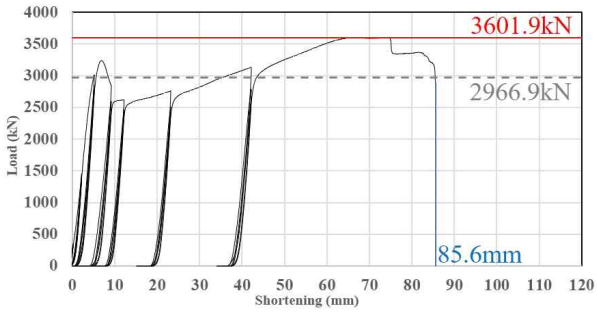
(l) C4N



(m) C4Aa

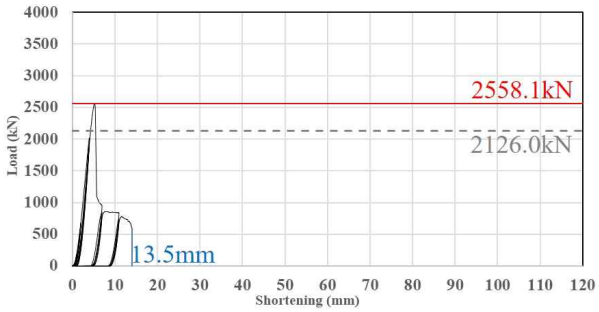


(n) C4Ab

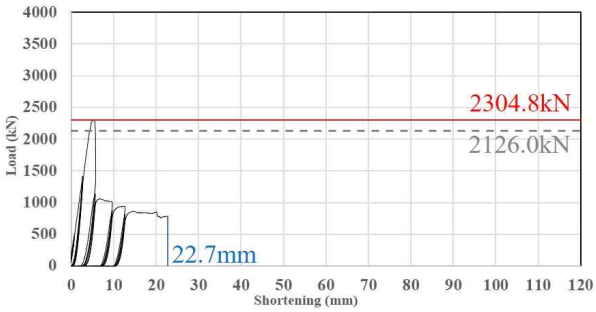


(o) C4Sa

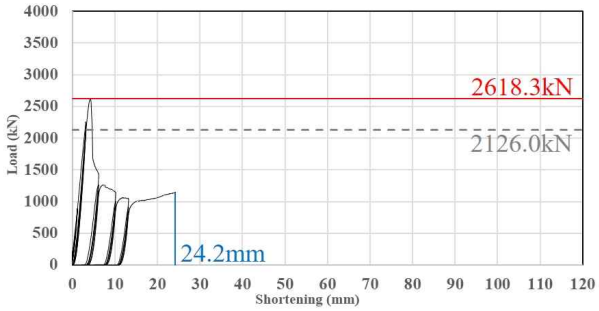
그림 2.28 성능 개선된 FRP를 보강한 원형 CFT기둥 실험체 하중-변위 그래프



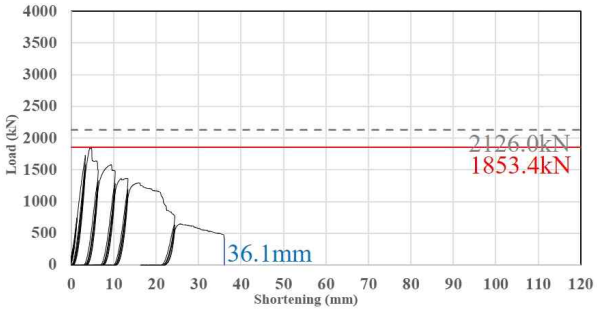
(a) S2N



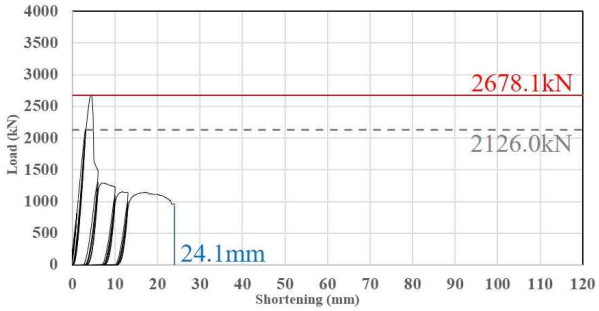
(b) S2Aa



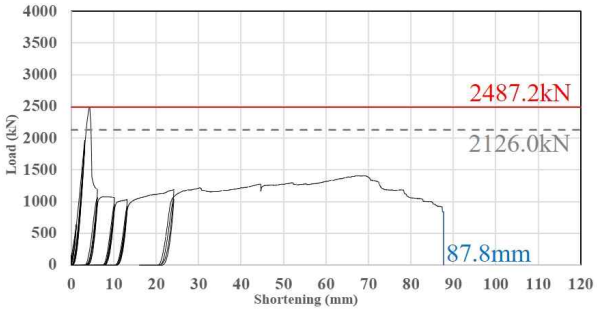
(c) S2Ab



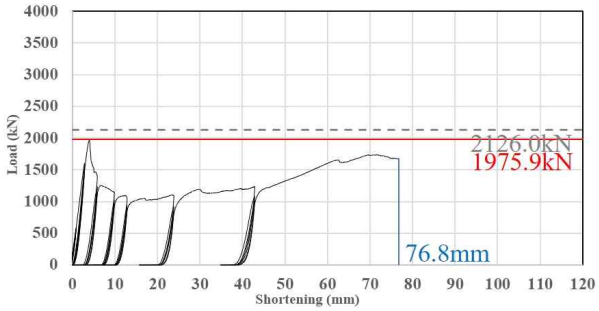
(d) S2Ac



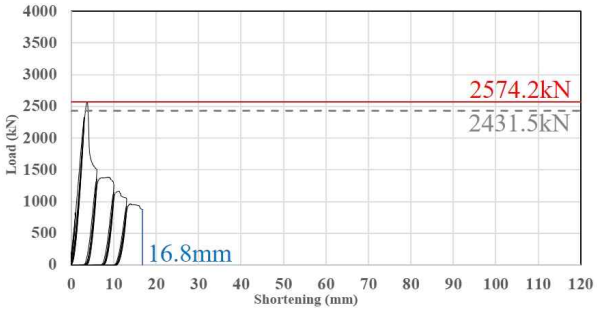
(e) S2Ad



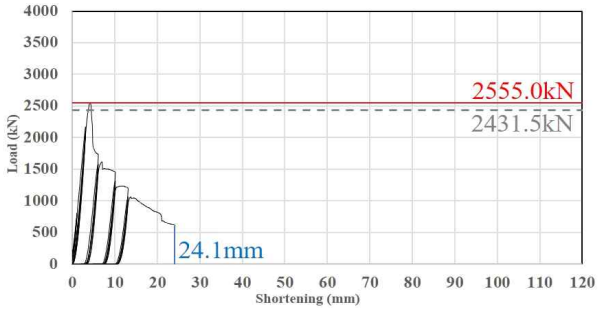
(f) S2Sa



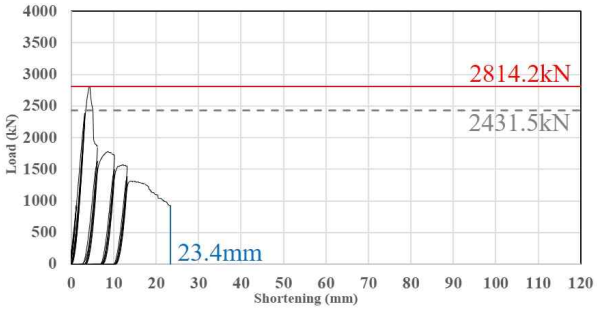
(g) S2Sb



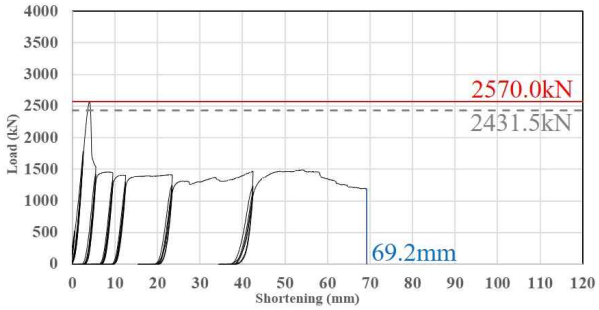
(h) S3N



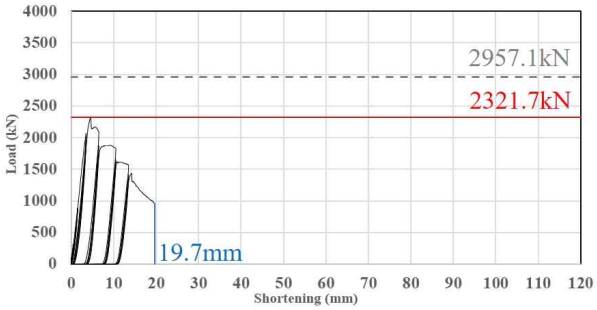
(i) S3Aa



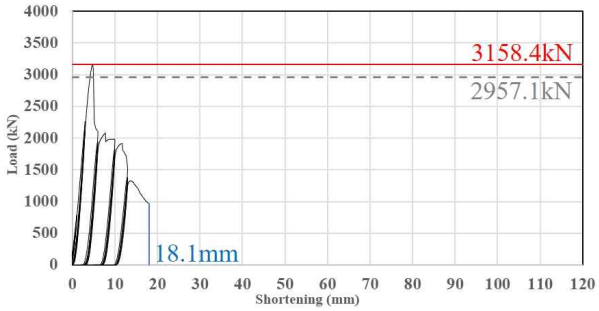
(j) S3Ab



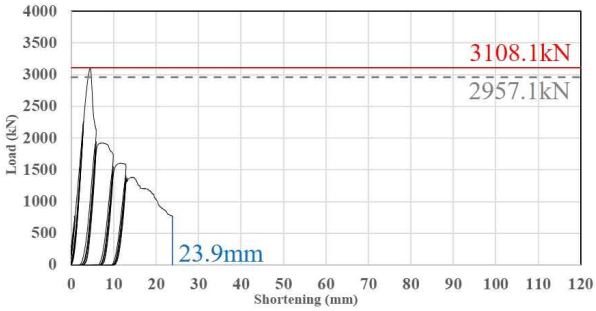
(k) S3Sa



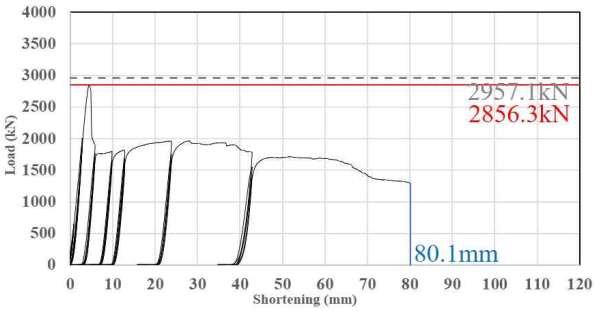
(l) S4N



(m) S4Aa



(n) S4Ab



(o)S4Sa

그림 2.29 성능 개선된 FRP를 보강한 각형 CFT기둥 실험체 하중-변위 그래프

No.	실험체	예상하중 (kN)	최대하중 (kN)	항복변위 (㎜)	최대변위 (㎜)	변위연성비	증가비율 (%)
1	C2N	2528.5	2576.4	4.1	24.4	5.9	-
2	C2Aa		2735.9	6.0	100.3	16.7	182.7
3	C2Ab		2680.6	4.1	80.9	19.6	232.0
4	C2Ac		2707.5	4.7	98.8	21.0	255.0
5	C2Ad		2994.4	4.2	111.3	26.3	345.0
6	C2Sa		2611.1	5.2	99.6	19.3	325.7
7	C2Sb		3531.3	5.2	101.0	19.3	326.5
8	C3N	2682.0	2977.7	4.2	68.9	16.4	-
9	C3Aa		2977.3	4.5	40.5	9.0	-45.2
10	C3Ab		2969.5	4.0	72.9	18.2	11.2
11	C3Sa		2918.0	4.1	69.4	16.8	2.2
12	C4N	2966.9	3210.9	4.2	48.5	11.5	-
13	C4Aa		3258.6	4.4	68.9	15.7	36.9
14	C4Ab		3405.5	4.2	58.4	13.9	21.3
15	C4Sa		3601.9	4.7	85.6	18.2	58.1

그림 2.30 성능 개선된 FRP를 보강한 원형 CFT기둥 실험체 최대하중/항복변위/최대변위/변위연성비

성능 개선된 Aramid FRP 및 SRF공법으로 보강한 원형/각형 CFT 기둥 실험체결과와 함께 무보강 실험체 대비 보강 실험체의 변위연성비를 비교하였다. 먼저 원형 CFT 기둥 실험체들의 실험결과 및 연성능력 보강효과에 대한 분석을 진행하였다. 강관두께가 2.3㎜인 원형 CFT 기둥 실험체를 비교한 결과 모든 실험체가 재료내력을 반영한 예상하중을 만족한 것을 확인하였다. 또한 무보강 실험체 대비 성능 개선된 FRP를 활용하여 보강한 실험체들의 최대하중이 증가함을 확인하였다. 무보강 실험체의 변위연성비 대비 FRP 보강 실험체들의 변위연성비의 증가비율을 확인한 결과 최소 약 182.7% ~ 최대 345.0% 증가하여 **연성능력이 증가함을 확인**하였다. 강관 두께 3.2㎜인 원형 CFT기둥 실험체 역시 모든 실험체가 재료내력을 반영한 예상하중을 만족하였으며, 무보강 실험체 대비 최대하중이 같거나 증가함을 확인하였다. 또한 무보강 실험체의 변위연성비 대비 FRP 보강 실험체들의 변위연성비의 증가비율을 확인한 결과 0.288㎜ Aramid FRP를 보강한 C3Aa 실험체의 경우 변위연성비가 약 45.2% 감소하였으나 나머지 실험체는 각각 11.2%, 2.2% 증

가함을 확인하였다. 마지막으로 강관 두께 4.5㎜의 원형 CFT 실험체의 경우 모든 실험체가 재료내력을 반영한 예상하중을 만족하였으며, 최대하중의 경우 0.288㎜ Aramid FRP를 보강한 C4Aa 실험체는 무보강 실험체와 최대하중이 동일하고, 나머지 0.576㎜ Aramid FRP를 보강한 C4Ab 실험체와 4.0㎜ SRF 공법 보강한 C4Sa 설험체의 경우 각각 약 6%와 약 12% 증가함을 확인하였다. 또한 성능 개선된 FRP를 보강한 실험체들의 변위연성비 증가비율을 확인한 결과 최소 21.3% ~ 최대 58.1% 증가하여 **<u>연성능력이 증가</u>**함을 확인하였다.

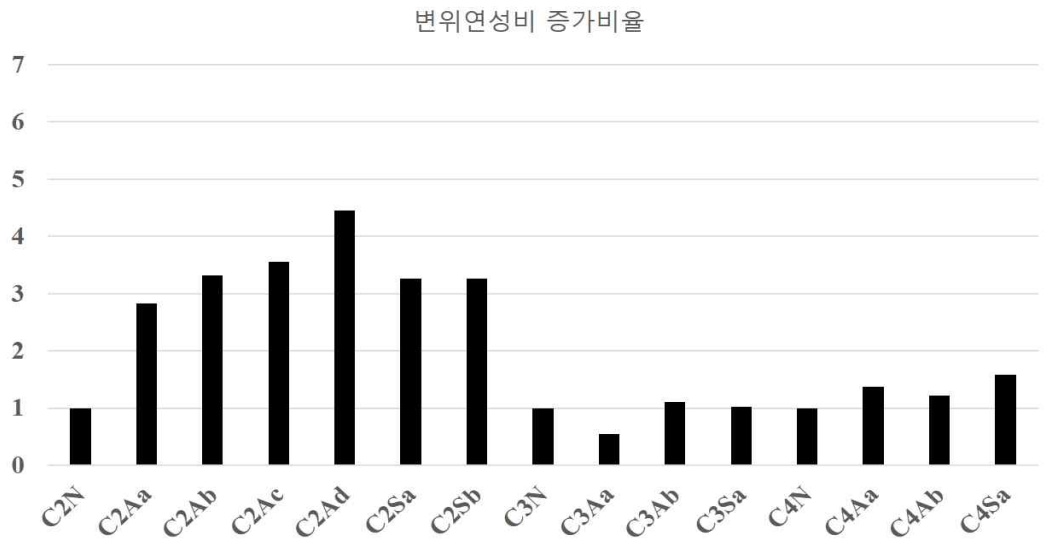


그림 2.31 성능 개선된 FRP를 보강한 원형 CFT기둥 실험체 변위연성비 비교 그래프

No.	실험체	예상하중 (kN)	최대하중 (kN)	항복변위 (㎜)	최대변위 (㎜)	변위연성비	증가비율 (%)
1	S2N	2126.0	2558.1	4.2	13.5	3.2	-
2	S2Aa		2304.8	4.3	22.7	5.2	64.6
3	S2Ab		2618.3	3.8	24.2	6.3	99.0
4	S2Ac		1853.4	3.0	36.1	12.1	281.4
5	S2Ad		2678.1	3.9	24.1	6.2	95.9
6	S2Sa		2487.2	4.0	87.8	22.2	596.1
7	S2Sb		1975.9	3.634549	76.8	21.1	563.9
8	S3N	2431.5	2574.2	3.3	16.8	5.0	-
9	S3Aa		2555	3.6	24.1	6.6	32.3
10	S3Ab		2814.2	3.6	23.4	6.4	28.2
11	S3Sa		2570.0	3.6	69.2	19.2	282.5
12	S4N	2957.1	2321.7	3.9	19.7	5.0	-
13	S4Aa		3158.4	4.1	18.1	4.4	-21.95
14	S4Ab		3108.1	4.0	23.9	6.0	20.3
15	S4Sa		2856.2	4.1	80.1	19.5	288.3

그림 2.32 성능 개선된 FRP를 보강한 원형 CFT기둥 실험체 최대하중/항복변위/최대변위/변위연성비

다음으로 각형 CFT 기둥 실험체들의 실험결과 및 연성능력 보강효과에 대한 분석을 진행하였다. 강관두께가 2.3㎜인 각형 CFT 기둥 실험체를 비교한 결과 0.288㎜ Aramid FRP 2겹 보강한 S2Ac 실험체 및 4.0㎜ SRF 공법으로 보강한 S2Sb 실험체를 제외한 모든 실험체가 재료내력을 반영한 예상하중을 만족한 것을 확인하였다. 또한 무보강 실험체 대비 성능 개선된 FRP를 활용하여 보강한 실험체들의 최대하중을 비교한 결과 마찬가지로 S2Ac, S2Sb 실험체를 제외하고 모두 증가함을 확인하였다. 무보강 실험체의 변위연성비 대비 FRP 보강 실험체들의 변위연성비의 증가비율을 확인한 결과 최소 약 64.6% ~ 최대 596.1% 증가하여 **<u>연성능력이 증가함을 확인</u>**하였다. 강관 두께 3.2㎜ 각형 CFT 기둥 실험체들의 경우 모든 실험체가 재료내력을 반영한 예상하중

을 만족하였으며, 무보강 실험체의 최대하중과 각 보강 실험체들의 최대하중을 비교한 결과 S3Aa, S3Sa 실험체는 무보강 실험체와 최대하중이 비슷하였으며, S3Ab 실험체는 최대하중이 증가하였다. 또한 무보강 실험체 대비 성능 개선된 FRP를 보강한 실험체들의 변위연성비 증가비율을 확인한 결과 최소 32.3% ~ 최대 282.5% 증가하여 성능 개선된 FRP를 보강할 경우 **연성능력이 증가함을 확인**하였다. 마지막으로 강관 두께가 4.5㎜인 각형 CFT 기둥 실험체의 경우 Aramid FRP를 보강한 S4Aa, S4Ab 실험체만 재료내력을 반영한 예상하중을 만족하였다. 무보강 실험체 대비 FRP 보강한 실험체들의 최대하중은 모두 증가한 것으로 확인되었다. 또한 변위연성비를 비교한 결과 0.288㎜ Aramid FRP를 보강한 S4Aa 실험체는 약 22.0% 감소하였지만. 나머지 실험체는 변위연성비가 증가한 것을 확인하였다.

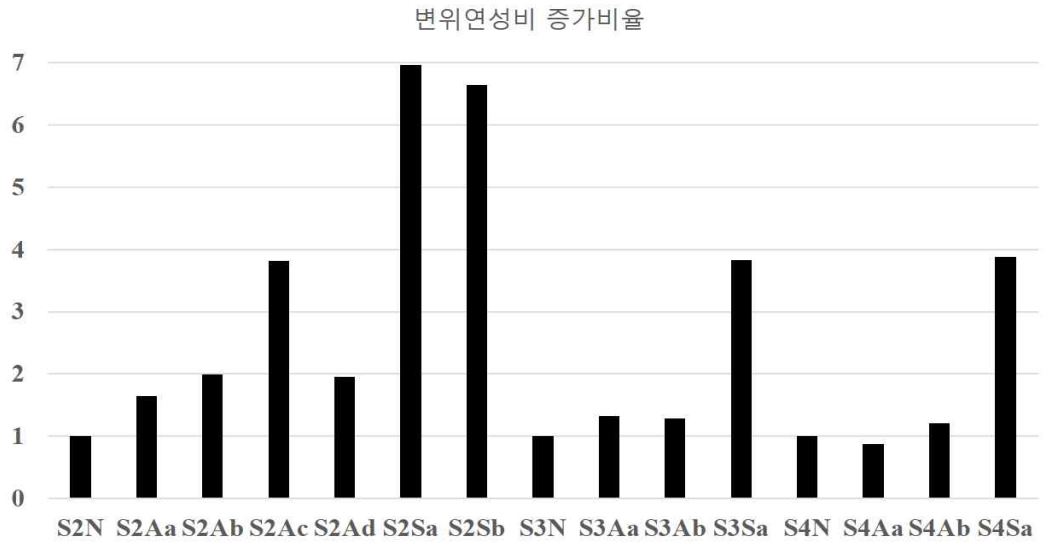


그림 2.33 성능 개선된 FRP를 보강한 각형 CFT기둥 실험체 변위연성비 비교 그래프

따라서 원형 및 각형 CFT 기둥에 성능 개선된 FRP를 보강하여 반복 중심축하중 가력실험 후 실험결과를 분석해본 결과, **성능 개선된 Aramid FRP 보강 및 SRF 공법 보강이 합성기둥의 연성능력을 증가시킴에 따라 내진성능을 증가시킴**을 확인하였다.

㈐성능 개선된 FRP 소재의 난연성능 및 부착성능에 대한 실험적 연구

현재 국내에서 적용되고 있는 FRP 섬유는 화재발생으로 연소 확대를 방지하기 위하여 난연 이상의 연소성능을 확보하도록 요구하고 있으나 난연 이후 FRP 섬유의 부착강도 성능에 대해서는 알려진 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 아라미드 섬유를 대상으로 두께가 다른 3개 시험체에 대해 난연성능 시험을 수행하고 이후에 상온 및 고온에 노출된 6개 시험체에 대해 부착강도시험을 수행하고 측정하여 비교하였다. 그림 2.34는 부착강도 시험을 진행한 실험체 리스트이다.

Specimens	FRP Type	Thickness	Conditions
AFRP-01-NF	Aramid	0.288	Ambient
AFRP-02-NF	Aramid	0.433	Ambient
AFRP-03-NF	Aramid	0.576	Ambient
AFRP-01-FE	Aramid	0.288	Fire
AFRP-02-FE	Aramid	0.433	Fire
AFRP-03-FE	Aramid	0.576	Fire

그림 2.34 부착강도 실험체 리스트

현재 건축물에서 내장재로 사용되는 건축재료는 화재 발생시 주변으로의 확산을 막기 위해 난연

성능을 규정하고 있다. 그림 2.35은 콘칼로리미터 시험으로 시험체(100mm×100mm×50mm)가 화재에 노출되는 동안 열방출률에 기여하는 정도를 평가하는 방법이며, 콘히터에서 50㎾/㎡의 복사강도로 5분 동안 가열하여 열방출 특성을 확인한다. 국토교통부 고시 제2019-473호에서는 총방출열량이 8MJ/㎡ 이하일 때 난연성능을 가지는 것으로 판단한다.

