

(뒷면) (옆면)

(앞면)

16TBIP
-C0929
32-02

산업부산물로
제작된 친환경
영구거푸집을
적용한 고성능
철근 선조립
콘크리트
기둥의 실용화
설계·시공기술
개발

최
종
보
고
서

2017

국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원

Infrastructure R&D Report

보안 과제(), 일반 과제(✓) / 공개(✓), 비공개()

국토교통기술사업화지원사업 제2차 연도 최종보고서

R&D /
16TBIP-C092932-02

산업부산물로 제작된 친환경
영구거푸집을 적용한 고성능 철근
선조립 콘크리트 기둥의 실용화
설계·시공기술 개발 최종보고서

2017. 06. 01.

주관연구기관 / (주)더나은구조엔지니어링
공동연구기관 / 서울시립대학교
공동연구기관 / (주)엔아이스틸

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관 귀하

‘산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥의 실용화 설계·시공기술 개발’(연구개발 기간 : 2015. 04. ~ 2017. 04.) 과제의 최종보고서 5부를 제출합니다.

2017. 06. 01.

주관연구기관명 : (주)더나은구조엔지니어링 (대표자) 이원록 (인)

공동연구기관명 : 서울시립대학교 산학협력단 (대표자) 송오성 (인)

공동연구기관명 : (주)엔아이스틸 (대표자) 배종민 (인)

주관연구기관책임자: 김성배
공동연구기관책임자: 김강수
공동연구기관책임자: 권순명

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	16TBIP -C092932-02	해당 단계 연구 기간	2016.04.27. ~ 2017.04.26.	단계구분	2단계/ 2단계
연구사업명	중사업명	국토교통기술사업화 지원사업			
	세부사업명	중소기업 보유기술 및 아이디어 사업화분야			
연구과제명	대과제명	대과제가 있을 경우 기재합니다(단위과제일 경우에는 아래에 기재합니다)			
	세부과제명	산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥의 실용화 설계·시공기술 개발			
연구책임자	김성배	해당단계 참여 연구원 수	총: 30명 내부: 30명 외부: 0명	해당단계 연구개발비	정부: 398,000천원 기업: 273,000천원 정부 외: 0천원 계: 671,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 32명 내부: 32명 외부: 0명	총 연구개 발비	정부: 799,000천원 기업: 546,000천원 정부 외: 0천원 계: 1,345,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	(주)더나은구조엔지니어링 기술연구소			참여기업명	
국제공동연구	상대국명: 해당사항 없음			상대국 연구기관명: 해당사항 없음	
위탁연구	연구기관명: 해당사항 없음			연구책임자: 김성배	
요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)				보고서 면수:100	
- "산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥" 기술의 사업화를 위하여 개발 기둥의 설계 및 제작방법, 구조적 성능검증, 경제성 분석 및 현장적용성 평가를 수행하였음. 특히, 개발 기둥부재는 물론 보-기둥 접합부의 설계방법까지 도출하였으며, 제작과정 및 현장적용성 분석을 통하여 개발기술의 경제성과 시공성을 확보하였음. 해석적 연구와 실험적 연구를 병행하여 개발 기둥 부재의 구조적 성능을 상세하게 검증하였으며, 이러한 연구결과 및 분석을 바탕으로 녹색기술인증과 건설신기술인증 추진하고 있음. - 연구개발성과를 세부적으로 나타내면, ①개발 기둥부재의 구조성능 검증, ②보-기둥 접합부 상세설계방안의 개발, ③개발 기둥부재의 설계·시공 기술 확보 및 매뉴얼 구축, ④경제성 분석 및 현장 적용성 확보, ⑤녹색기술인증 및 건설신기술인증 추진 등이며, 우수한 기술력 및 현장 적용성을 기반으로 "산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥" 기술의 사업화를 통하여 기업의 매출 극대화는 물론 건설기술의 선진화에 이바지 하고자 하였음.					

〈 국문요약 〉

연구의 목적 및 내용	산업부산물인 여철로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥은 기존 RC기둥의 단점들을 개선한 기술로서 5m 이상의 층고가 높은 기둥부재에 적용성이 매우 우수함. 이 연구를 통하여 개발 기술의 설계 및 시공기술을 확보하고 사업화를 추진하고자 하였음. 주관 및 공동연구기관의 역할 분담을 통하여 효율적인 연구수행을 도모하였으며, 연차별 연구 내용과 범위를 다음과 같이 설정하여 연구를 수행하였음. 1차 년도 : 1단계 연구로써, 기둥 부재의 제작과정에서 발생하는 문제점을 보완 및 개선하고, 설계방법의 도출, 구조적 성능검증 및 현장 적용성 평가를 수행하였음. 2차 년도 : 2단계 연구로써, 보-기둥 접합부 상세 개발 및 구조성능 검증, 대상기술의 현장적용 및 시공성·경제성 분석, 설계 및 시공 매뉴얼 구축 등을 수행하여 개발기술의 성능 검증을 완료하였음. 이러한 단계별 연구를 통하여 산업부산물인 여철로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥의 사업화를 통하여 기업의 이익을 극대화 하고, 나아가 국내 건설시장의 활성화에 기여할 수 있는 경쟁력 있는 기술을 확보하였음.				
	“산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥” 기술을 사업화하기 위하여 발 기둥의 설계 및 제작방법, 구조적 성능검증, 경제성 분석 및 현장적용성 평가를 수행하였음. 특히, 개발 기둥부재는 물론 보-기둥 접합부의 설계방법까지 도출하였으며, 제작과정 및 현장적용성 분석을 통하여 개발기술의 경제성과 시공성을 확보하였음. 해석적 연구와 실험적 연구를 병행하여 개발 기둥 부재의 구조적 성능을 상세하게 검증하였으며, 이러한 연구결과 및 분석을 바탕으로 녹색기술인증과 건설신기술인증 추진하고 있음. 연구개발성과를 세부적으로 나타내면, ①개발 기둥부재의 구조성능 검증, ②보-기둥 접합부 상세설계방안의 개발, ③개발 기둥부재의 설계·시공 기술 확보 및 매뉴얼 구축, ④경제성 분석 및 현장 적용성 확보, ⑤녹색기술인증 및 건설신기술인증 추진 등이며, 우수한 기술력 및 현장 적용성을 기반으로 "산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥" 기술의 사업화를 통하여 기업의 매출 극대화는 물론 건설기술의 선진화에 이바지 하고자 하였음.				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	현재 건설현장에서는 노동 집약적인 거푸집 공사의 소요 비용이 크게 증가하고 있음. 산업부산물인 여철로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥은 기존 RC기둥에서 필요한 거푸집 공정을 획기적으로 개선한 친환경 기술로서 5m 이상의 층고가 높은 기둥부재에 적용성이 매우 우수함. 이 연구를 통하여 개발된 기술은 기존 RC기둥에 비해 충분한 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 판단되므로 개발기술의 사업화를 통하여 기업의 이익을 극대화 하고, 나아가 국내 건설시장의 활성화에 기여하고자 함.				
핵심어 (5개 이내)	RC기둥	여철	친환경 기술	영구거푸집	철근선조립

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	The eco-friendly reinforced concrete (RC) column using by-product of steel as prefabricated permanent molds is an enhanced technology, compared to the existing RC columns, having a good applicability when the story height becomes greater than 5 m. The research team developed the design and construction methods of the new advanced technology, and have tried to commercialize it. In order to carry out this research project in an efficient manner, detailed assignments were given to each institution, and the yearly research scopes and summaries are following. - First year: For the first step, the research team started from catching the problems in manufacturing the column members and its enhancement, and performed development of design method, validation of structural performance, and feasibility study. - Second year: As the second step, all the necessary investigations were performed to validate the performance of the new advanced technology. The details of beam-column joint were developed and their structural performance were validated. The design and construction manuals were established, and the constructability and economic feasibility were also checked through applying the new advanced technology to building structures. Based on the results of this research, the structural performance and constructability of the proposed technology, i.e., the eco-friendly reinforced concrete (RC) column using by-product of steel as prefabricated permanent molds, were completely validated, based on which its application is now ready at any time. Its commercialization for practical use is expected to lead us to earn more profits, and can contribute to encouraging domestic construction market to apply new technologies that are advanced and competitive.
Results	To commercialize the eco-friendly concrete columns using industrial by-products as prefabricated permanent molds, the research team members performed development of design method, validation of structural performance, and studies on constructability and economic feasibility, including design method of beam-column joint. The feasibility of the development technology was conducted based on the constructability and expected construction period as well as the economics. Both analytical and experimental studies were conducted for the validation of its structural performance, based on which the applications for the certification of green technology and for the certification of new construction technology are now being prepared. The results of this research project include ①validation of structural performance, ②development of detailed design guide for beam-column joint, ③establishment of design and construction manuals, ④checking constructability and economic feasibility, and ⑤preparing the applications for the certification of green technology and for the certification of new construction technology. The final aims of the project are to maximize the profit of our company and to lead the advancement of the construction technology through the utilization of the eco-friendly concrete columns using industrial by-products as prefabricated permanent molds.
Expected Contribution	The costs for concrete formwork have been increasing due to its labor-intensive characteristics. The eco-friendly reinforced concrete (RC) column using by-product of steel as prefabricated permanent molds is an enhanced technology, compared to the existing RC columns, having a good

	applicability when the story height becomes greater than 5 m. Because the new technology developed in this research project would be very competitive in comparison with existing RC columns, it is expected that it contributes to maximize the profits of our company and to lead the advancement of the construction technology.				
Keywords	Reinforced concrete column	By-product of steel	Clean tech	Permanent mold	Preformed bar

< Contents >

1. Summary of R&D Project	9
2. Current Status of Domestic and Foreign Technology Development	29
3. Research Performance and Results	34
4. Target Attainment and Contribution	83
5. Plan to Utilize R&D Achievement	87
6. Overseas Science and Technology Collected during Study	88
7. Security Level R&D Achievement	93
8. Status of research facilities and equipment registered in the National Science and Technology Comprehensive Information System	94
9. Implementation of Safety Measures in Laboratories Based on R&D Tasks	95
10. Representative Research Results of R&D Projects	98
11. Other Item	99
12. Reference	100

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	9
2. 국내외 기술 개발 현황	29
3. 연구 수행 내용 및 성과	34
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	83
5. 연구개발성과의 활용 계획	87
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	88
7. 연구개발성과의 보안등급	93
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	94
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	95
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	98
11. 기타 사항	99
12. 참고 문헌	100

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

이 연구에서는 노동집약적인 기존의 철근콘크리트 공법이 내재하고 있는 문제점 중 거푸집 제작공정 및 비용을 개선할 수 있는 산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥을 개발하는 것을 주요목적으로 하였다.

가. 사업화 대상기술

(1) 철근콘크리트기둥(RC기둥, Reinforced Concrete Column)

- 대부분의 철근콘크리트 기둥은 그림 1.1에 나타낸 것과 같이 원형이거나 직사각형 단면으로 설계되며 축방향 철근(longitudinal reinforcement)으로 보강되어 있다. 압축력은 단면적의 대부분을 차지하는 콘크리트에 의해 주로 저항되며, 휨모멘트 작용 시 발생하는 인장력은 축방향으로 배치된 철근에 의해서 저항되는 구조부재이다.
- 작용하는 전단력은 횡철근(strup)에 의해서 저항하며, 배치되는 횡철근의 종류는 띠철근 기둥(tied column)과 나선철근 기둥(spiral column)으로 구분할 수 있다.
- RC기둥은 철근배근 및 거푸집 설치와 같이 현장에서 노동력에 의해 수행되는 작업이 많기 때문에 시공성이 저하되고 공기가 길어지는 단점이 있다. 그럼에도 불구하고 단가가 저렴하기 때문에 대부분의 중소규모의 현장에서 많이 적용되어 왔다.

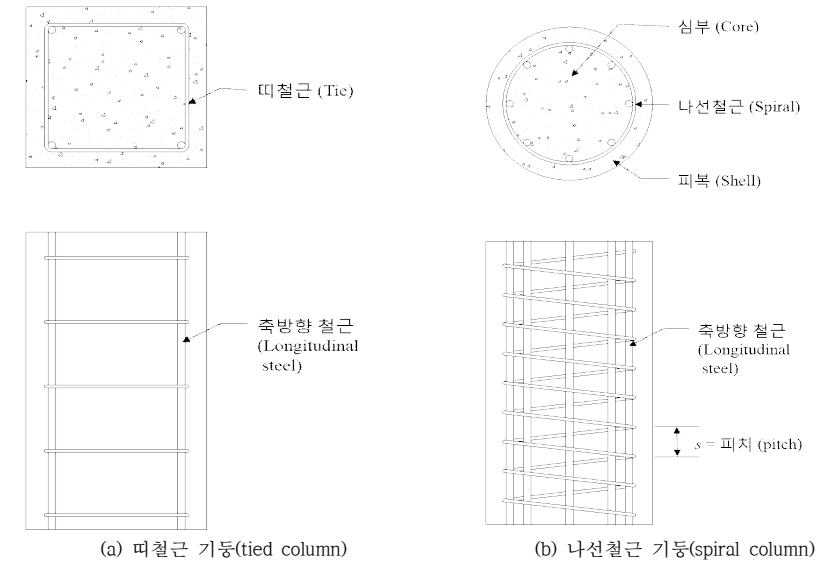


그림 1.1 RC기둥의 종류

(2) 합성기둥(Composite Column)

- 합성기둥은 그림 1.2에 나타낸 것과 같이 구조용 강재를 매입하여 보강하는 매입형 합

성기둥(Steel Reinforced Concrete, SRC)과 강관에 콘크리트를 충전하는 충전형 합성기둥(Concrete Filled Tube, CFT)으로 구분할 수 있다.

- 최근 초고층 등 대형 건축물이 증가함에 따라 구조적 성능과 시공성이 우수한 합성기둥의 사용이 증가하고 있으나, 설계 시 구조적인 제약조건이 많고 보-기둥 접합부 상세가 복잡해지며 가격이 높아지는 단점을 가지고 있다.

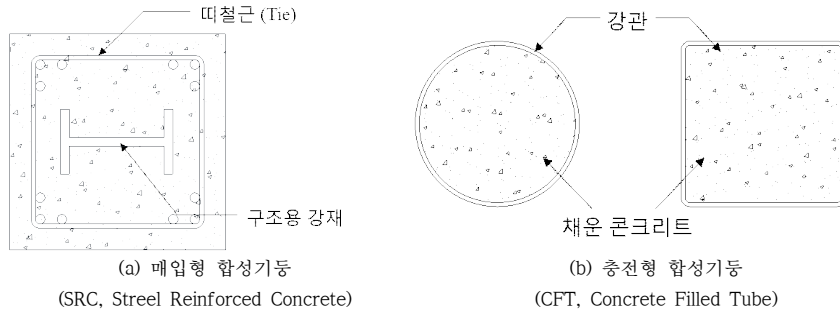


그림 1.2 합성기둥의 종류

(3) 철근 선조립 공법

- 철근 선조립공법은 일명 기계식 이음공법으로서 기둥, 보, 벽체 등을 부위별로 공장 또는 현장의 야적공간에서 미리 조립하고 유니트(unit)화 된 철근 부재를 가스 압접, 용접 또는 특수 이음 철물(기계식 이음) 등을 사용하여 조립하는 공정으로 이루어진다. 주로 공장에서 정밀 가공된 철근을 현장에 반입하여 선조립하는 방식이 일반적이며, 현장에서의 철근 절단, 절곡 공정과 2차 소운반 및 부재위치에서의 조립공정이 생략되어 공기단축에 유리하다.
- 표 1.1에 나타난 것과 같이 철근 선조립 공법은 구조적인 측면에서는 고층 건물에 유리하고, 시공정밀도가 높으며, 고강도 콘크리트 적용에 유리하다. 시공적인 측면에서는 기술적 숙련도가 적어도 시공이 가능하며, 공기 단축이 가능하고, 철근을 날개 및 다발로 인양하는 방식에 비하여 안전성을 확보할 수 있다.
- 그림 1.3은 철근 선조립 공법 시공순서를 간략하게 나타낸 것이다. 철근 선조립 기둥은 각 단위 부재별 철근을 배근하기 위한 가설 프레임(frame) 설치, 수직근 및 수평근 설치, 각종 매립물 설치, 검토 및 양중 순서로 시공되며, 선조립 기둥을 수직 양중하는 경우에는 조립된 케이지(cage)에 변형이 발생하지 않도록 주의해야 한다. 각 층 기둥의 철근 케이지는 겹침이음, 압접이음, 기계적 이음 등으로 연결할 수 있으며, 철근 케이지 배치 후에 콘크리트 타설을 위한 거푸집을 설치할 때까지 케이지의 형태유지를 위하여 보호 캡을 사용한다. 그림 1.4는 삼성동 H사의 아파트현장에 적용한 선조립 공법의 시공사진을 보여준다.

표 1.1 철근 선조립 공법 특징

장점	구조 측면	-낮은 철근 사용 가능 RC 고층 건물에 유리 -철근피복이 정확하며, 시공정밀도가 높아 안전을 증대 효과 -고강도 콘크리트 적용에 유리 -강재 절감 -> 부작성이 좋아 균열제어 효과적 (용접철망 선조립 공법)
	시공 측면	-기술적 숙련도 및 강재 절감 -철근공사 및 콘크리트 거푸집공사 등에서 공기 단축 증대 효과 -기존의 PC공법과 비교해 운반 부재 중량이 적어 소규모 T/C로 시공 가능 -슬래브 전기배선, 배관공사 용이 (용접철망 선조립 공법)
단점	설계 측면	-평면의 단순화 필요 -부재 규격화, 종류 단순화 필요 -주근 동일 굵기로 사용 -부재 접합은 공법의 특성에 적합한 이음 기술 사용 -철선의 연신율이 작음 -> 냉간가공으로 고강도이나 연신율이 작음 (용접철망 선조립 공법)
	시공 측면	-부재의 운반, 접합방식에 대한 주의 요함 -기둥, 보 접합부의 단순화 필요 -운반과 조립작업시 변형 및 응력 발생 지양 -띠철근과 스티럽 나선키가 유리 -공장조립시 운반비가 높게 책정되므로 현장조립이 유리 -철근에 비해 재료비가 고가 (용접철망 선조립 공법) -녹의 진행이 일반 철근에 비해 빠름 (용접철망 선조립 공법)

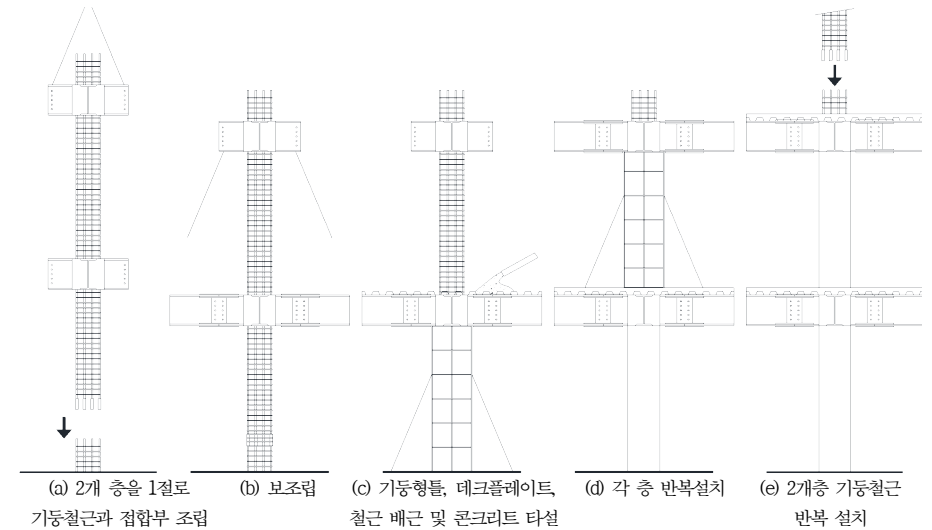


그림 1.3 철근 선조립 공법 시공순서



그림 1.4 철근 선조립 공법 시공 사례 (삼성동 H사 아파트 시공현장)

(4) 산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥
(Concrete Column Using the Industrial By-Products as Prefabricated Permanent Form with High Performance Steel Reinforcement)

- 산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥은 구조용 강재 제작 시 발생하는 산업부산물인 여철(rest steel)을 거푸집으로 사용하여 제작하는 RC기둥이다.
- 그림 1.5에 나타난 것과 같이 거푸집 제작과 기둥에 배근되는 철근은 공장에서 일체형으로 조립되고, 현장에 운반 및 설치된 후 콘크리트를 타설하여 완성된다. 따라서, 우수한 시공성과 공기절감 효과를 동시에 확보할 수 있다. 또한, 가격이 저렴한 산업부산물인 여철을 사용하여 거푸집을 제작하기 때문에 경제성 및 친환경성을 확보할 수 있는 기술이다.