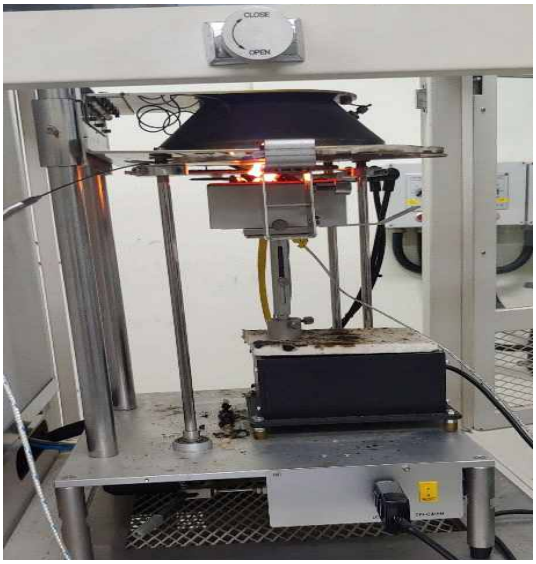


그림 2.35 콘칼로리미터 테스트

부착강도 시험은 시험용 밑판(접착면)을 시멘트 모르타르로 제작하여 아라미드 시트를 들뜸이나 공극이 없이 균일하게 도포하여 24시간 동안 양생을 하여 40mm×40mm 크기의 상부 인장용 지그를 에폭시로 부착하여 충분히 경화되면 지그 주변을 따라 시험용 밑판이 닿을 때까지 홈을 내고 그림 2.36과 같이 UTM을 이용해 시료면에 대해 수직방향으로 인장력을 가하여 식(1)을 통해 인장 시 최대 부착강도를 구한다.

$$\text{부착강도} = \frac{T}{1600} \qquad \text{식 2.1}$$

T = 최대 인장 강도 (MPa)

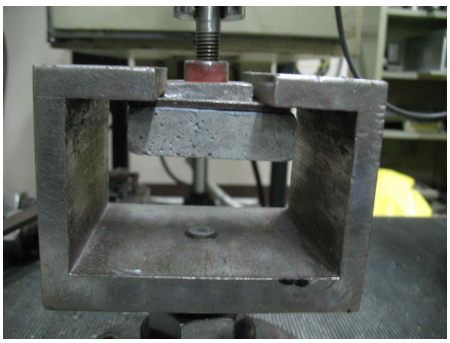
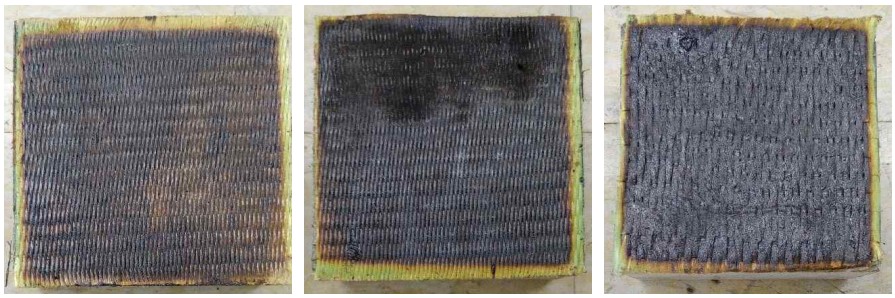


그림 2.36 30kN UTM

난연성능 시험 및 부착강도 시험 결과는 다음 그림 2.37 및 그림 2.38에 나타났다.



(a) AFRP-01-FE (b) AFRP-02-FE (c) AFRP-03-FE

그림 2.37 가열 실험 이후 탄화된 실험체 표면

Specimens	THR (MJ/m^2)	Temperature (℃)		Bond Strength (MPa)
		Top	Bottom	
AFRP-01-NF	-	-	-	2.36
AFRP-02-NF	-	-	-	1.29
AFRP-03-NF	-	-	-	1.07
AFRP-01-FE	0.1	493.3	40.1	0.92
AFRP-02-FE	0.1	619.9	35.8	0.38
AFRP-03-FE	0.6	623.2	38.5	0.47

그림 2.38 열전도율 및 부착강도 실험 결과

④성능 개선된 FRP 소재에 적합한 내화성능 확보 기술 개발 및 상세 설계 완성

성능 개선된 FRP의 내화특성을 분석하여 내화성능 확보 기술 개발을 위한 개념을 정립하였다. FRP소재 자체는 고온에 대한 저항성능을 확보하고 있지만, FRP 부착에 사용되는 에폭시 계열의 접착제는 약 80°C에서 액상화로 형태가 변형되어 부착성능을 발휘할 수 없는 단점이 존재하였다. 이를 해결하고자, 합성/RC 기둥의 내진보강을 위해 시공된 FRP를 열원으로부터 분리시키기 위한 기술 개발하였다. 불연 특성을 갖는 CRC 보드를 합성/RC 기둥의 겉면에 기둥의 길이방향으로 분절하여 부착하여 접착제의 액상화를 방지하는 기술에 대한 개념을 정립하고, 이에 대한 상세 설계를 완성하여 특허 출원을 진행하였다. 다음 그림 2.39는 개념 정립 후 출원을 진행한 내진보강 및 내화성 확보를 위하여 에프알피 시트 및 시멘트 보드를 이용한 기둥 보강방법의 상세도면이다.

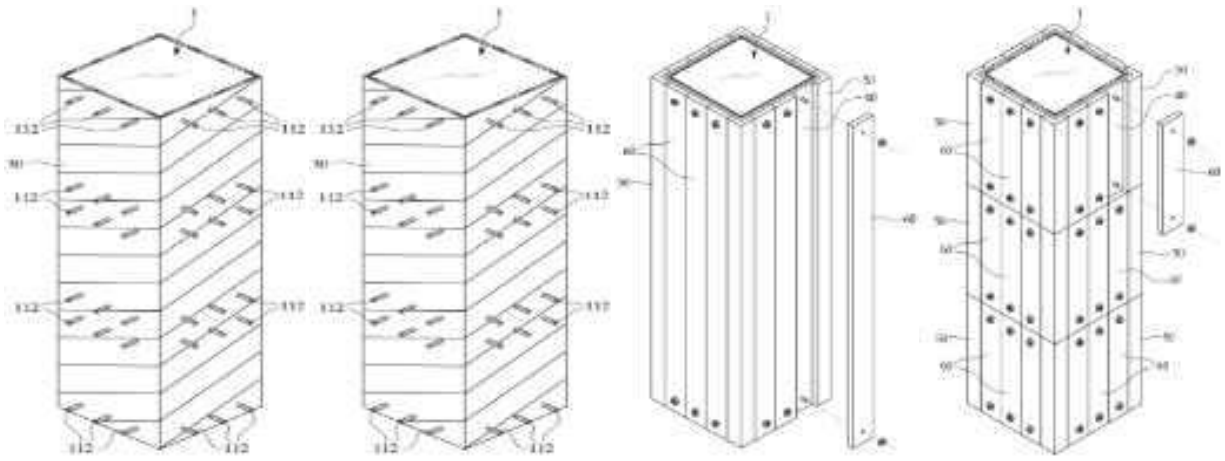


그림 2.39 성능 개선된 FRP를 활용한 합성/RC 기둥의 FRP 보강 및 CRC 보드 부착

일반적으로 판재 형태 FRP로 구성되어 구조부재에 조립/부착해야 하는 기존 탄소섬유, 유리섬유 보강 FRP 내진성능 확보기술은 무거운 중량 및 두꺼운 두께를 가지고 있어 구조체 보강의 작업성이 어렵고, 각형이 아닌 원형기둥의 보강 시 판재를 절곡하기 힘들어 시공성이 낮은 단점을 가지고 있다. 하지만 개발한 성능 개선된 FRP 소재에 적합한 내화성능 확보 기술의 경우, 유연한 시트(Sheet) 및 포대 형태의 FRP로 각형 기둥 뿐만 아니라 원형 기둥에도 적용이 쉬우며 얇은 두께를 가지고 있어 내화성능 확보를 위한 추가적인 판재 시공 시에도 구조체 외부 방향 부피 증가가 크지 않은 장점을 가지고 있다. 기존 FRP 보강 기술과 성능 개선된 FRP 소재에 적합한 내화성능 확보 기술의 장단점을 비교하여 그림 2.40에 나타내었다.

	Steel	Carbon FRP	Glass FRP	Aramid FRP	SRF FRP
보강성능	◎	○	○	◎	◎
시공성	×	△	△	○	○
내화학성	×	◎	◎	◎	◎
종합	△	○	○	◎	◎

◎: 매우 우수 ○: 우수 △: 보통 ×: 미흡

그림 2.40 강판 및 기존 FRP 및 성능 개선된 FRP를 활용한 보강 기술의 장·단점 비교

(나)2차년도

①실험을 위한 실험체 제작 및 구조 실험을 통한 지진피해 저감 효과와 물리적 성능 검증

㉮성능 개선된 Aramid FRP 보강 비내진철근 상세를 가진 필로티 RC 기둥의 반복횡하중 가력실험

1차 년도에서 Aramid FRP와 SRF공법 FRP의 내진/내화 보강성능에 대한 검증을 진행하였다. Aramid FRP와 SRF 공법 FRP의 경우 두 FRP 모두 내진성능을 보강하는데 효과가 있음을 확인하였지만, Aramid FRP의 경우 불연성능을 만족하는데 반해 SRF 공법 FRP의 경우 불연성능을 발휘하기 어려운 것을 확인하였다. 따라서 성능 개선된 FRP로 선정한 두 FRP 중 **Aramid FRP를 내진/내화 보강을 위한 FRP**로 확정하였다.

국내에서 발생된 경주 및 포항지진에 따른 필로티 RC 기둥의 피해사례를 분석하여 **피해가 발생한 필로티 RC 기둥 타입을 선정**하였다. 또한, 피해 분석 결과 기존에 시공된 필로티 건물의 기둥이 모두 개정된 **한국건축구조설계기준(KBC)의 연성상세 기준을 만족하지 않음**을 확인하였다. 따라서, 성능 개선된 Aramid FRP를 보강한 필로티 RC 기둥의 내진성능에 대한 보강효과를 분석하기 위하여, 포항 지진 발생 시 피해를 입은 비내진 상세를 가지는 필로티 RC 기둥을 실제적으로 모사한 실험체에 Aramid FRP를 보강하여 휨·전단 보강 성능을 확인하고 연성 보강 효과가 있는지 확인하고자 하였다. 또한, FRP 섬유로 보강한 필로티 RC 기둥의 예상내력을 한국복합신소재구조학회에서 발간된 복합신소재(FRP 재료)시스템에 의한 철근콘크리트구조물의 보강 설계 및 시공지침서에 따라 계산하고, **실험 결과가 설계 내력을 만족하는지 확인**하였다.

실험체의 단면은 실제 필로티 건물에서 많이 사용되는 단면인 300㎜×400㎜이고, 피복 두께는 40㎜이다. 또한, 비내진 철근상세로 설계하여 띠철근 간격을 300㎜로 정하였다. 실험체 기둥부 길이는 실제 필로티 건물의 층고로 많이 사용되는 3000㎜로 결정하였다. 콘크리트 설계 압축강도는 30㎫, 주철근 및 띠철근은 SD400을 사용하였으며, 주철근은 D19 철근을 10개 배치하였고, 띠철근은 D10을 사용하였다. 실험체 상세 단면 및 철근배치는 그림 2.41에 나타내었다.

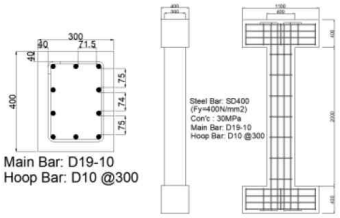


그림 2.41 비내진철근상세를 갖는 필로티 RC 기둥 실험체

Aramid FRP의 휨·전단 보강타입 및 전단 보강량에 따른 보강효과 성능분석을 위하여 Aramid FRP sheet 보강 겹수 및 strip 추가 보강을 변수로 하여 무보강 실험체 포함 총 4개의 실험체를 제작하였다. RN은 비교를 위한 무보강 실험체이며, RA1은 Aramid FRP 0.576㎜ sheet 1겹을 보강하여 전단성능만을 보강한 실험체, RA2는 Aramid FRP 0.576㎜ sheet 2겹을 보강하여 전단성능을 보강한 실험체, RA3는 Aramid FRP 0.576㎜ 2겹으로 전단보강 및 strip 보강을 통한 휨보강을 진행한 실험체이다. 그림 2.42는 각 실험체에 대한 설명이 있는 실험체 리스트이다.

No.	Specimen	Aramid Sheet (ply)		Aramid Strip (width/thickness/face)
1	RN	-		-
2	RA 1	0.576 mm	1	-
3	RA 2		2	-
4	RA 3		2	100mm/1.4mm/All Face

그림 2.42 필로티 RC 기둥 실험체 리스트

RA1, RA2, RA3 실험체의 전단보강의 경우 Aramid FRP sheet를 폭방향으로 실험체 기둥부 전면에 폭방향 보강을 하였으며, 추가적인 휨 보강을 진행한 RA3실험체의 경우 폭 100㎜/두께 1.4㎜ Aramid FRP strip을 기둥 4면에 길이방향으로 부착하였다. 또한 strip의 정착을 위하여 가력방향 면에 0.576㎜ Aramid FRP strip을 기둥부와 고정부에 각 400㎜씩 부착하고, 실험체 고정부에 Aramid FRP sheet의 정착을 위하여 고정부 3면에 0.576㎜ Aramid FRP sheet를 부착하였다. 그림 2.43에 각 실험체별 Aramid FRP 부착 방법을 나타내었다.



그림 2.43 필로티 RC 기둥 실험체 Aramid 부착 방법

필로티 RC 기둥에 지진력이 가해진 상황을 정확하게 모사하기 위한 실험체 반복횡하중 가력 세팅을 그림 2.44에 나타내었다. 필로티 RC 기둥의 경우 지진력이 가해지면 **기둥부 전체는 동일한 전단력을 받게되고, 모멘트는 양 단부에서 가장 크게** 된다. 따라서 기둥부 정 중앙의 높이에서 가력을 하며, ㄱ자 지그를 통해 500kN급 Actuator가 가력 하는 힘이 실험체 상부에 전달되도록 한다. 또한 실험체 반복횡하중 가력 시 편심가력을 방지하기 위하여 실험체 양 면에 링크시스템 지그를 연결하였다.



그림 2.44 필로티 RC 기둥 실험체 가력 세팅 사진 및 세팅도

비내진상세 적용 필로티 RC 기둥 실험체 반복횡하중 가력계획을 그림 2.45에 정리하였다. 실험체 기둥부의 길이를 기준으로 변위각을 설정하였으며, 각 Step당 3Cycle씩 8Step까지 반복횡하중 가력을 진행하였다. 8Step 하중가력 완료, 실험체 내력이 최대내력의 80% 미도달 또는 실험체의 파괴 발생 시 실험을 종료하였다.

Step	Cycle	Displacement (mm)	Deformation Angle (rad)
1	3	(±) 5	0.0025
2		(±) 10	0.005
3		(±) 20	0.01
4		(±) 29.8	0.015
5		(±) 40	0.02
6		(±) 60.6	0.03
7		(±) 100	0.05
8		(±) 130	0.065

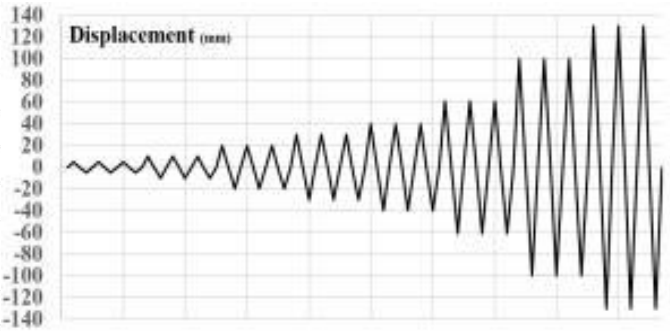


그림 2.45 필로티 RC 기둥 실험체 가력 프로토콜

실험체 반복횡하중 가력실험 진행 시 실험체 주근 및 띠철근의 응력분포와 실험체의 하중-변위 관계의 정확한 확인을 위하여 주근과 띠철근에 게이지를 부착하고, 실험체에 LVDT를 설치하였다. 각 게이지 및 LVDT 부착 위치는 그림 2.46와 같다.

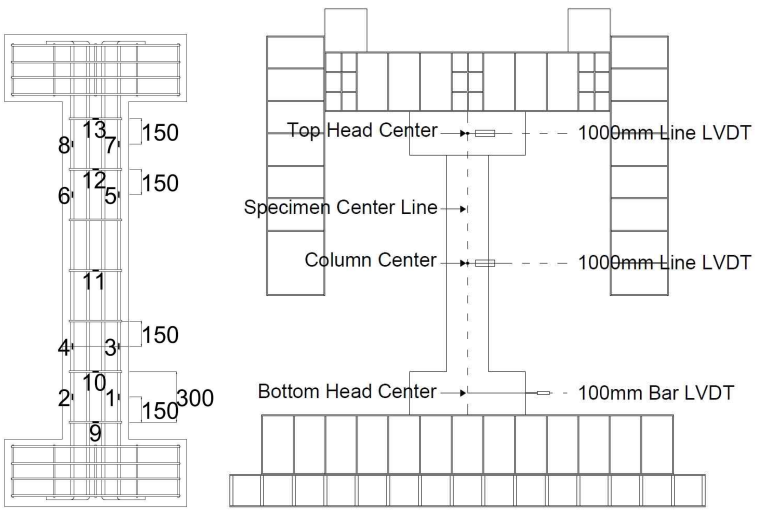


그림 2.46 필로티 RC 기둥 게이지 및 LVDT 부착 위치

실험체 제작에 사용된 실제 콘크리트와 철근, Aramid FRP 물성치는 다음 그림 2.47과 그림 2.48과 같다. 철근 인장시편의 경우 SD400 D19 및 D10 철근 각 3개를 사용하여 인장시험을 진행하고, 3개의 시편의 평균값을 사용하였다. 콘크리트 압축강도의 경우 실험체 타설 시 제작한 콘크리트 공시체의 28일 강도를 확인하였다.

Yield Strength of Steel Bar (MPa)		Elastic Modulus of Steel Bar (MPa)		Concrete f_{ck} (MPa)
D10	D19	D10	D19	44.05
450	478	220473	202267	

그림 2.47 필로티 RC 기둥 실험체 철근 및 콘크리트 물성치

Aramid	Elastic Modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)
Sheet	120000	2100
Strip	60000	1400

그림 2.48 필로티 RC 기둥 실험체 Aramid FRP 물성치

필로티 RC 기둥 실험체의 설계내력은 Aramid FRP 보강 시 실험체의 전단 및 휨 예상 내력 중 작은 값으로 설정하였다. 비내진철근상세를 갖는 필로티 RC 기둥의 전단내력은 RC 실험체의 파괴 시 최대내력으로 결정하였으며, 각 실험체별 Aramid FRP 보강량에 따른 전단 설계내력은 콘크리트와 전단철근, 전단 보강 Aramid FRP sheet의 전단내력의 합으로 계산하였다. 이는 **복합신소재(FRP재료) 시스템에 의한 철근콘크리트구조물의 보강 설계 및 시공지침서**의 **기둥전단보강 전단저항능력식**인 식 2.2에 따라 계산하였다. 이 때 FRP 인장응력은 탄성계수의 0.002배를 넘을 수 없는 것으로 설정하였다.

$$\overline{V_r} = \Phi(\overline{V_c} + \overline{V_s}) + \overline{V_{frp}} \qquad \text{식 2.2}$$

$\overline{V_r}$ = FRP 보강 기둥 전단내력

$\overline{V_c}$ = 철근 콘크리트 기둥 콘크리트 전단내력

$\overline{V_s}$ = 철근 콘크리트 기둥 철근 전단내력

$\overline{V_{frp}}$ = FRP 전단내력

Φ = 0.75

$$\overline{V_c} = 0.2\lambda\Phi_c\sqrt{f_c'}\,b_w d \qquad \text{식 2.3}$$

λ = 경량콘크리트 계수

Φ_c = 콘크리트 저항계수

f'_c = 콘크리트 설계기준압축강도 (㎫)

b_w = 콘크리트 기둥 폭 (㎜)

d = 압축 상단으로부터 인장철근 중심까지 거리 (㎜)

$$\overline{V_s} = \frac{\Phi_s f_{hy} n A_h d}{S}\cot\Theta \qquad \text{식 2.4}$$

Φ_s = 철근 저항계수

f_{ny} = 수평철근의 항복응력 (㎫)

n = 하중방향의 횡지지 수평기둥의 다리 수

A_h = 수평철근 하나의 단면적 (㎟)

d = 압축 상단으로부터 인장철근 중심까지 거리 (㎜)

S = 부재의 수평 전단철근 간격 (㎜)

Θ = 전단균열의 경사각 (보통 45°)

$$\overline{V_{frp}} = 2\Phi_{frp} f_{frp} N_b t_{frp} d sin^2\Theta \quad \text{식 2.5}$$

Φ_{frp} = FRP 저항계수

f_{frp} = FRP 섬유 인장응력 (㎫)

N_b = FRP 시트 총 겹수

t_{frp} = FRP 시트 한 겹 두께 (㎜)

d = 압축 상단으로부터 인장철근 중심까지 거리 (㎜)

Θ = 전단균열의 경사각 (45°)

$$f_{frp} = 0.002 E_{frp} \leq \Phi_{frp} f_{frpu} \quad \text{식 2.6}$$

휨내력의 경우 Aramid FRP 보강 시 실험체 단면의 콘크리트 극한압축변형률에 따른 철근과 Aramid FRP strip의 변형률에 의한 모멘트를 이용하여 계산하였다. Aramid FRP 섬유를 사용하여 필로티 RC 기둥을 보강하면 구속효과로 인하여 콘크리트의 압축강도와 극한변형률이 증가하는데, 이러한 구속효과를 적용한 상태의 실험체 휨모멘트를 계산하여 휨내력을 산정하였다. 구속압축강도 및 극한압축변형률의 식은 다음 식 2.7과 식 2.9과 같다.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 4.5\frac{f_l^*}{f'_{cc}} \quad \text{식 2.7}$$

f'_{cc} = FRP로 구속된 콘크리트 압축강도 (㎫)

f'_{co} = 비구속 철근 콘크리트 압축강도 (㎫)

$$f_l^* = \frac{k_e}{2}(1 + \frac{b}{h})(\frac{2nt_{frp}E_{frp}0.2\epsilon_{fu}}{b}) \quad \text{식 2.8}$$

k_e = 유효구속계수

b = 기둥 너비 (㎜)

h = 기둥 높이 (㎜)

n = 아라미드 보강 겹수

t_{frp} = 아라미드 1겹 두께 (㎜)

E_{frp} = 아라미드 탄성계수 (㎫)

ϵ_{fu} = 아라미드 파단 변형률

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + 1.25\frac{\rho_{frp} f_{uj} \epsilon_{fe}}{f'_{cc}} \quad \text{식 2.9}$$

ϵ_{cu} = 콘크리트 극한압축변형률

ρ_{frp} = FRP 스트립 면적비

f_{uj} = FRP 섬유 인장응력 (㎫)

ϵ_{fe} = FRP 섬유 인장파단변형률

$$\rho_{frp} = \frac{2nt_{frp}(b+h)}{bh} \quad \text{식 2.10}$$

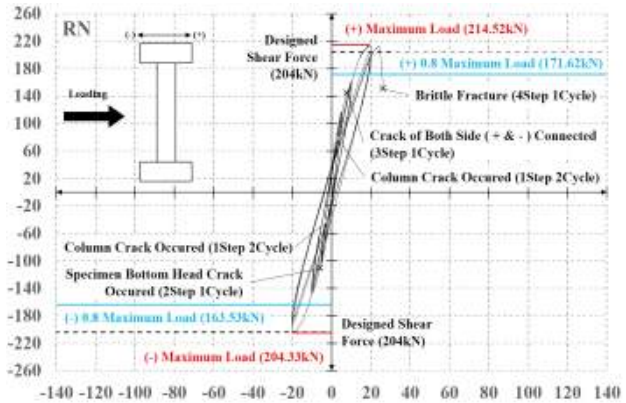
이때 식 2.8의 유효구속계수 ke는 콘크리트 기둥의 너비와 높이에 따라 변하는 값이며, 본 연구에서는 K. H. Tan, T. Bhowmik, T. Balendra의 연구를 분석하여 0.2를 사용하였다.

성능 개선된 Aramid FRP를 보강한 실험체들의 최대내력은 정방향 및 부방향 가력 시 최대내력의 평균으로 하였다. 실험체 별 설계내력 계산 결과를 그림 2.49에 정리하였다.

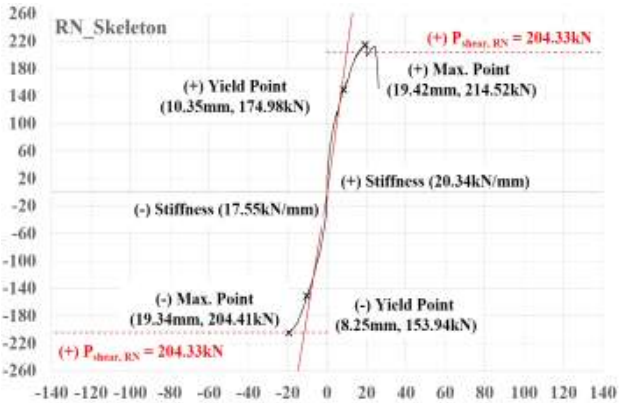
Specimen		RA1	RA2	RA3
Bending	Moment (kN · m)	110.30		157.97
	Bending Load (kN)	220.60		315.95
Shear	RC	214.52		
	Aramid	138.24	276.48	276.48
	Total Load (kN)	352.76	491	491
Designed Load (kN)		220.60	220.60	315.62

그림 2.49 Aramid FRP를 보강한 필로티 RC 기둥 실험체의 설계내력

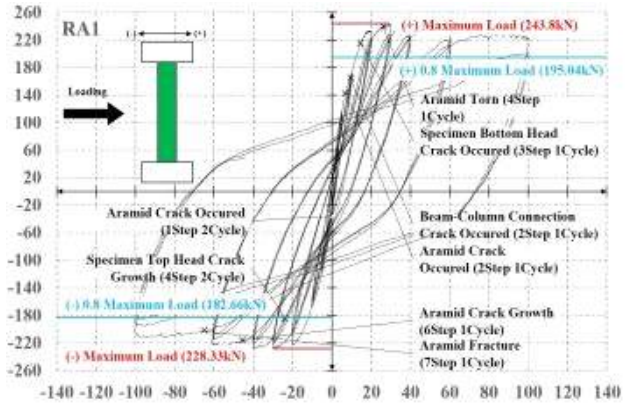
다음 그림 2.50은 필로티 RC 실험체들의 하중-변위 그래프 및 골격곡선이다. 각 실험체 하중-변위 그래프에서 1/3접선법을 사용하여 항복내력을 구하고, 최대내력의 0.6배 지점과 원점을 이은 직선의 기울기를 실험체 초기강성으로 구하였다. 실험체 별 설계내력, 항복내력, 최대내력 및 강성을 그림 2.51에 정리하였다.



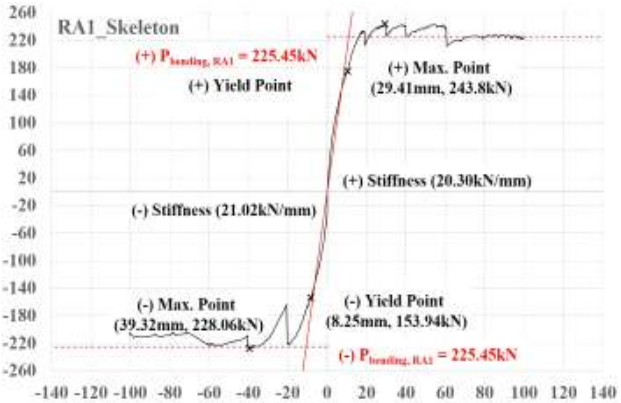
(a) RN 실험체 하중-변위 그래프



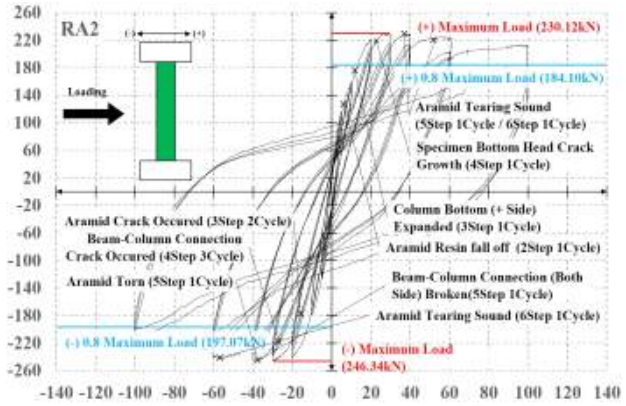
(b) RN 실험체 골격곡선



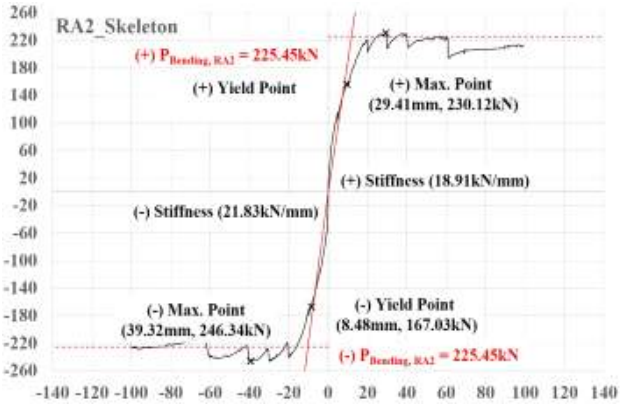
(c) RA1 실험체 하중-변위 그래프



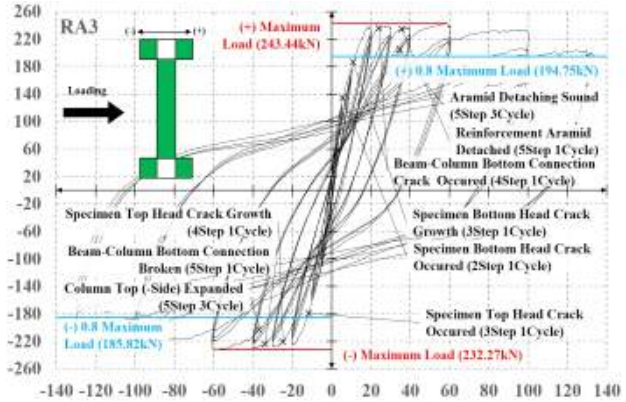
(d) RA2 실험체 골격곡선



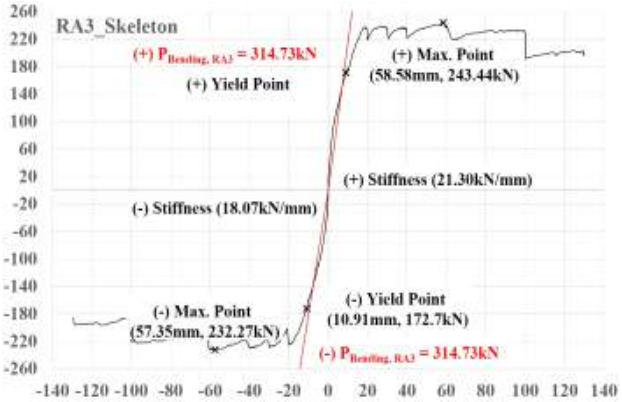
(e) RA2 실험체 하중-변위 그래프



(f) RA2 실험체 골격 곡선



(g) RA3 실험체 하중-변위 그래프



(h) RA3 실험체 골격 곡선

그림 2.50 각 실험체 하중-변위 그래프 및 골격곡선

Specimen		RN	RA1	RA2	RA3
Yeild Load (kN)	+	149.08	174.98	156.11	171.39
	-	151.49	153.94	167.03	172.70
Maximum Load (kN)	+	214.52	243.80	230.12	243.44
	-	204.41	228.06	246.34	232.27
Stiffness (kN/mm)	+	20.34	20.30	18.91	21.30
	-	17.55	21.02	21.83	18.07

그림 2.51 각 실험체 별 항복내력/최대내력/강성

Aramid FRP를 보강하지 않은 RN 실험체의 경우 4Step(0.015rad) 1Cycle 가력 도중 최대변위에 도달하기 전 갑작스런 전단균열의 발생과 함께 내력이 크게 감소하며 취성적으로 파괴되었다. 또한 상·하단 고정부에 균열이 발생하였으나 기둥-고정부 접합부의 파괴는 발생하지 않았다. RA1 실험체는 1Step (0.0025rad) 2Cycle 부방향 가력 시 아라미드 균열이 처음 발견되었다. 2Step (0.005rad) 1Cycle 정방향 가력 시 기둥-고정부 접합부의 균열이 발생하였고, 실험을 진행함에 따라 기둥-고정부 접합부의 균열이 성장하며 접합부 전체에 균열이 확장되었다. 4Step (0.015rad) 1Cycle 정방향 가력 시 접합부의 파괴가 관찰되었고, 이후 실험체의 하중이 증가하지 않았다. 변위가 증가하며 7Step (0.05rad) 1Cycle 부방향 가력 시 아라미드의 파단이 일어났으나 실험체 내력에 큰 영향을 주지 않았다. 실험체 주근 게이지 중 상·하부 기둥과 고정부 접합부에 위치한 1, 2,

7, 8번 게이지의 변형률을 확인한 결과 실험체 하단 부방향 주근에 위치한 1번 게이지는 최대하중 도달 후 6Step (0.03rad)에서 항복했으며, 나머지 게이지는 7Step (0.05rad)에서 항복한 것으로 확인되었다. RA2 실험체는 2Step (0.005rad) 1Cycle 정방향 가력 시 아라미드 레진이 탈락하였고, 3Step (0.01rad) 2Cycle 부방향 가력 시 최외곽 아라미드 시트의 미세균열이 관찰되었지만 실험체 내력에 영향을 주지 않았다. 2Step (0.005rad) 1Cycle 정방향 가력 시 기둥-고정부 하단 접합부의 균열이 관찰되었으며, 가력을 진행 할수록 균열이 성장하였다. 4Step (0.015rad) 1Cycle 정방향 가력 시 접합부의 파괴가 관찰되며 최대내력에 도달 후 점차 내력이 감소하였다. 이후 6Step (0.03 rad) 1Cycle에 아라미드의 찢어짐 소리가 발생하였지만 실험체 내력에 큰 영향을 주지 않았다. RA2 실험체의 1, 2, 7, 8번 게이지 변형률을 확인한 결과 모두 최대하중 도달 후 7Step (0.05rad)에서 항복한 것으로 확인되었다.

RA3 실험체는 8Step 0.065rad (130mm)가력 시 최대내력의 80%에 도달하며 실험체가 파괴되었다. RA3실험체는 최외곽 아라미드의 균열이 관찰되지 않았으나, 5Step 1Cycle 정방향 가력 시 접합부 보강 아라미드 시트가 탈락하였고, 동일 Cycle 부방향 가력 시 기둥-고정부의 파괴가 발생하며 이후 실험체의 내력이 크게 증가하지 않았다. 5Step 3Cycle 정방향 가력 시에는 아라미드의 찢어짐 소리가 관찰되었으나 실험체 내력에 영향을 주지 않았다. RA3 실험체 1, 2, 7, 8번 게이지의 변형률을 확인한 결과 1번 게이지의 경우 실험체 항복 후 최대하중 도달 전 4Step (0.015rad)에서 항복했으며, 2, 8번게이지는 최대하중 도달 Step인 6Step (0.03rad)에서 항복하였고, 7번 게이지는 최대하중 도달 후 7Step (0.05rad)에서 항복 한 것으로 확인되었다. 그림 2.52는 각 실험체들의 실험 종료 후 파괴사진이다.



(a) RN 파괴모드 (b) RA1 파괴모드



(c) RA2 파괴모드 (d) RA3 파괴모드

그림 2.52 각 실험체의 실험 종료 후 파괴 사진

실험결과를 분석하여 필로티 RC 기둥에 성능 개선된 Aramid FRP를 보강 시 전단 및 휨 보강 효과를 판단하였다. Aramid FRP 전단보강만 진행한 RA1, RA2 실험체는 각각 설계 휨내력의 106.95%, 107.99%로 최대내력이 설계 휨내력을 만족함을 확인하였다.

각 실험체들의 최대내력 및 설계내력을 비교하고, Step 별 최대변위 도달 시 전단철근의 변형률을 분석하여 Aramid FRP의 전단보강 효과를 확인하였다. Aramid 보강 결과 무보강 실험체의 전단내력 대비 최대내력이 RA1 110.0%, RA2 111.1% RA3 110.8%로 약 10% 상승하였고, 보강 실험체들은 모두 휨파괴 거동을 보였다. 따라서 Aramid FRP 보강이 비내진 상세 철근배근을 가진 철근콘크리트 기둥의 전단보강효과가 있는 것으로 판단된다.

전단보강 Aramid FRP가 내력을 분담하면 띠철근의 변형률은 감소할 것이다. 각 실험체의 step 별 띠철근 게이지 변형률을 분석하여 그림 2.53에 정리하였다. RA3 실험체는 게이지 변형률이 0.01이상으로 기록된 6step이후의 데이터를 제거하였다.

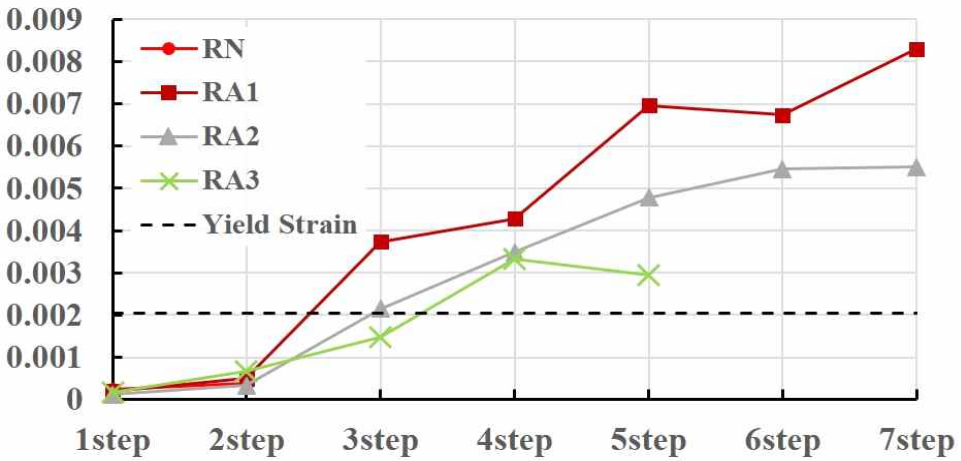


그림 2.53 각 실험체 띠철근 변형률

RN 실험체는 전단파괴가 발생한 3step에서 띠철근이 파괴되었고, 나머지 실험체도 최대하중에 도달한 3step에서 항복변형률 이상의 변형률이 확인되었다. RA1 실험체와 RA2 실험체의 띠철근 변형률을 분석한 결과 각 step의 최대변위 시 RA1 실험체의 띠철근 변형률이 RA2보다 큰 것을 확인하였다. 또한 동일한 전단보강을 진행한 RA2와 RA3 실험체의 경우 4step까지 유사한 변형률이 발생했음을 확인하였다. 따라서 변수로 설정한 Aramid FRP 보강 겹수가 전단성능에 영향을 끼침을 확인하였다. 분석 결과 Aramid FRP 보강이 전단보강에 효과적이라고 판단된다.

또한 성능 개선된 FRP를 보강한 실험체들의 유효강성 및 연성지수를 비교하여 따른 연성보강능력을 평가하였다. 실험체의 유효강성은 각 Step별 정방향 최대하중과 변위 지점, 부방향 최대하중과 변위지점을 연결한 직선의 기울기로 정의하였다. 실험체 Step별 유효강성을 비교한 결과 1 ~ 3Step에서 모두 약 5% 증가함을 확인하였다. 그림 2.54는 각 실험체들의 Step 별 유효강성을 나타낸 표이다.

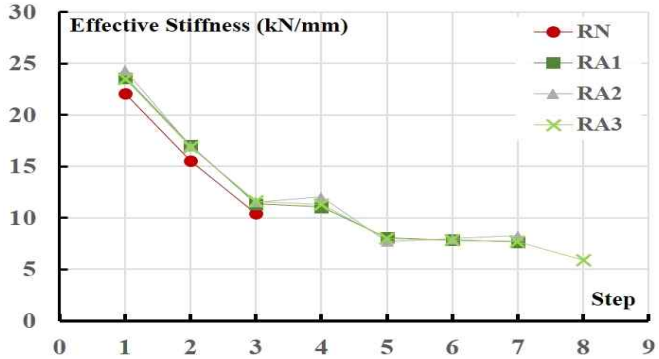


그림 2.54 각 실험체 Step 별 유효강성

Aramid FRP 보강 철근콘크리트 기둥의 연성지수는 최대내력 이후 최대내력의 80%까지 저하된 시점의 변위를 실험체 항복 변위로 나눈 값으로 정의하고 이를 그림 2.55에 정리하였다. 항복내력과 최대내력의 80%지점은 정방향 및 부방향 값이 모두 존재할 경우 두 값의 평균으로 설정하였고, RN 실험체는 실험체가 파괴된 Step의 최대하중 80%를 이용하여 연성지수를 구하였다.

Specimen	Yield Displacement (mm)	0.8Max. Load Displacement (mm)	Ductility Index
RN	9.39	26.14	2.78
RA1	9.3	100	10.75
RA2	9.03	100	11.07
RA3	10.05	130	12.94

그림 2.55 각 실험체 Step 별 연성지수

무보강 실험체인 RN의 연성지수는 2.78, Aramid FRP 보강 실험체인 RA1, RA2, RA3의 연성지수는 각각 10.75, 11.07, 12.94이다. 각 Aramid FRP 보강 실험체들의 연성지수를 무보강 실험체의 연성지수로 나눈 결과 약 기둥을 Aramid sheet만 보강한 RA1, RA2 실험체는 약 300%, 기둥을 Aramid sheet 및 strip으로 보강하고 접합부를 추가 보강한 RA3 실험체는 약 365% 증가함을 확인하였다. 모든 실험체의 유효강성과 연성지수를 비교한 결과 Aramid FRP 보강 시 유효강성은 모두 약 5%, 연성지수는 300 ~ 365% 증가하였다.

실험결과를 토대로 필로티 RC기둥에 성능 개선된 **Aramid FRP 보강 시 필로티 RC 기둥의 전단성능과 연성능력이 크게 증가하는 것으로 판단**된다.

㉯성능 개선된 Aramid FRP 보강 CFT(Concrete Filled steel Tube) 기둥의 전단성능 향상에 대한 실험적 연구

합성 구조 시스템 중 하나인 CFT 기둥은 최근 국내 건축물의 고층화 및 대형화 경향으로 사용이 증대되고 있는 부재이며, 단일 재료로 이루어진 구조체에 비해 작은 단면적으로 같은 강도를 만족시킨다는 장점이 있다. 특히 CFT기둥의 종류인 용접조립 각형CFT기둥의 경우 기존의 얇은 강관의 문제점을 해소하였다는 점에서 사용이 증가하고 있다.

지진 발생 시, 기둥부재에 휨·전단하중이 작용 하게 되는데, CFT 기둥 구조체의 휨내력의 경우 다양한 실험연구를 통하여 정확한 예측이 가능하며, 설계식 역시 합리적으로 제안되고 있다. 하지만 CFT 기둥 구조체의 전단내력 산정의 경우, 강관 웨브의 전단내력 또는 콘크리트의 전단내력 중 큰 값을 적용하고 있다. 특히 강판을 ㄱ형으로 절곡한 네 개의 단위 부재를 용접하여 강관을 구성하는 구조적 특성을 가지는 용접조립각형 CFT기둥의 경우 중앙 리브가 설치되어 스티프너 역할을 하도록 유도하는 특징을 가지고 있지만, 전단내력 산정 시 이러한 특성이 고려되지 않고 있으며 강관 웨브만의 단면적을 전단내력 산정 시 고려하고 있다. 따라서 용접조립각형 CFT기둥 부재의 **전단내력에 대한 검토 및 성능 개선된 Aramid FRP 보강에 따른 연성능력 보강효과**에 대한 연구가 필요한 상황이다.

용접조립각형 CFT기둥의 전단거동확인 및 Aramid FRP 보강에 따른 연성능력 증가를 확인하기 위하여 두께가 일정하고 강관 폭이 다른 실험체 12개를 계획하였다. 기둥 폭이 각 각 300×300, 350×350, 450×450 크기인 실험체를 각 크기당 4개씩 총 12개를 제작하였다. 전단성능에 대한 분석을 위하여 실험체 폭에 대한 가력 지점 길이 비인 전단스팬비를 변수로 하고, Aramid를 보강한 실험체를 추가하였다. 모든 실험체는 컴팩트섹션에 속하였고, 강관두께는

9mm이고 강종은 SM355이다. 용접조립 각형강관 안에 충전한 콘크리트의 설계압축강도는 30 ㎫이다. 용접조립각형 CFT기둥 실험체에 보강된 Aramid FRP의 두께는 0.576mm이다. 실험체 리스트를 그림 2.56에 나타내었다.

Specimen	Column Section (㎜)	Concrete Area (㎟)	Steel Tube Area (㎟)	Rib Area (㎟)	a/D	Steel Tube Thickness (㎜)	Yield Strength (MPa)	Concrete f_{ck} (MPa)	Aramid
C1V1	300×300	77,913	13,896	6,524	0.2	9	355	30	-
C1V2					0.4				
C1V3					0.6				
C1V4					0.4				0.576㎜
C2V1	350×350	108,913	15,696	7,424	0.2				-
C2V2					0.4				
C2V3					0.6				
C2V4					0.4				0.576㎜
C3V1	450×450	144,913	19,296	9,224	0.2				-
C3V2					0.4				
C3V3					0.6				
C3V4					0.4				0.576㎜

그림 2.56 용접조립각형 CFT기둥 실험체 리스트

용접조립각형 CFT기둥 실험체의 전단내력 확인 실험을 진행하기 위하여 그림 2.57과 같이 실험을 계획하였다. 실험체 양 끝단에서 0.5D만큼 떨어진 위치에 가력지점을 놓고, 실험체 중앙부 쪽으로 0.2D/0.4D/0.6D 만큼 지지점을 세팅하였다. 또한 가력 시 강관의 응력을 분석하기 위하여 그림 2.58과 같이 실험체의 가운데 높이 중 가력점과 가력점과 지지점 사이 위치에 게이지를 설치하였다. 실험체는 10,000kN 급 오일잭을 사용하여 실험체 상부에서 측정하는 변위가 40mm에 도달할 때 까지 단조가력 하였다.

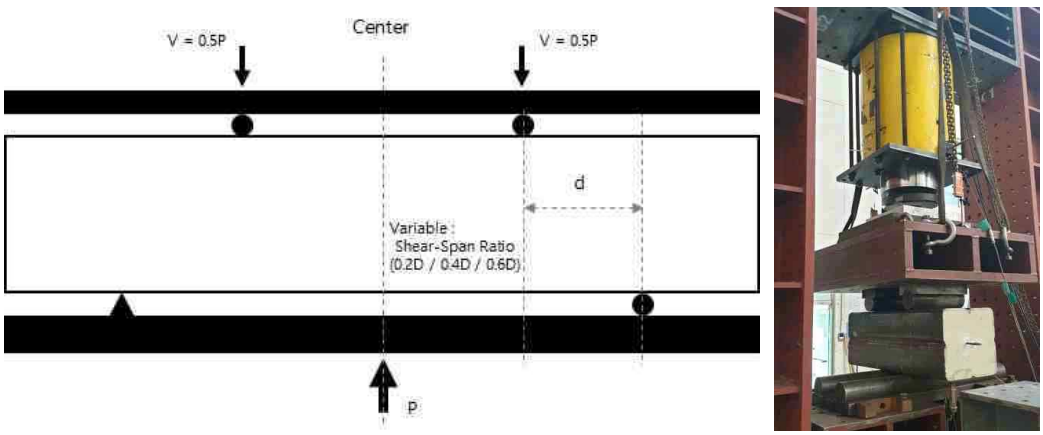


그림 2.57 용접조립각형 CFT기둥 실험 세팅 개념도 및 사진

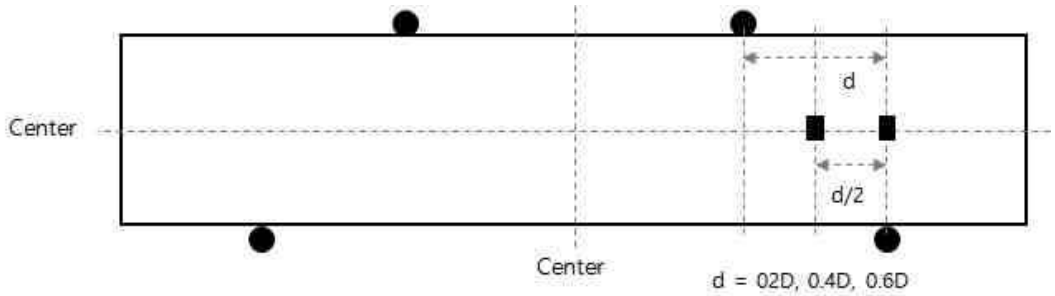


그림 2.58 용접조립각형 CFT기둥 실험체 게이지 위치

실험체 제작에 사용된 실제 콘크리트와 강관, Aramid FRP 물성치는 다음 그림 2.59 ~ 그림 2.61과 같다. 강관 인장시편의 경우 강관 제작에 사용된 강판에서 인장시편을 3개 채취하여 시험을 진행하고, 3개의 시편의 평균값을 사용하였다. 콘크리트 압축강도의 경우 실험체 타설 시 제작

한 콘크리트 공시체 3개의 28일 강도를 확인하여 평균값을 사용하였다.