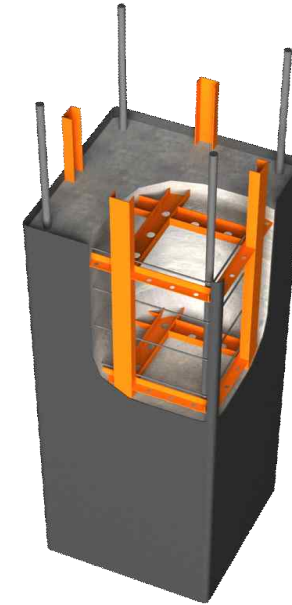


그림 1.5 산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥

2. 연구개발의 필요성

가. 사업화 대상기술 설명

- 많은 건설공법들이 개발되고 있음에도 불구하고, 전통적인 철근콘크리트 공법은 우수한 경제성과 지난 수십 년간 축적된 기술력(또는 노하우)을 바탕으로 여전히 국내외 건설현장에서 높은 경쟁력 확보하고 있다. 그러나 최근 건설시장에서는 노무비의 비약적인 증가로 인하여 거푸집공사비용이 크게 증가하고 있으며, 특히, 5m 이상의 층고를 갖는 철근콘크리트 기둥이 시공되어야 하는 경우, 거푸집의 설치에 소요되는 노무비를 포함한 가설비용이 크게 증가하여 경제성이 현저히 떨어진다. 한편, 일반적인 골조공사에서 기둥공사는 주공정선(critical path)에 해당하여 전체 공기를 결정할 수 있기 때문에 가설공사를 최소화 하는 것이 매우 중요하다.
- 따라서, 이 연구에서는 거푸집과 철근을 공장에서 미리 조립하여 현장으로 운반하는 공법을 도입하여 기존의 철근콘크리트 공법이 내재하고 있는 문제점들을 극복하고자 하였으며, 그 일환으로 산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥을 개발하였다.
- 제안 공법에서는 산업부산물로 여겨지던 여철을 강재거푸집으로 적극 활용하여 경제성을 도모하였으며, 모든 철근을 공장에서 일체로 배근하고, 이를 거푸집에 고정하여 현장에서 배근작업 및 거푸집 가설작업을 생략할 수 있도록 고안하였다. 따라서 현장에서는 양중 및 설치와 동시에 타설이 가능하고, 거푸집이 자체적으로 충분한 강도 및

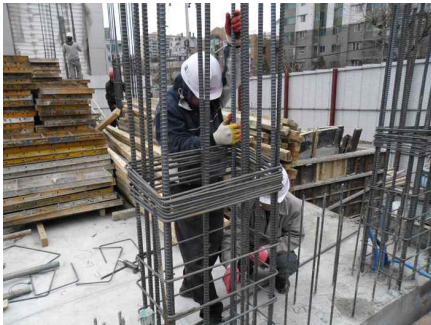
강성을 확보하고 있기 때문에 수평부재를 시공할 때에 별도의 가설공사를 요구하지 않는다.

- 또한, 설계 단계에서는 거푸집으로 사용되는 외부철판을 구조재로 고려하지 않기 때문에 기존의 RC기둥과 동일한 구조시스템으로 적용이 가능하다. 이는 내화피복 등의 추가적인 공정이 필요하지 않고 접합부의 경우에도 일반적으로 사용되는 RC접합부나 기존의 개발된 다양한 형태의 합성보에 즉시 적용가능하다는 것을 의미하며, 용이한 실무설계와 현장적용이 기대된다.

(1) 기술의 우수성

○ 거푸집을 철근과 공장에서 선조립함으로써 시공성 향상 및 공기절감

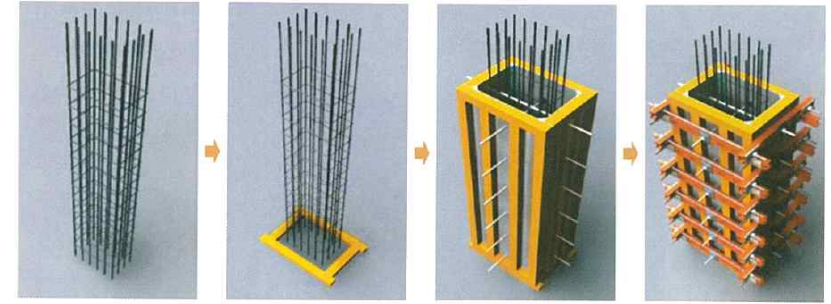
- 철근콘크리트구조는 가장 전통적인 기둥 제작방법으로, 경제적이고 자재 수급이 용이하며 양중부담이 적다. 또한, 보, 슬래브 등의 수평부재와 동시에 콘크리트가 일체 타설되므로 내진성능 확보에 유리한 장점이 있으며, 콘크리트가 외부에 배치되므로 별도의 내화피복이 불필요하다.
- 그러나 RC 기둥 시공은 그림 1.6(a)와 (b)에 나타난 것같이 현장작업이 필요한 공정을 포함하고 있으므로 작업자의 숙련도 및 현장여건에 따른 품질 편차가 크며 철근 배근을 위한 철근공, 거푸집 설치에 위한 형틀 목공, 콘크리트 타설을 위한 콘크리트 타설공 등 다양한 인력이 필요하고, 철근 야적장, 철근 작업장, 거푸집 야적장 등의 현장 작업공간이 확보되어야한다. 또한, 거푸집은 그림 1.6(c)에 나타난 것과 같이 콘크리트에 접하는 막음널과 이를 지지하는 버팀보, 띠장, 긴결재 등을 포함하여 구성되기 때문에 가설자재가 과다하게 소요될 뿐만 아니라 거푸집의 설치 및 해체 작업에 상당한 시간이 소요되며 콘크리트 양생기간 동안 콘크리트 측압을 지탱하기 위한 가설서포트가 필요하다. 따라서, 이로 인한 공기 지연, 비용 증가 등의 문제가 발생되고 있다.



(a) 기둥 철근 배근작업



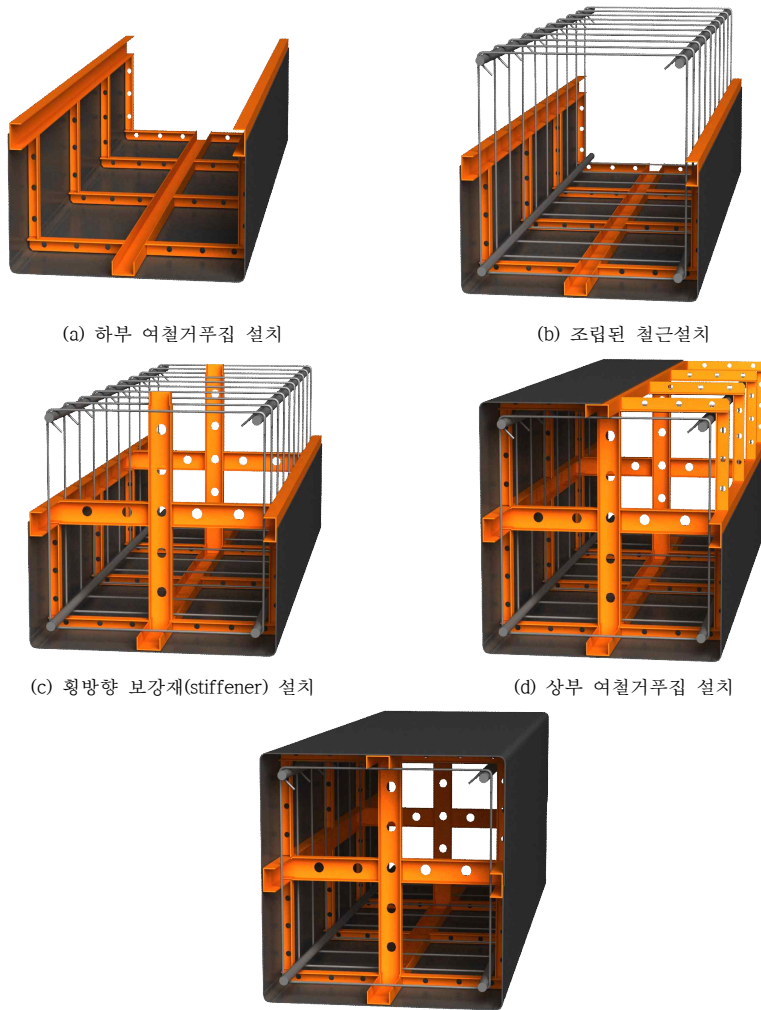
(b) 거푸집 설치



(c) 기둥 거푸집 설치순서

그림 1.6 일반적인 RC기둥의 제작

- 그러나, 이 연구를 통해 개발하고자하는 철근 선조립 거푸집의 제작과정은 그림 1.7과 같이 공장에서 거푸집과 철근이 일체형으로 제작된 후 운반되어 현장에서 설치되기 때문에 현장작업을 최소화할 수 있다. 제작과정은 먼저 그림 1.7(a)와 같이 여철로 된 강재판을 보강강재와 용접하여 하부의 거푸집을 제작하며, 여기에 그림 1.7(b) 및 ©와 같이 사전에 조립된 철근을 거푸집에 용접하여 배근하고 콘크리트 타설시 측압에 의해 발생할 수 있는 거푸집의 배부름이나 비틀림 등의 변형에 저항할 수 있게 횡방향 보강재(stiffener)를 설치한다. 이때 설치되는 횡방향 보강재에 중공을 두어 콘크리트 타설작업을 용이하게 하였다. 마지막으로 그림 1.7(d)에 나타난 바와 같이 상부의 거푸집을 용접하여 설치하면 그림 1.7(e)와 같이 조립철근을 포함한 거푸집 제작이 완성된다.
- 제안된 개발기둥은 공장제작에 따른 대량생산이 가능하며 거푸집 및 동바리설치와 같은 가설공사시간이 생략할 수 있기 때문에 공기 단축 및 시공성 확보 측면에 유리하다. 일반적인 RC기둥과 개발기둥의 공정을 간략하게 비교하여 나타내면 그림 1.8과 같다. RC기둥의 경우 거푸집 설치를 위한 먹매김, 거푸집 제작 및 설치, 서포트 설치 및 해체와 거푸집 해체 등의 가설공사를 포함한 10단계의 공정이 필요한 반면, 개발기둥의 경우 이러한 가설공사를 생략할 수 있고, 철근배근까지 공장에서 수행되기 때문에 4단계의 공정만으로 시공성을 혁신적으로 향상시킬 수 있다.



(a) 하부 여철거푸집 설치

(b) 조립된 철근설치

(c) 횡방향 보강재(stiffener) 설치

(d) 상부 여철거푸집 설치

(e) 완성된 선조립 거푸집

그림 1.7 선조립 거푸집의 제작과정



<공정단계 비교>

자재반입계획	●	자재반입계획
자재반입	●	기동 반입, 양중, 설치
먹매김	●	-
거푸집 제작 설치	●	-
서포트 설치	●	-
철근배근	●	-
콘크리트 타설 및 양생	●	콘크리트 타설 및 양생
서포트 해체	●	-
거푸집 해체	●	-
자재정돈 및 반출	●	자재정돈 및 반출

철근콘크리트구조 10단계 4단계 철근 일체형 선조립 기동

그림 1.8 RC기동과 개발기동의 공정단계 비교

○ 산업부산물인 여철을 사용하여 경제성 및 친환경성 확보

- 산업부산물은 철강제조 공정 중 고로제강법이나 전기로제강법에 상관없이 건습식 집진장치가 있는 모든 공정에서 발생되며 매년 약 200만 톤이 발생된다. 철강업체에서는 그림 1.9에 나타난 것과 같이 산업부산물을 자원화 시키기 위한 노력을 지속적으로 기울이고 있다.
- 현재 산업부산물은 주로 발생업체에서 펠렛(pellet) 또는 단광(briquette)으로 제조되어 원료로서 재활용되고 있으나 철 회수 효율이 상대적으로 낮고 일부는 시멘트 원료 및 아스콘의 채움재료로 활용되거나 대부분 매립되고 있기 때문에 유용한 철원 자원과 부산물 처리비용을 낭비하고 있다. 철강업체에서는 산업부산물의 재사용률을 높이고 부산물 처리비를 줄이기 위해 노력하고 있으며, 지식경제부 기술표준원은 자원 절약 및 환경보호를 위해 “산업부산물을 적용한 직접환원철”에 대한 국가표준(KS D 4000)을 제정하여 자원 활성화 방안을 모색하고 있다. 이러한 요구는 이 연구의 개발 기술과 부합하는 것이기 때문에 개발기술은 기술적, 경제적 그리고 환경적인 측면에서 매우 우수하고 가치 있는 기술이라고 판단된다.



그림 1.9 부산물의 자원화 현황 (자료출처:포스코)

○ RC기둥으로 설계함으로써 현장적용 및 내화성능의 확보가 용이

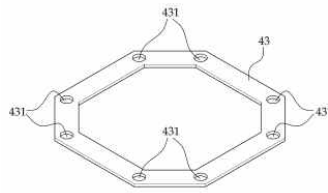
- 합성기둥으로 설계할 경우 추가적으로 고려해야하는 여러 가지 제한조건들이 있다. 매입형 합성기둥의 경우 강재코어의 단면적은 합성기둥 총 단면적의 1% 이상이 되어야 하며, 연속된 길이방향철근의 최소철근비를 0.4% 이상으로 제한해야 한다. 또한, 접합부에서 구조용 강재단면 또는 콘크리트의 응력집중을 피하기 위해 직접지압과 전단접합 또는 이 두 가지의 결합에 의한 하중전달이 요구된다.
- 충전형 합성기둥의 경우 강관의 단면적이 총 단면적의 1% 이상이 되어야하며, 각형강관과 원형강관을 구분하여 판폭두께비를 설계해야 한다. 또한, 외력이 각형단면 또는 충전콘크리트에 직접 가해지는 경우, 직접부착작용, 전단연결 또는 직접지압의 전달 기구 중 가장 큰 힘의 전달기구를 이용하여 강재단면으로부터 콘크리트 코어(core)로의 힘 전달이 이루어지게 해야 하며 이러한 힘의 전달기구들은 서로 중첩되지 않도록 설계해야 한다.
- 그러나, 개발기술의 경우 설계 단계에서 거푸집으로 사용되는 외부철판을 구조재로서 고려하지 않기 때문에 기존의 RC기둥과 동일한 구조시스템으로 적용이 가능하다. 한편, 표 1.2에 나타낸 건축물의 피난·방화구조의 기준에 관한규칙에 따르면 일반적으로 합성기둥이 많이 쓰이는 12층 또는 50m 이상의 일반시설, 주거시설 그리고 산업시설의 경우 기둥은 3시간의 내화성능을 확보해야 된다고 명시되어 있다. 충전형 합성기둥과 같이 구조용 강재가 노출된 합성보의 경우, 이와 같은 내화성능 확보를 위해 내화피복이 필요하게 된다. 그러나, 개발기둥은 RC기둥과 동일하게 일정두께 이상의 콘크리트 피복 내에 주요인장저항요소인 철근이 매입되어 있기 때문에 내화뿔침 혹은 내화페인트 등의 추가적인 내화피복 없이 내화성능을 확보할 수 있다.

표 1.2 내화구조의 성능기준

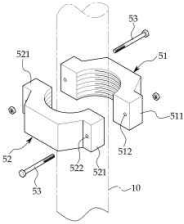
구성 부재 용 도			벽						보 · 기둥	바닥	지붕 틀
			외벽			내벽					
			내 력 벽	비내력		내 력 벽	비내력				
연소우려 가 있는 부분(가)	연소우려 가 없는 부분(나)	칸막이 벽 (다)		샤프트 실,구획 벽 (라)							
용도구분 (1)	용도규모(2) 층수/최고높이(m)										
일반시설	12/50	초과	3	1	0.5	3	2	2	3	2	1
		이하	2	1	0.5	2	1.5	1.5	2	2	0.5
	4/20 이하		1	1	0.5	1	1	1	1	1	0.5
주거시설	12/50	초과	2	1	0.5	2	2	2	3	2	1
		이하	2	1	0.5	2	1	1	2	2	0.5
	4/20 이하		1	1	0.5	1	1	1	1	1	0.5
산업시설	12/50	초과	2	1.5	0.5	2	1.5	1.5	3	2	1
		이하	2	1	0.5	2	1	1	2	2	0.5
	4/20 이하		1	1	0.5	1	1	1	1	1	0.5

○ 보-기둥 접합부의 단순화

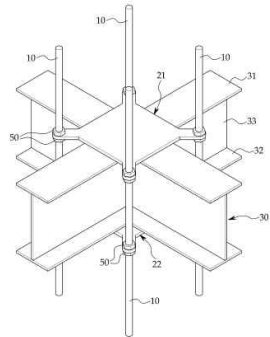
- 합성기둥은 주로 구조용 강재와 콘크리트의 결합으로 제작되는 경우가 많으며, 보-기둥 접합부의 경우 RC기둥이나 철골기둥에 비해 다소 복잡해지거나 별도의 공정이 추가되는 경우가 있다. 그러나, 이 과정을 통해 개발하고자하는 기둥이 RC보와 접합될 경우 일반적으로 사용되는 RC접합부를 그대로 적용할 수 있다. 또한, 철골보나 기존에 개발된 다양한 형태의 합성보와 접합될 경우에는 그림 1.10의 예에 나타난 바와 같이 본 기관에서 개발한 “다이하프램이 구비된 나사산 철근과 분할형 너트를 적용한 고성능 철근 선조립 기둥”을 활용하여 시공성을 확보할 수 있다. 그림 1.10(a)와 (b)는 다이하프램과 분할형 너트를 나타낸 것이며, 그림 1.10(c)와 (d)에는 판형 다이하프램과 선형 다이하프램이 선조립된 기둥과 접합된 형태를 나타내는 것으로서 안전하면서 효율적인 접합부의 시공이 가능한 기술이다. 또한, 이 과정을 통해 보다 효율적이고 경제적인 접합부 상세를 개발하고자 하였다.



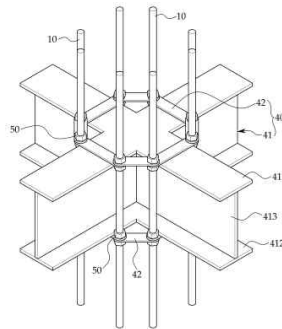
(a) 선형 다이아프램



(b) 분할형 너트



(c) 관형 다이아프램



(d) 선형 다이아프램

그림 1.10 다이아프램이 구비된 나사산 철근과
분할형 너트를 적용한 철근 선조립 기둥

○ 보강앵글을 이용한 상부기둥과 연속화 공법

- 일반적인 RC기둥의 경우 상부기둥과의 이음은 그림 1.11에 나타난 것과 같이 하부기둥의 축방향 철근에 상부기둥의 축방향 철근을 견고하게 결속시켜 자립시킨 후 비계와 동바리 등의 가설물을 설치하고 거푸집을 제작하여 타설하는 방식으로 이루어지며, 공정이 복잡하고 시공성이 저하되는 단점을 가지고 있다.
- 개발기술의 경우 거푸집의 보강앵글로 사용된 ㄷ형 앵글을 사용하여 그림 1.12에 나타난 것과 같이 볼트접합이 가능하게 구현하였다. 따라서, RC기둥의 연속화에 필요한 철근의 이음, 비계 그리고 동바리 설치와 같은 가설작업을 생략할 수 있으며, 공기단축과 시공성 극대화가 가능하다.