Concrete Specimen #1	Concrete Specimen #2	Concrete Specimen #2	Average
34.14 **MPa**	40.11 **MPa**	42.22 **MPa**	38.32 **MPa**

그림 2.59 용접조립각형 CFT기둥 실험체 콘크리트 물성치

	f_y(MPa)	f_u(MPa)	E (MPa)
Steel Tube	458.9	541.6	201,308

그림 2.60 용접조립각형 CFT기둥 실험체 강관 물성치

Aramid	Elastic Modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)
Sheet	120000	2100
Strip	60000	1400

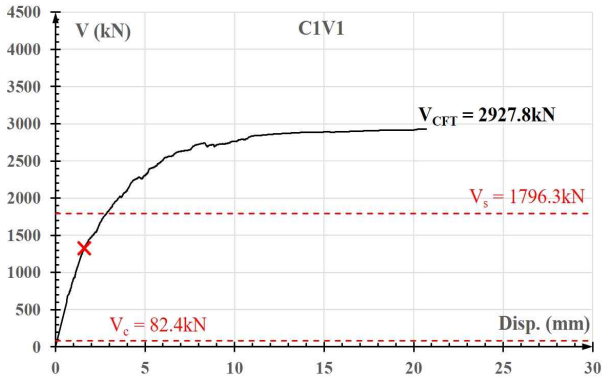
그림 2.61 용접조립각형 CFT기둥 실험체 Aramid FRP 물성치

용접조립각형 CFT기둥 실험체들의 항복내력은 1/3접선법을 사용하여 구하였고, 전단내력은 가력 하중의 1/2배 중 최대내력으로 하였다. 실험체 변위는 실험체 하부에서 측정한 LVDT의 값으로 정하였다. 강성은 최대 하중점의 0.6배 지점과 원점을 이은 직선의 기울기로 구하였다.

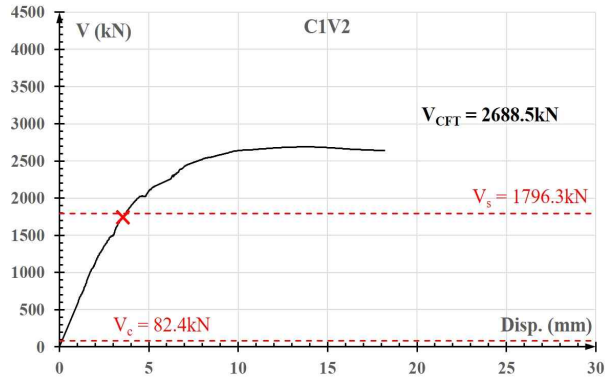
모든 실험체들은 AISC 기준인 강관만의 전단내력을 만족하는 것으로 확인되었다. 각 실험체별 항복내력 및 전단내력을 비교한 결과, 전단스팬비가 증가할수록 최대내력이 감소하는 것을 파악하였다. 또한 같은 전단스팬비를 가지는 Aramid FRP 보강 실험체의 경우 무보강 실험체와 전단내력은 비슷하였으나, 항복시점이 더 일찍 발생하였다. 또한 실험체의 실험 종료 변위의 경우 모두 상부 LVDT의 변위는 40mm로 동일하였지만, 전단스팬비가 낮을수록 실험체 하부 변위가 더 큰 것을 확인하였다. 또한 동일한 전단스팬비를 가지는 무보강 및 Aramid FRP 보강 실험체를 비교 한 결과, Aramid FRP 보강 실험체의 최종변위가 무보강 실험체의 최종변위보다 큰 것을 확인하였다. 그림 2.62는 실험결과를 정리한 표이고, 그림 2.63은 각 실험체의 하중-변위 그래프이다.

Specimen	F_{yield} (kN)	V_{CFT} (kN)	Yeid Ratio	Stiffness (kN/mm)	Yield Disp. (㎜)	End Disp. (㎜)	Disp. Ductility Ratio
C1V1	1327.9	2,927.8	2.2	644.5	1.6	20.7	12.9
C1V2	1739.6	2,688.5	1.5	504.9	3.5	18.2	5.2
C1V3	1876.3	2,479.0	1.3	500.25	4.4	14.9	3.4
C1V4	1344.3	2779.9	2.1	425.5	2.5	18.9	7.6
C2V1	1997.4	3,024.4	1.5	608.5	3.5	15.4	4.4
C2V2	2177.3	2,986.7	1.34	637.9	3.7	14.0	3.8
C2V3	2209.2	2,763.6	1.25	638.9	3.8	10.8	2.8
C2V4	1307.1	3027.4	2.31	463.637	2.6	16.1	6.3
C3V1	2198.8	3,954.0	1.79	856.5	2.5	13.5	5.4
C3V2	2619.4	3,726.7	1.4	843.6	3.4	9.2	2.7
C3V3	2779.2	3,380.4	1.21	751.5	4.3	8.1	1.9
C3V4	1372.5	3638.2	2.7	704.5	1.6	24.4	15.3

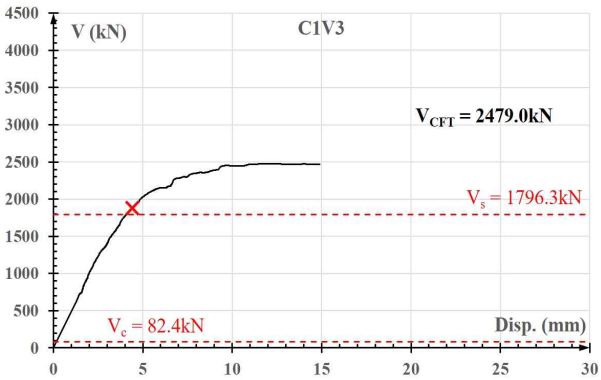
그림 2.62 용접조립각형 CFT기둥 실험체 실험 결과



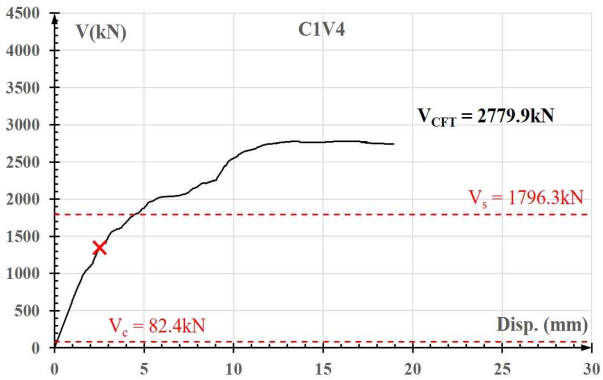
(a) C1V1 하중-변위 그래프



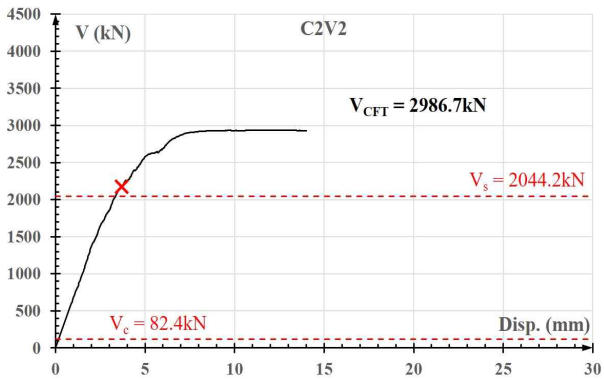
(b) C1V2 하중-변위 그래프



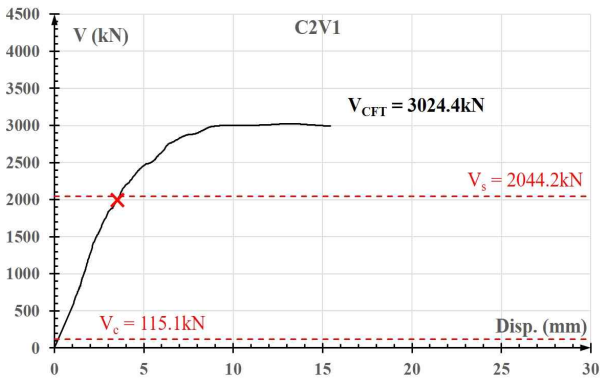
(c) C1V3 하중-변위 그래프



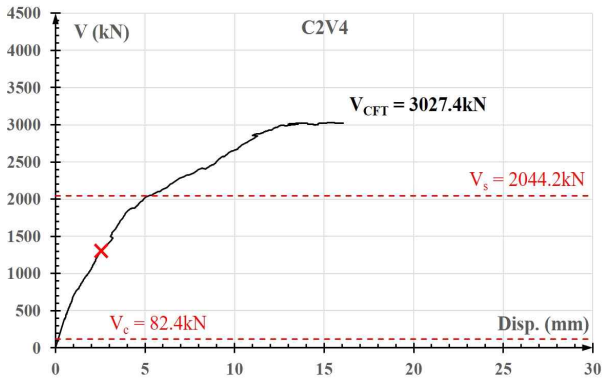
(d) C1V4 하중-변위 그래프



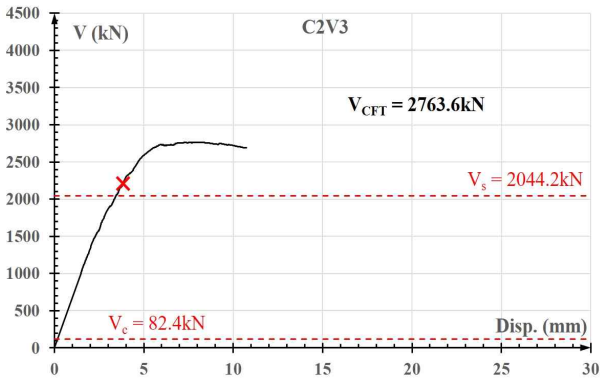
(e) C2V1 하중-변위 그래프



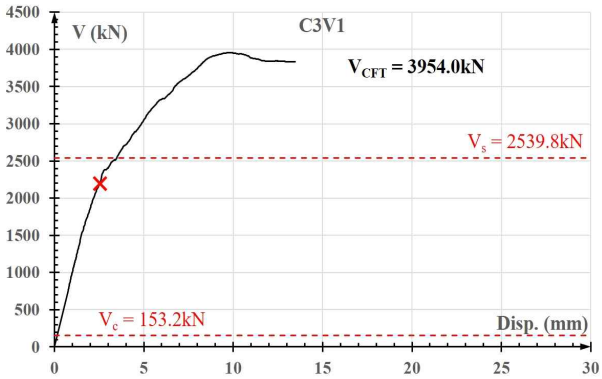
(f) C2V2 하중-변위 그래프



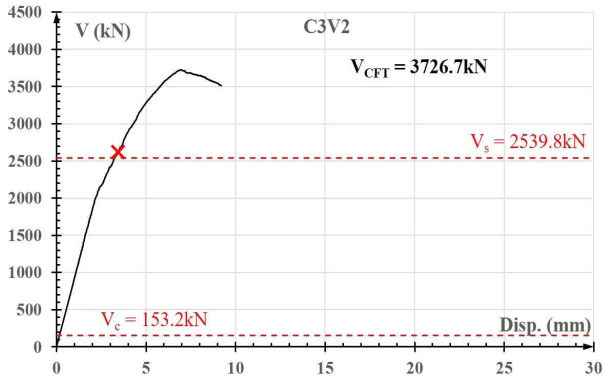
(g) C2V3 하중-변위 그래프



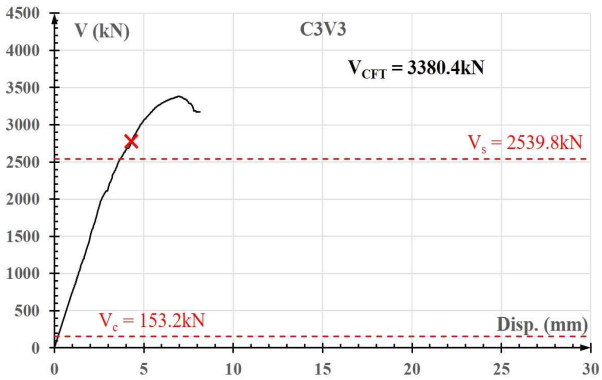
(h) C2V4 하중-변위 그래프



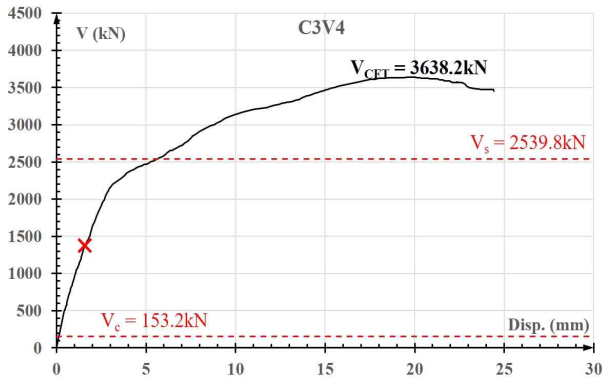
(i) C3V1 하중-변위 그래프



(j) C3V2 하중-변위 그래프



(k) C3V3 하중-변위 그래프



(l) C3V4 하중-변위 그래프

그림 2.63 용접조립각형 CFT기둥 실험체 하중-변위 그래프

실험결과를 토대로 각 실험체들의 최대내력을 항복내력으로 나눈 항복비와 최대변위를 항복변위로 나눈 변위연성비를 비교하였다. 분석결과 전단스팬비가 높아질수록, 즉 지점과 가력점의 거리가 클수록 항복비와 변위연성비가 낮음을 확인하였다. 또한 같은 전단스팬비를 가지는 **Aramid FRP 보강 및 무보강 실험체의 항복비와 변위연성비를 비교**한 결과 항복비는 폭 300㎜ 실험체는 1.4배, 폭 350㎜실험체는 1.7배, 폭 450㎜ 실험체는 1.9배 증가하였고, 변위연성비의 경우 폭 300㎜ 실험체가 1.5배, 폭 350㎜실험체는 1.7배, 폭 450㎜ 실험체는 5.7배 증가한 것을 확인하였다. 그림 2.64는 실험체 별 항복비를 비교한 그래프이고, 그림 2.65는 실험체 별 변위연성비를 비교한 그래프이다.

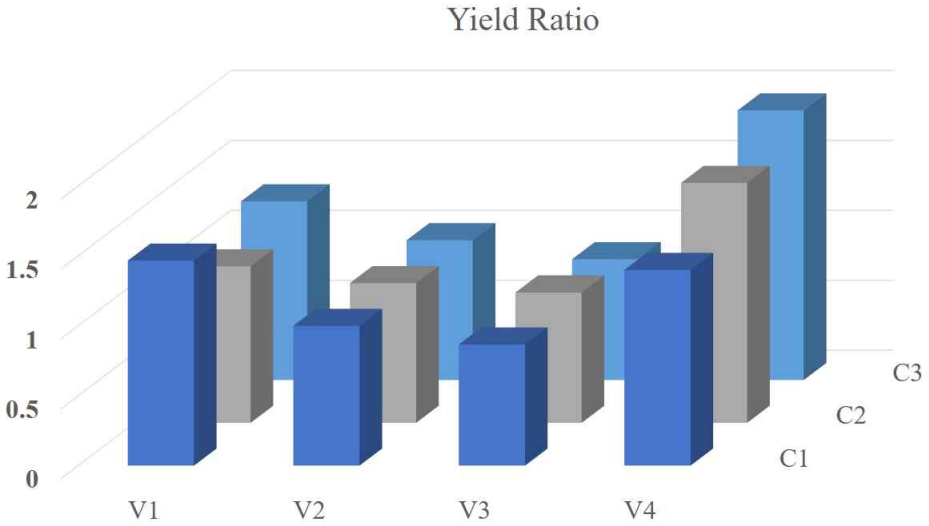


그림 2.64 용접조립각형 CFT기둥 실험체별 항복비 비교 그래프

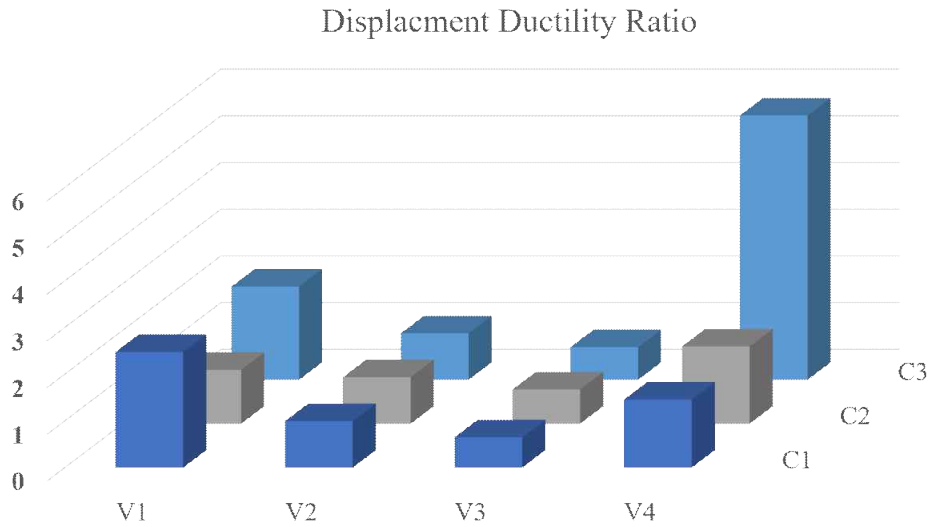


그림 2.65 용접조립각형 CFT기둥 실험체별 변위연성비 비교 그래프

따라서 성능 개선된 Aramid FRP를 CFT기둥에 보강한 결과, **지진하중이 발생될 때** 기둥의 전단성능을 유지하며 항복비와 변위연성비 등이 증가하여 **연성능력이 증가함을 확인**하였다. 또한 이는 **강관의 판폭두께비가 낮을수록 효과가 큰 것**으로 판단된다.

②정밀한 유한요소해석을 통한 최적의 설계 파라미터 도출

현재 한국건축구조설계기준(KBC)에서 CFT기둥의 전단내력은 CFT기둥의 강관 또는 콘크리트의 내력 중 큰 값으로 정한다. CFT기둥의 강관 전단내력 및 콘크리트 전단내력 산정식은 다음과 같다.

$$V_c = 0.11\lambda\sqrt{f'_c}A_c \qquad \text{식 2.11}$$

V_c = 콘크리트의 전단내력
f'_c = 콘크리트의 압축강도 (㎫)
A_c = 콘크리트 단면적 (㎟)

$$V_s = 0.6F_yA_wC_{v2} \qquad \text{식 2.12}$$

V_s = 강관의 전단내력
F_y = 강관의 항복강도 (㎫)
A_w = 강관 웨브 단면적 (㎟)
C_{v2} = 웨브전단좌굴강도계수, 1

식 2.11의 콘크리트 전단내력식의 경우 ACI 코드 내 콘크리트의 전단내력식과 동일하며, 식 2.12 강관 전단내력식의 경우 AISC 코드 내 강관의 전단내력식과 동일하다. 식 2.12의 경우 Box형 강관의 플랜지의 면적이 강관의 전단내력에 영향을 주는 것으로 제시하고 있다.

따라서 일반적인 리브 또는 스티프너가 존재하지 않는 CFT기둥의 경우 강관의 웨브의 면적을 이용하여 전단내력을 산정할 수 있다. 하지만 성능 개선된 Aramid FRP를 사용하여 보강한 용접조립각형 CFT기둥의 경우 일반적인 CFT기둥과 다르게 네 변에 리브가 존재하고 있다. 따라서 Aramid FRP의 보강효과에 대한 역학적 메커니즘을 정확하게 파악하고, 설계파라미터를 도출하기 위해서는 용접조립각형 CFT기둥의 리브가 전단내력에 어떤 영향을 미치는지 파악해야 한다. 따라서 유한요소해석을 통하여 성능보강한 Aramid FRP를 보강한 용접조립각형 CFT기둥 부재

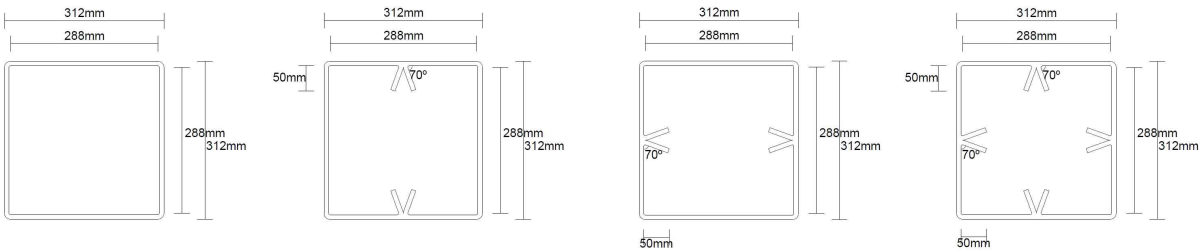
에서 리브의 역학적 메커니즘을 파악하고 새로운 설계식을 제안하고자 한다.

유한요소해석 모델 리스트는 그림 2.66과 같다. 성능 개선된 Aramid FRP를 보강한 용접조립각형 CFT의 전단내력에 리브가 미치는 영향을 분석하기 위하여 각 변의 리브의 존재여부를 변수로 총 4개의 유한요소해석 모델을 제작하였다.

Model	Parameter	Rib Existence	Rib Location
CFT-rib-0	Existence and Location of Rib	X	-
CFT-rib-1		O	Flange
CFT-rib-2		O	Web
CFT-rib-3		O	Flange & Web

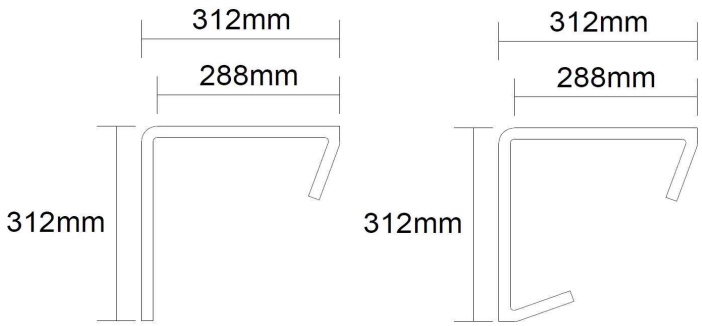
그림 2.66 용접조립각형 CFT기둥 해석모델 리스트

강관 단면은 그림 2.67과 같다. 리브가 존재하지 않는 CFT-rib-0 모델의 경우 도면과 같은 강관 부재를 하나로 만들었고, 리브가 플랜지 또는 웨브가 존재하는 CFT-rib-1, CFT-rib-2 모델의 경우 그림 2.68과 같이 리브가 한쪽만 존재하는 강관 단면 1/4 instance를 4개 만들어 접하는 면을 Tie로 Contact 했다. 모든 강관 부재 길이는 900㎜로 하였고, 지지부재는 지름 20㎜ 길이 350㎜, 가력부재는 너비 350㎜, 길이 480㎜, 높이 200㎜이다.