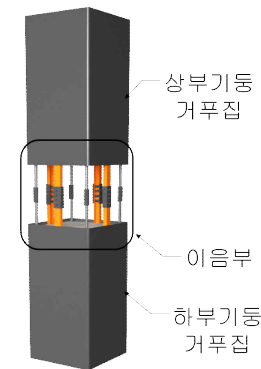


(a) 떠철근 기둥의 이음

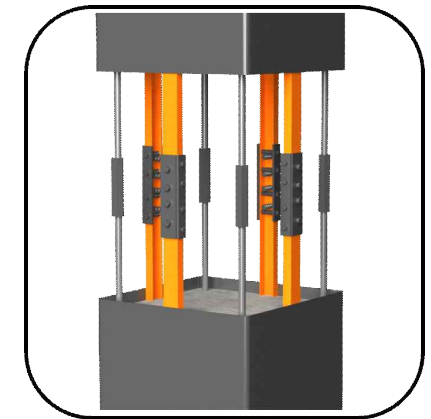


(b) 나선철근 기둥의 이음

그림 1.11 RC기둥의 이음



(a) 전체적인 모습



(b) 이음부 상세

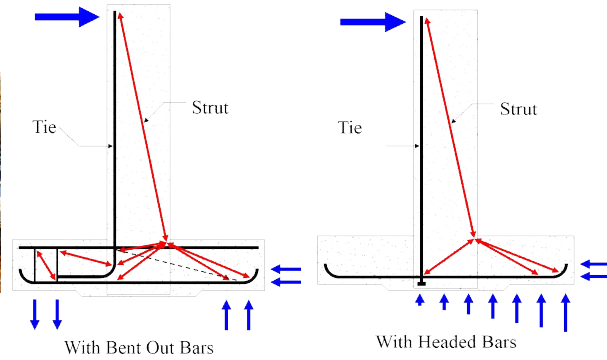
그림 1.12 보강앵글을 이용한 개발기둥의 이음

○ 확대머리 철근(headed bar)을 적용한 종방향 철근의 정착의 단순화

- 개발기둥의 종방향 보강근에는 그림 1.13(a)에 나타난 것과 같이 나선철근에 확대머리 철물을 설치한 확대머리 철근을 적용함으로써 RC기둥의 기초판과 지붕층에서 시공성이 저하되는 복잡한 철근 배근을 완화시킬 수 있도록 하였다. 이러한 확대머리 철근을 사용함으로써 시공성이 향상되는 것뿐만 아니라 절곡된 철근이 없기 때문에 제작 및 운반도 용이하다.
- 그림 1.13(b)에는 일반적인 절곡 철근으로 정착된 기둥에서 발생하는 힘의 전달양상과 확대머리 철근으로 정착된 기둥에서의 힘의 전달양상을 도식화하여 나타내었다. 확대머리 철근으로 정착된 기둥의 힘 전달양상이 절곡 철근으로 정착된 기둥에 비해 단순하고 명확한 것을 확인할 수 있다.



(a) 나선철근을 적용한
확대머리 철근



(b) 힘의 전달양상 비교
(Strut and Tie Model)

그림 1.13 확대머리 철근을 이용한 정착

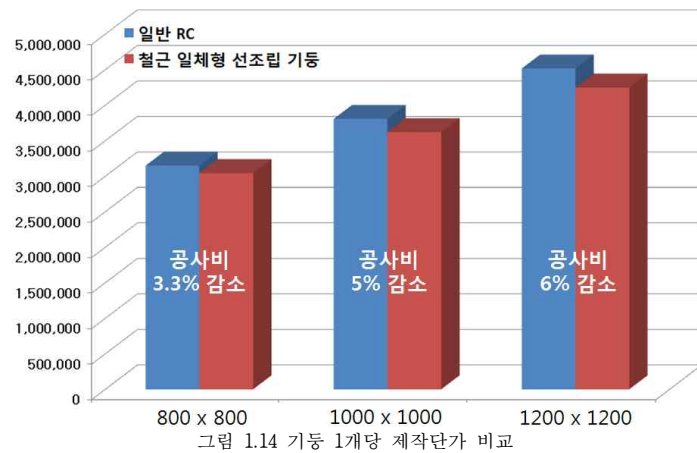
(2) 기술의 독창성

표 1.3 기존기술과 신청기술의 비교

구분	기존 기술명	기술내용	기존기술 도면	신청기술 도면
1	RC기둥	- 작용하는 전단력은 횡철근(strup)에 의해서 저항되며, 띠철근 기둥(tied column)과 나선철근기둥(spiral column)으로 구분할 수 있음. - RC기둥은 철근배근 및 거푸집설치와 같이 현장에서 수행되는 작업이 많기 때문에 시공성이 저하되고 공기가 길어지는 단점이 있음. 그럼에도 불구하고 가격이 저렴하기 때문에 대부분의 중소규모의 현장에서 많이 사용되고 있음.		
2	매입형 합성기둥	- SRC기둥은 기존의 RC기둥보다 높은 휨강도와 연성도 확보를 가능케 함. - 기둥의 휨저항 성능을 높이기 위해서는 강재를 최대한 기둥단면의 모서리에 배치하는 것이 효과적이며, 공기단축을 위해서는 프리캐브(prefab)화를 통해 현장에서의 작업을 최소화하는 것이 필요함.		
3	충전형 합성기둥	- 폐단면 부재로써 휨모멘트를 부담하는 강관이 외측에 있고, 축력을 부담하는 콘크리트가 내측에 있어 강관이 내부 콘크리트를 구속하는 한편 콘크리트가 강관의 국부좌굴을 방지하는 효과도 있음. 이로 인해 강도와 에너지 흡수능력이 타 구조시스템에 비해 우수함. - 고가의 제작비용이 요구되며, 구조용 강재가 노출되어 있어 내화피복이 필요하다는 단점이 있음.		
신청기술의 독창성				
○ 철근과 거푸집을 공장에서 선조립함으로써 현장작업의 최소화 ○ 산업부산물인 여철을 거푸집으로 사용하여 경제성 및 친환경성 확보 ○ RC기둥으로 설계함으로써 현장적용 및 내화성능의 확보가 용이 ○ 보-기둥 접합부의 단순화하여 시공성 및 안정성 확보 ○ 보강앵글을 이용한 상부기둥과 연속화 공법으로 시공성 확보 및 공기절감 ○ 확대머리 철근(headed bar)을 적용한 종방향 철근의 간략화				

(3) 기술의 활용성

- 제안된 선조립 거푸집 콘크리트 기둥은 층고가 작은 소규모 일반 건축물이나 기둥 단면이 작은 경우에는 기존 철근콘크리트에 비해 경제성이 떨어지는 단점이 있다. 그러나 최근 건설시장 노무비의 비약적인 증가로 인하여 거푸집 설치비용이 크게 증가하고 있으며, 특히, 5m 이상의 길이가 긴 RC기둥의 시공을 위하여 가설 거푸집이 사용되는 경우에는 거푸집의 설치에 소요되는 노무비를 포함한 가설비용이 크게 증가하여 경제성이 현저히 떨어진다. 기둥공사는 주공정선(critical path)에 해당하며 전체 골조공사기간을 결정하기 때문에 가설공사를 최소화하여 공기를 절감하는 것이 금융비용 및 현장 인건비를 줄일 수 있는 중요한 방법이 될 수 있다.
- 이 연구를 통해 개발하고자 하는 “산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥”은 철근배근과 거푸집 제작작업을 공장에서 수행하기 때문에 거푸집, 철근배근 및 비계설치 등의 가설공사가 생략되어 시공성 향상 및 공기절감 효과를 기대할 수 있다. 그림 1.14는 기둥의 길이가 8m인 경우 단면적에 따른 기둥 1개의 단가를 RC기둥과 비교하여 나타낸 것이다. 800mm x 800mm에서 1200mm x 1200mm로 기둥의 단면적이 증가함에 따라서 절감되는 비용이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 기둥의 높이가 높아질수록 더욱 두드러지게 나타난다. 이러한 제작비 절감이 가능한 것은 산업부산물인 여철을 이용하여 영구 거푸집을 제작하고, 거푸집 및 철근조립 공정이 공장에서 미리 이루어지기 때문이다.
- 거푸집을 설계단계에서 구조재료로 고려하지 않기 때문에 기존의 RC기둥과 동일하게 설계 및 시공이 가능하고 특히 개발기둥이 RC보와 접합할 경우 일반적으로 사용되는 RC접합부를 그대로 적용할 수 있다. 또한, 철골보나 기존에 개발된 다양한 형태의 합성보와의 접합은 본 연구기관에서 개발한 기술인 “다이하프램이 구비된 나사산 철근과 분할형 너트를 적용한 철근 선조립 기둥”을 활용하여 시공할 수 있다.



3. 연구개발 범위

이 연구에서는 노동집약적인 기존의 철근콘크리트 공법이 내재하고 있는 문제점 중 거푸집 제작공정 및 비용을 개선할 수 있는 산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥을 개발하는 것을 주요목적으로 하였으며, 개발기둥의 Mock-up 부재 제작, 거푸집의 측압에 대한 성능 확보, 기둥의 중심 압축성능 및 편심 압축성능 확보, 휨력에 대한 구조성능 확보, 기둥-보 접합부의 구조성능 검증, 철근의 이음성능 확보, 경제성 및 시공성 분석 등을 연구범위로 계획하였다.

연구 범위	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
개발기둥의 실제제작	- 실험적 접근방법	- Mock-up실험을 통해서 개발 기둥의 제작 시 발생할 수 있는 문제점을 파악하였으며, 이에 대한 개선방안을 도출하여 수정된 상세에 따라 개발기둥을 제작함.
거푸집의 측압에 대한 성능 확보	- 개발기술의 목표설정 - 해석적 접근방법 - 실험적 접근방법	- 해석과 실험에 앞서 기존의 법규나 연구들을 분석하여 거푸집의 목표 측압저항성능을 0.2 MPa로 설정함. - 상용비선형유한요소해석 프로그램 사용하여 앵글의 배치, 용접두께 및 길이 등을 변수로 다양한 해석을 수행함. - 해석한 결과를 바탕으로 목표 강도를 만족하면서 물량을 절감할 수 있는 최적의 기둥의 형태를 선정하고 실물크기의 실험을 수행하여 측압성능 확보함.

기동의 중심압축성능 확보	- 개발기술의 목표설정 - 해석적 접근방법 - 실험적 접근방법	- 기존의 법규나 연구들을 분석하여 개발기동의 목표 중심압축성능을 기존 RC기동과 동일한 수준으로 설정함. - 상용비선형유한요소해석 프로그램을 사용하여 앵글의 배치, 용접두께 및 길이 등을 변수로 다양한 해석을 수행함. - 해석한 결과를 바탕으로 목표강도를 만족하면서 물량을 절감할 수 있는 최적의 기동의 형태를 선정하고 실물크기의 실험을 수행하여 중심압축성능을 확보함.
기동의 편심압축성능 확보	- 개발기술의 목표설정 - 해석적 접근방법 - 실험적 접근방법	- 축력과 모멘트가 동시에 작용하는 기동의 구조성능 검증을 위하여 실험적 연구와 해석적 연구를 병행함. 개발기동의 목표 구조성능을 기존의 CFT기동과 RC기동과 동일한 수준으로 설정함. - 상용비선형유한요소해석 프로그램을 사용하여 앵글의 배치, 용접두께 및 길이 등을 변수로 다양한 해석을 수행함. 또한, 개발기동에 적합한 P-M상관곡선을 작성하였으며, 2차모멘트를 고려할 수 있는 방법도 고안하였음. - 해석적 연구를 바탕으로 편심의 크기를 주요변수로 실험적 연구를 수행하여 구조성능을 검증하였음.

기동의 휨력에 대한 구조성능 확보	- 개발기술의 목표설정 - 해석적 접근방법 - 실험적 접근방법	- 축력과 휨력이 동시에 작용하는 기동의 구조성능 검증을 위하여 실험적 연구와 해석적 연구를 병행함. 개발기동의 목표 구조성능을 기존의 CFT기동과 RC기동과 동일한 수준으로 설정함. - 유한요소해석 프로그램을 사용하여 다양한 해석을 수행함. 개발된 P-M상관곡선을 이용하여 실험수행 전에 부재의 적절한 축력비와 강도를 산정함. - 해석적 연구를 바탕으로 실험의 주요변수를 설정하여 기존공법의 기동들과 구조성능을 비교하여 검증하였음.
기동-보 접합부의 구조성능 검증	- 개발기술의 목표설정 - 해석적 접근방법 - 실험적 접근방법	- 개발 기동의 내진성능을 검증하기 위하여 기동-보 접합부에 대한 해석적 연구와 실험적 연구를 수행함. - 유한요소해석프로그램을 사용하여 수치해석을 수행하였으며, 접합부에서 하중전달시 발생하는 응력집중과 과도한 변형에 대한 검토를 수행함. - 실제크기의 기동-보 접합부 실험체 2개를 제작하여 반복하중 실험을 수행하였으며, 최대하중 및 변위비 등을 검토하여 구조성능을 분석함.

철근의 이음성능 확보	- 개발기술의 목표설정	- 기존의 법규 및 연구결과들을 분석하여 철근 이음부 목표 인장강도를 1.25fy로 설정함. - 상용비선형유한요소해석 프로그램을 사용하여 용접길이, 용접 두께 및 철근의 배치 등을 변수로 다양한 이음방법에 대해서 해석을 수행함. - 해석한 결과를 바탕으로 목표 강도를 만족하면서 시공성이 우수한 변수를 선정하여 실물크기의 실험을 수행하여 개발 이음 방법에 대한 구조성능을 검증함.
	- 해석적 접근방법	
	- 실험적 접근방법	
경제성 분석	- 외부기관에 의뢰	- 객관성 확보를 위해 외부기관인 “동양경제정보연구소”에 의뢰하여 개발기술의 경제성 검토를 수행함.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

(1) 관련 분야의 국내외 연구동향 및 학술적 성과

가) 국가연구개발사업 유사연구 검토

(단위 : 억원)

부처명	사업명	과제명	예산	비 고
중소기업청	기술혁신개발사업	안전성 향상 및 현장 공정 최소화를 위한 거푸집 선조립 기동공법	2.6	
중소기업청	산학연협력기술개발	공작제작 선조립 철근 및 SRC 공법을 위한 접합부 개발	2.5	
중소기업청	산학연협력기술개발	공장제작 선조립 철근 및 SRC 공법을 위한 접합부 개발	1.2	

- 기존에 수행되었거나 지금 수행중인 국가 R&D과제들에서 연구된 합성기둥들은 이 연구를 통해 개발하고자하는 RC기둥인 “산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥”과는 여러 가지 측면에서 차이가 있다. 즉, 기술적인 측면으로는 개발 기둥의 제작방법, 설계방법, 해석방법 및 시공방법 등에서 매우 큰 차이가 있고, 여철을 거푸집으로 사용하여 설계 및 시공하기 때문에 친환경적인 특징을 갖는다는 점 등에서 기 수행된 과제들과는 확연한 차별성이 존재한다.

나) 사업화과제의 차별화 방안

- 철근과 거푸집을 공장에서 선조립함으로써 현장작업의 최소화
- 산업부산물인 여철을 거푸집으로 사용하여 경제성 및 친환경성 확보
- RC기둥으로 설계함으로써 현장적용 및 내화성능의 확보가 용이
- 보-기둥 접합부의 단순화하여 시공성 및 안정성 확보
- 보강앵글을 이용한 상부기둥과 연속화 공법으로 시공성 확보 및 공기절감
- 확대머리 철근(headed bar)을 적용한 종방향 철근의 간략화

(2) 국내외 관련 기술 특허 동향

- 해외에서는 충전형 합성기둥에 스티프너를 적극 활용하고 있다. 일반적인 스티프너와 더불어 그림 2.1(b)에 나타난 것과 같은 성첨모양(battlement-shaped), 그림 2.1(c)에 나타난 바와 같이 모서리에 용접되는 사선성첨모양(oblique battlement-shaped), 그림 2.1(d)에 나타난 것과 같은 원형스티럽(circular-stirrup), 그림 2.1(e)에 나타난 것과 같이 기둥의 마주보는 면에 용접되는 인장 스트립(tensile strip) 등 여러 가지 종류의 보강방법이 고안되었다. 충전형 합성기둥에 스티프너를 적용하면 일반 CFT기둥보다 유효면적을 크게 할 수 있어서 기둥의 강도 및 콘크리트에 대한 구속효과를 증진시킬 수 있으며, 취성파괴보다는 연성파괴를 유도할 수 있게 된다. 또한 그림 2.2에 보이는 바와 같이 스티프너가 축방향으로 배열되어 기둥의 국부좌굴 발생시점을 늦추거나 방지하기 때문에 구조적으로 유리하다.

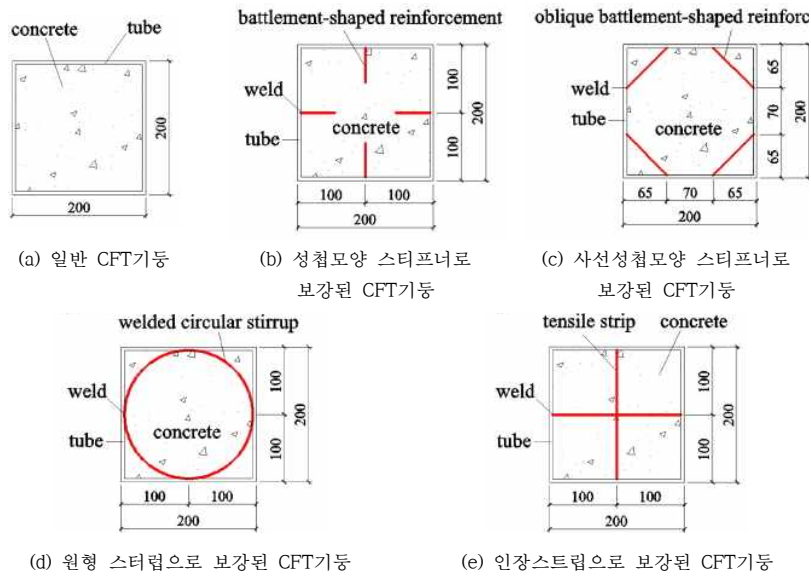


그림 2.1 여러 가지 스티프너로 보강된 CFT 기둥의 단면

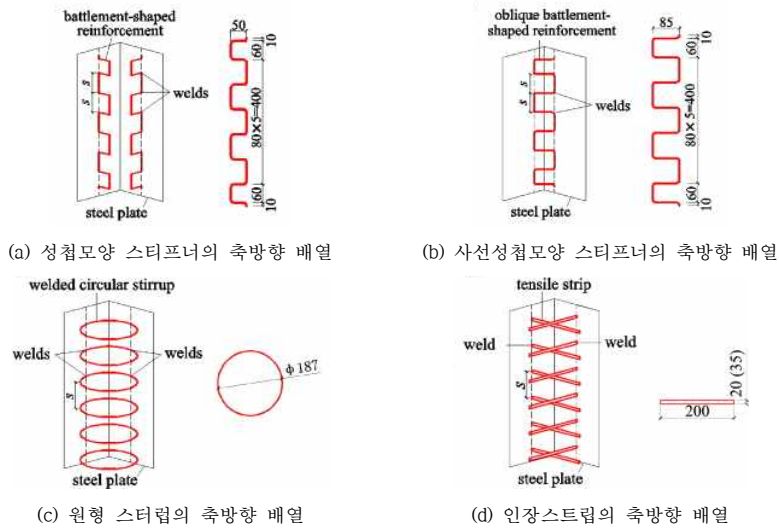


그림 2.2 인접한 두 판 사이에 용접된 스티프너의 축방향 배열

- 해외에서는 충전형 합성기둥의 강관에 일반 강재가 아닌 스테인리스 스틸(stainless steel) 등의 재료를 활용한다. 스테인리스 스틸을 사용하는 경우 일반 탄소 강재를 사용했을 때보다 연성이 증가하여 연성파괴를 유도할 수 있다는 장점이 있다. 또한 스테인리스 스틸은 일반 강재에 비해 화재에 대한 저항 성능이 매우 뛰어나 같은 온도에서도 훨씬 더 큰 하중을 지탱할 수 있다.
- 국내에서는 그림 2.3에 나타난 것과 같이 중공이 형성된 다각형 철판플레이트와 철근과 콘크리트로 구성된 기술이 연구되었다. 철판플레이트는 거푸집역할을 함과 동시에 기둥 시공 후 전단력에 저항하고, 철근과 콘크리트가 축력 및 모멘트에 저항하는 것이 특징으로 철판플레이트 양 옆으로 보 브래킷이 더 설치되며, 철판플레이트와 보 브래킷의 상부 플랜지와 동일 레벨로 설치된다. 보 브래킷에 보 철골이 연결된 후 콘크리트를 타설할 때 철판플레이트 내부에 별도의 다이어프램이 설치되지 않고 슬래브 콘크리트가 보 브래킷과 철판플레이트 상단 사이의 공간으로 동시에 타설된다. 그러나, 콘크리트 타설시 시공성이 저하되며, 많은 용접작업으로 인한 경제성 저하와 함께 구조용 강재가 노출되기 때문에 내화성능을 확보하기 위한 추가공정이 요구된다.

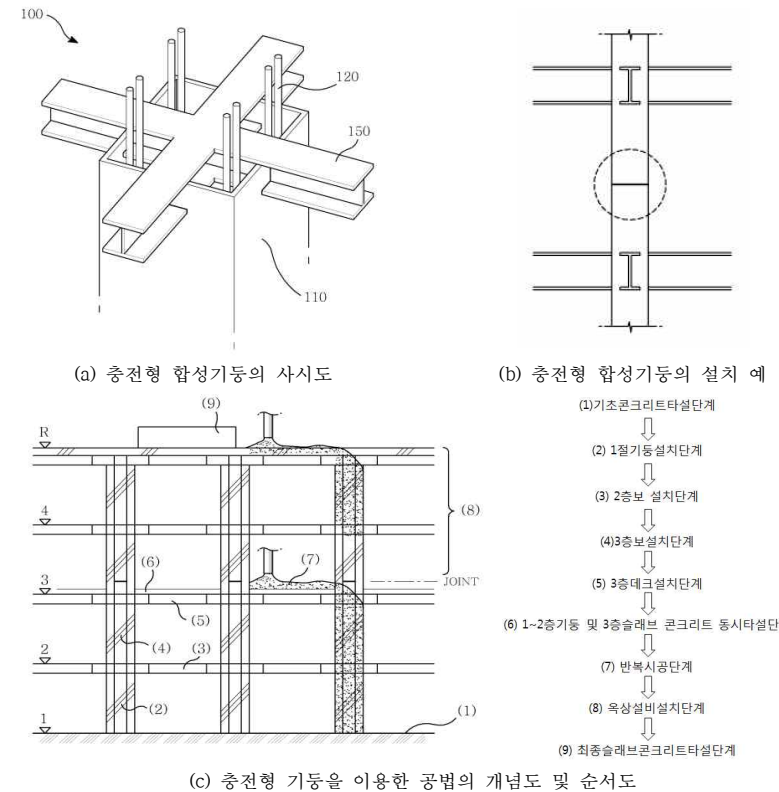
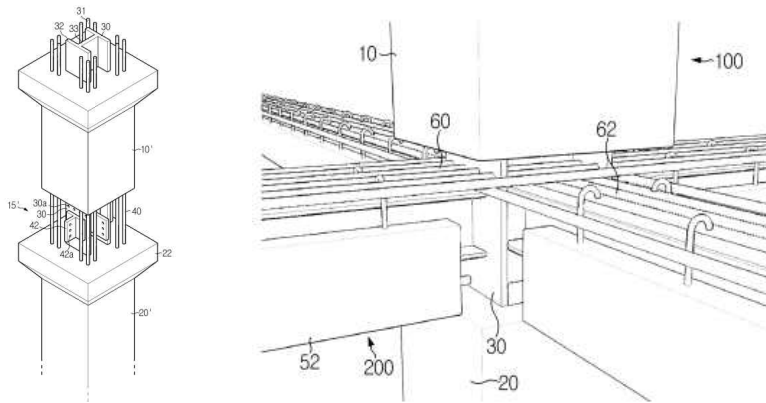


그림 2.3 개량형 세미(semi) CFT기둥

○ 그림 2.4에 나타난 바와 같이 매입형 복합기둥은 노출부(접합부)를 사이에 두고 길이 방향으로 연장되어 있는 상부 및 하부 콘크리트 기둥부로 이루어져 있으며, 노출부는 상부콘크리트와 하부콘크리트에 결합된 H형강으로 구성된다. 노출부에 있는 H형강에는 슬래브 철근이 통과하도록 복수개의 관통공이 형성된다. 슬래브용 철근이 기둥을 관통하여 연속적으로 연장 설치될 수 있도록 함으로써 시공이 용이하며, 구조적 측면에서도 부재강도에 대한 안정성과 신뢰성을 확보할 수 있다. 매입형 합성기둥에서 요구되는 거푸집설치과정을 생략하고 미리 제작한 부재를 현장에서 설치함으로 단점을 보완하고자 하였지만, 그 과정에서 부재가 과도하게 무거워져 길이가 긴 기둥의 경우 분절하여 양중 해야 하는 문제가 발생할 수 있다.

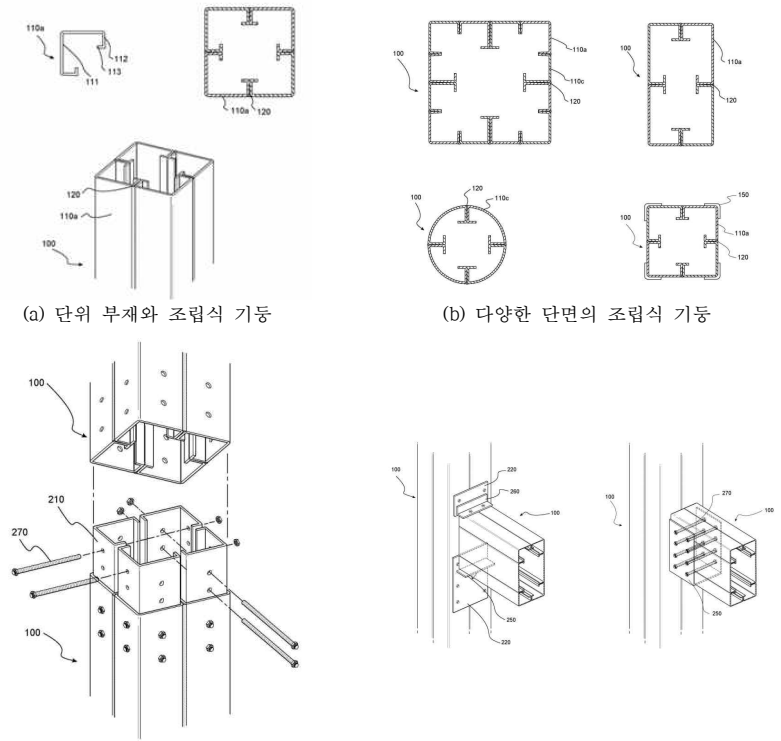


(a) 매입형 기둥의 구성

(b) 기둥과 보의 접합

그림 2.4 콘크리트 복합기둥

○ 그림 2.5에 나타난 합성기둥은 얇은 철판을 절곡한 단위부재를 이용함으로써 종래의 폐쇄형 철판부재 대비 경제적인 제작이 가능하고, 얇은 단면을 가지는 철판으로 제작 되면서도 큰 좌굴내력을 발휘하며, 충전 기둥으로 사용하는 경우 콘크리트의 구속력을 증대시킬 수 있다. 다수의 단위부재들을 조립하여 내부가 빈 폐쇄형의 단면을 갖도록 완성되는 원형 또는 각형 튜브 형상의 철판부재이며, 단위부재는 튜브의 단면일부와 일치하고, 튜브내부를 향해 절곡된 절곡부를 포함하여 구성된다. 철판부재는 그 자체로 거푸집 역할을 하게 되지만, 화재가 발생하였을 때, 절곡된 철판으로 인해 내부로의 열전달이 과속화되어 부재가 쉽게 손상될 수 있기 때문에 내화성능을 확보하는데 어려움이 있다. 또한, 보-기둥 접합부에서 추가적인 공정이 필요하기 때문에 시공성이 저하될 우려가 있다.



(a) 단위 부재와 조립식 기둥

(b) 다양한 단면의 조립식 기둥

(c) 상부 기둥과의 접합방법

(d) 기둥과 보의 접합방법

그림 2.5 절곡성형 철판을 이용한 조립식 폐쇄형 철판부재

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

이 연구에서는 노동집약적인 기존의 철근콘크리트 공법이 내재하고 있는 문제점 중 거푸집 제작공정 및 비용을 개선할 수 있는 산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥을 개발하는 것을 주요목적으로 하였으며, 개발기둥의 Mock-up 부재 제작, 거푸집의 측압에 대한 성능 확보, 기둥의 중심 압축성능 및 편심 압축성능 확보, 횡력에 대한 구조성능 확보, 기둥-보 접합부의 구조성능 검증, 철근의 이음성능 확보, 경제성 및 시공성 분석 등을 수행하였다. 특히, 정량적인 성과로는 특허 등록 2 건, 논문(SCIE급) 1 건, 논문(국내학술) 1 건, 기술기사 1 건, 학술발표대회 1 건, 설계·시공지침서 1 건, 현장적용 3 건, 시작품제작 5 건, 시작품제작(Mock-up) 1 건, 제작결과보고서 1 건 등을 달성하였으며, 녹색기술인증 및 건설신기술인증을 추진하고 있다.

(1) 개발부재의 구조성능 분석

가) 콘크리트 측압에 대한 저항성능 검증

- 콘크리트 타설시 발생하는 측압에 대한 저항성능을 검증하기 위해 유한요소해석프로그램을 사용하여 해석적 연구를 진행하였다. 콘크리트표준시방서를 참조하여 아래와 같이 거푸집에 작용하는 측압(p)을 산정하였다.

$$p = WH \quad (3.1)$$

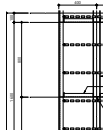
여기서, W 와 H 는 각각 생콘크리트의 단위중량(kN/m^3)과 콘크리트의 타설 높이(m)이다. 개발기둥의 적용이 예상되는 층고는 8 m로 설정하였으며, 이 때 산정된 측압은 약 0.19 MPa로 산정되었다. 산정된 측압에 50%의 여유율을 적용하여 목표 측압을 0.30 MPa로 설정하고 이 연구를 수행하였다.

- 거푸집의 목표 평탄성은 콘크리트표준시방서 3.7.1 일반사항을 참조하였으며, 내용은 표 3.1에 정리된 바와 같다. 개발기둥의 거푸집은 마무리 두께 7 mm 이하 또는 양호한 평탄함이 필요한 경우로 가정하여 3 m당 10 mm 이하의 평탄성을 목표로 해석을 진행하였다.

표 3.1 콘크리트 마무리의 평탄성 표준 값

콘크리트 면의 마무리	평탄성	참고	
		기둥, 벽의 경우	바닥의 경우
마무리 두께 7 mm 이상 또는 바탕의 영향을 많이 받지 않는 마무리의 경우	1 m당 10 mm 이하	바름 바탕 띠장 바탕	바름 바탕 이중마감 바탕
마무리 두께 7 mm 이하 또는 양호한 평탄함이 필요한 경우	3 m당 10 mm 이하	뽀칠 바탕 타일압착 바탕	타일 바탕 용단 깔기 바탕 방수 바탕
제물치장 마무리 또는 마무리 두께가 얇은 경우	7 m당 10 mm 이하	제물치장 콘크리트 도장 바탕 천붙임 바탕	수지 바름 바탕 내마모 마감 바탕 석손 마감 마무리

- 이 연구에서는 상용유한요소해석프로그램을 사용하여 그림 3.1과 같이 개발기둥을 모델링하였다. 그림 3.1(a)에 나타난 것과 같이 전체 8 m의 높이의 기둥으로서 길이방향으로 대칭이고, 단면도 좌우로 대칭이기 때문에 그림 3.2(b)와 같이 부재를 1/8만 모델링하여 해석시간을 줄이고 수렴도를 높였다. 수압은 내부에서 밖으로 밀어내는 압력(pressure)로 구현하였고, 모든 대칭면에는 대칭(symmetric)으로 지점조건을 부여하였다. 주요 해석변수는 횡방향 앵글의 간격과 외부 철판의 두께로 앵글의 간격은 300 mm, 400 mm 500 mm, 철판의 두께는 4.5 mm와 6 mm로 설정하여 해석을 수행하였다.
- 거푸집 철판의 두께가 6 mm인 경우에 대하여 앵글의 간격에 따른 변형을 그림 3.2(a)에 나타냈다. 앵글의 간격이 400 mm에서 600 mm로 커짐에 따라 동일 압력에서 변형이 약 3배까지 커지는 것을 확인하였다. 그러나, 목표 측압인 0.3 MPa에서의 변형이 7.5 mm로서 목표평탄도인 10 mm를 만족하는 것으로 나타났다. 그림 3.2(b)에는 600 mm의 동일한 앵글 간격에서 철판의 두께를 4.5 mm와 6.0 mm로 설정한 해석결과를 비교한 것이다. 동일 압력이 작용할 때 거의 동일한 변형이 발생하였으며, 철판의 두께보다는 앵글의 간격이 측압에 따른 변형에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.



y-symmetric

Inner pressure

Welding → Tie connection

Total Length : 8m

x-symmetric

z-symmetric

z-symmetric

Z

X

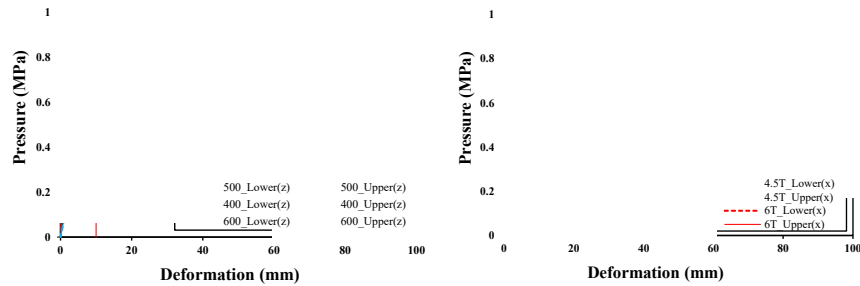
U1,U2,U3 = 0

x-symmetric

(a) 개발기둥의 단면도

(b) 1/8 모델링 모습

그림 3.1 개발기둥과 모델링 모습



(a) 앵글간격에 따른 변형비교
(철판두께 6 mm)

(b) 판두께에 따른 변형비교
(앵글간격 @600)

그림 3.2 축압해석 결과

○ 표 3.2에 나타난 바와 같이 해석결과의 주요변수와 단면의 크기를 변수로 한 3개의 실험체를 제작하여 수압실험을 수행하였다. 모든 기둥의 높이는 2600 mm이고 단면이 $350 \times 350 \text{ mm}^2$ 인 SF-350실험체는 철판의 두께가 3.5 mm이며, 나머지 SF-600실험체와 SF-800실험체의 철판두께는 4.5 mm로 제작하였다. 실험체의 자세한 형상은 그림 3.3~그림 3.5에 나타내었으며, 그림 3.6은 실험체 제작모습을 나타낸 것이다.

표 3.2 수압실험체 종류

실험체	길이 (mm)	폭 (mm)	철판두께 (mm)	앵글 (EA)	비고
SF-350	2600	350	3.2	1	선조립기둥
SF-600		600	4.5	1	
SF-800		800	4.5	2	

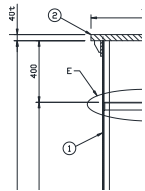
(b) A-A' 단면도



(a) 입면도

(b) B-B' 단면도

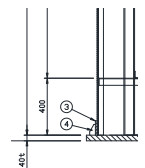
그림 3.3 수압실험체 (350×350단면)



(b) A-A' 단면도

(a) 입면도

(b) B-B' 단면도
그림 3.4 수압실험체 (600×600단면)



(a) 입면도

(b) B-B' 단면도
그림 3.5 수압실험체 (800×800단면)



그림 3.6 실험체 제작모습

○ 이 연구에서는 그림 3.7과 같이 콘크리트 타설에 의해 거푸집에 발생하는 측압을 구현하기 위하여 체적탄성계수가 작은 수압을 이용하여 측압에 대한 저항성능을 검토하였다. 시험장비의 구성은 유체를 가압하기 위한 유압펌프, 역류방지를 위한 체크밸브, 내부의 수압측정을 위한 유압측정기, 유압조절을 위한 유압조절밸브로 구성된다.

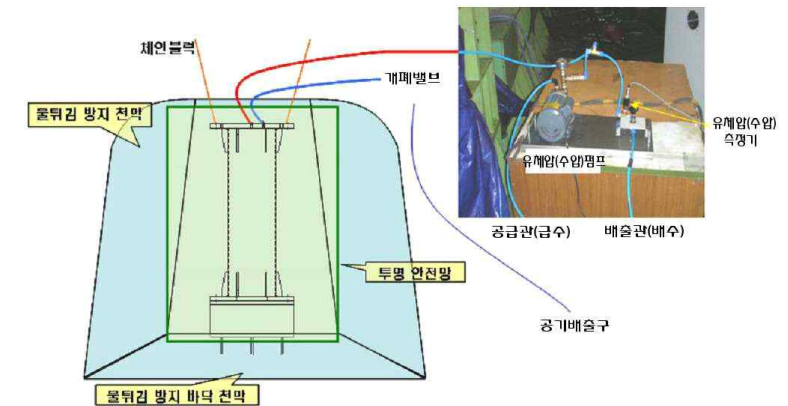


그림 3.7 수압실험 계획도

○ 체적팽창계수가 큰 공기가 남아있을 경우 거푸집이 폭발할 위험이 있기 때문에 내부에 유체를 완전히 채우고 내부의 공기를 완전히 배출시킨 이후 가압펌프를 작동시켜 0.1 MPa/min의 속도로 수압을 증가시켰으며, 그림 3.8에 나타난 것과 같이 기둥의 표면에 변위계(LVDT)와 변형률게이지(strain gage)를 설치하여 변형과 변형률을 측정하였다.



그림 3.8 수압 실험수행 모습

○ 그림 3.9에는 수압에 따라 기둥에서 발생하는 최대변형을 그래프로 나타낸 것이다. 3개의 실험체 모두 0.2 MPa에서 목표평탄성인 10 mm 보다 작은 변형이 발생한 것을 확인할 수 있다. 다만, SF-350실험체에서는 SF-600실험체와 SF-800실험체에 비해 다소 큰 변형이 발생하였는데, 이는 SF-350실험체의 단면이 너무 작기 때문에 앵글을 용접하는 작업이 매우 어려워서 용접불량으로 인한 것이다. 개발기둥의 목표대상인 길이가 길고 단면이 큰 기둥에서는 용접작업이 용이하기 때문에 콘크리트 측압에 대한 저항성능을 확보하는 데에는 어려움이 없을 것으로 판단된다.

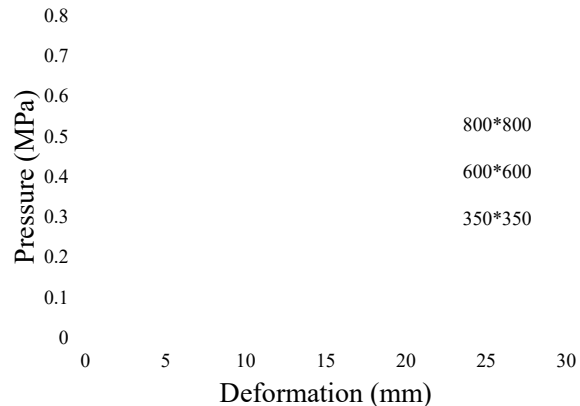


그림 3.9 수압에 따른 변형

나) 중심압축력이 작용하는 선조립기둥의 저항성능 검증

○ 이 연구에서는 제안공법으로 제작된 선조립기둥의 구조성능을 평가하기 위하여 9개의 중심압축 실험체, 즉, 일반적인 RC기둥인 R시리즈 실험체(R series specimens) 2개, 선조립기둥(Prefabricated permanent steel form reinforced concrete column, PPSFRC 기둥)인 P시리즈 실험체(P series specimens) 6개, 철근이 배치되지 않은 충전강관 합성기둥(concrete-filled tube column, CFT 기둥) 1개를 제작하여 실험하였다. 표 3.3에 나타낸 바와 같이 기둥의 종류, 콘크리트 압축강도 및 사용된 철근의 강도를 주요 실험변수로 설정하였으며, 특히 P21-S600G 와 P30-S400G 실험체에는 철판거푸집과 하중전달 프레임 사이에 10 mm 길이의 갭(gap)을 두어 고하중에서 강관의 국부좌굴을 방지하고자 하였다.

표 3.3 중심압축실험체의 종류

No.	Specimen	Compressive strength of concrete (MPa)	Steel Form	Yield strength of reinforcing bars (MPa)	Gap
1	R21-S600	21	X	600	X
2	P21-S600	21	O	600	X
3	P21-S400	21	O	400	X
4	P21-S600G	21	O	600	O
5	R30-S600	30	X	600	X
6	P30-S600	30	O	600	X
7	P30-S400	30	O	400	X
8	P30-S400G	30	O	600	O
9	CFT	21	X	-	X

○ 그림 3.10~12에 나타낸 바와 같이, 실험체들은 길이가 1,480 mm이고, 단면의 폭과 높이 (B and H) 는 모두 350 mm 이다. 실험체의 상하부에는 응력집중을 최소화 하고 기둥의 전단면에 등분포 하중을 가력하기 위해 두께 40 mm의 철판으로 보강을 하였고, 기둥 상하부의 4면에는 두께와 길이가 각각 12 mm 및 75 mm 인 보강재를 2개씩 총 8개를 설치하여 하중집중에 의한 국부적인 좌굴을 방지하였다. 기둥 내부 콘크리트 타설을 위하여 상부철판의 중심에는 직경 150 mm의 타설구멍을 두었으며, 기둥의 각 모서리에는 직경 30 mm 의 공기구멍 4개를 설치하였다. 또한, P계열 실험체와 CFT실험체의 경우에는 실험체의 최하단에서 300 mm떨어진 곳에 20 mm 직경을 갖는 구멍을 두어 콘크리트 타설시 콘크리트 충진을 확인할 수 있도록 하였다. R계열과 P계열 실험체에는 25.4 mm 직경의 나사마디철근 4개를 길이방향으로 배치하였으며, 9.5 mm 직경의 띠철근을 150 mm 간격으로 배근하였다.