(a) CFT-rib-0 단면 (b) CFT-rib-1 단면 (c) CFT-rib-2 단면 (d) CFT-rib-3 단면

그림 2.67 CFT-rib 모델 단면도



(a) CFT-rib-1,2 1/4 단면 (b) CFT-rib-3 1/4 단면

그림 2.68 CFT-rib 1/4 모델 단면도

유한요소해석을 모델의 전체 형상은 그림 2.69과 같다. 모델은 강관, 지지부재, 가력부재로 구성하였으며, 모든 부재는 solid element로 모델링하였다. Mesh 크기는 강관의 경우 둘레 방향 12㎜, 길이 방향 5㎜로 하고, 지지부재의 경우 원기둥을 5등분하고, 길이방향으로 seed의 수가 10개가 되도록 하였다. 가력부재의 경우 각 변의 seed가 12개가 되도록 Mesh를 제작하였다. Mesh Type은 모든 부재를 C3D8R 타입으로 지정하였다.

비탄성 재료모델을 사용하여 재료 실험값을 토대로 강재의 물성치를 적용하였다. 인장 시편 시험결과는 성능 개선된 Aramid FRP 보강 CFT 기둥의 전단성능 향상에 대한 실험적 연구의 인장 시편 시험결과인 그림 2.59와 동일한 항복강도와 항복변형률을 입력하였고, 이 때 강재의 strain-hardening은 고려하지 않았다. 해석 모델에 사용된 강재의 물성치는 다음 그림 2.70과 같다.

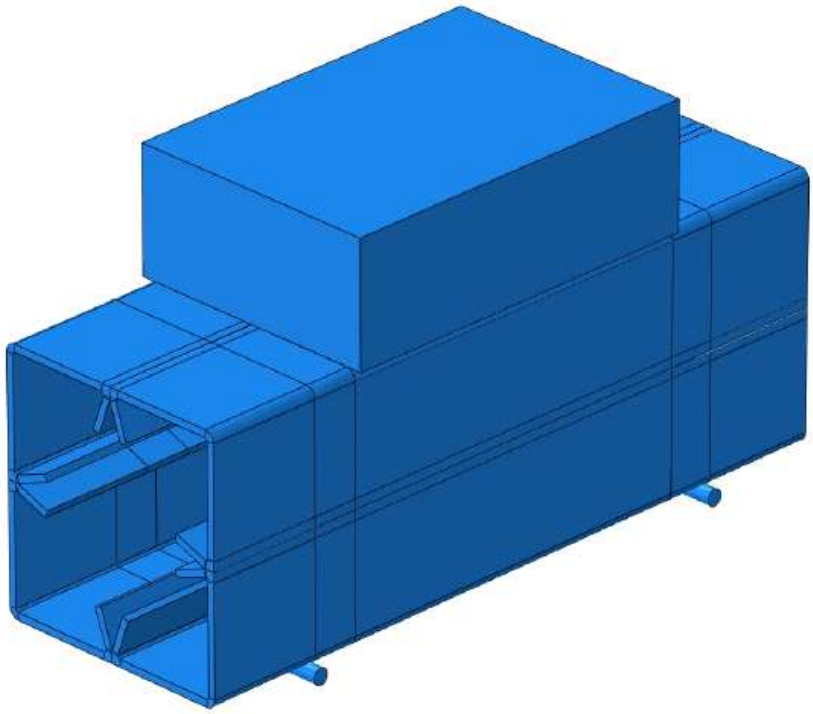
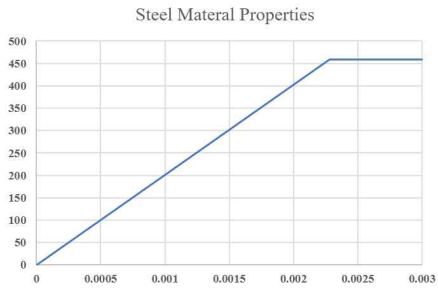


그림 2.69 유한요소해석 모델(CFT-Rib-3)

Material	Elastic Modulas (㎫)	Poisson Ratio	Yield Stress (㎫)	Elastic Deformation Ratio
Steel	201,308	0.3	458.9	0.003

(a) Abaqus 해석 시 입력한 강재 물성치



(b) Abaqus 입력 강재 강도-변형률 그래프

그림 2.70 유한요소해석 모델 입력 강재 물성치

경계조건은 실제 실험과 같이 비슷한 조건을 위해 지지부재 위에 강관을 위치시키고, 강관 위에 가력부재를 위치시켰다. 지지부는 x,y,z 방향의 이동구속을 통해 롤러를 구현하였다. 또한 가력 시 강관의 면외 좌굴 발생 시 전단내력을 산정하기 어렵기 때문에 강관의 웨브 부분을 x,y 방향의 이동구속을 하였다. 가력부재 상단을 z축 방향으로 40㎜ 이동하도록 변위제어를 통한 하중을 작용하였다. 강관 지지부재와 가력부재의 거리는 60㎜로, 전단스팬비는 0.2이다.

동일한 전단스팬비로 가력한 용접조립각형 CFT기둥 강관만의 전단해석 모델 CFT-rib-3과 콘크리트를 충전한 용접조립각형 CFT기둥 전단실험체인 C1V1의 하중-변위그래프를 비교하여 그림 2.71에 나타내었다. 해석 모델의 전단내력은 가력부재 node들의 하중의 합을 구하고, 이를 1/2로 하여 산정하였다. 실험 및 해석 결과 모두 강관의 전단강도인 1796.3kN보다 전단내력이 높고 실험결과와 해석결과의 초기강성이 비슷한 것을 확인하였다.

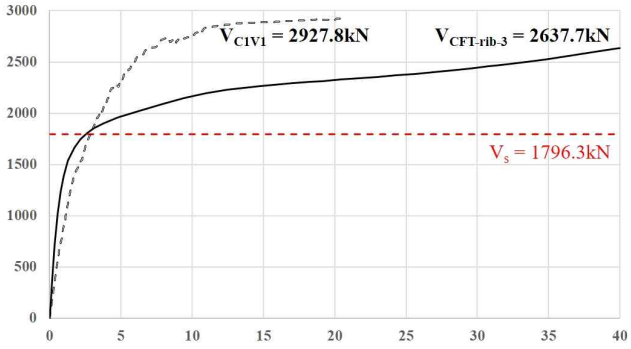
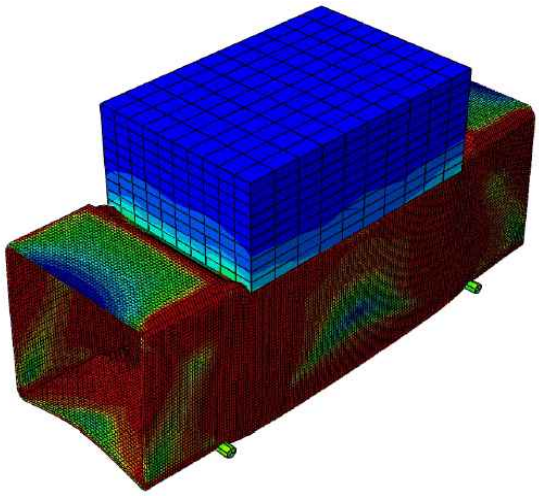
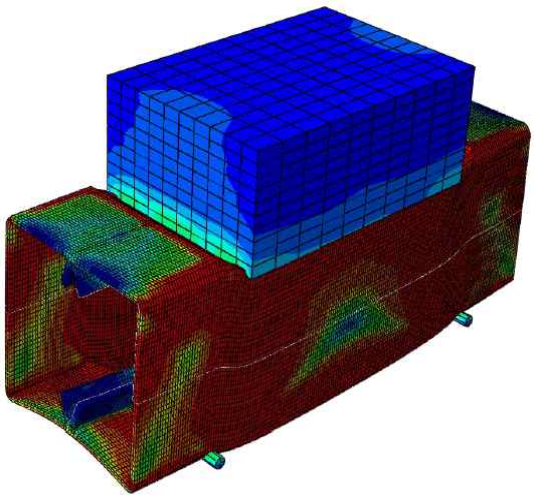


그림 2.71 실험결과 및 해석결과 하중-변위 그래프 비교

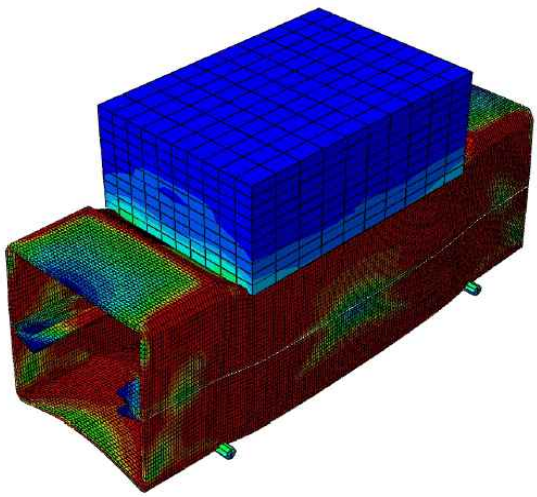
하지만 해석모델의 강성저하시점이 실험결과보다 빠르며, 최종 전단내력 역시 실험값이 해석값보다 큰데, 이는 이론상 실험체와 해석모델의 전단내력은 강관만의 전단내력으로 같지만, 실험체에는 콘크리트가 충전되어 있어 콘크리트가 발휘하는 전단내력의 영향과 함께 실제 실험체는 strain-hardening 효과가 존재하지만 해석 모델에는 이를 고려하지 않았기 때문에 발생하는 차이로 해석된다. 따라서 CFT-rib-3 해석모델의 결과 값이 타당한 것으로 판단하고, 이를 토대로 리브의 영향을 변수로 한 CFT-rib-0, CFT-rib-1, CFT-rib-2 모델의 해석을 진행하였다. 그림 2.72은 네 해석모델의 해석 결과 사진이며, 그림 2.73는 각 해석모델의 하중-변위 그래프이다.



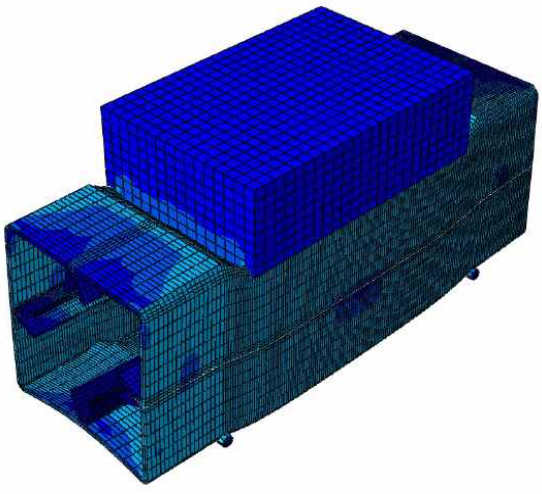
(a) CFT-rib-0 해석결과



(b) CFT-rib-1 해석결과

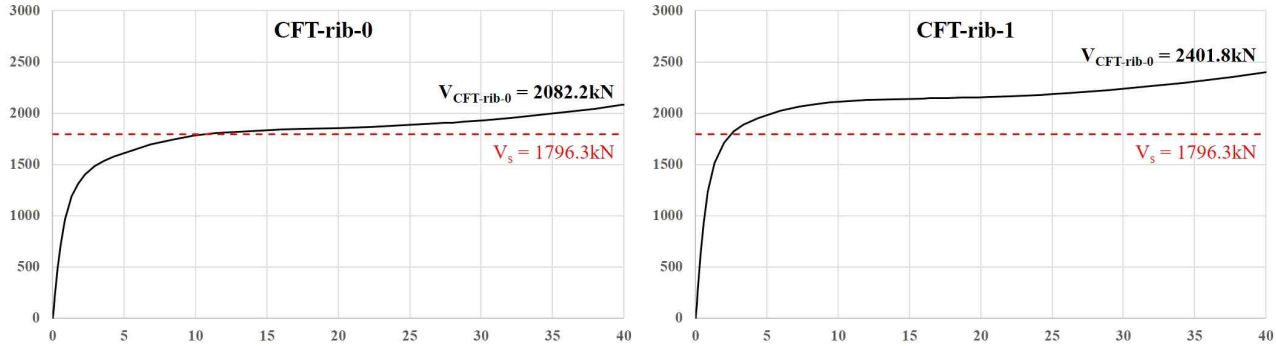


(c) CFT-rib-2 해석결과

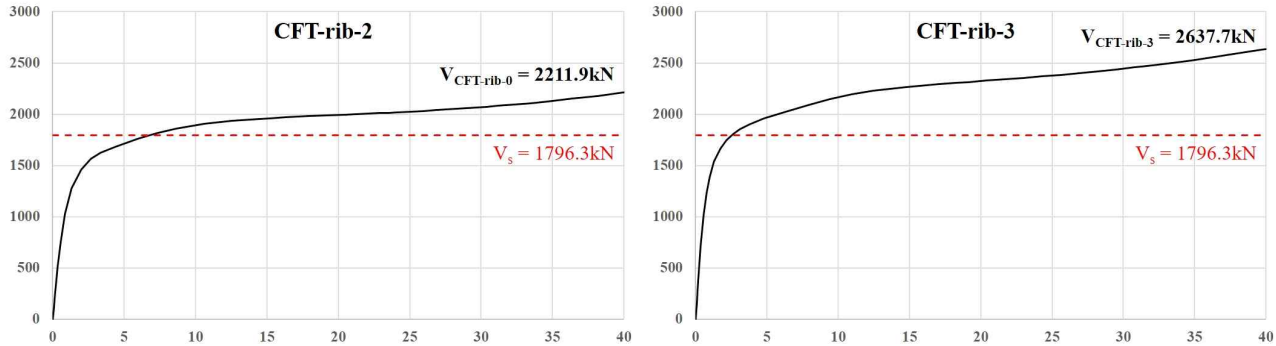


(d) CFT-rib-3 해석결과

그림 2.72 CFT-rib 모델의 해석결과



(a) CFT-rib-0 하중-변위 그래프 (b) CFT-rib-1 하중-변위 그래프



(c) CFT-rib-2 하중-변위 그래프 (d) CFT-rib-3 하중-변위 그래프

그림 2.73 CFT-rib 모델 하중-변위 그래프

리브 유무 및 위치를 변수로 한 CFT-rib-0/CFT-rib-1/CFT-rib-2/CFT-rib-3 네 개 모델의 해석결과를 분석한 결과 리브의 유무와 상관없이 네 해석모델 모두 전단내력이 AISC 기준 강관 전단내력식보다 큰 것을 확인하였다. 또한 플랜지 및 웨브에 리브가 모두 존재하는 용접조립각형 CFT기둥과 동일한 형상의 CFT-rib-3 모델의 전단내력이 2637.7kN으로 가장 크게 해석되었다. 나머지 모델의 전단내력은 리브가 플랜지에 위치한 CFT-rib-1 모델이 2401.8kN, 리브가 웨브에 위치한 CFT-rib-2 모델이 2211.9kN, 마지막으로 리브가 없는 CFT-rib-0 모델이 2082.2kN으로 해석되었다. 해석결과를 분석한 결과 리브가 강관의 전단내력에 영향을 주는 것으로 확인되었고, 또한 리브의 위치가 플랜지에 존재하는 것이 웨브에 존재하는 것 보다 영향이 큰 것을 확인하였다.

따라서 성능 개선된 Aramid FRP를 보강한 용접조립각형 CFT기둥의 전단내력 산정 시, 기존의 KBC 및 AISC 전단내력식을 차용할 경우 웨브의 면적만 고려하게 되는데, 이 경우 정확한 구조부재의 전단내력을 파악할 수 없다. 따라서 성능 개선된 FRP를 보강한 용접조립각형 CFT기둥의 유효 전단내력 산정을 위한 리브 면적을 고려하는 새로운 전단내력식인 식 2.13를 제안한다.

$$V_s = 0.6F_yA_{eff}C_{v2} \quad \text{식 2.13}$$

V_s = 강관의 전단내력

F_y = 강관의 항복강도 (㎫)

A_{eff} = 강관 웨브 면적과 모든 리브 면적을 더한 유효 단면적 (㎟)

C_{v2} = 웨브전단좌굴강도계수, 1

$$A_{eff} = A_{web} + 1.4A_{rib,web} + 0.5A_{rib,flange} \quad \text{식 2.14}$$

A_{web} = 강관 웨브의 순단면적 (㎟)

$A_{rib,web}$ = 강관 웨브에 위치한 리브의 면적 (㎟)

$A_{rib,flange}$ = 강관 플랜지에 위치한 리브의 면적 (㎟)

제안된 식 2.13을 이용하여 동일한 단면을 가지는 Aramid FRP를 보강한 용접조립각형 CFT기둥의 전단 실험의 C1V1 실험체와 유한요소해석 모델인 CFT-rib-3 모델의 전단내력을 계산한 후, 기존 설계식과 실험, 해석결과와 비교하여 오차율을 계산하였다. 계산 결과 및 오차율을 그림 2.74에 정리하였다.

	Results (kN)	Calculated (kN)		Error factor (%)
C1V1	2927.8	V_{KBC}	1796.3	63.0
		$V_{propose}$	2505.5	16.9%
CFT-rib-3	2637.7	V_{KBC}	1796.3	46.8%
		$V_{propose}$	2505.5	5.3%

그림 2.74 표준화재곡선 및 외부화재곡선 비교

기존 한국건축구조설계기준(KBC)에서 제안한 CFT기둥의 강관 전단내력 설계식과 실험결과는 약 63%, 해석결과는 약 46.8%의 차이가 발생하였다. 하지만 본 연구에서 제안한 용접조립각형 CFT기둥의 전단내력 설계식으로 계산한 결과값은 실험체와 약 17%, 해석 모델과 약 5.3% 오차율이 발생해 기존 CFT기둥의 강관 전단내력 설계식보다 부합함을 확인할 수 있었다. 따라서 Aramid FRP를 보강한 용접조립각형 CFT기둥의 **리브가 전단내력에 영향을 미치는 설계 파라미터**임을 확인하였다.

③실험을 위한 실험체 제작 및 내화 실험을 통한 화재피해 저감 효과와 내화 성능 검증

재료의 연소특성을 확인하는 난연, 준불연, 불연실험과 달리 내화실험은 가열로에서 장시간 동안 이루어진다. 본 연구에서는 내화특성을 확인하기 위해 그림 2.75와 같이 두 가지 화재곡선(표준화재곡선, 외부화재곡선)에 대해 내화실험을 수행하였다. 표준화재곡선은 현재 구조부재의 내화성능을 확인하기 위해 사용되는 방법으로 구획내에서 화재가 발생하는 경우 플래쉬오버로 인한 영향을 고려하여 1시간, 2시간, 3시간으로 구분하고 있으며, 그 때의 온도는 각각 945℃, 1049℃, 1110℃에 도달하게 된다. 이와 달리 외부화재곡선은 구획 외부에서 화재로 인한 영향을 고려하여 평가하는 방법으로 일정 시간 도달 후 680℃를 유지하게 된다. 국내에서는 아직까지 외부화재곡선을 이용한 실험결과는 전무한 상태로 도시형 생활주택의 저층에서 많이 사용되는 필로티 기둥과 같은 경우 구획내부에 위치하지 않아 플래쉬오버에 도달하지 않으므로 이에 대한 영향을 살펴보았다. 식 2.15는 표준화재조건의 화재 시 온도 계산식이며, 식 2.16은 외부화재조건의 화재 시 온도 계산식이다.

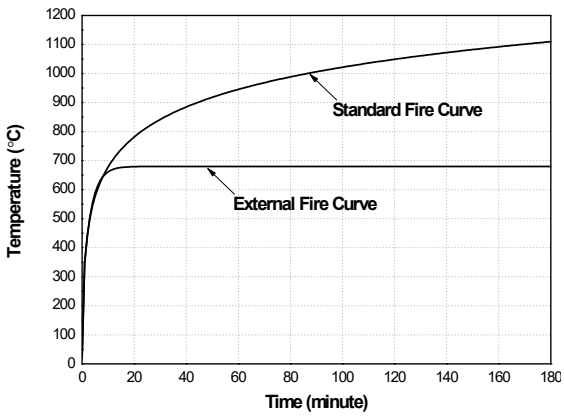


그림 2.75 표준화재곡선 및 외부화재곡선 비교

$$T_{standard} = 20 + 345\log_{10}(t+1) \quad \text{식 2.15}$$

$T_{standard}$ = 표준화재조건의 화재온도(℃)
t = 시간(min)

$$T_{external} = 660(1 - 0.687e^{-0.32t} - 0.313^{-3.8t}) + 20 \quad \text{식 2.16}$$

$T_{external}$ = 외부화재조건의 화재온도(℃)
t = 시간(min)

또한, 기둥의 내화성능은 재하 내화실험과 비재하 내화실험으로 구분할 수 있다. 그림 2.76과 같이 재하 내화실험은 기둥의 축방향 변위 및 축방향 변형률을 통해 내화성능을 결정한다. 반면에 비재하 내화실험은 기둥의 온도를 측정해서 내화성능을 결정하는 방법으로 철근콘크리트 기둥의 경우 주근의 평균온도는 538℃, 최고온도는 649℃를 초과하지 않는 것을 기준으로 하고 있다. 본 연구에서는 비재하 내화실험을 통해 내화성능을 확인하였다.

Criteria	
Loading	Unloading
Axial Deformation : $C=\frac{h}{100}(\text{mm})$ Rate of Axial Deformation : $\frac{dC}{dt}=\frac{3h}{1000}(\text{mm/min})$	Average ≤ 538℃ Maximum ≤ 649℃

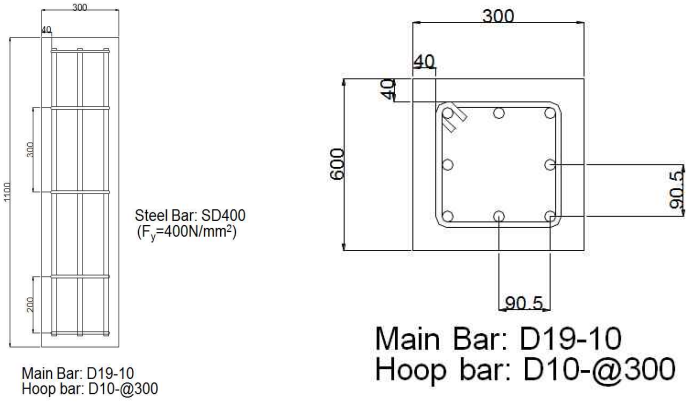
그림 2.76 재하 및 비재하 기둥의 내화성능 기준

본 연구에서는 두 가지 화재조건에 대한 내화실험을 위해 각각 6개의 실험체를 제작하였다. 실험체는 마감재를 포함하여 세라크울 보드를 적용하였으며 내화실험체 변수는 그림 2.77과 같다. 실험체명의 RC는 콘크리트 기둥 실험체, AFRP는 Aramid FRP를 사용한 보강, M은 몰탈 충전 유무, C는 시멘트보드, CB는 세라크울 보드를 사용한 실험체임을 표현한 것이다.

Specimnens	Column Size (mm2)	Thickness of aramid sheet (mm)	Thickness of mortar (mm)	Thickness of cement board (mm)	Thickness of cerakwool board (mm)
RC	300×300	-	-	-	-
RC-AFRP	300×300	0.299	-	-	-
RC-AFRP-M-6C	300×300	0.299	6	6	-
RC-AFRP-M-9C	300×300	0.299	9	9	-
RC-AFRP-M-9C-12.5CB	300×300	0.299	9	9	12.5
RC-AFRP-M-9CB-25CB	300×300	0.299	9	9	25

그림 2.77 내화성능 확인실험 실험체 리스트

내화실험에서 사용하는 철근콘크리트 기둥 실험체는 일반적인 도시형 생활주택에서 많이 사용될 수 있는 300mm×300mm 단면을 설정하였고, 주근 및 늑근은 D19, D10의 이형철근을 사용하였으며 배치는 그림 2.78과 같다. 실험에 사용한 철근 및 콘크리트의 재료 물성치는 그림 2.79과 같으며 Aramid FRP의 재료 물성치는 그림 2.79 및 2.80와 같다. 실험체 제작에서 철근의 피복두께는 KBC 2016에서 제시하고 있는 최소피복두께 기준에 따라 최외곽으로부터 40mm를 확보하였다.