(b) A-A' 단면도

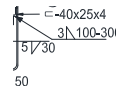


(a) 입면도

(b) B-B' 단면도

그림 3.10 R계열 실험체

(b) A-A' 단면도



(a) 입면도

(b) B-B' 단면도

그림 3.11 P계열 실험체

(b) A-A' 단면도

(a) 입면도

(b) B-B' 단면도

그림 3.12 CFT실험체

○ 표 3.4에는 American Institute of Steel Construction (AISC), Eurocode4 and Korean Building Code (KBC)에서 규정하고 있는 CFT기둥과 관련된 현행 설계기준들을 요약하여 나타내었다. AISC와 KBC에서는 합성기둥에 사용되는 강재의 최소단면적 ($A_{s,min}$)과 최대 판폭두께비($(B \text{ or } D)/t_w$)의 규정이 점차 완화되는 방향으로 개정되었으며, 재료강도의 (f'_c 과 $F_{y,max}$)의 적용범위도 확장되고 있다. 이 연구에서 제작된 P계열 실험체들과 CFT실험체는 각각 3.2 mm와 7.0 mm 강판을 사용하였으며, 강재비 (A_s/A_g)는 각각 3.6 %와 7.0 %로 표 3.4에서 나타낸 설계기준에서 규정하고 있는 최소 강재비를 만족하였다. 판폭두께비(B/t_w)는 CFT실험체의 경우 50으로서, KBC, AISC와 Eurocode4의 규정을 만족하도록 설계된 반면에, P계열 실험체들의 판폭두께비는 109 로서 현행설계기준에 부합하지 않는다. 이는 제안된 공법의 목적이 얇은 박판을 영구거푸집으로 사용하되 구조재료로 활용하지 않는 것이므로 의도적으로 판폭두께비를 크게 제작했기 때문이다. P계열 실험체의 강판에는 콘크리트 측압에 의한 변형을 방지하기 위한 목적으로 4면에 길이방향으로 C-40×25×4 채널을 300 mm 간격으로 배치하였으며, 수직방향으로는 L-25×25×3.2 앵글을 600 mm간격으로 배치하여 길이방향 채널에 용접 접합하였다.

○ 실험체에 사용된 콘크리트 배합표는 표 3.5에 나타낸 바와 같으며, 설계압축강도는 21 MPa과 30 MPa이고, 실험결과 각각 26.3 MPa과 44.2 MPa로 측정되었다. 또한, 25 mm 직경의 SD400와 SD600 나사형 철근의 항복강도는 각각 460 MPa과 690 MPa로 측정되었다. P계열 실험체와 CFT실험체에 사용된 3.2 mm와 7.0 mm 두께의 철판은 모두 SS400이며, 재료실험결과 항복강도는 각각 350 MPa과 388 MPa으로 측정되었다.

표 3.4 중심압축실험체의 종류

Code	KBC				AISC				Eurocode 4	
	2005		2009		1999		2005			
A_s/A_y	3 % or above		1 % or above		4 % or above		1 % or above		2% - 9%	
f'_c	20.5 MPa or greater		21-70MPa		21-55MPa		21-70MPa		20 - 50MPa	
$F_{y, \max}$	415 MPa		440 MPa		415 MPa		440 MPa		450MPa	
Shape	□	○	□	○	□	○	□	○	□	○
$(B \text{ or } D)/t_w$	$\sqrt{\frac{3E}{F_y}}$	$\sqrt{\frac{8E}{F_y}}$	$\sqrt{\frac{5.1E}{F_y}}$	$\frac{0.15E}{F_y}$	$\sqrt{\frac{3E}{F_y}}$	$\sqrt{\frac{8E}{F_y}}$	$\sqrt{\frac{5.1E}{F_y}}$	$\frac{0.15E}{F_y}$	$52\sqrt{\frac{235}{F_y}}$	$90\sqrt{\frac{235}{F_y}}$

표 3.5 콘크리트 배합표

Design strength (MPa)	G_{max} (mm)	W/C (%)	S/A (%)	Unit volume weight (kg/m ³)				
				W	C	S	G	AD_2
21	25	56.1	48.8	179	319	856	915	1.60
30	25	42.1	46.9	120	284	844	974	3.25

○ 그림 3.13에 나타난 것과 같이 10 MN 용량의 만능시험기(UTM)를 사용하여 0.02 mm/sec의 속도로 실험체의 중심에 변위제어로 가력하였다. 가력 시 실험체의 수직변위를 측정하기 위해 실험체 네모서리에 각 1개씩의 LVDT를 설치하였으며, 횡변위를 측정하기 위해서 두 면에 LVDT를 1개씩 설치하였다.

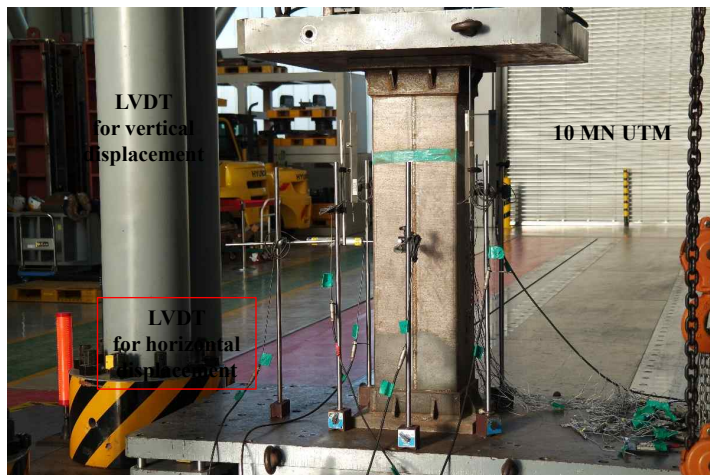
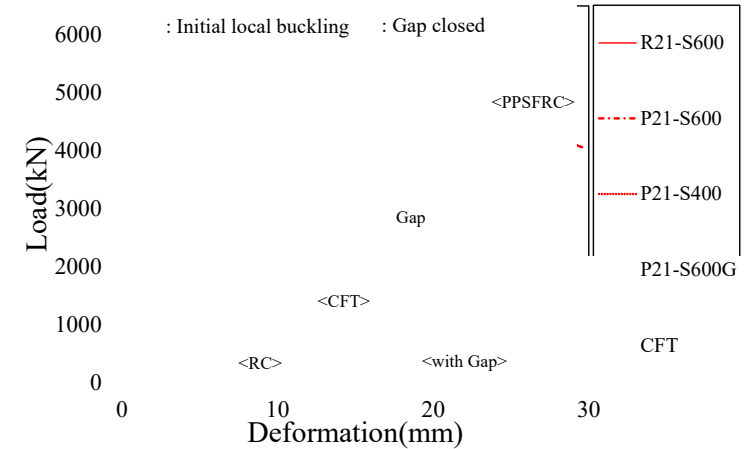
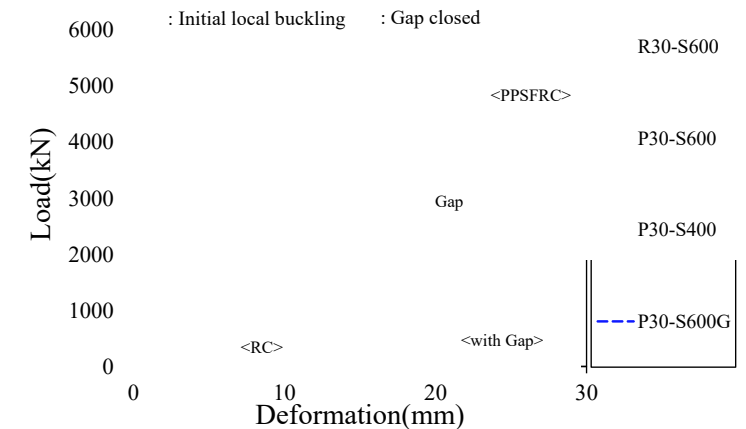


그림 3.13 실험체 세팅과 측정장비

○ 그림 3.14(a)와 (b)에는 각각 압축강도가 21 MPa인 실험체들과 30 MPa인 실험체들의 하중-변형관계를 나타내었다. 이 때 사용된 길이방향변위는 4개의 LVDT에서 측정된 변위의 평균값을 사용했으며, 최대강도의 80 %까지 하중이 감소된 시점에서 가력을 종료하였다. R21-S600실험체와 R30-S600실험체는 외부강관이 없는 일반적인 RC기둥이며 극한하중은 각각 3,042 kN과 3,782 kN, 최대변위는 각각 7.9 mm와 6.8 mm으로 측정되었다.



(a) R21과 P21계열 실험체

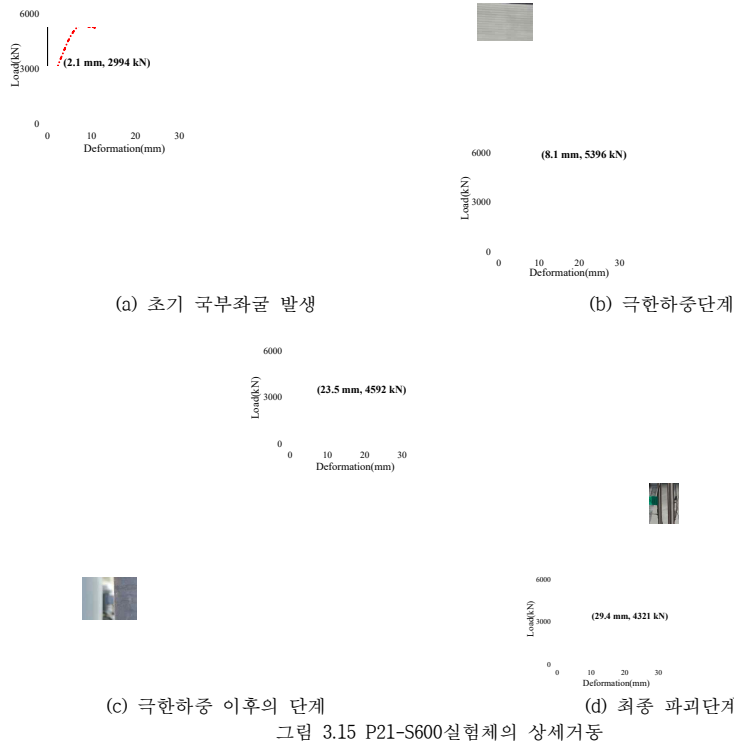


(b) R30과 P30계열 실험체

그림 3.14 중심압축실험체들의 하중-변형관계곡선

○ 그림 3.15(a)에 나타난 것과 같이, P21-S600실험체는 약 3,000 kN의 하중에서 상부로부터 B/2 (175 mm)떨어진 부분에서 최초의 국부좌굴이 발생하면서 강성이 점차 줄어들었고, 국부좌굴이 기둥의 상부에서부터 하부 방향으로 점차적으로 확대되는 거동특성을 나타내었다. 그림 3.15(b)에 나타난 것과 같이 최대하중 5,396 kN에서는 국부좌굴이 약

300 mm 간격으로 발생하였는데, 이는 길이방향으로 배치된 채널의 용접간격과 동일하였다. 최대하중 이후에는 그림 3.15(c)에 보이는 바와 같이 기둥 상부에서 발생된 국부좌굴이 더욱 심하게 나타났고, 최종적으로는 최대변위 29.4 mm에서 그림 3.15(d)와 같이 파괴되었다.



- 다른 P계열 실험체들도 대체로 P21-S600실험체와 비슷한 거동특성을 나타내었다. 철판거푸집과 가력철판 사이에 10 mm 길이의 gap을 도입한 P21-S600G와 P30-S600G 실험체의 경우에는 가력초기에는 거푸집과 가력철판사이에 도입된 gap 으로 인하여 하중이 콘크리트를 통해서만 전달되기 때문에 RC실험체인 R21-S600과 R30-S600 실험체와 동일한 축강성을 나타내었다. 하중이 증가함에 따라서 gap의 크기가 점차 줄어들고 실험체의 수직변위가 10 mm를 초과하면서 가력철판과 강판거푸집이 접촉하여 점차 P21-S600과 P30-S600 실험체의 거동과 유사한 거동양상을 나타내었다.
- CFT실험체의 경우, 일정한 하중이 선형으로 증가하다가 약 4,500 kN의 하중 시점에서 상부 끝단으로부터 $B/2$ 만큼 떨어진 부분에 최초의 국부좌굴이 발생함과 함께 강성이 천천히 감소하다가 극한하중 4,700 kN에서 처음 발생한 국부좌굴이 크게 전파되어 최대변위 12 mm에서 파괴되었다. CFT실험체는 P계열 실험체에 비해 매우 낮은 변형능력을 보여주었으며, 그 원인을 그림 3.16에 나타난 파괴양상으로부터 유추할 수 있다. 즉, 그림 3.16(b)에 나타난 것과 같이, P계열 실험체의 경우 기둥 내부에 배치된 앵글

에 의해서 국부좌굴이 한곳에 크게 집중되기 보다는 여러 개의 작은 국부좌굴들이 관측된 반면, CFT실험체의 경우에는 그림 3.16(c)에 보이는 바와 같이 기둥 상부 끝단으로부터 $B/2$ 만큼 떨어진 부분에서 발생한 초기 좌굴이 하중증가에 따라 집중적으로 발달되면서 파괴되었기 때문에 P계열 실험체에 비해 CFT기둥의 변형 능력이 상대적으로 낮게 나타난 것으로 판단된다.

<Front> <Back>
 (a) R21-S600 (b) P21-S600 (c) CFT
 그림 3.16 실험체들의 파괴모습

○ ACI318-08에서는 University of Illinois and Leigh University 에서 1927년부터 1933년까지 실험된 564개의 기둥실험에 대한 결과를 바탕으로 기둥의 축강도를

$$P_0 = f_y A_{st} + (0.85 f'_c) (A_g - A_s) \quad (3.2)$$

와 같이 규정하고 있다. 여기서, f_y 와 A_{st} 는 각각 철근의 항복강도와 단면적이며, f'_c 와 A_g 는 각각 콘크리트의 압축강도와 기둥의 전체단면적이다. 식 (3.2)에 의하여 산정된 기둥의 중심축강도(P_0)와 실험을 통해 계측된 기둥의 중심축강도(P_u)를 비교하여 그림 3.17과 표 3.6에 나타내었다. 식 (3.2)를 통해 산정된 중심축강도에 대한 실험체들의 중심축강도의 비율 (P_u/P_0)이 0.65 에서 0.95 사이에 분포하는 것으로 나타났으며, 식(3.2)의 P_0 가 실험체의 강도를(P_u)를 과대평가하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 기둥의 강도를 과대평가하는 이유는 제작 시 발생하는 초기결함(e_i)과 실험체의 세팅과정에서 피할 수 없이 야기되는 최소우발편심 (e_m)이 식(3.2)에 고려되어 있지 않기 때문이다. 이러한 이유로 ACI318-08에서는 사각형 단면을 가진 RC기둥의 축강도를 $0.8P_0$ 로 제시하고 있다.

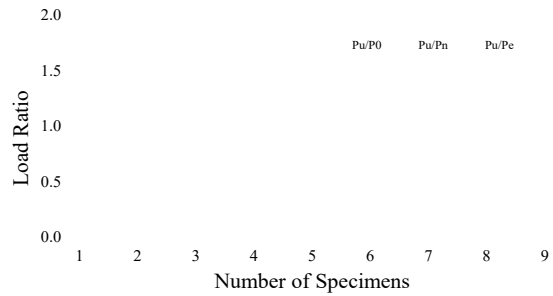


그림 3.17 실험결과와 해석결과 비교

표 3.6 실험결과와 해석결과 비교

No.	Specimen	P_u (kN)	P_0 (kN)	P_n (kN)	e_m (mm)	e_i (mm)	e (mm)	P_e (kN)	P_u/P_0	P_u/P_n	P_u/P_e
1	R21-S600	3,042	4,011	3,209	13	7	20	3,354	0.76	0.95	0.91
2	P21-S600	5,396	5,748	3,109	7	7	14	4,895	0.94	1.74	1.10
3	P21-S400	5,041	5,282	2,736	7	7	14	4,895	0.95	1.84	1.03
4	P21-S600G	5,062	5,748	3,109	20	7	27	4,507	0.88	1.63	1.12
5	R30-S600	3,782	5,789	4,631	16	7	23	5,313	0.65	0.82	0.71
6	P30-S600	5,964	7,571	4,567	20	7	27	6,185	0.79	1.31	0.96
7	P30-S400	5,660	7,104	4,194	18	7	25	6,138	0.80	1.35	0.92
8	P30-S600G	5,721	7,571	4,567	26	7	33	5,864	0.76	1.25	0.98
9	CFT	4,797	6,250	5,000	27	7	34	4,933	0.77	0.96	0.97
Average									0.81	1.32	0.97

○ 이 연구에서는 부재의 초기결합을 고려하기 위해서 Eurocode4에서 제안하고 있는 $L/200$ 을 초기결합에 의한 편심(e_i)으로 가정하였다. 실험에 사용된 기둥의 길이는 모두 1,400 mm이기 때문에 실험체들의 초기결합을 7 mm로 가정하여 분석을 수행하였다. 또한, 부재에 작용하는 최소우발편심을 고려하기 위하여 그림 3.18과 같이 중심축력과 동시에 휨모멘트가 작용된다고 가정하였다. 휨모멘트에 의해 발생하는 회전각(θ)은

$$\tan\theta \approx \theta = L/D \quad (3.3)$$

으로 산정할 수 있다. 여기서 L 은 기둥 폭의 절반인 $B/2$ 이고, D 는 최외단 단면에서의 측면형으로서 기둥의 중심과 최외단 단면에서 LVDT에 의해 측정된 값을 사용하였다. 부재의 길이방향으로 휨모멘트가 일정한 경우, 부재의 회전각(θ)과 모멘트(M)의 관계는

$$M = \theta \frac{EI}{l} \quad (3.4)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서 E 와 I 는 탄성계수와 단면2차모멘트이다. 기둥이 콘크리트, 철근 및 철판으로 이루어진 합성기둥이기 때문에 식 (3.4)에서 E 와 I 는 환산단면적법을 이용하여 산정하였다. 계측된 회전각(θ)을 식 (3.4)에 대입하여 휨모멘트(M)를 추정할 수 있으며, 편심(e_m)의 크기는

$$e_m = \frac{M}{P} \quad (3.5)$$

으로 산정할 수 있다. 이렇게 계산된 실험체들의 최소우발편심(e_m)은 7.0 mm 에서 27.0 mm 사이에 분포하며, 이를 정리하여 표 3.6에 나타내었다.

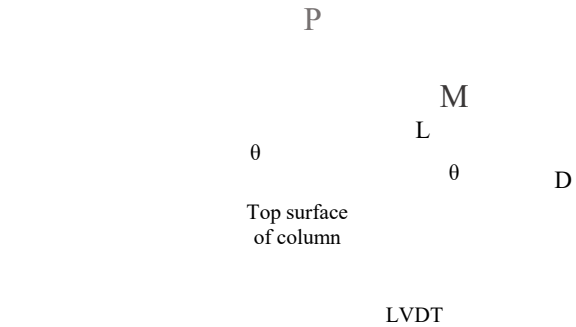
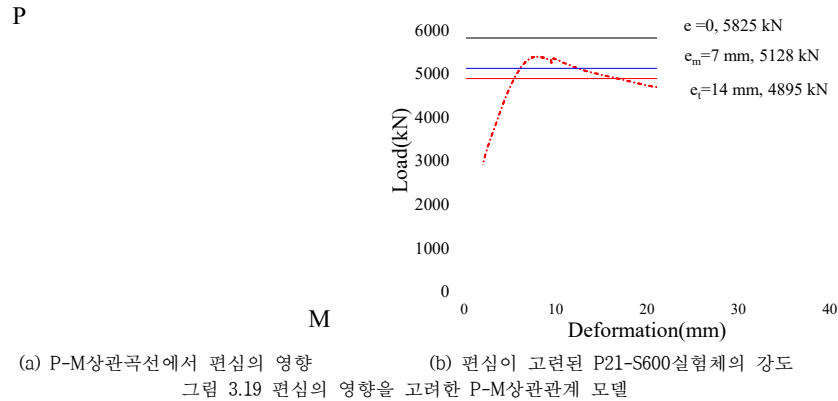


그림 3.18 축력과 휨모멘트가 작용하는 기둥의 최소우발편심

○ 측정값을 기반으로 계산된 편심 (e_m)과 초기결합에 의해 발생하는 편심(e_i)의 합으로 실험체에 작용되는 전체편심 (e)은 14.0 mm 에서 34.0 mm 사이에 분포하였다. 따라서, 그림 3.19(a)에 보이는 바와 같이 전체편심(e)의 영향으로 인하여 축강도(P_0)가 P_e 로 감소되며, 그림 3.19(b)에는 P21-S600실험체에 대하여 편심(e)의 영향을 고려한 해석결과를 예시로 나타내었다. 측정된 편심과 초기결합에 의한 편심의 합인 전체편심(e)에 의해서 발생하는 휨모멘트의 추가적인 영향을 고려하여 중심축강도(P_0)로부터 감소된 기둥의 유효축강도(P_e)를 산정하였고, 그 결과들을 그림 3.17과 표 3.6에 나타내었다. 모든 실험체에 대한 P_u/P_e 이 0.97로서, 편심을 고려해서 산정한 기둥의 축강도(P_e)가 실험결과와 매우 유사한 것을 알 수 있다. 앞서 언급된 바와 같이 ACI318-08에서는 띠철근이 배근된 RC기둥의 공칭축강도(P_n)를 P_0 의 80 %로 제한하고 있으므로 이를 그림 3.19(a)에 나타난 방법으로 추정하면, 단면폭(B)의 10.0 %를 최소편심(e)으로 고려한 결과와 동일한 것이며, 이 연구에서 수행된 기둥부재에 대해서는 35.0 mm의 편심에 해당

된다. 앞에서 언급한 것과 같이, 이 연구의 제안공법에서는 영구강판거푸집을 구조용 부재로 사용하지 않기 때문에 공칭축강도(P_n)를 산정할 때는 영구거푸집의 기여분을 고려하지 않았다. 그림 3.17과 표 3.6에 나타난 바와 같이 공칭강도와 실험체의 극한강도의 비(P_u/P_n)의 평균값은 1.32로 나타났다. 따라서, 이 연구에서 제안된 선조립공법으로 제작된 RC 기둥을 기존의 RC기둥과 동일한 방법으로 설계하여도 적절한 구조적 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) 철근조립 (b) 거푸집에 철근배근

(c) 콘크리트 타설 (d) 완성된 실험체

그림 3.20 편심의 영향을 고려한 P-M상관관계 모델

다) 편심압축력이 작용하는 선조립합성기둥의 저항성능 검증

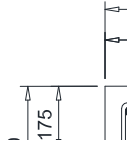
○ 총 7개의 편심압축실험체를 제작하였으며, 표 3.7에 나타난 바와 같이 RC실험체 1개, CFT실험체 1개, P계열 실험체 5개로 구성되어 있다. P계열 실험체의 경우 편심비(편심(e)에 대한 기둥 폭(b)의 비율), 철근비 및 철근의 강도를 변수로 하였다. 실험체는 그림 3.20에 나타난 것과 같이 선조립된 철근을 철판거푸집에 배치하고 거푸집의 상부철판을 용접한 후, 강판 내부에 콘크리트를 타설하여 완성하였다.

표 3.7 편심압축실험체

No.	Name	Method	Eccentric ratio (%)	Rebar ratio (%)	Yielding strength (MPa)
1	R25-1-600	RC	25	1.65	600
2	CFT25	CFT	25	-	-
3	P25-1-600	선조립기둥	25	1.65	600
4	P25-1-400	선조립기둥	25	1.65	400
5	P50-1-600	선조립기둥	50	1.65	600
6	P25-3-600	선조립기둥	25	3.30	600
7	P25-3-400	선조립기둥	25	3.30	400

○ 그림 3.21에 나타난 것과 같이, 실험체들의 길이는 3,230 mm이고, 단면의 폭과 높이는 모두 350 mm이다. 부재 가력 시 응력집중을 최소화하기 위하여 실험체의 상하부를 두께 40 mm의 철판으로 보강하였으며, 상하부 철판과 기둥 접합면에는 두께와 길이가 각각 12 mm와 75 mm인 스틱프너(stiffner)를 각면에 각각 2개씩 총 8개를 설치하여 보강하였다. 실험체 내부 콘크리트 타설을 위하여 가력철판의 중심에는 직경 150 mm의 구멍(hole)을 두었으며, 기둥의 각 모서리에는 직경 30 mm의 공기구멍 4개를 두어 콘크리트가 밀실하게 충전되도록 하였다. RC실험체와 PPSFRC실험체에는 철근비에 따라 25.4 mm 직경의 나사형 철근을 각각 4개와 8개씩 기둥 모서리에 배치하였으며, 철근의 끝단은 상하부 가력철판에 용접하여 정착시켰다. 띠철근은 9.5 mm 직경의 철근을 150 mm 간격으로 배근하였다.

○ 실험체 제작에 사용된 콘크리트는 30 MPa로 계획되었으며, 재료시험 결과 26.3 MPa로 측정되었다. 25.4 mm 직경의 SD400과 SD600 나사형 철근의 항복강도는 각각 460 MPa와 690 MPa로 측정되었다. CFT실험체와 PPSFRC실험체에 사용된 3.2 mm와 7.0 mm철판은 모두 SS400 재질을 사용하였으며, 재료시험 결과 항복강도는 각각 360.8 MPa와 223.5 MPa, 인장강도는 각각 441.0 MPa와 273.0 MPa로 측정되었다. 그림 3.22에 나타난 것과 같이 10 MN 용량의 만능시험기를 사용하여 0.02 mm/sec의 속도로 실험체의 중심에서 설정한 편심(e)만큼 떨어진 거리에서 변위제어로 가력하였다. 실험체의 수직변위를 측정하기 위하여 실험체 네모서리에 각각 변위측정기(LVDT)를 설치하였으며, 횡변위를 측정하기 위하여 인장면에 $L/4$ 간격 (L : 실험체 길이)으로 3개의 LVDT를 설치하였다.



<RC specimen>

<PPSFRC_rebar ratio 1.65%>

10 MN UTM

LVDT
for horizontal
displacement

LVDT
for vertical
displacement

<CFTspecimen>

(a) 단면도 (A-A)

<PPSFRC_rebar ratio 3.30%>

그림 3.22 실험체 세팅과 측정장비

○ 가력하중이 최대하중 이후 최대하중의 85%이하로 저감된 시점을 실험체의 파괴로 간주하여 실험을 종료하였다. 그림 3.23은 실험체들의 하중-축변위 관계를 보여준다. R25-1-600 실험체는 약 734 kN에서 초기균열이 인장축 중앙부에 발생하였으며, 균열이 인장축 모든 면에서 급격하게 발전하다가 최대하중 1,837 kN에 도달한 직후 하중의 급감과 함께 압축축 중앙부에서 콘크리트가 분쇄되면서 그림 3.24(a)와 같이 파괴되었다. 그림 3.23과 그림 3.25에 나타낸 바와 같이 R25-1-600 실험체의 최대수직 및 수평변위는 각각 6.4 mm와 18.9 mm로 측정되었다.



<RC specimen>

<CFT specimen>
(b) 입면도

<PPSFRC specimen>

그림 3.21 편심압축실험체

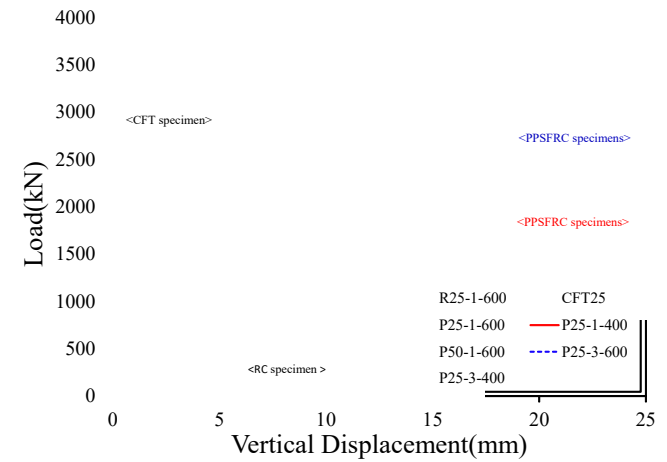


그림 3.23 실험체의 축력과 수직변형의 상관도

- CFT25실험체의 최대하중은 3,377 kN이며, 실험체가 최대하중에 도달하였을 때 실험체의 압축측 상부로부터 b/2 떨어진 부분에 최초의 국부좌굴이 발생하였다. 이후, 변형이 계속 증가됨에 따라 좌굴이 점차 커졌으며, 최종적으로 그림 3.24(b)에 나타난 것과 같이 측면으로 좌굴이 진전되면서 파괴되었다. 파괴 시 CFT25실험체의 최대수직 및 수평 변위는 그림 3.23과 그림 3.25에 나타난 것과 같이 12.6 mm와 24.6 mm로 측정되었으며 RC기둥인 R25-1-600실험체보다 더 연성적인 거동을 나타냈다.
- P25-1-600와 P25-1-400실험체에서는 각각 2,334 kN과 1,884 kN 하중에서 실험체 상부 압축측의 국부좌굴이 관측되었다. 이는 철판의 두께가 상대적으로 얇기 때문에 최대하중 직전에 국부좌굴이 발생한 CFT25실험체보다 이른 시점에 국부좌굴이 발생한 것으로 판단된다. 그러나, CFT25실험체와 달리 하중이 증가함에 따라 압축측 전면에 여러 개의 국부좌굴이 최대하중까지 발생하였고, P25-1-600와 P25-1-400실험체의 최대하중은 각각 3,125 kN과 2,979 kN으로 측정되었다. 최대하중 이후에는 압축측 중앙부의 국부좌굴이 가장 크게 형성되었으며, 압축측에서 발생한 좌굴이 측면까지 발전하면서 하중이 점차 감소되어 그림 3.24(c)에 나타난 것과 같이 파괴되었다. 파괴 시 두 실험체의 최대수직변형과 최대수평변형은 그림 3.23과 그림 3.25에 나타난 것과 같이 각각 17.4 mm, 50.1 mm와 16.3 mm, 44.4 mm로 측정되었으며, 기존의 CFT기둥인 CFT25실험체에 비해 매우 연성적인 거동을 보였다.
- 철근비가 상대적으로 큰 P25-3-600와 P25-3-400실험체는 P25-1-600와 P25-1-400실험체에 비해 다소 높은 초기강성을 보였으며, 각각 하중 2,195 kN과 1,897 kN에서 실험체 상부 압축측에 국부좌굴이 발생하기 시작하였다. 이후 압축측 전면에 다수의 국부좌굴이 발생하였고, 최대하중은 각각 3,344 kN과 3,500 kN로 측정되었다. 최대하중 이후에는 압축측 중앙부에서 형성된 국부좌굴이 가장 크게 발전되었으며, 압축측에서 발생한 좌굴이 측면까지 진전되면서 하중이 점차 감소되어 파괴에 이르렀다. 파괴 시 두 실험체의 최대 수직 및 수평 변위는 그림 3.23과 그림 3.25에 나타난 것과 같이 각각 17.2 mm, 46.9 mm와 18.4 mm, 51.3 mm로서, 철근비가 1.65%인 실험체들과 유사한 연성을 나타내었다.
- P50-1-600실험체는 표 3.7과 그림 3.23에 나타난 것과 같이 큰 편심의 영향으로 이하여 앞서 언급된 다른 PPSFRC실험체들에 비해 작은 초기강성을 나타내었으며, 1,150 kN의 낮은 하중에서 실험체 압축측에 국부좌굴이 발생되기 시작하였다. 이후, 최대하중 1,865 kN까지 점차 강성이 줄어들었다. 최대하중에 도달한 후에는 다른 실험체에 비해 하중이 매우 천천히 감소되었으며 최대하중의 약 87%인 1,621 kN에서 그림 3.24(d)에 나타난 것과 같이 인장측 철판거푸집의 용접부가 찢어지면서 파괴되었다. 이는 P50-1-600실험체에 가해진 상대적으로 큰 편심에 의하여 인장측 변형이 매우 크게 발생되었으며, 용접에 의한 열변형으로 인하여 상대적으로 취성적인 용접부가 찢어지는 현상이 발생되었기 때문으로 판단된다. 파괴 시 최대 수직 및 수평 변위는 그림 3.23과 그림 3.25에 나타난 것과 같이 각각 21.6 mm와 56.0 mm로서 실험체들 중에서 가장 연성적인 거동을 보였다.

(a) R25-1-600

(b) CFT25

(c) P25-1-600

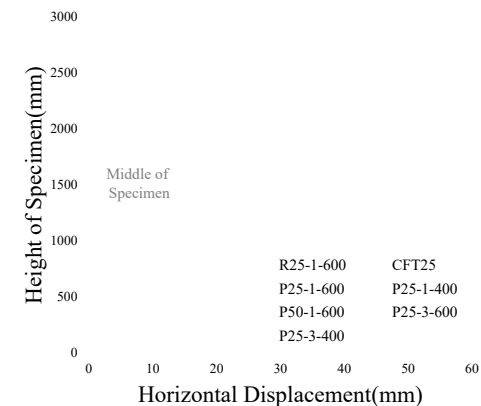
(d) P50-1-600
그림 3.24 실험체들의 파괴모습

그림 3.25 실험체의 축력과 수직변형의 상관도

- 앞서 언급된 바와 같이 외부강관 거푸집이 매우 얇기 때문에 부재 설계 시 강관 거푸집의 기여분은 기둥의 강도계산에 반영하지 않고, 철근콘크리트 단면의 기여도만 반영하여 설계된다. 따라서, 제안된 PPSFRC 기둥은 KBC 2016의 ‘제5장 콘크리트구조’에 제시된 방법에 의해 힘의 평형과 변형률 적합조건을 만족시키는 극한강도설계법으로 설계될 수 있다. 다만, 이 연구에서는 PPSFRC 기둥에 대한 정밀한 구조성능 분석을 목적으로 RC설계법 뿐만 아니라 충전형 합성부재 설계법에 대한 검토를 동시에 수행하였다.
- 현재 국토교통부 고시 KBC 2016 (Korea Building Code)에 따르면 충전형 합성부재에 압축력과 휨이 동시에 작용하는 경우에 대하여 축력과 휨의 상관곡선(P-M곡선)을 다음과 같은 2가지 방법으로 산정할 수 있도록 제시하고 있다. 첫 번째 방법은 그림 3.26에 나타난 바와 같이 힘의 조합력에 대한 부재의 설계강도를 이선형(bi-linear) 상관곡선으로 정의하는 것이며, 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{P_r}{P_c} \geq 0.2 \text{인 경우 } \frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_r}{M_c} \right) \leq 1.0 \quad (3.6a)$$

$$\frac{P_r}{P_c} < 0.2 \text{인 경우 } \frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_r}{M_c} \right) \leq 1.0 \quad (3.6b)$$

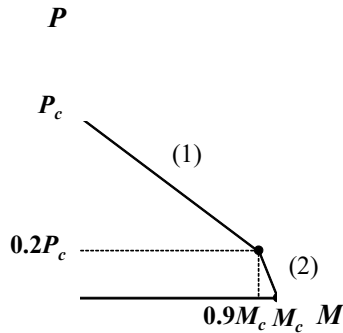


그림 3.26 조합력에 대한 이선형 상관곡선

- 여기서, P_r 과 M_r 은 각각 설계압축강도와 설계휨강도이며, P_c 와 M_c 는 각각 소요압축강도와 소요휨강도이다. 이 방법은 두 개의 식으로 P-M곡선을 간략하게 표현할 수 있고 비조밀 단면 및 세장한 콘크리트 충전강관 단면에도 적용이 가능하다는 장점이 있지만, 부재의 강도를 크게 과소평가하여 경제성이 저하된다는 단점이 있다.
- 두 번째 방법은 그림 3.27에 나타난 바와 같이 소성응력분포를 가정하여 4개의 P-M 포인트(point)를 결정하여 관계도를 도출하는 것이다. 여기서, A점과 B점은 각각 순수 압축강도와 순수휨강도이고, C점은 압축력(N_c)을 가진 상태에서 B점과 같은 휨강도를 가진 위치이며, D점은 C점 압축강도의 1/2에 해당되는 축력이 작용하는 점이다.

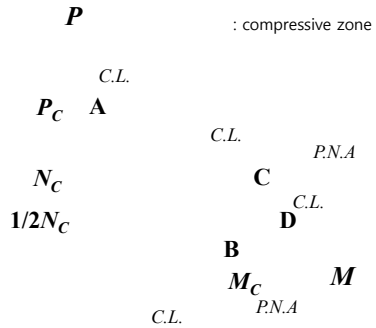


그림 3.27 소성응력분포를 상용한 상관곡선

- 앞서 언급된 RC설계법과 두 가지 합성부재 설계법에 의하여 산정된 P25-1-600실험체와 P50-1-600실험체의 P-M곡선을 그림 3.28에 나타내었다. RC설계법에 의한 P-M 상관도는 실험체의 강도를 매우 과소평가하는 것을 알 수 있다. 또한, 합성부재 설계법의 방법 1은 방법 2에 비해 실험체의 강도를 과소평가하는 것을 알 수 있다. 두 실험체 모두 하중 초기에는 편심의 영향으로 일정한 기울기를 가지고 선형으로 증가하다가 하중이 커짐에 따라 수평변형이 점차 커지면서 P-Δ 효과에 의한 비선형 거동을 나타내었다. 특히, 2차 모멘트에 대한 영향은 편심이 더 작은 P25-1-600실험체에서 크게 발생하였는데, 이는 상대적으로 편심에 의한 차이보다 압축력 크기에 따른 차이가 더 큰 영향을 미쳤기 때문이다.

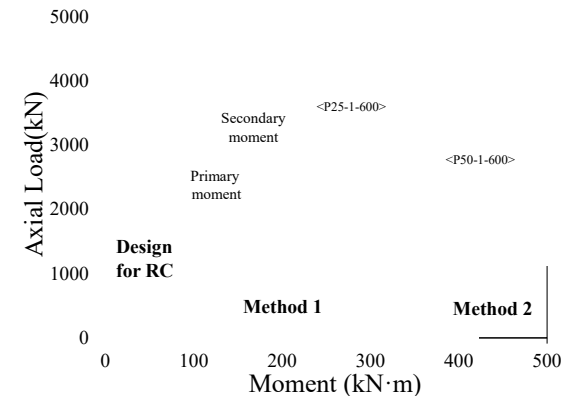


그림 3.28 P25-1-600실험체와 P50-1-600실험체의 P-M곡선

- 표 3.8에는 RC설계법과 두 가지 합성부재 설계법에 의하여 산정된 모든 실험체들의 압축 및 휨강도를 실험결과와 비교하여 나타내었다. RC설계법에 의한 실험체의 설계압축강도와 설계휨강도는 각각 P_r 과 M_r 이며, 합성부재 설계법인 방법 1과 2 (Method 1과 Method 2)를 이용해서 산정한 각 실험체의 설계압축강도와 설계 휨강도는 각각

$P_{c,1}$, $P_{c,2}$ 과 $M_{c,1}$, $M_{c,2}$ 이다. RC설계법은 모든 실험체의 압축 및 휨강도를 매우 과소 평가하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 합성부재 설계법인 방법 1의 강도산정식은 간단하지만 결과는 매우 보수적이며, 방법 2의 경우 방법 1에 비해 정확도가 매우 높은 것을 확인할 수 있다.

표 3.8 실험결과와 설계강도 비교

No.	Name	Test results		Design strength for RC		Design strength for Composite member			
						Method 1		Method 2	
		P_{test} (kN)	M_{test} (kNm)	$\frac{P_{test}}{P_r}$	$\frac{M_{test}}{M_r}$	$\frac{P_{test}}{P_{c,1}}$	$\frac{M_{test}}{M_{c,1}}$	$\frac{P_{test}}{P_{c,2}}$	$\frac{M_{test}}{M_{c,2}}$
1	R25-1-600	1,837	188	1.26	1.44	-	-	-	-
2	CFT25	3,377	350	-	-	1.67	2.01	1.27	1.52
3	P25-1-600	3,120	345	1.71	2.63	1.43	1.82	1.17	1.48
4	P25-1-400	2,977	327	2.04	2.54	1.51	1.91	1.21	1.51
5	P50-1-600	1,865	382	1.79	2.60	1.24	1.48	1.02	1.07
6	P25-3-600	3,342	365	1.82	2.27	1.34	1.66	1.07	1.30
7	P25-3-400	3,500	306	1.96	1.99	1.61	1.62	1.23	1.22
Average				1.76	1.99	1.47	1.75	1.18	1.36

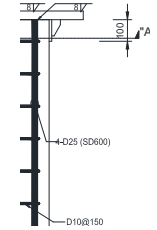
라) 횡력이 작용하는 선조립합성기둥의 구조성능 검증

- 축력과 횡력이 동시에 작용하는 기둥의 구조성능을 검증하기 위하여 기존의 RC기둥 1개, CFT기둥 1개 및 선조립 기둥 4개를 제작하여 횡력실험을 수행하였다. 실험체 상세는 표 3.9에 나타난 바와 같으며, 주요변수는 기둥공법의 종류와 주철근의 강도이다.