(a) RC기둥 내화 실험체 배근 상세　　(b) RC기둥 내화 실험체 단면 상세

그림 2.78 RC기둥 내화성능 확인실험의 실험체 상세도

Yield Strength of Steel Bar (MPa)		Concrete fck (MPa)
D10	D19	44.05
450	478	

그림 2.79 RC기둥 내화성능 확인실험의 철근 및 콘크리트 물성치

Aramid	Elastic Modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)
Sheet	120000	2100

그림 2.80 RC기둥 내화성능 확인실험의 Aramid FRP 물성치

표면 마감재 상세에 따른 실험을 위해 사용한 시멘트 보드와 코너비드 및 세라크울 보드의 두께는 그림 2.77에 제시되어있으며 고정을 위해 지름 4.5mm와 길이 60mm 및 90mm의 칼블럭을 사용하였다. 그림 2.81은 실험체 표면 마감재 상세 도면이다.

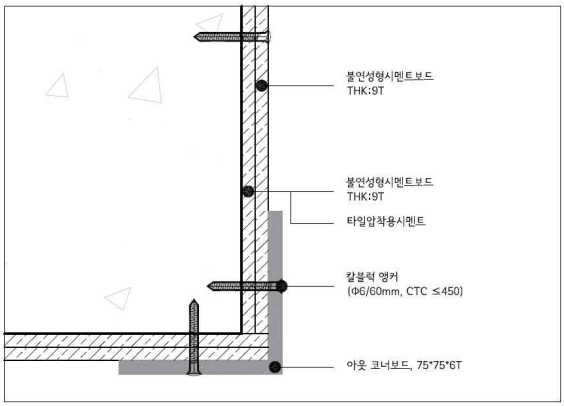
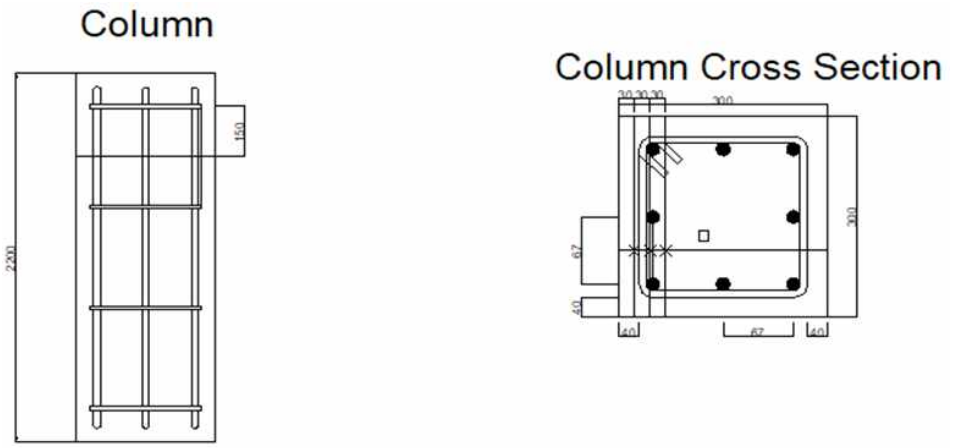


그림 2.81 표면 마감재 상세

실험체의 가열은 KS F 2257-1(2019)에서 규정하고 있는 표준화재곡선과 EN 1991-2(2002)에서 규정하고 있는 외부화재곡선에 따라 가열하였으며 가열 시간에 따른 실험체의 온도는 주근과 콘크리트에 각각 K-Type 열전대(Thermocouple, TC)를 설치하여 측정하였다.

철근열전대는 주근 중앙부(TC1), 모서리(TC2)에 설치하였고 콘크리트 열전대는 최외곽면으로부터 30(TC3), 60(TC4), 90(TC5)mm 지점에 Fig. 8과 같이 설치하여 피복 깊이에 따른 온도변화 양상을 확인하고자 하였다. 그림 2.82와 그림 2.83은 각각 열전대 설치 위치와 열전대 설치 위치 도면을 나타낸 그림이며, 그림 2.84는 실험체 수평 가열로에 설치 후 가열실험을 진행한 실험체 사진이다.

그림 2.82 열전대 설치 위치



(a) RC 기둥 실험체 설치 열전대의 상부 위치 (b) RC 기둥 실험체 설치 열전대의 단부 위치
그림 2.83 열전대 설치 위치 도면

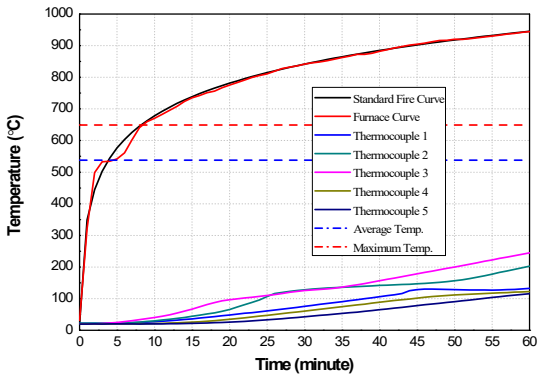


(a) 수평가열로 내 설치 후 가열 완료된 실험체(#1) (b) 수평가열로 내 설치 후 가열 완료된 실험체(#2)
그림 2.84 수평가열로 내에서 가열 실험 진행한 실험체 사진

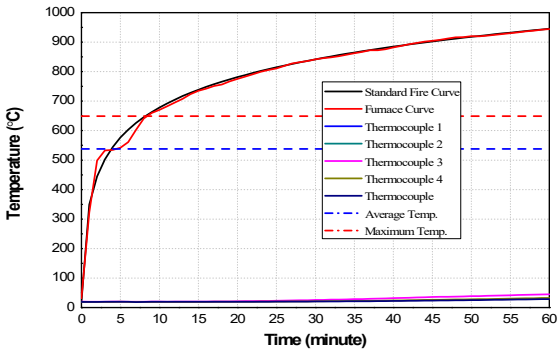
표준화재곡선과 외부화재곡선 하에서 가열 실험한 시험체의 온도이력은 각각 그림 2.85 및 2.86과 같다. 온도측정에서 표준화재곡선의 RC-AFRP 실험체의 주근 및 모서리 철근의 온도결과와 외부화재곡선의 RC-AFRP 실험체의 콘크리트 두께 30mm와 60mm 온도는 열전대의 이상으로 데이터를 얻지 못하여 제외하였다.

표준화재곡선에 노출된 실험체에서 순수한 철근콘크리트의 온도는 30mm 깊이 콘크리트, 모서리 주근, 중앙부 주근의 순서대로 온도가 높은 것으로 나타났으며, 30mm 깊이의 콘크리트는 60분 경과 후 244.6℃, 모서리 주근은 202.5℃, 중앙부 주근은 132.4℃의 온도에 도달했고, 나머지는 130℃ 이하를 기록하였다. 6mm와 9mm 두께의 시멘트 보드를 적용한 RC-AFRP-M-6C, RC-AFRP-M-9C 실험체에서는 30mm 깊이의 콘크리트에서 각각 온도가 91.5℃와 105.9℃까지 상승하였으나 나머지 부분의 열전대 온도는 100℃ 미만의 온도 상승을 나타내 크게 상당한 온도상승 지연 효과가 있음을 확인하였다. 또한, 12.5mm와 25mm의 세라크울 보드를 적용한 RC-AFRP-M-9C-12.5CB와 RC-AFRP-M-9CB-25CB 실험체에서는 모든 열전대 측정부에서 온도가 100℃ 미만으로 상당한 내화성능을 나타내는 것을

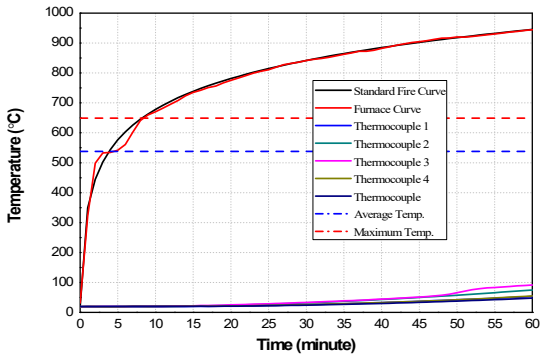
확인하였다.



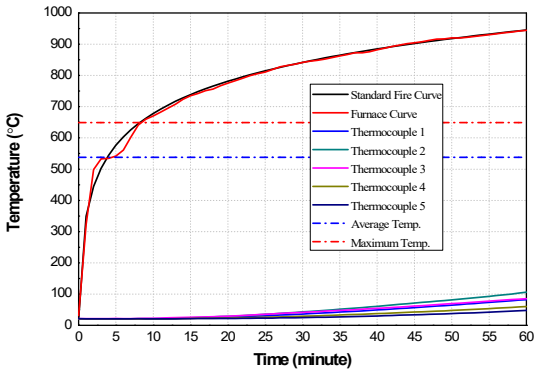
(a) RC



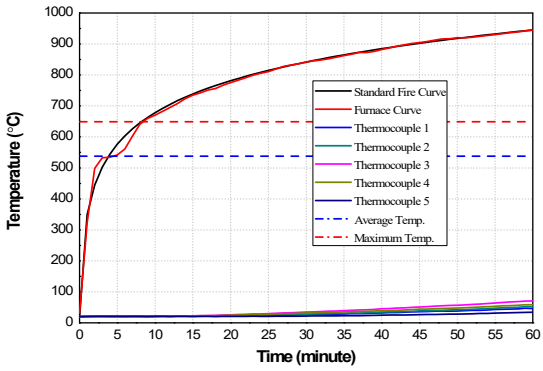
(b) RC-AFRP



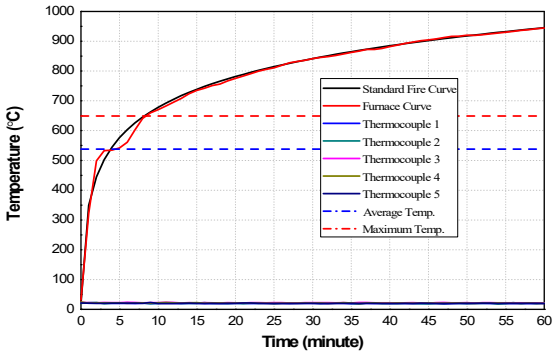
(c) RC-AFRP-M-6C



(d) RC-AFRP-M-9C



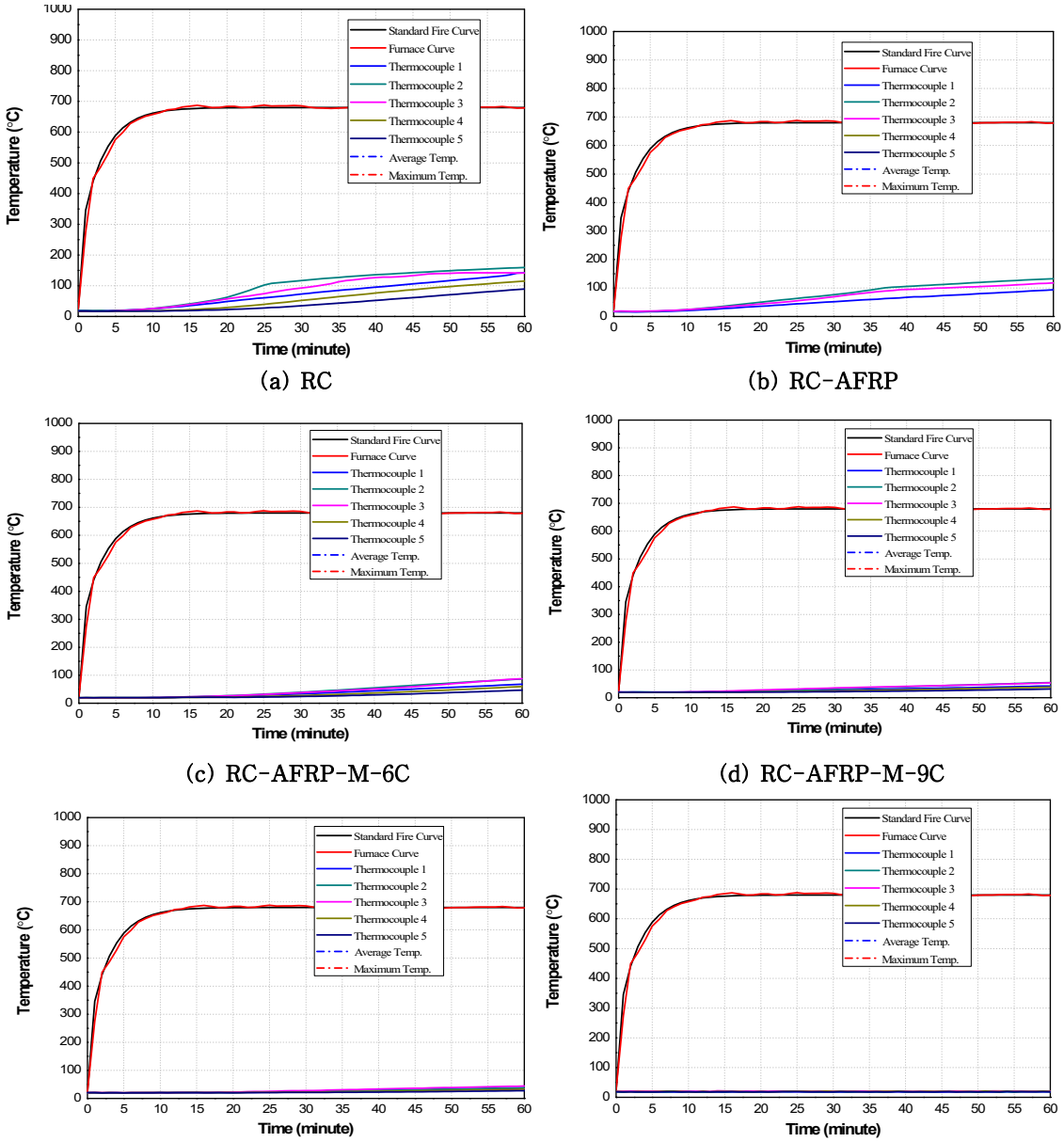
(e) RC-AFRP-M-9C-12.5CB



(f) RC-AFRP-M-9C-25CB

그림 2.85 표준화재조건로 가열한 각 RC 기둥 실험체의 온도-시간 그래프

외부화재곡선에 노출된 실험체에서는 표준화재실험과 달리 60분까지 최고 온도가 680℃로 각각의 열전대에서 온도 상승은 상당히 지연된 것을 확인할 수 있었다. 순수 철근콘크리트 실험체에서는 최고 온도가 159.5℃를 나타내어 60분 화재 노출 후에도 상당 부분이 화재에 건전한 것을 확인할 수 있었다. 또한, 나머지 실험체에 대해서도 시멘트 보드와 세라크울 보드의 영향으로 온도 상승은 100℃ 미만을 나타내었다.



(a) RC (b) RC-AFRP

(c) RC-AFRP-M-6C (d) RC-AFRP-M-9C

(e) RC-AFRP-M-9C-12.5CB (f) RC-AFRP-M-9C-25CB

그림 2.86 외부화재조건로 가열한 각 RC 기둥 실험체의 온도-시간 그래프

Fire Curves	Specimens	Maximum Temperature (℃)				
		TC1	TC2	TC3	TC4	TC5
Standard Fire	RC	132.4	202.5	244.6	122.5	115.5
	RC-AFRP	-	-	45.0	32.8	28.9
	RC-AFRP-M-6C	53.2	74.5	91.5	54.9	47.6
	RC-AFRP-M-9C	81.9	105.9	85.6	60.1	47.5
	RC-AFRP-M-9C-12.5CB	46.1	52.4	70.9	58.6	34.3
	RC-AFRP-M-9C-25CB	20.0	22.1	20.9	20.4	19.7
External Fire	RC	142.3	159.5	141.5	115.3	89.4
	RC-AFRP	93.6	132.6	117.7	-	-
	RC-AFRP-M-6C	67.9	86.4	87.7	59.4	46.7
	RC-AFRP-M-9C	42.3	54.7	53.2	38.4	31.3
	RC-AFRP-M-9C-12.5CB	34.6	38.7	44.1	33.0	27.7
	RC-AFRP-M-9C-25CB	18.5	19.2	20.8	19.4	18.5

그림 2.87 위치에 따른 1시간 경과 후 최고 온도

그림 2.87은 60분에 도달했을 때 표준화재와 외부화재 조건에서 측정된 각 열전대의 최고 온도를 나타낸다.

④열해석을 통한 성능 개선된 FRP 보강 시스템의 화재 시 거동 메커니즘과 최적의 설계 파라미터 도출

유한요소해석 프로그램인 SAFIR를 이용하여 열전달 해석을 수행하였다. 열전달은 열의 이동으로 전도, 대류, 복사의 형태로 전달되고, 물체 내부의 온도는 위치와 시간에 따라서 변하게 되므로 온도 분포를 위치와 시간에 따른 함수로 해석을 수행한다.

철근콘크리트 기둥은 부재 전 단면에 동일한 크기의 화재가 작용한다고 가정하여 4면이 모두 화재에 노출되는 것으로 가정하여 2차원 해석으로 단순화하였고, 열전달 해석의 열 방정식은 식 2.17과 같다.

$$k\nabla^2 T(x,y,t) + Q(x,y,t) = \rho c_p \frac{\partial T(x,y,t)}{\partial t} \quad \text{식 2.17}$$

k = 열전도율
T = 온도(℃)
Q = 내부 발생 열
ρ = 밀도
c_p = 비열
t = 시간(min)

전달 해석에 사용된 재료의 열적 특성을 나타내는 비열과 열전도율은 온도에 따른 함수로써 비선형 해석을 위해 사용된다. 본 연구에서 강재와 콘크리트의 열적 특성은 Eurocode 3 & 4 Part 1.2를 기본으로 설정하였다. 여기서 각 함수의 Θ는 강재와 콘크리트의 온도이다. 강재의 열전도율(λ_a, W/mK)은 열전달 해석에서 열적 특성을 나타내는 값으로 재료의 열전달 능력을 나타내는 척도이다. 강재의 열전도율은 콘크리트 보다 크기 때문에 동일한 화재에서 열전도율이 높은 강재가 먼저 내력을 잃게 된다. 식 2.18은 20°C에서 200°C사이일 때 강재의 열전도율이고, 식 2.19는 800°C에서 1200°C일 때 강재의 열전도율이다.

$$\lambda_a = 54 - 3.33 \times 10^{-2}\theta \quad \text{식 2.18}$$

$$\lambda_a = 27.3 \quad \text{식 2.19}$$

강재의 비열(c_a, J/kgK)은 물질 1g의 온도를 1℃ 올리는데 필요한 열량을 말한다. 강재의 비열은 콘크리트 비열보다 작고, 비열이 작은 강재의 온도 상승률이 콘크리트보다 더 크다. 식 2.20 은 20°C에서 600°C 사이에서의 비열에 대한 식이고, 식 2.21은 600°C에서 735°C 사이에서의 비열에 대한 식이며, 식 2.22는 735°C에서 900°C 사이, 식 2.23은 900°C에서 1200°C 사이에서의 비열에 대한 식이다.

$$c_a = 425 + 7.73 \times 10^{-1}\theta - 1.69 \times 10^{-3}\theta^2 + 2.22 \times 10^{-6}\theta \quad \text{식 2.20}$$

$$c_a = 666 - 13302/(\theta - 738) \quad \text{식 2.21}$$

$$c_a = 545 + 17820/(\theta - 731) \quad \text{식 2.22}$$

$$c_a = 650 \quad \text{식 2.23}$$

콘크리트의 열적 특성은 혼합형태에 따른 콘크리트의 종류와 콘크리트에 함유된 수분량에 따라 다

르다. 본 연구에서는 보통 콘크리트를 이용한다. 식 2.24는 20°C에서 1200°C 사이의 콘크리트 열전도율(W/mK), 식 2.25는 20°C에서 1200°C 사이의 콘크리트 비열(J/kgK)을 나타낸다.

$$\lambda_c = 2 - 0.24(\theta/120) + 0.012(\theta/120)^2 \qquad \text{식 2.18}$$

$$c_c = 900 + 80(\theta/120) - 4(\theta/120)^2 \qquad \text{식 2.19}$$

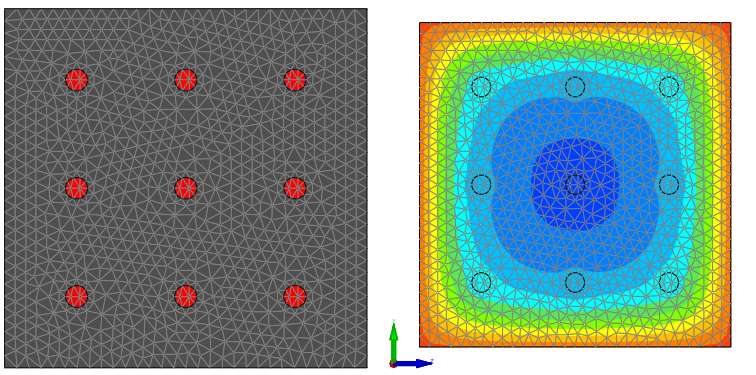
고온에서 열전달 값은 화재에 노출된 면과 노출되지 않은 면의 대류열전달 계수는 각각 25 W/m2K와 10 W/m2K를 적용하며, 복사 경계조건으로 강재의 방사율(ε)은 0.7, 콘크리트의 방사율(ε)은 0.8, 스테판-볼츠만 상수(σ)는 5.67×10-8W/m2K4로 적용한다.

무피복 철근콘크리트 기둥과 달리 피복된 철근콘크리트 기둥에 대한 수치해석적인 예측을 위해서는 고온에서 피복재료에 대한 정확한 물성이 필요하다. 그러나 국내에서는 내화피복 재료에 대한 고온특성은 알려져 있지 않으므로, 내화 피복된 철근콘크리트 기둥의 내화성능을 평가하기 위해서 해외에서 참고 가능한 내화피복 데이터를 참고하여 내화해석을 수행하였다. 그림 2.88은 고온에서 내화피복 재료의 값을 나타낸다.

온도 (°C)	밀도 (kg/㎥)	열전도율 (W/mK)	비열 (J/kgK)
20	240	0.042	797
50	240	0.072	868
100	240	0.093	712
200	240	0.088	924
300	240	0.106	1086
400	240	0.134	1149
500	240	0.169	1252
600	240	0.216	1293
800	240	0.275	1369
1000	240	0.369	1412
1200	240	0.407	1462

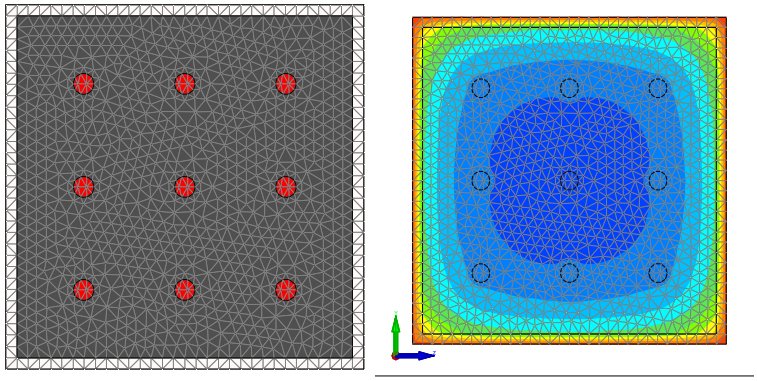
그림 2.88 내화피복 재료의 열 특성

철근콘크리트 기둥의 열전달 해석은 특수목적 유한요소해석 프로그램인 SAFIR를 이용하여 KS F 2257-1 표준화재 곡선에 대해 수행하였다. 열전달 해석은 2차원 해석을 가정하여, 삼각형의 요소를 이용해 메쉬를 생성하였으며, 철근콘크리트 기둥의 4면이 화재에 노출되어 있는 것으로 가정하였다. 그림 2.89는 무피복 단면에 대한 열해석 모델 및 결과를, 그림 2.90은 피복두께 10㎜ 단면에 대한 열해석 모델 및 결과를, 그림 2.91은 피복두께 20㎜ 단면에 대한 열해석 모델 및 결과를, 그림 2.92는 피복두께 30㎜단면에 대한 열해석 모델 및 결과를 나타낸다.