표 3.9 횡력가력실험체의 종류 및 강도

구분	Name	공법의 종류	주철근강도 (MPa)	파괴하중 (kN)	하중비 (kN)	모멘트 (kNm)	가력횡력 (kN)	비고
				P_0	10%	$M_{0.1P_0}$	P_l	
1	R30-600	RC공법	600	4,288	428.8	212.1	267.3	
2	CFT	CFT공법	-	5,136	513.6	472.2	617.0	
3	P30-600	선조립공법	600	5,493	549.3	434.6	564.1	
4	P30-400	선조립공법	400	5,088	508.8	388.3	503.1	
5	P30-600G	선조립공법	600	5,493	549.3	434.6	564.1	with gap
6	MP30-600	선조립공법	600	5,493	549.3	434.6	564.1	다이어프램

- 그림 3.29에는 횡력가력실험을 위하여 제작된 실험체들의 단면도와 입면도를 나타내었다. 실험체는 RC, CFT, 조립공법을 사용한 P계열 실험체 및 선조립기둥에서 길이방향과

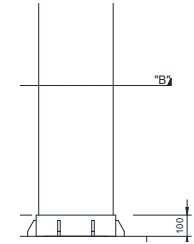


<A-A section>

<Elevation>

(a) R30-600 실험체

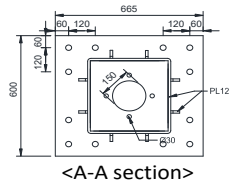
<A-A section>



<B-B section>

<Elevation>

(b) CFT실험체

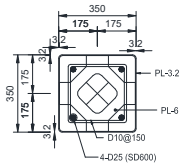


<B-B section>

<Elevation>

(c) P계열 실험체

<A-A section>



<B-B section>

<Elevation>

(d) MP30-600 실험체

그림 3.29 휨력가력 실험체 상세

휨방향 앵글을 제거하고 내부에 다이어프램을 설치한 MP30-600 실험체로 구성되어 있다. 모든 기둥의 길이와 폭은 각각 2,100 mm와 350 mm이며, 기둥 내부에 타설된 콘크리트의 강도는 30 MPa이다.

- 그림 3.30(a)에 나타난 것과 같이 축력(N)과 휨력에 의한 모멘트(M) 작용하는 기둥의 곡률은 그림 3.30(b)와 같이 나타낼 수 있다. 일반적으로 합성기둥에서 기둥의 단부에서 $D/2$ 만큼 떨어진 위치까지는 소성힌지 구간이며, 여기에 발생하는 모멘트(M_u)는

$$M_u = P_u(L/2 - D/2) + N\Delta_u/2 \quad (3.7)$$

와 같이 산정된다. 여기서 P_u 와 N 은 각각 기둥에 작용하는 휨력과 축력이며, L 과 D 는 기둥의 길이와 폭, Δ_u 는 기둥의 휨방향 변형이다. 따라서, 식 (3.7)의 좌측의 첫 번째 항은 휨력에 의해서 발생하는 휨모멘트이고, 두 번째 항은 축력에 의해서 발생하는 휨모멘트이다.

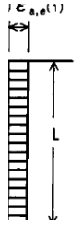


그림 3.29 축력과 휨력이 작용하는 기둥

- 이 실험에서 사용된 기둥은 앞서 언급한 바와 같이 길이(L)가 2,100 mm이고 폭(D)은 350 mm이며, 예상되는 최대 휨변형률을 4 %로 가정하여 휨변형(Δ_u)를 84 mm로 산정하였다. 휨력가력 실험 시 기둥에 작용하는 축력은 기둥 파괴하중(P_0)의 10%로서 실험장비의 용량에 맞게 설정하였다. 파괴하중 10%의 축력 작용 시 기둥의 모멘트강도($M_{0.1P_0}$)는 앞서 언급한 P-M상관도를 통하여 산정하였다. 이렇게 산정된 값들을 식 (3.7)에 대입하여 기둥에 가력되는 휨력을 산정하였으며, 이를 표 3.9에 나타내었다.
- 실험체에는 그림 3.30에 나타난 것과 같이 1000 kN 액츄에이터를 이용하여 기둥 축강도의 10%에 해당하는 축력이 가력되었으며, 반력벽에 설치된 1000 kN 액츄에이터로부터 휨력이 도입되었다. 이때 기둥의 단부에서 발생하는 회전을 방지하기 위해서 L자 형강을 설치하였다. 실험체 가력계획으로서 그림 3.31(a)에 나타난 것과 같이 기둥의 항복변위(Δ_y)까지는 하중제어로 가력하고 항복변위 이후부터는 변위제어방식으로 가력하였으며, 그림 3.31(b)에는 가력모습을 나타내었다.

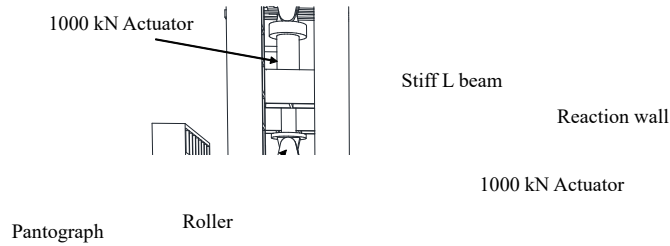
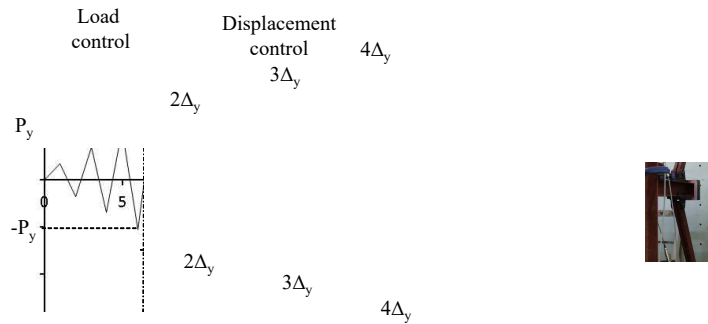


그림 3.30 횡력가력실험 실험체 세팅 계획도

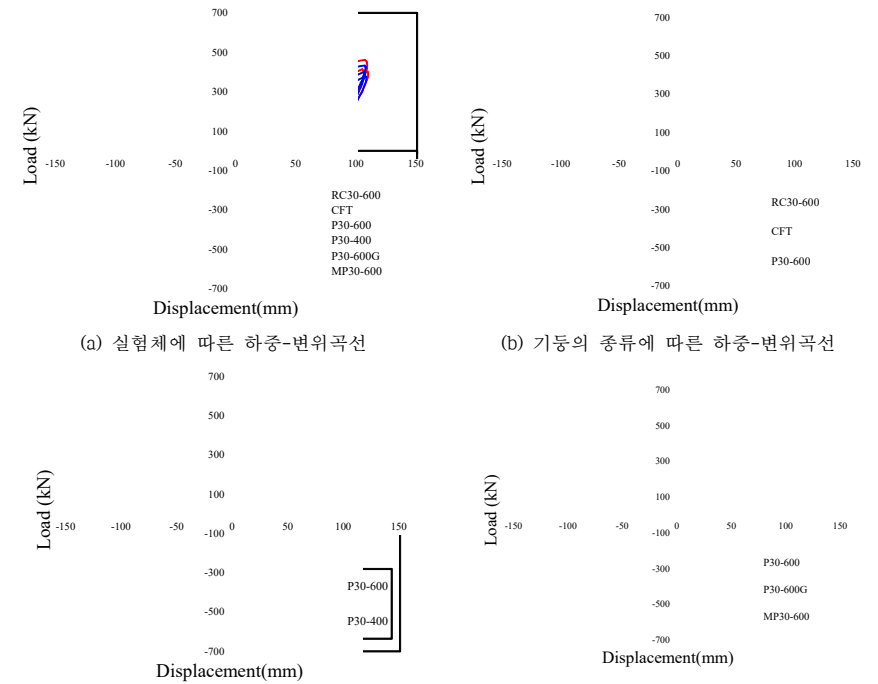


(a) 가력계획 (b) 가력모습
그림 3.31 횡력가력실험의 하중가력계획 및 가력모습

- 그림 3.32는 횡력에 따른 실험체들의 횡변위를 나타낸 것이다. 기존 RC공법인 RC30-600실험체의 경우 기둥의 횡변위가 항복변위(Δ_y)에 도달하기 전에 인장력이 작용하는 길이방향철근과 가력철판 사이의 용접부에서 파단이 발생하여 그림 3.33(a)에 나타난 것과 같이 가력철판이 실험체에서 분리되면서 하중이 급격하게 저하되었다. CFT실험체의 경우 그림 3.32(b)에 나타난 것과 P계열의 실험체보다 큰 강성과 강도를 보였으며, 극한강도 이후에 압축측에 국부적인 좌굴이 발생하면서 하중이 급격하게 떨어지는 거동을 나타냈다.
- 그림 3.32(c)에 나타난 것과 같이 P30-600실험체와 P30-400실험체는 서로 유사한 거동을 나타냈다. 주철근의 항복강도가 큰 P30-600실험체는 P30-400실험체보다 큰 강성과 강도를 나타내었으며, 두 실험체 모두 횡변위비 약 4.8 %까지 급격한 하중저하 없이 연성적인 거동을 보였다. 최종적인 파괴형상은 그림 3.33(b)와 (c)에 나타난 것과 같이 단

부로부터 $D/2$ 떨어진 구간내에서 소성힌지의 발생과 함께 철판의 국부적인 좌굴에 의한 것임을 확인할 수 있다.

- 거푸집 철판의 양단부에 10 mm의 갭(gap)을 둔 P30-600G실험체의 경우 RC30-600실험체와 마찬가지로 인장력이 작용하는 주철근과 가력철판 사이의 용접부에서 그림 3.33(d)에 보이는 바와 같이 조기 파괴되었다. 철판 내부에 앵글을 제거하고 다이어프램을 설치한 MP30-600실험체의 경우에는 길이방향 채널이 없기 때문에 P30-600실험체보다 강성이나 강도가 다소 낮게 측정되었다. 그러나, 그림 3.32(d)에 나타난 바와 같이 연성 측면에서 유사한 거동을 나타내었다.



(c) 주철근의 강도에 따른 하중-변위곡선 (d) 개발기둥 변수에 따른 하중-변위곡선
그림 3.32 횡력가력실험 결과



(a) RC30-600실험체



(b) P30-600실험체



(c) P30-400실험체

그림 3.33 횡력가력실험체 파괴모습

(d) P30-600G실험체

마) 기둥-보 접합부의 구조성능 검증

- 개발기둥의 내진성능을 검증하기 위하여 실제 크기의 보-기둥 접합부를 제작하여 반복 가력실험을 수행하였다. 여기서 휨부재인 보는 국내 다수 현장에 적용 되고 있는 하이포(HyFo) 합성보를 사용하였다. HyFo합성보의 정모멘트구간에서는 그림 3.34(a)에 나타난 바와 같이 슬래브의 유효폭 내 콘크리트가 압축력에 저항하고, 강제보와 하부철근이 인장력에 저항한다. 또한, 부모멘트구간에서 그림 3.35(b)에 나타난 것과 같이 소성중립축 아래의 하부 ㄷ강판과 하부콘크리트 및 웨브가 압축력에 저항하며, 유효폭 내의 상부철근, 상부플랜지 및 소성중립축 위의 웨브가 인장력에 저항하는 효율적인 합성보이다.
- 실험에서는 HF-500×270×6×6과 HF-700×270×6×6 HyFo합성보를 사용하였으며, 각각의 정모멘트와 부모멘트 강도는 표 3.10에 나타난 것과 같다. 강기둥-약보의 설계철학을 기반으로 기둥의 휨강도는 보 휨강도의 1.25배 이상이 되도록 설계하였으며, HF-500 실험체의 기둥 주철근은 그림 3.35와 같이 각 모서리에 UHD32 규격으로 3개씩 총 12개를 배치하였다. HF-700실험체 역시 HF-700×270×6×6 합성보 휨강도의 1.25배가 되도록 기둥을 설계하였으며, 그림 3.36에 나타난 것과 같이 UHD41규격의 주철근을 각 모서리에 3개씩 총 12개를 배치하였다.

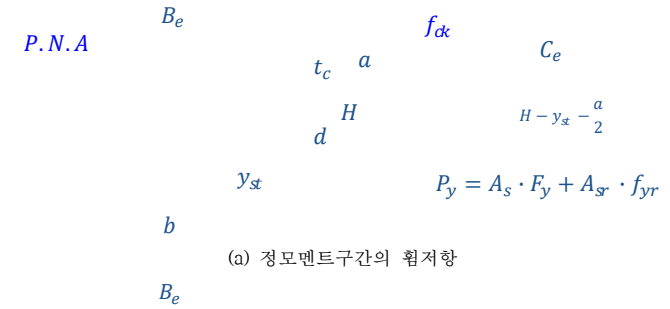


그림 3.34 HyFo합성보의 휨저항 매카니즘

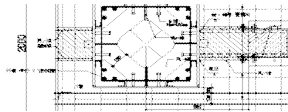
표 3.10 기둥-보 접합부 실험체의 휨강도

No.	실험체명	보의 휨강도 (정방향, kN·m)	보의 휨강도 (부방향, kN·m)	기둥의 주철근	기둥의 휨강도 (kN·m)
1	HF-500	1,220	1,052	12-UHD32	1,601
2	HF-700	1,883	1,601	12-UHD41	2,481

- 실험에 사용된 실험체의 기둥은 길이 3,300 mm, 단면크기는 800×800 mm 이다. 보와 연결된 접합부에는 16 mm 두께의 철판이 사용되었으며, 그 외의 기둥부는 4.2 mm 두께의 철판을 사용하여 제작하였다. 기둥을 포함한 슬래브의 길이와 폭은 각각 4,279 mm와 2,000 mm이며, 두께는 150 mm 이다. HF-500실험체에 사용된 HyFo합성보의 높이와 폭은 각각 500 mm와 270 mm 이며, 사용된 철판의 두께는 6 mm 이다. HF-700실험체에 사용된 HyFo합성보의 높이와 폭은 각각 700 mm와 270 mm 이며, 사용된 철판의 두께는 6 mm 이다. 기둥표면에 400 mm 길이의 브라켓(bracket)을 접합하여 기둥과 보를 연결하였으며, 보의 웨브와 하부플랜지는 고력볼트로 접합을 하였고, 상부플랜지는 용접하여 모멘트 접합을 구현하였다.
- 그림 3.37(a)에 나타난 것과 같이 기둥과 슬래브의 거푸집을 제작하고 철근을 배근한 후 그림 3.37(b)에 나타난 것과 같이 콘크리트를 타설하여 실험체를 완성하였다. 이때 기둥과 슬래브에 타설된 콘크리트의 설계강도는 각각 30 MPa와 24 MPa로서 일반적인 실무 상황과 동일하게 계획하였다.



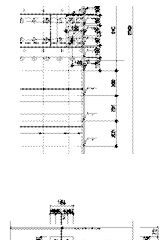
(a) 입면도



(b) 평면도

그림 3.35 HF-500실험체 상세

(a) 입면도



(b) 평면도

그림 3.36 HF-700실험체 상세



(a) 기둥 및 슬래브 거푸집 제작



(b) 콘크리트 타설

그림 3.37 기둥-보 접합부 실험체 제작

○ 제작된 실험체를 28일 동안 양생한 후 그림 3.38에 나타난 것과 같이 기둥의 양단부를 반력벽에 고정시키고 보의 단부를 액츄에이터와 연결하여 반복하중을 가력하였다. 기둥의 표면에서 가력점까지의 거리는 2,880 mm 이며, 반복하중은 AISC(Seismic Provision for Structural Steel Building)에서 제시하는 바에 따라 표 3.11과 변위제어 방식으로 가력되도록 하였다.

표 3.11 Loading Sequence

6 cycles at θ	0.00375 rad
6 cycles at θ	0.005 rad
6 cycles at θ	0.0075 rad
4 cycles at θ	0.01 rad
2 cycles at θ	0.015 rad
2 cycles at θ	0.02 rad
2 cycles at θ	0.03 rad
2 cycles at θ	0.04 rad

(a) HF-500 실험체



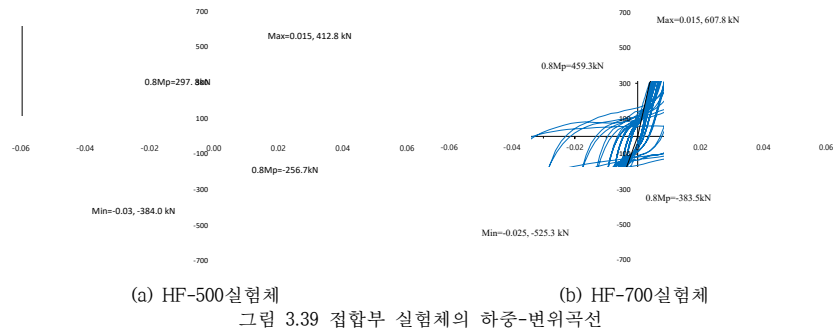
(b) HF-700 실험체

그림 3.38 기둥-보 접합부 실험모습

○ AISC에서는 $0.8M_p$ 이상의 하중을 유지하면서 0.02 radian의 횡변위비까지 연성을 확보할 수 있으면 중간모멘트골조, $0.8M_p$ 이상의 하중을 유지하면서 0.04 radian의 횡변위비까지 연성을 확보할 수 있으면 특수모멘트골조로 규정하고 있다. 여기서, M_p 는 보의 공칭강도이다. KBC에서는 $0.8M_p$ 이상의 하중을 유지하면서 0.03 radian의 횡변위비까지 연성을 확보할 수 있으면 중간모멘트골조, $0.8M_p$ 이상의 하중을 유지하면서 0.04 radian의 횡변위비까지 연성을 확보할 수 있으면 특수모멘트골조로 규정하고 있다. 따라서, 국내기준인 KBC에서는 특수모멘트골조에 대한 요구조건은 AISC와 같지만 중간모멘트골조에 대해서는 더 엄격한 것을 확인할 수 있다.

○ 그림 3.39에는 실험체들의 하중-횡변위비 곡선을 나타내었다. 그림 3.39(a)에 나타난 것과 같이 HF-500 실험체의 경우 횡변위비 0.04 radian에서 공칭휨강도 80% 이상의 강도를 확보하였으므로 특수모멘트골조로 속하는 것으로 볼 수 있다. 반면, 그림 3.39(b)에 나타

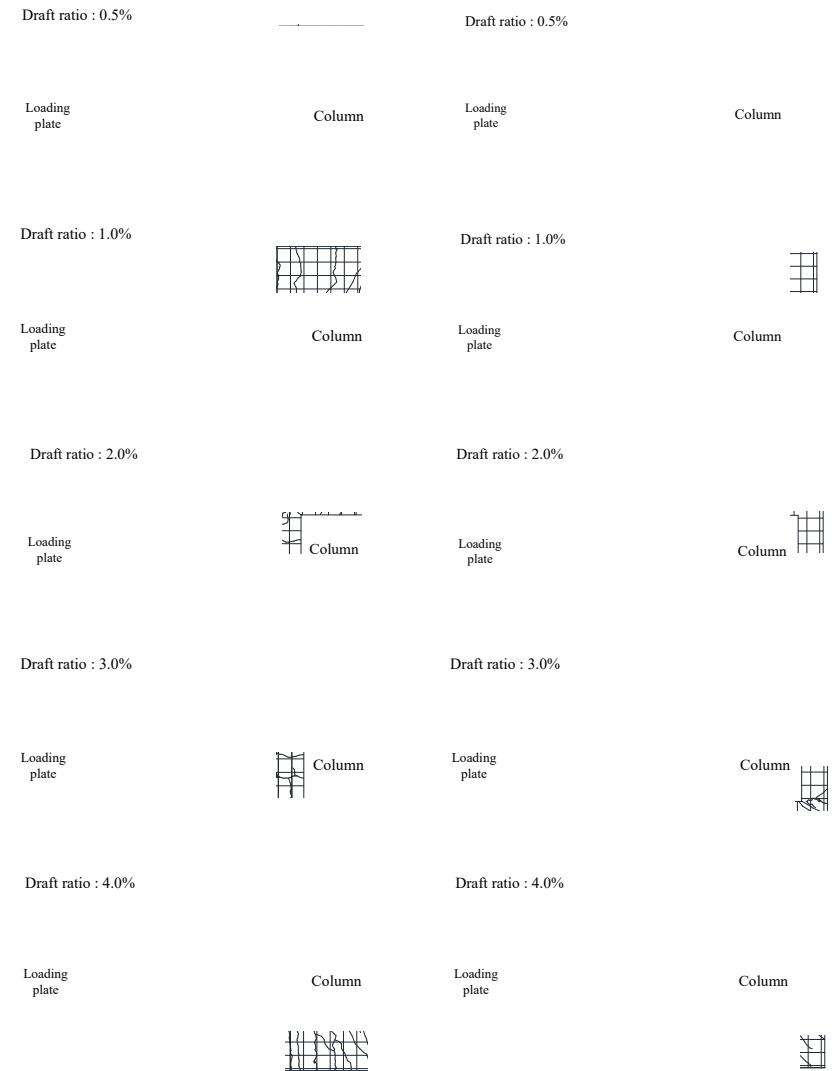
낸 것과 같이 HF-700실험체는 횡변위비 0.02 radian까지는 $0.85M_p$ 의 강도를 유지하지만 0.03 radian 이후 급격히 하중이 저하되면서 파괴되었다. 그 원인은 그림 3.40(a)에 나타난 것과 같이 슬래브의 두께가 150 mm로 얇고 실험여건상 기둥 뒤편에 연장한 슬래브의 길이가 충분하지 않았으며, 여기에 배근되는 슬래브 철근이 충분히 정착되지 못해서 접합부에 발생하는 높은 부모멘트에 의하여 발생하는 인장력에 저항하지 못했기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 이와 함께 보-기둥 접합부방향으로 슬래브의 변형이 발생한 것으로 관측되었다. 이 외에도 그림 3.40(b)에 나타난 것과 같이 웨브 이음판의 연단거리가 충분히 확보되지 못했기 때문에 이음판의 하부 끝단에서 전단파괴가 일어난 것을 확인할 수 있다. 따라서 이러한 결함이 보완된다면 HF-700실험체와 같은 상세를 갖는 부재도 특수모멘트골조로 사용할 수 있을 것으로 기대된다. 그림 3.41은 각 횡변위비에 따라 HF-700실험체의 슬래브 상면에 발생한 균열을 나타낸 것이다.