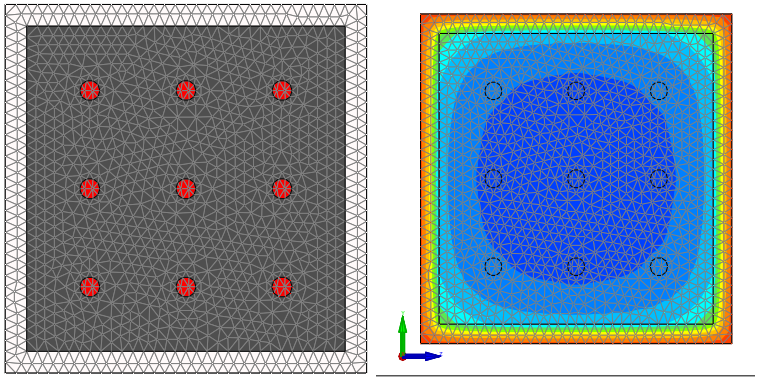
(a) 무피복 단면 열해석 모델 (b) 무피복 단면 열해석 결과

그림 2.89 무피복 단면에 대한 열해석 모델링 및 해석 결과



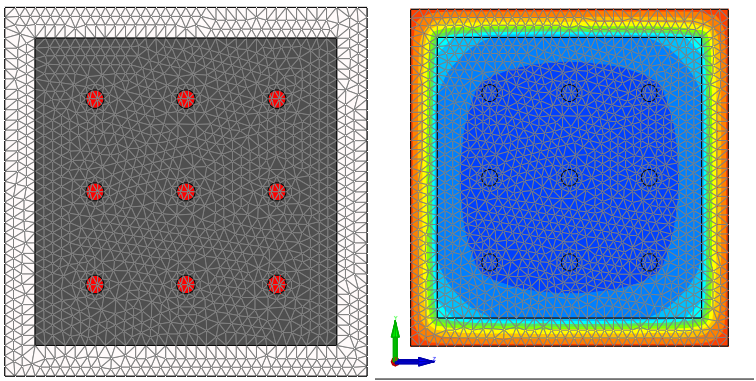
(a) 무피복 단면 열해석 모델 (b) 무피복 단면 열해석 결과

그림 2.90 피복 두께 10㎜ 단면에 대한 열해석 모델링 및 해석 결과



(a) 무피복 단면 열해석 모델 (b) 무피복 단면 열해석 결과

그림 2.91 피복 두께 20㎜ 단면에 대한 열해석 모델링 및 해석 결과



(a) 무피복 단면 열해석 모델 (b) 무피복 단면 열해석 결과

그림 2.92 피복 두께 30㎜ 단면에 대한 열해석 모델링 및 해석 결과

열해석 결과 내화피복이 존재할 경우 콘크리트 기둥 단면 내 온도가 크게 감소하였으며, 무피복 철근콘크리트 해석 모델의 경우 최외곽 철근의 온도가 크게 증가했지만, 피복 존재 시 최외곽 철근의 온도가 100℃ 내외로 크게 증가하지 않았다. 또한 피복두께 20㎜까지는 피복두께 증가 시 최외곽 철근 온도의 증가가 크게 감소하였지만, 피복두께 30㎜의 경우 큰 감소가 발생하지 않았다. 따라서 **내화피복의 두께**를 **설계 파라미터**로 설정하고, 20㎜ 내외로 이를 결정하였다. 철근 콘크리트 기둥 내의 충분한 내화피복 두께가 확보되고, 폭렬이 방지된다면 1시간의 내화성능을 가질 수 있지만 내화피복 재료의 고온특성은 국내에서 정확한 자료를 찾기 어려우므로 이에 대해서는 추가연구를 통해 좀 더 명확한 온도 예측이 필요할 것으로 판단한다.

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 연구개발 성과지표 및 목표

성과지표	성과 목표	최소 성과 목표
SCI(E)급 학술지 개제(2점)	1건	1건
일반학술지 게재 (1점)	4건	3건
특허출원 (1점)	4건	3건
디자인 등록(1점)		
소프트웨어(1점)		
하드웨어(1점)		
기타(1점)		
소계(점수)	10점	7점

핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준							양적 성과 건수
				질적성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치	
1	활용될 신소재의 물성치 특성 확인 및 거동 재현을 위한 해석적 재료 모델 완성	1-1	신소재(성능 개선된 FRP, 내화 피복 시스템) 특성 확인	①	재료 특성 확인	문헌 수집	문헌 수집	문헌 수집	전문가 검증	10	학술기사 : 2건 학술발표 : 2건
		1-2	신소재의 거동 재현을 위한 해석 모델 완성	②	신소재 해석 모델	해석 모델 완성	해석 모델 완성	모델 완성	전문가 검증	10	
2	성능 개선된 FRP 소재와 융합된 내진성능 확보 기술 개발 및 상세 설계 완성	2-1	성능개선된 FRP보강 시스템의 개념 정립	①	개념 정립	개념 정립 완성	개념 정립 완성	개념 도제시	전문가 검증	10	특허 : 출원 1 건
		2-2	성능개선된 FRP보강 시스템의 상세설계 완성	②	상세 설계도	상세 설계도 완성	상세 설계도 완성	설계 도제시	전문가 검증	10	
3	실험을 위한 실험체 제작 및 구조 실험을 통한 지진피해 저감 효과와 물리적 성능 검증	3-1	성능 개선된 FRP 보강 시스템의 실험체 제작	①	합성/RC 기둥 실험체	실험체 제작	실험체 제작	세금계산서	과제담당자 검토	20	논문 : 3 건 시제품 : 4 건 학술발표 : 4건
		3-2	재료 및 구조 실험 수행 및 결과 분석을 통한 성능 검증	②	구조 실험 결과	구조 실험 완성(재하/내화 실험)	구조 실험 완성(재하/내화 실험)	구조/내화 실험	자체검증	15	
4	정밀한 유한요소해석을 통한 최적의 설계 파라미터 도출	4-1	유한요소해석모델 제작 및 해석 수행	①	해석 모델	해석 모델 완성	해석 모델 완성	해석 모델 제시	자체검증	20	
		4-2	유한요소해석결과로 최적의 설계방식 도출	②	최적 설계 변수 도출	설계 지침 완성	설계 지침 완성	최적의 설계 지침 제시	자체검증	15	
5	성능 개선된 FRP 소재에 적합한 내화성능 확보 기술	5-1	성능 개선된 FRP 보강 시스템의 개념 정립	①	개념 정립	개념 정립 완성	개념 정립 완성	개념 도제시	전문가 검증	10	특허 : 출원 1 건
		5-2	성능 개선된 FRP 보강 시스템의	②	상세 설계	상세 설계	상세 설계	설계 도제	전문가 검증	10	

	개발 및 상세 설계 완성		상세설계 완성		도	도완성	도완성	시			
6	실험을 위한 실험체 제작 및 내화 실험을 통한 내화피해 저감 효과와 내화성능 검증	6-1	성능 개선된 FRP 보강 시스템의 실험체 제작	①	RC 기둥 내화 실험체	실험체제작	실험체제작	세금계산서	과제담당자 검토	20	특허 : 출원 2 건 논문 : 1 건 시제품 : 1 건
		6-2	재료 및 구조 실험 수행 및 결과 분석을 통한 성능 검증	②	내화 실험 결과	구조 실험 완성(재하/내화 실험)	구조 실험 완성(재하/내화 실험)	구조/내화 실험	자체검증	15	
7	열해석을 통한 성능 개선된 FRP 보강 시스템의 화재 시 거동 메커니즘과 최적의 설계 파라미터 도출	7-1	유한요소해석모델 제작 및 해석 수행	①	해석 모델	해석 모델 완성	해석 모델 완성	해석 모델 제시	자체검증	20	
		7-2	유한요소해석결과로 최적의 설계방식 도출	②	설계 지침(최적 설계 변수 도출)	설계 지침 완성	설계 지침 완성	최적의 설계 지침 제시	자체검증	15	
계											특허 : 출원 4 건 논문 : 4 건 시제품 : 5 건 학술기사 : 2건 학술발표 : 6건

나. 핵심 연구 성과별 설명 및 성과 달성

핵심성과 1		
정의	지진, 화재로부터 합성/RC 기둥을 보호할 수 있는 내진/내화성능 확보 기술을 갖는 성능 개선된 FRP와 내화피복 시스템을 위한 내화보드의 특성 확인 및 거동 재현을 위한 해석적 재료 모델을 완성한다.	
목적	시스템의 설계와 해석에 활용하는 신소재인 성능 개선된 FRP 소재의 물성치 특성을 자료조사 및 전문가 자문을 통해 파악하고 유한요소해석을 통하여 구조물의 보강 효과를 확인하는 모델을 개발한다.	
성능목표	(기존기술 수준) 해외에서는 FRP 보강과 내화도료제를 이용한 내진/내화보강 기술은 현재 실험적 성능 검증을 마무리한 상용화 단계에 있으나 국내에서는 본 연구 책임자를 포함한 일부 연구자에 의해 기초·원천 기술개발 단계에서의 연구만이 수행중이다. (개발기술 수준) 본 연구 과제를 수행하여 국내 건설 산업의 내진/내화분야에 새로운 소재를 발굴하고 실질적인 구조/내화성능 시스템에 도입하여 구조적 안전성과 내구성 등이 확보된 우수한 성능의 내진/내화성능 보강 시스템을 개발하고자 한다.	
성과달성 책임자 (소속기관)	최성모(서울시립대학교 건축학부)	
소요기간	'18.04 ~'18.06(3개월, 1년차)	
성과달성 확인방법	신소재 FRP와 내화 피복 시스템의 재료적 특성을 검증하고 유한요소해석과 수치해석에 활용되는 해석적 재료 모델을 완성한다.	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	0건
	논문	0건
	시제품	0건
	기타	학술기사 : 2건

		학술발표 : 2건

핵심성과 2		
정의	신소재 FRP와 융합된 내진 시스템을 개발하여 시스템의 개념과 거동특성을 파악하고 신소재 FRP와 융합된 내진시스템과 구성요소들에 대한 상세 설계를 완성한다.	
목적	지진 재해 피해저감을 위하여 필로티 구조물 기둥의 내력 증진과 연성능력 보강이 가능한 내진시스템 장치를 개발하고 실험체 제작을 위한 상세설계를 완성한다.	
성능목표	(기존기술 수준) 현재 기존 내진보강에 대한 연구는 비교적 활발히 수행중이나 성능 개선된 FRP를 활용한 내진/내화성능을 동시 만족하는 있는 기술개발은 현재 국내 도입 단계이다. (개발기술 수준) 본 연구를 수행하여 새로운 개념의 내진 보강시스템에 대한 개념을 정립 하고 상세설계를 완성하며 2차년도의 구조해석 및 유한요소해석수행을 위한 기초·원천 기술들을 개발한다.	
성과달성 책임자 (소속기관)	최성모(서울시립대학교 건축학부)	
소요기간	'18.06 ~'18.10(5개월, 1년차)	
성과달성 확인방법	새로운 소재의 FRP와 내진보강시스템의 역학적 메커니즘과 거동 원리 등의 개념을 정립하고 상세설계를 완성한다.	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 1건
	논문	0건
	시제품	0건
	기타	0건

핵심성과 3		
정의	재료·구조 실험을 위한 실험체를 제작하고 실험을 수행하여 지진피해 저감 효과 및 물리적 성능을 검증한다.	
목적	FRP를 활용한 내진보강 기술의 성능을 검증하고 내력과 연성능력의 증가 효과를 평가하기 위한 실험체를 제작하여 변위 제어 반복 하중을 가하는 구조 실험을 수행한다.	
성능목표	(기존기술 수준) 국내에서 FRP를 이용한 합성/RC 기둥의 내진보강에 대한 연구와 현장 적용은 일부 제한적이며 대부분의 연구는 해석적 방법 위주로 수행되고 있다. (개발기술 수준) 본 연구를 수행하여 재료 실험을 통한 성능 개선된 FRP의 재료적 물성치 데이터를 확보하고 내진보강 기술에 대한 구조 실험으로 실질적인 성능을 검증한다.	
성과달성 책임자 (소속기관)	최성모(서울시립대학교 건축학부)	
소요기간	'18.11 ~'19.07(9개월, 1~2년차)	
성과달성 확인방법	FRP 내진보강 기술을 적용한 실험체를 완성하고 내진피해 저감효과 및 물리적 성능검증을 위한 재료·구조 실험을 수행하여 도출된 결과를 분석한다.	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	0건
	논문	등재지 : 3건
	시제품	4건
	기타	학술발표 : 4건

핵심성과 4		
정의	유한요소 해석을 통한 시스템 요소의 역학적 메커니즘과 최적의 설계 파라미터를 도출한다.	
목적	실험을 통하여 도출된 최적화 시스템 형성을 바탕으로 다양한 설계 파라미터를 사용하여 유한요소 해석 모델을 제작하고 해석을 통한 거동을 재현하며 해석결과로 최적의 설계 방식을 도출한다.	
성능목표	(기존기술 수준) 성능 개선된 FRP의 정확한 거동 재현을 위한 3차원 정밀 유한요소해석 모델의 개발과 수행에 대한 연구는 현재 기초단계 수준에서 연구가 수행 중이다. (개발기술 수준) 본 연구를 수행하여 정확한 거동 예측이 가능한 정밀 유한요소 해석모델을 자체적으로 개발, 수행하여 실험을 통한 결과와 비교분석으로 성능을 검증한다.	
성과달성 책임자 (소속기관)	최성모(서울시립대학교 건축학부)	
소요기간	'19.08 ~'19.12(5개월, 2년차)	
성과달성 확인방법	3차원 정밀 유한요소 해석모델을 개발하고 시스템 성능의 신뢰성 향상을 위한 유한요소해석 결과를 도출하여 비교·분석을 수행한다.	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	0건
	논문	0건

	시제품	0건
	기타	0건

핵심성과 5		
정의	신소재와 융합된 내화도료재를 이용한 내화성능 확보 기술을 개발(시스템의 개념과 거동특성 정립)하고 신소재와 융합된 내화보강 기술과 구성요소들에 대한 상세 설계를 완성한다.	
목적	화재 피해저감을 위하여 필로티 구조물 기둥의 화재 손상방지와 신속 복구가 가능한 신 개념의 내화성능 확보 기술을 개발하고 실험체 제작을 위한 상세설계를 완성한다.	
성능목표	(기존기술 수준) 현재 기존 내화성능 보강에 대한 연구는 비교적 활발히 수행중이나 신소재를 활용한 내화성능 보강 기술 개발은 현재 국내에서 도입 단계이다. (개발기술 수준) 본 연구를 수행하여 새로운 개념의 내화성능 보강시스템에 대한 개념을 정립하고 상세 설계를 완성하며 2차년도의 열해석 및 유한요소해석수행을 위한 기초·원천 기술들을 개발한다.	
성과달성 책임자 (소속기관)	최성모(서울시립대학교 건축학부)	
소요기간	'18.06 ~'18.10(5개월, 1년차)	
성과달성 확인방법	신소재와 내화피복 시스템의 열적 메커니즘과 거동 원리 등의 개념을 정립하고 상세설계 도면을 완성한다.	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 1건
	논문	0건
	시제품	0건
	기타	0건

핵심성과 6		
정의	내화 실험을 위한 실험체를 제작하고 2차년도에 실험을 수행하여 화재 발생 시 우수한 피해 저감 효과 성능을 검증한다.	
목적	신소재를 활용한 내화성능 보강 기술의 성능을 검증하고 내구성과 에너지 저항성을 평가하기 위한 실험체를 제작하여 화재 온도를 제어한 내화 실험을 수행한다.	
성능목표	(기존기술 수준) 국내에서 내화도료재를 이용한 합성/RC 기둥의 내화성능 보강에 대한 연구는 제한적이며, 대부분의 연구는 실험적 방법 위주로 수행되고 있다. (개발기술 수준) 본 연구를 수행하여 재료 실험을 통한 성능 개선된 FRP의 재료적 물성치 데이터를 확보하고 내화보강 기술에 대한 가열 실험으로 실질적인 성능을 검증한다.	
성과달성 책임자 (소속기관)	최성모(서울시립대학교 건축학부)	
소요기간	'18.11 ~'19.07(9개월, 1~2년차)	
성과달성 확인방법	스마트 FRP와 내화도료재를 활용한 내화보강 기술의 시험체를 완성하고 실질적 성능검증을 위한 내화성능 실험을 수행하여 도출된 결과를 분석한다.	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	0건
	논문	등재지 : 1건
	시제품	0건
	기타	0건

핵심성과 7	
정의	유한요소 해석을 통한 시스템 요소의 열적 메커니즘과 최적의 설계 파라미터를 도출한다.
목적	실험을 통하여 도출된 최적화 시스템 형성을 바탕으로 다양한 설계 파라미터를 사용하여 유한요소 해석 모델을 제작하고 해석을 통한 거동을 재현하며 해석결과로 최적의 설계 방식을 도출한다.
성능목표	(기존기술 수준) 성능 개선된 FRP와 내화피복시스템의 정확한 거동 재현을 위한 3차원 정밀 유한요소해석 모델의 개발, 수행에 대한 연구는 현재 기초단계수준에서 연구가 수행 중이다. (개발기술 수준) 본 연구를 수행하여 정확한 거동 예측이 가능한 정밀 유한요소 해석모델을 자체적으로 개발, 수행하여 실험을 통한 결과와 비교분석으로 성능을 검증한다.
성과달성 책임자 (소속기관)	최성모(서울시립대학교 건축학부)
소요기간	'19.08 ~'19.12(5개월, 2년차)
성과달성	3차원 정밀 유한요소 해석모델을 개발하고 시스템 성능의 신뢰성 향상을 위한 유한요소해석 결과를

확인방법	도출하여 비교·분석을 수행한다.	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	0건
	논문	0건
	시제품	0건
	기타	0건

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

가. 성과의 활용방안

본 연구 진행 후 기대할 수 있는 성과의 활용방안을 각 7개의 핵심성과별로 정리하였다.

최종성과물	활용방안
스마트 소재의 발굴 및 활용 (핵심1: 활용될 성능 개선된 FRP 소재의 물성치 특성 확인 및 거동 재현을 위한 해석적 재료 모델 완성)	· 국내 건설·토목 산업분야에서 기존 소재 대체가 가능한 스마트 FRP 소재를 활용 · 토목·건축 R&D 분야에 신소재 활용 등 다양한 융·복합 연구 지원 · 첨단 스마트 소재 제작 및 활용 시스템 기술의 민간기업 이전 가능 · 내진/내화성능을 동시에 만족시킬 수 있는 시스템 제작 · 건축물 기둥 보강을 통해 변위제어 시스템에 에너지 소산을 위한 핵심소재로 활용 · 화재에 대한 피해 저감을 위한 내화성능 확보 장치에 활용
성능 개선된 FRP 보강 시스템의 개발 (핵심2: 성능 개선된 FRP 소재와 융합된 내진/내화성능 확보 기술 개발 및 상세 설계 완성) (핵심 5: 성능 개선된 FRP 소재에 적합한 내화성능 확보 기술 개발 및 상세 설계 완성)	· 화재 발생 후 손쉽게 보수가 이루어져 시공성과 경제성을 확보할 수 있는 보수보강 시스템에 활용 · 건축물 하부 기둥에 발생하는 변위를 제어하는 섬유보강 공법에 활용 · 지진 등의 횡방향 하중으로 발생하는 모멘트에 의해 극한 변위가 발생하기 쉬운 기둥과 보 부위를 연결하는 접합 시스템에 활용 (내진성능 향상 스마트 접합 시스템)
시스템의 성능 검증을 위한 실험 (핵심3: 실험을 위한 실험체 제작 및 구조실험을 통한 지진/화재피해 저감 효과와 물리적 성능 검증) (핵심 6: 실험을 위한 실험체 제작 및 내화성능 실험을 통한 지진/화재피해 저감 효과와 물리적 성능 검증)	· 제작된 시스템에 반복하중/화재하중을 가하여 사용성과 내구성 검증 · 기둥 구조물의 내력 증대를 위한 효율성 · 에너지 소산 및 강도 향상 효과, 화재 저항성 검증
정밀한 유한요소 해석을 통한 설계 파라미터 도출 (핵심 4: 유한요소해석을 통한 시스템 부품의 역학적 메커니즘과 최적의 설계 파라미터 도출) (핵심 7: 유한요소해석을 통한 내화보강 기술의 열적 메커니즘과 최적의 설계 파라미터 도출)	· 사용자 정의 알고리듬을 사용하여 스마트 재료의 거동을 수치해석의 방법으로 재현하는데 활용 · 시스템을 장착한 프레임 구조물의 설계와 지진/화재 발생 시 거동을 예측하는데 활용(시스템이 구조물에 미치는 영향력을 손쉽게 파악함) · 합성 단면에 재료적 비선형 거동의 구현을 요구하는 정밀한 동적 프레임 해석에 활용 · 역학적/열적 메커니즘이 복잡한 부위에 FEM 해석을 통한 정확한 거동을 재현하고 해석결과를 분석하여 최적의 설계 파라미터를 도출하는데 활용

나. 연구개발의 기대효과

본 연구개발의 결과로 기대할 수 있는 효과를 아래 표에 정리하였다.

파급적 측면	기대 효과
기술적 측면	· 지진, 태풍 등 자연재해와 인류 생활에 의한 발생하는 화재에 대한 피해 저감 기술을 개발함 · 성능 개선된 FRP를 복합소재 구조체로 제작하여 내진보강재로 적용하였을 때 합성구조의 보강에서 활용가능하며, 연성 확보 측면에서 충분히 응용기술로 확장 가능함 · 건설 분야의 니즈를 만족하는 지속가능한 방재기술을 개발함 · 첨단소재를 활용한 건설기술의 융복합화를 달성함 · 지진/화재에 대한 비선형적인 거동 예측을 위한 시뮬레이션을 개발함 · 선진국 대비 기술수준이 상대적으로 낙후된 성능 개선된 FRP 보강 시스템에 대한 국내 기술력을 향상시킴
산업·경제적 측면	· 기존 소재의 한계를 극복하고 복원력과 에너지 소산 능력 및 내화성능을 향상시킨 성능 개선된 FRP 보강시스템의 기초·원천 기술을 개발함 · 시스템의 기술 개발부터 현장적용 및 성능평가까지 전주기적인 연구를 수행 · 재료 및 구조물의 비선형적 거동을 해적적인 방법으로 구현할 수 있는 정확한 시뮬레이션 모델을 개발 · 관련 분야가 연구개발 초기 단계이므로 국내·외 저명 학술지에 독창적인 저널 논문

	발표
교육적 측면	· 새로운 개념의 재해저감 기술에 대한 시스템 개발 및 구조물 설계에 대한 개념을 정립 · 본 연구가 포함하는 이론, 설계, 해석, 성능평가 등 다양한 분야에 석·박사급 연구원이 직접 참여하여 연구 역량 강화 등 교육적 효과를 얻음 · 민간 참여와 글로벌 교류로 인한 참여연구원의 관련 기술 실무형 인력 양성
인력양성 측면	· 선진 기술에 대한 전문 인력을 양성하여 국가 기술 경쟁력을 갖춘 우수한 인재 배출 · 기존의 한정된 건설 영역 뿐만 아니라 타 산업과의 기술 융복합화로 새로운 건설기술에 특화된 기술 인력 배출 · 세계 시장에서 비전이 있고 선도할 수 있는 주제로 연구개발함으로써 이공학계열에 대한 관심 유발

다. 추후 연구를 통한 국내 기술의 경쟁력 향상과 시장 활성화 및 사업화 방안 마련

본 연구를 통하여 기초·응용 단계에서의 연구 성과를 달성하였다. 추후 지속적인 연구를 통하여 스마트 내진/내화보강 화보 기술의 시제품을 직접 제작하고 성능평가를 위한 구조실험과 테스트베드를 수행하여 제품화를 위한 실용화 연구를 수행 할 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구를 통해 달성한 성과가 적용되어있는 아라미드 공법은 연구개발 종료 후에 성공적인 기술 상용화 및 사업화가 예상된다.

먼저, 내진보강 시장에 적용하고 있는 여러 기술 중, 공식적으로 내화 성능을 인정받은 공법은 전무한 상태이다. 현재 여러 내진보강 시장에서 적용되고 있는 아라미드 공법에 내화성능까지 공식적으로 내화구조인증을 받는다면 시장에서 가질 수 있는 “선점” 효과가 상당히 클 것으로 예상한다.

지난 포항지진으로 필로티 구조물의 지진에 대한 취약성은 실증되었으며, 충북 제천 스포츠센터의 화재로 인한 인명, 재산의 피해가 커진 이유도 필로티 구조물로 인함이 전문가들 사이에 지적되면서 필로티 구조에 대한 개선 필요성이 대두되었다.

전국 약 24만여 동으로 추산되는 필로티 구조물의 내진과 동시에 내화성능까지 충족시킨다면 필로티 구조 내진보강 시장에 즉시 진출할 수 있을 것으로 예상되며, 정부의 각종 인센티브 도입으로 내진보강이 점차 활성화될 것이라 예상했을 때 연간 필로티 구조물 1천 여동 이상이 내진보강을 진행할 것으로 보이며 본 공법 적용률을 약 3%로 예상, 약 15억 원의 매출액 발생을 예상한다.

또한 현재 정부는 공공시설물 내진보강 프로젝트를 활발히 진행 중이다. 약 5.4조원을 투입하여 2035년까지 약 18만 여개의 시설물 내진보강을 완료할 예정이다. 이 시장에 연간 5개 시설물에 본 공법 적용을 목표로 하여 약 10억 원의 매출을 기대하고 있으며, 내진/내화 성능 동시 확보로 지하철도, 병원 등 다중이용시설의 내진보강에 유리한 본 공법을 중점적으로 홍보하여 시장 선점에 주력할 예정이다.

라. 연구성과 홍보

국내 및 국제 학술대회 발표를 통한 연구성과의 지속적인 홍보활동을 진행하였다.

(1) 제 ℰ회 요코하마 국립대학교-서울시립대학교 국제학술교류회

- 일시: 2018. 08. 02(목) ~ 2018. 08. 04(토)
- 장소: 서울시립대학교
- 내용: “Study on Seismic and Fire Resistance Reinforcement of Piloti Structure Using FRP” 발표



그림 4.1 2018 제 5회 요코하마 국립대학교-서울시립대학교 국제학술교류회 발표

(2) 2019 한국복합신소재구조학회 학술발표대회 참가

- 일시: 2019. 04. 25(목) ~ 2019. 04. 26(금)
- 장소: 강릉 스카이베이 경포호텔
- 내용: "연성능력 향상을 위한 FRP 보강 RC 기둥의 반복하중가력 실험" 발표



그림 4.2 2019 한국복합신소재구조학회 학술발표대회 발표

(3) 2019 한국강구조학회 학술발표대회 참가

- 일시: 2019. 05. 29(수) ~ 2019. 05. 31(금)
- 장소: 부산 해운대 그랜드 호텔
- 내용: "FRP로 보강된 콘크리트충전 원형강관(CFT)기둥의 중심축하중 실험" 발표



그림 4.3 2019 한국강구조학회 학술발표대회 발표

(4) 제 6회 요코하마 국립대학교-서울시립대학교 국제학술교류회

- 일시: 2019. 08. 01(목) ~ 2019. 08. 05(월)
- 장소: 요코하마 국립대학교
- 내용: "Experimental Study of CFT(Concrete Filled steel Tube) Column Reinforced with Aramid and Polyester FRPs" 발표

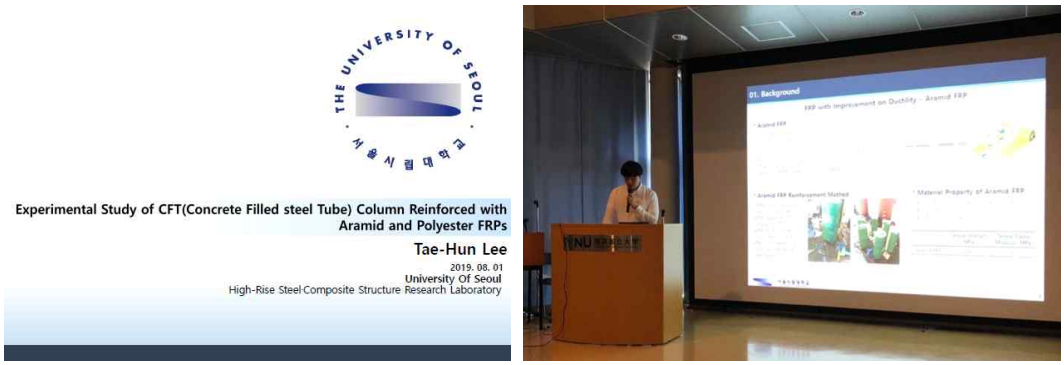


그림 4.4 2019 제 6회 요코하마 국립대학교-서울시립대학교 국제학술교류회 발표

(5) 10th ISSS (International Symposium of Steel Structures

- 일시: 2019. 11. 13(수) ~ 2019. 11. 16(토)
- 장소: 제주도 라마다 플라자 호텔
- 내용: “Experimental Study of Circular CFT Column Reinforced with Aramid and Polyester FRPs” 발표



그림 4.5 The 10th ISSS(International Symposium for Steel Structures) 발표

붙임. 참고문헌

1) ACI 440R-96 (2002), Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI Committee 440, pp.27-28

2) B. D. Scott., R. Park., M. J. N. Priestley., (1982), " Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Over-Lapping Hoops at Low and High Strain Rates", ACI Structural Journals, Vol. 79, No. 1, pp. 13-27.

3) A. Fam., F. S. Qie., S. Rizkalla., (2004), " Concrete-Filled Steel Tubes Subjected to Axial Compression and Lateral Cyclic Loads", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.130, No. 4, pp. 631-640.

4) A. H. Varma., J. M. Ricles., R. Sause., L. W. Lu., (2002), "Experimental Behavior of High Strength Square Concrete-Filled Steel Tube Beam-Columns", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 128, No. 3, pp. 309-318.

5) A. Mirmiran., M. Shahawy., M. Samman., H. E. Echara (1998), "Effect of Column Parameters on FRP-Confined Concrete", Journal of Composite for Construction, ASCE, Vol. 2, No.4, pp. 175-185.

6) ASCE-ACI Joint Tasck Committee 426 (1973), Shear Strength of Reinforced Concrete Members, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 99, No. 6, pp.1091-1187

7) ASTM D 3039, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composites

8) Block, F., Yu, C., Butterworth, N. (2010), The Practical application of Structural Fire Engineering on a Retail Development in the UK, Journal of Structural Fire Engineering, pp.2040-2317

9) Capani, F., D'Ambrisi, A., De Stefano, M., Focacci, F., Luciano, R., Nudo, R. (2017), Experimental Investigation on Cyclic Response of RC Elements Repaired by CFRP External Reinforcing Systems, Composites Part B: Engineering, Vol. 112, No. 1, pp.290-299

10) Chang, Xu, Lin Haixiao, Huang Chengkui (2009), Experimental study on shear resistance of self-stressing concrete filled circular steel tubes, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, No. 4, pp.801-807

11) Di Ludovico, M., Balsamo, A., Porta, A. (2008), Comparative Assessment of Seismic Rehabi

litation Techniques on a Full Scale 3-Story RC Moment Frame Structure, Vol. 28, No. 6, pp.727-747

12) Eid, R., Roy, N., and Paultre, P. (2009), Normal- and High-strength Concrete Circular Elements Wrapped with FRP Composites, Journal of Composite for Constructions, Vol. 13, No. 2, pp.113-124

13) Enrique del Ret Castllo, Michael Griffith, Jason Ingham. (2018), Seismic behavior of RC columns flexurally strengthened with FRP sheets and FRP anchors, Composite Structures, Vol. 203, pp.382-395

14) H. Ge., T. Usami., (1996), “Cyclic Tests of Concrete Filled Steel Box Columns”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 10, pp. 1169-1177.

15) H. Ge., T. Usami.,(1992), " Strength of Concrete Filled Thin Walled Steel Box Columns : Experiment",, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 18, No. 11, pp. 3036-3053.

16) H. Saadatmanesh., M. R. Ehsani., M. W. Li., (1994), “Strength and Ductility of ConcreteColumns Externally Reinforced with Fiber Composite Straps”, ACI Structural Journals,Vol. 91, No. 4, pp. 434-447.

17) J. G. Macgregor. (1997), Reinforced Concrete Mechanics and Design, Prentice Hall, INC.

18) J. G. Teng., L. Lam., (2004), "Behavior and Modeling of Fiber Reinforced Polymer-Confined Concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 130, No. 11, pp. 1713-1723.

19) J. M. Ricles., S. D. Paboojian., (1995) " Seismic Performance of Steel-Encased CompositeColumns", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 8, pp. 2474-2494.

20) Khalifa, A., Gold, W. J., Nanni, A., Abdel Aziz, M. I. (1998), Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of RC Flexural Members, Journal of Composites for Construction, Vol. 2, No. 4, pp.195-202

21) Kirby B. R., Newman G. M., Butterowth N., Pagan J., English C. (2004), A New Approach to Specifying Fire Resistance Periods, Structural Engineering, Vol. 82, No. 19

22) Lam, L., and Teng, J. G. (2002), Strength Model for Fiber-reinforced Plastic-confined Concrete, Journal of Structural Engineering, Vol. 128, No. 5, pp.612-623

23) Li, J., and Hadi, M. N. S. (2003), Behavior of Externaaly Confined High Strength Concrete

Columns under Eccentric Loading, Composite Structures, Vol. 62, No. 2, pp.145-153

24) M. A Bradford., (1996), " Design Strength of Slender Concrete-Filled Rectangular SteelTub es", ACI Structural Journals, Vol. 93, No. 2, pp. 229-235.

25) M. A. Mansur., M. S. Chin., T. H. Wee., (1997), "Stress-Strain Relationship of Confined Hi gh-Strength Plain and Fiber Concrete", Journal of Material in Civil Engineering, ASCE, Vol. 9, No. 4, pp. 171-179.

26) M. Fardis., H. H. Khalili., (1982), "FRP-Encased Concrete as a Structural Material", Magazi ne of Concrete Research, Vol. 121, No. 34, 1973, pp. 191-202.

27) M. R. Spoelstra., G. Monti., (1999), “FRP-Confined Concrete Model”, Journal of Composites and Construction, ASCE, Vol. 3, No. 3, pp. 143-150.1

28) M. J. Nigel Priestley, Ravindra Verma, YaH Xiao.(1994) , Seismic Shear Strength of Reinfo rced Concerte Columns, Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No. 8, pp.2310-2329

29) Maaddawy, T. E. (2009), Strengthening of Eccentrically Loaded Reinforced Concrete Colum ns with Fiber-reinforced Polymer Wrapping System: Experimental Investigation and Analytica l Modeling, Journal of Composite for Constructions, Vol. 13, No. 1, pp.13-24

30) Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R.(1988), Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No. 8,

31) Marta Del Zoppo, Marco Di Ludovico, Alberto Balsamo, Andrea Prota, Gaetano Manfredi. (2017), FRP for seismic strengthening of shear controlled RC columns: Experience from earthq uakes and experimental analysis, Composites Part B, Vol. 129, No. 15, pp.47-57

32) Muhammad N. S Hadi, Ida Bagus Rai Widiarsa. (2012), Axial and flexural performance of square RC columns wrapped with CFRP under eccentric loading, 2012, Journal of Composites for Construction, Vol. 16, No. 6, pp.640-649

33) M. Saffi., H. A. Toutanji., Z. Li., (1999), "Behavior of Concrete Columns Confined with Fibe r Reinforced Polymer Tubes", ACI Material Journals, Vol. 96, No. 4, pp. 500-509.

34) M. Samaan., A. Mirmiran., M. Shahawy., (1998), "Model of Concrete Confined by Fiber Co mposites", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 9, pp. 1025-1031.

35) O. Chaallal., M. Shahawy., (2000), “Performance of Fiber-Reinforced Polymer-Wrapped Rei

nforced Concrete Column under Combined Axial-Flexural Loading", ACI Structural Journals, Vol. 97, No. 4, pp. 659-668.

36) Priestley, M. J. N., and Park, R.(1987), Strength and Ductility of Concrete Bridge Columns under Seismic Loading, ACI Structural Journal, Vol. 84, No. 1, pp.69-76

37) Robert M. Foster, Savan Haria, Chris T. Morley, Janet M. Lees. (2017), Shear Capacity of Reinforced Concrete Subjected to Tension: Experimental Results and Analysis, Journal of Structural Engineering, Vol. 143, No. 9

38) Roberto Realfonzo, Annalisa Napoli, Joaqin Guillermo Rinilla. (2014), Cyclic behavior of RC beam-column joints strengthened with FRP systems, Construction and Building Materials, Vol. 54, No. 15, pp.282-297

39) Seible F., Priestly, M. J. N., Hegender G. A., Innamorato D. (1997), Seismic Retrofit of RC Columns with Continuous Carbon Fiber Jackets, Journal of Composites for Construction, Vol. 1, No. 2, pp.52-62

40)S. P. Schneider, (1998), "Axially Loaded Concrete-Filled Steel Tubes", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 10, pp. 1125-1138.

41)S. R. Razvi., M. Saatcioglu., (1994), "Strength and Ductility of Confined high-Strength Concrete Columns", ACI Structural Journals, Vol. 91, No. 6, pp. 678-687.

42) Specification for Structural Steel Buildings, (2015), AISC

43) Tao, Z., Han, L. H., and Wang, L. L. (2007), Compressive and Flexural Behavior of CFRP-Repaired Concrete-Filled Steel Tubes after Exposure ro Fire, Journal of Constructural Steel Research, Vol. 63, No. 8, pp.1116-1126

44) Tomas Gernay, Ruben Van Coile, Negar Elhami Khorasani, Danny Hopkin (2019), Efficient Uncertainty Quantification Method Applied to Structural Fire Engineering Computations, Engineering Structures, Vol. 183, pp.1-17

45) T. Usami., H. Ge., (1994), "Ductility of Concrete Filled Steel Box Columns under Cyclic Loading", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 7, pp. 2021-2040.

46) W.M. Ghannoum, J.P. Moehle. (2008), Shear Failure Model for Flexure-Shear Critical Reinforced Concrete Columns, World Conference on Earthquake Engineering

27) Wai-Fah chen. (2007), Plasticity in Reinforced Concrete

47) X. Y. Mao., Y. Xiao., (2006), “Seismic Behavior of Confined CFT Columns ”, Engineering Structures, No. 28, pp. 1378-1386.

48) Y. C. Wang., J. I. Restrepo., (2001), “Investigation of Concentrically Loaded Reinforced Concrete Columns Confined with Glass Fiber-Reinforced Polymer Jackets,” ACI Structural Journals, Vol. 98, No. 3, pp. 377-385.

49) Yu-Chen Ou, Dimas Pramudya Kurniawan. (2015), Effect of Axial Compression on Shear Behavior of High-Strength Reinforced Concrete Columns, ACI Structural Journal, Vol. 112, No. 3, pp.209-220

50)Y. Xiao., W. He., K. K. Choi., (2005), “Confined Concrete-Filled Tubular Columns”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 131, No. 3, 2005, pp. 488-497.

51) 건설교통부, 지진현황과 시설물 안전대책, 2015

52) 국토교통부. 건축구조기준, 2009

53) 국토교통부, 콘크리트구조 휨 몇 압축 설계기준, 2016

54) 김선희, 옥치열, 최성모 (2015), 철골 및 합성기둥 내화성능 확보를 위한 내화페인트 열적 물성치 규명과 소요두께 제안, 복합신소재구조학회논문집, Vol. 6, No. 1, pp.21-29

55) 김선희, 박영옥, 최성모 (2014), 열적특성을 고려한 각형 CFT 기둥의 온도분포에 관한 연구, 한국구조물진단유지관리공학회 학술발표대회 논문집, Vol. 2014, No. 10, pp.247-251

56) 김진섭, 권민호, 서현수 (2014), 긴급시공이 가능한 FRP 복합재로 보강된 기둥의 내진성능평가, 콘크리트학회논문집, Vol. 26, No. 1, pp.47-55

57) 과학기술부 (2000), 차세대 내진설계 개념과 지진응답 제어기법 연구, 자연재해방재기술개발사업

58) 류재용, 김도범, 최영환, 노광근, 최성모 (2012), AFRP를 이용한 steel beam 휨보강 성능에 관한 실험, 2012년도 한국복합신소재구조학회 학술발표대회논문집, pp.33-34

59) 박재우, 유정한, 최성모 (2013), 강구조물의 복합소재를 활용한 보수보강, 복합신소재학회논문집, Vol. 4, No. 3, pp.30-36

60) 박재우, 정성훈 (2010), 탄소섬유쉬트로 보강된 각형 CFT기둥의 실험 및 설계식, 한국산학기술학회논문지, Vol. 11, No. 10, pp.4024-4030

61) 박재우, 최성모 (2010), FRP로 보강된 원형 CFT 기둥의 구속효과를 고려한 압축내력설계식 제안, 대한건축학회논문집:구조계, Vol. 26, No. 7, pp.69-76

62) 박재우, 최성모 (2014), 섬유보강플라스틱(FRP) 스트립으로 보강한 철골보의 휨거동에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회논문집, Vol. 26, No. 2, pp.69-79

63) 박재우, 최성모 (2014), 아라미드섬유(AFRP)판으로 보강된 철골보의 부착성능 개선법, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, Vol. 34, No. 2, pp.533-534

64) 박재우, 홍영균, 최성모 (2011), 탄소섬유쉬트로 보강된 원형CFT기둥의 압축거동과 ACI 440 code를 응용한 압축내력예측식 제안, 한국복합신소재구조학회논문집, Vol. 2, No. 1, pp/23-29

65) 박재우, 홍영균, 홍기섭, 이성희, 최성모 (2009), 탄소섬유쉬트로 구속된 콘크리트충전 각형강관기둥의 단조압축실험, 한국강구조학회 논문집, Vol. 21, No. 3, pp.311-320

66) 박재우, 홍영균, 홍기섭, 최성모 (2009), 탄소섬유쉬트로 구속된 콘크리트충전 원형강관기둥의 단조압축실험, 한국지진공학회논문집, Vol. 13, No. 5, pp.61-71

67) 박재우, 홍영균, 홍기섭 (2008), 탄소섬유쉬트로 보강한 고강도 콘크리트 충전강관(CFT) 기둥의 휨내력에 관한 연구, 한국지진공학회논문집, Vol. 12, No. 1, pp.21-28

68) 박정민, 김화중 (1995), 중심축력을 받는 콘크리트 충전강관 기둥의 역학적 거동특성에 관한 연구, 한국콘크리트학회논문집, Vol. 7, No. 5

69) 박태만, 박성민, 홍혁준, 강경수, 윤정배 (2005), 복합판으로 보강된 철근콘크리트 기둥의 내진성능 연구, 콘크리트학회논문집, Vol. 17, No. 1, pp.151-158

70) 변은혁, 김민숙, 이영학, 김희철 (2011), FRP Sheet와 비좌굴 가새를 적용한 보-기둥 접합부의 횡방향 보강효과에 관한 실험적 연구, 한국지진공학회논문집, Vol. 15, No. 1, pp.49-56

71) 서상훈, 유연종, 이영학, 김희철, 이기학, 이한선 (2009), 탄소섬유시트와 비좌굴가새를 이용한 저층 필로티 구조물의 보-기둥 연결부의 횡방향 보강효과에 관한 실험적 연구, 한국지진공학회논문집, Vol. 13, No. 1, pp.69-77

72) 신쟁연, 최원호, 박재우, 염경수, 최성모 (2018), 세장한 충전형 합성기둥의 FRP보강 공법, 복합신소재학회논문집, Vol. 9, No. 4, pp.32-28

73) 양영성, 김주인, 서정환, (1998), “ 콘크리트 충전 각형 강관주의 내력에 관한 연구”, 대한건축학회논문집, 제 14권 6호, pp 67-75.

74) 이경훈, 김희철, 홍원기, 이영학, 엄철환, (2006), “탄소 섬유관으로 구속된 콘크리트 부재의 신

뢰성 해석", 한국지진공학회논문집, 제10권 5호, pp 1-8.

75) 이태훈, 김선희, 노광근, 최성모, 양일승 (2019), 아라미드 FRP보강 비내진상세 철근콘크리트 기둥의 반복횡하중 가력실험, 한국복합신소재구조학회논문집, Vol, 10, No.6, pp.34-42

76) 이태훈, 최성모 (2019), 연성능력 향상을 위한 FRP 보강 RC기둥의 반복하중가력 실험, 복합신소재구조학회 학술발표대회, Vol. 2019, No. 04, pp.77

77) 이현철, 이성희, 박재우, 최성모 (2010), FRP로 보강된 각형 CFT 단주의 압축내력에 관한 해석, 대한건축학회 학술발표대회 논문집-계획계/구조계, Vol. 30, No. 1, pp.65-66

78) 이현호 (2011), "아라미드 FRP 보강된 RC 기둥의 FE해석," 한국콘크리트학회 봄학술대회 논문집, 23권, 2호, pp.219~220.

79) 이현호 (1998), "아라미드 섬유쉬트로 휨보강한 RC보의 강도성능 및 변형성능에 관한 고찰," 콘크리트학회 논문집, 10권, 5호, pp. 151~158.

80) 이현호, 김진호, 노광근 (2012), 섬유보강재를 이용한 RC 기둥의 보강효과, 콘크리트학회논문집, Vol. 24, No.4, pp.473-480

81) 이현호, 구은숙 (1999), "아라미드섬유쉬트로 전단보강한 RC 기둥의 성능평가에 관한 연구," 대한건축학회 구조계 논문집, 15권, 6호, pp. 25~36.

82) 정은비 염희진, 유정한 (2015), 대구경 콘크리트 충전형 합성기둥의 전단 설계식 분석, 한국강구조학회

83) 조순호, (2007), "FRP 합성재료에 의하여 구속된 콘크리트의 응력-변형률 응답예측", 한국콘크리트학회논문집, 제19권 6호, pp 763-772.

84) 조창근 (2007), 직접변위기반설계법에 의한 철근콘크리트 기둥의 FRP 피복보강 내진성능설계법의 개발, 한국지진공학회

85) 최성모, 홍영균, 박재우 (2010), 탄소섬유쉬트로 보강된 콘크리트충전 원형강관기둥의 연성능력, 한국강구조학회논문집, Vol. 22, No. 2, pp.185-195

86) 최영환, 김강수, 최성모, 이상섭, (2007), "고강도 콘크리트를 사용한 각형 CFT 기둥의 축력-모멘트 상관곡선", 한국강구조학회논문집, 제19권 6호, pp 575-585.

87) 최원호, 신쟁연, 류재용, 박용필, 최성모 (2019), FRP 보강 원형 CFT 기둥의 구조성능 실험평가, 한국복합신소재구조학회논문집, Vol.

88) 최정진, 이태훈, 류재용, 노광근, 최성모 (2018), 포항지진 피해로 예상되는 필로티건물 기둥의

FRP 내진보강 공법, 복합신소재학회논문집, Vol. 9, No. 3, pp.14-21

89) 최정진, 이태훈, 박병진, 노광근, 최성모 (2019), FRP 보강 RC기둥의 내진성능 향상에 관한 실험적 연구, 한국복합신소재구조학회논문집, Vol. 10, No. 2, pp.17-25

90) 하기주, 하영주, 강현욱 (2015), 섬유시트와 매입형 CFRP Rod를 보강한 R/C 외부 보-기둥 접합부의 내진성능 평가 및 개선, 한국구조물진단유지관리공학회

91) 한국복합신소재구조학회 (2017), 복합신소재(FRP재료)시스템에 의한 철근콘크리트구조물의 보강 설계 및 시공지침서

92) 한상훈, 홍기남, 이재범 (2009), “아라미드 스트랩으로 프리스트레싱 횡구속된 RC 원형기둥의 일축압축거동에 관한 실험적 연구,” 콘크리트학회 논문집, 21권, 2호, pp.159~168.

93) 한택희, 김성남, 강영종, (2007), “내부 구속 중공 CFT 기둥의 내진 성능 평가”, 한국강구조학회논문집, 제19권 1호, pp 53-65.

94) 한택희, 염응준, 한상윤, 강영종, (2007), “구속효과를 고려한 내부 구속 중공 CFT부재의 비선형 콘크리트 모델 개발”, 한국강구조학회논문집, 제19권 1호, pp.43-52.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술사업화지원사업 사업의 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.