(a) HF-F00실험체 슬래브 파괴



(b) HF-700실험체 이음판 파괴
그림 3.40 HF-700실험체의 파괴모습



(a) HF-500실험체 (b) HF-700실험체
그림 3.41 하중변위비에 따른 균열패턴

바) 철근 이음부 실험

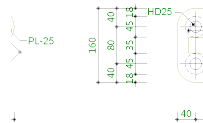
○ 개발 기둥 간의 연결에 적합한 철근의 이음방법을 고안하였으며, 해석적 연구와 실험적 연구를 병행하여 이음부에 대한 구조성능을 검증하였다. 이 연구에서 개발한 철근의 이음 방법은 그림 3.42에 나타난 바와 같다. 먼저, 철근을 용접용 커플러와 결합하고 이를 철판에 용접한 후, 현장으로 운반하여 기둥을 설치하고 나서 철판과 철판을 용접하는 방식으로 철근을 잇는 방식이다.



그림 3.42 고안된 철근의 용접이음방법

- 그림 3.43에 나타난 것과 같이 실험체의 총 길이는 700 mm, 커플러가 용접되는 철판의 두께는 25 mm, 지그에 고정되는 철판의 길이와 두께는 각각 150 mm와 33 mm 이다. 실험변수로서 철근의 규격은 SD600 D25와 DS400 D25 이며, 커플러에 병렬 연결되는 철근개수는 2개, 3개 및 4개 이다.
- 실험수행에 앞서 유한요소해석 프로그램을 이용하여 실험체와 동일하게 그림 3.44와 같이 모델링하였으며, 모든 용접부는 완전 합성을 가정하고 타이(tie)를 사용하여 모델링 하였다. 해석결과, 응력집중이나 과도한 소성변형 등은 관측되지 않았으며, 고안된 용접이음방식의 철근이음 실험체는 철근항복 이후 $1.25f_y$ 까지 안정적인 거동을 보이는 것으로 나타났다.

(a) 입면도



(b) 단면도

그림 3.43 철근 용접이음 실험체 상세

그림 3.44 철근 용접이음 실험체 해석결과

- ACI 318과 KCI에서 철근의 용접이음은 설계기준항복강도 f_y 의 125% 이상을 발휘할 수 있어야 한다고 명시되어 있기 때문에 용접이음된 실험체의 목표 인장성능을 $1.25f_y$ 로 설정하였다. 표 3.13와 그림 3.45에 나타난 것과 같이 실험체의 종류는 총 3가지이며, 각 종류마다 3개씩의 실험체를 제작하여 실험을 수행하였다.

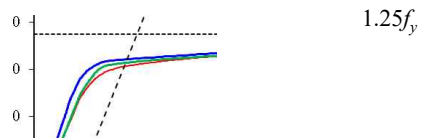
표 3.12 철근 용접실험체 종류

종류	실험체명	철근개수	철근의 항복강도(MPa)	철근의 직경	파괴위치
1	C2-600	2	600	D25	이음부
2	C3-400	3	400		철근
3	C4-400	4	400		철근



그림 3.44 철근 용접이음 실험체 해석결과

○ 그림 3.45에 나타난 바와 같이 C2-600실험체는 목표강도인 $1.25f_y$ 에 도달하기 이전에 커플러의 나사산이 전단파괴 되거나 커플러와 철판사이의 용접부에서 취성적으로 파괴되었다. 이는 사용된 커플러가 SD400 철근용 커플러이기 때문인 것으로 판단되며, SD600철판에 적합한 성능이 확보된 커플러를 사용하여 용접한다면 목표강도 이상의 강도를 확보할 수 있을 것이다. 반면, C3-400실험체와 C4-400실험체의 경우 그림 3.46과 그림 3.47에 나타난 것과 같이 응력이 $1.25f_y$ 에 도달할 때까지 이음부에 이상이 없었고 이후 철판에서 파단되어 파괴되었다. 따라서, 개발한 용접이음은 SD400 철판에 대해서는 바로 적용이 가능하며, SD600 철판에 대해서는 SD600 철근용 커플러를 제작하여 검증이 필요할 것으로 판단된다.



(a) 응력-변형률곡선

(b) 실험체 파괴모습
그림 3.45 C2-600실험체의 실험결과

$1.25f_y$

(a) 응력-변형률곡선



(b) 실험체 파괴모습
그림 3.46 C3-400실험체의 실험결과

1000

(a) 응력-변형률곡선

(b) 실험체 파괴모습
그림 3.47 C4-400실험체의 실험결과

(2) 시공성 및 경제성 분석

(가) 시공성 및 경제성 분석을 위한 Mock-up 실험체 제작

○ Mock-up 실험체 제작과정을 통해서 실무 적용 시 발생하는 문제점 및 작업성 등을 확인하고 이에 대한 피드백을 도면에 반영한 후 재제작하여 공장제작 및 현장시공에 대한 효율성을 높이고자 하였다. 제작된 실험체는 표 3.13와 그림 3.48에 나타난 것과 같이 총 5개를 3차에 걸쳐 제작하였다. (세부사항은 ‘목업결과보고서’ 참조)

표 3.13 Mock-up실험체

No.	실험체명	길이 (mm)	폭×높이 (mm)	제작중량 (kg)	비고
1	FC-1000	8,000	1,000	3,338	1차 제작
2	FC-600		600	1,959	2차 제작
3	FC-800		800	2,713	2차 제작
4	FC-1200		1,200	4,195	2차 제작
5	FC-1000		1,000	4,326	3차 제작



그림 3.48 Mock-up실험체

(나) 경제성 분석 보고서

- 이 연구에서는 ‘동양경제정보연구소’에 의뢰하여 기존 RC공법 대비 개발기술의 객관적인 경제성분석을 수행하였다. 여기서 사용된 경제성 분석방법은 생애주기비용(Life Cycle Cost, LCC)이며, 공법의 시공에서 시공된 구조물의 생애 전체에 대한 비용을 비교하는 객관적인 경제성 분석방법이다. LCC분석결과는 표 3.14에 나타난 바와 같으며, 기존의 RC공법에 대비 개발공법은 기둥의 단면크기에 따라 1.44 ~ 6.45% 높은 경제성을 확보하는 것으로 분석되었다. (자세한 사항은 ‘원가계산보고서’ 참조)

표 3.14 경제성분석 총괄표

[단위 : 원(부가세포함)/식]

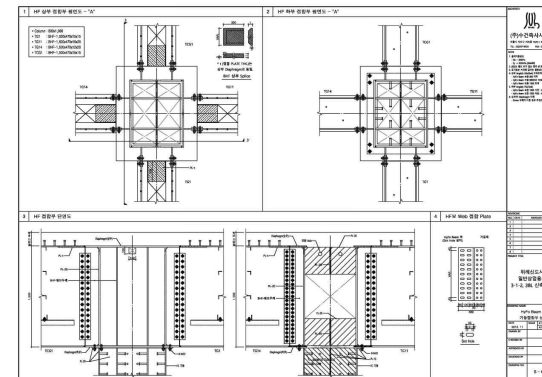
구분	신형기술				비교기술				대비(%) (A/E)	대비(%) (B/F)	대비(%) (C/G)	대비(%) (D/H)
	신형기술 (A)	신형기술 (B)	신형기술 (C)	신형기술 (D)	비교기술 (E)	비교기술 (F)	비교기술 (G)	비교기술 (H)				
모델명	선조립기둥	선조립기둥	선조립기둥	선조립기둥	RC기둥	RC기둥	RC기둥	RC기둥				
규격	800x800	1000x1000	1200x1200	1500x1500	800x800	1000x1000	1200x1200	1500x1500				
제품수명 (내용연수)	40년	40년	40년	40년	40년	40년	40년	40년				
원가 항목	취득원가	4,428,358	5,154,990	6,024,264	7,368,855	4,508,778	5,033,572	6,153,160	7,569,011	98.22%	102.41%	97.91%
	사용원가	4,321,643	5,030,765	5,879,082	7,191,277	4,400,105	4,912,258	6,004,875	7,386,587	98.22%	102.41%	97.91%
	폐기원가	-527,244	-594,263	-671,072	-772,298	-211,695	-213,869	-215,980	-217,673	249.06%	277.86%	310.71%
	합계	8,222,757	9,591,492	11,232,274	13,787,834	8,697,188	9,731,961	11,942,055	14,737,925	94.55%	98.56%	94.06%
산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥은 경제적 가치에 의한 비교분석한 결과 비교공법 대비 1.44% ~ 6.45%비용이 절감되는 기술임을 볼 수 있다.												
2017년 4월 20일												
원가계산용역기관 : (사)동양경제정보연구소												

(가) 현장적용 사례 1

- 이 연구를 통해서 개발된 기둥은 위례신도시에 위치한 일반사업용지 신축공사 현장에 적용되었다. 해당 구조물은 지하 6층, 지상 19층이며, 면적은 3,837.118 m², 골조는 철골 및 철근콘크리트 구조이며, 세부적인 건축물의 개요는 표 3.15에 나타난 바와 같다. 적용된 기둥은 그림 3.50(a)에 나타난 것과 같이 길이 약 6,100 mm, 단면크기는 1,000 mm × 800 mm 이다. 그림 3.50(b)는 기둥을 설치하는 모습이다.

표 3.15 개발기술이 적용된 현장개요 1

구분		내 용								
사업명칭		위례신도시 일반사업용지 3-1-2,3BL 신축공사								
대지위치		위례신도시 일반사업지역(의성3) 1-2,1-3 부지								
지역지구		일반사업지역, 최고고도지역, 제1종 지구단위계획구역								
도로현황		북측 20m도로, 서측 10m도로, 남측 43.6m도로								
주용도		오피스텔, 판매시설, 의료시설, 근린생활시설								
대지면적		5,639.00 m²		(1,705.80 py)						
건축면적		3,837.118 m²		(1,160.73 py)						
면적적		지상	39,792.383 m²		(12,037.20 py)			비고		
		지하	29,445.480 m²		(8,907.26 py)					
		계	69,237.863 m²		(20,944.45 py)					
		유적용 산정용	39,462.573 m²		(11,837.43 py)					
높이		70.43m								
건폐율		68.05%		(법정 : 70%이하)						
용적률		699.82%		(법정 : 700%이하)						
주차대수		구분	오피스텔	판매	근생	의료		계	자연구거차	비고
		신형기준	세대당 1대	100.00 대	135.00 대	100.00 대			20%	
		법정	434.00 대	127.24 대	15.98 대	35.20 대		612.42 대	122.46 대	
		계획	435 대	139 대	16 대	39 대		629 대	128.00 대	
조경	조경	법정	845.85 m²	15.00%	계획	859.81 m²	15.24%			
	자연지반	법정	84.59 m²	10.00%	계획	98.93 m²	11.69%			
	공개공지	법정	563.90 m²	10.00%	계획	615.18 m²	10.90%			
	규모	지하6층 지상 19층								
구조		철근 콘크리트조, 철골 콘크리트조								
비고										



(a) 현장적용 기둥의 도면
그림 3.49 현장적용 기둥의 모습



(b) 현장적용 모습

(나) 현장적용 사례 2

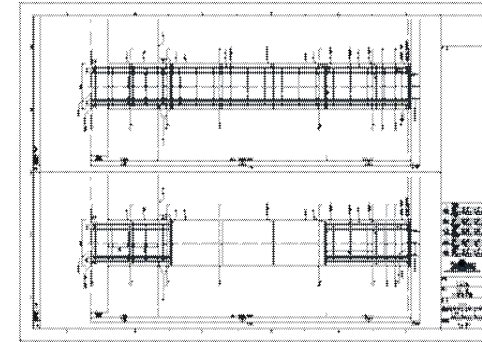
○ 이 연구를 통해서 개발된 기둥은 경기도 고양시 일산동구에 위치한 창고시설에 일부 적용되었다. 건축물의 면적은 10,602.60 m², 연면적은 44,333.29 m², 골조는 철골 및 철근콘크리트 구조이며, 세부적인 건축물의 상세개요와 조경도는 각각 표 3.16와 그림 3.50에 나타난 바와 같다. 적용된 기둥은 그림 3.51(a)에 나타난 것과 같이 길이는 약 5,000 mm 이고, 단면크기는 800 mm × 800 mm 이다. 그림 3.51(b)는 기둥을 설치하는 모습이다.

표 3.16 개발기술이 적용된 현장개요 2

대지위치	경기도 고양시 일산동구 식사동 2-8번지 외		
대지면적	27,189.00 m ²		
	계획	법정	비고
주용도	창고시설	허용용도: 「건축법 시행령」 별표1 제 18호의 창고시설	적법함
건폐율	38.99 %	40 % 이하	
용적율	99.94 %	100 % 이하	
최고높이	38.40 m	-	
규모	지하2층/	-	
건축면적	10,602.60 m ² (3,207.29 py)		
연면적	44,333.29 m ² (13,410.82 py)		
구조	철골 철근 콘크리트, 합성보		



그림 3.50 현장적용 건물의 조경도



(a) 현장적용 기둥의 도면

그림 3.51 현장적용 기둥의 모습

(b) 현장적용 모습

(다) 현장적용 사례 3

○ 기술이 적용된 마지막 현장은 양천구 목2동에 위치한 공동주택으로 건축물의 면적은 1,557.29 m², 규모는 지상 12층과 지하 4층, 골조는 철근콘크리트 구조이며, 자세한 건축물의 개요는 표 3.17에 나타난 바와 같다. 적용되는 기둥의 길이는 약 6,000 mm, 단면크기는 1,000 mm × 1,000 mm 이며, 기둥 도면은 그림 3.52에 나타난 바와 같다. 기둥은 현장적용을 위해 현재 공동연구기관인 (주)엔아이스틸에서 제작 중이다.

표 3.17 개발기술이 적용된 현장개요 3

프로젝트	양천구 목2동 복합개발 신축공사	
대지위치	서울특별시 양천구 목2동 514-5외 6개 필지	
지역지구	준주거지역, 제1종지구단위계획구역(양동5특별계획구역)	
대지면적	원 대지면적	2,635.70 m ²
	기부채납면적	.00 m ²
	대지면적	2,635.70 m ²
주요용도	공동주택(도시형생활주택_원룸형184세대, 업무시설(오피스텔 79실, 공공업무시설),판매시설	
건축면적	1,557.29 m ²	
건폐율	50.08 %	법정 : 60 %
연면적	지상(주차제외)	10,540.80 m ²
	지상주차	166.94 m ²
	지상 계	10,707.74 m ²
	지하 계	6,951.19 m ²
	합계	17,658.93 m ²
용적률	399.92 %	법정 : 400 %
규모	지상 12층, 지하 4층	
높이	48.90 m	법정 : 60 m이하 (해발 146 m미만)
구조	철근콘크리트 구조	



그림 3.52 현장적용 기동의 도면

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

(1) 제안 성과계획

구분	핵심연구성과 (level1)		단위 성과 (level2)	최종 성과점검기준					해당 기관	예산 (백만)	양적 성과목표			
				질적성과지표	목표치	측정방법	검증방법	기타						
총괄	A	산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기동의 실용화 설계-시공기술 개발	A-1	산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기동 및 실용화 기술 개발	①	시공인력 투입물량감소	90%	전문가 활용 평가 및 실무현장 만족도	보고서	1	대니온구조엔지니어링	473	설계시공지침서 : 1 건	
					②	현장적용성 확보	100%	전문가 활용 평가 및 실무현장 만족도	보고서					
			A-2	산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기동의 현장적용을 위한 설계-시공지침 구축	①	설계-시공 지침서 작성	1건	건축구조기준 부합 여부	보고서	1				
			A-3	대상기술의 설계적용을 통한 사업화 기반 마련	①	기술실시계약	1건	계약서제시	보고서	2				
		A-4	건설기술인증 추진	①	건설 기술인증 추진	1건	건설기술인증 추진 여부	기술인증신청서	2		473	한정적용 : 3 건 기술실시계약 : 1 건 건설기술인증추진 : 1 건		
	B	산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기동의 구조성능 개선 및 접합부 시스템 개발	B-1	개발기동의 구조성능 확보를 위한 수분배출구 형상/갯수/위치 최적화 공법도출	①	요구 구조성능 확보	100%	건축구조기준 부합여부	보고서	1	서울시립 대학교	160	시제품제작 : 1 건	
			B-2	산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기동의 구조성능 확보	①	실물실험	100%	건축구조기준 부합여부	시험성적서	2				
			B-3	산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기동의 보-기동 접합부 개발	①	실물실험	100%	건축구조기준 부합여부	시험성적서	2				
			B-4	대상기술의 구조성능 검증을 위한 이론적 연구수행	①	요구 구조성능 확보	1건	건축구조기준 부합 여부	보고서	1				
	C	산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기동의 시공성, 친환경성 및 경제성 평가	C-1	시공성 및 현장적용성 평가를 위한 기술의 현장적용 추진	①	시공인력 투입물량감소	90%	전문가 활용 평가 및 실무현장 만족도	보고서	2	N스틸	40	특허 출원 / 등록 : 1 건 시제품제작(Mock-up) : 1 건	
			C-2	개발기동의 설계 반영 및 실험을 통해 도출된 문제점 개선방안 도출	①	요구 구조성능 확보	95%	건축구조기준 부합여부	보고서	1				
					②	제작과정 개선	95%	시작품제작(mock-up)	시험성적서	2				
			C-3	높이, 형태 그리고 단면적에 따른 기동의 경제성을 평가하여 기술의 사업화 기반 마련	①	개발접합부에 대한 경제성 평가	100%	전문가 활용 평가 및 실무현장 만족도	보고서	1				
	C-4	산업부산물을 건설재료로 사용함으로써 얻어지는 친환경성을 정량적으로 평가해 녹색기술인증 신청	①	녹색기술인증 추진	1건	녹색기술인증 추진 여부	녹색기술 인증신청서	1		40	녹색기술인증신청 : 1 건			
		계							20	1,346	특허 출원 / 등록 : 2 건 논문 : 2 건 설계시공지침서 : 1 건 기술실시계약 : 1 건 건설기술인증추진 : 1 건 한정적용 : 3 건 시제품제작 : 3 건 녹색기술인증추진 : 1 건			

(2) 성과달성현황

구분	핵심연구성과 (level1)		단위 성과 (level2)	최종 성과검정기준						양적 성과목표	달성치	
				질적성과지표	목표치	측정방법	검증방법	기점치				
A	산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥의 실용화 설계-시공기술 개발	A-1	산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥 및 실용화 기술 개발	① 시공인력 투입물량감소	90%	전문가 활용 평가 및 실무현장 만족도	보고서	1	설계시공지침서 : 1 건	설계시공지침서 : 1 건		
			② 현장적용성 확보	100%	전문가 활용 평가 및 실무현장 만족도	보고서	1					
		A-2	산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥의 현장적용을 위한 설계-시공지침 구축	① 설계-시공 지침서 작성	1건	건축구조기준 부합 여부	보고서	1				
		A-3	대상기술의 설계적용을 통한 사업화 기반 마련	① 기술실시계약	1건	계약서제시	보고서	2				
총괄	B	B-1	산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥의 구조성능 개선 및 접합부 시스템 개발	① 건설 기술인증 추진	1건	건설기술인증 추진 여부	기술인증신청서	2	한정적용 : 3 건 기술실시계약 : 1 건 건설기술인증추진 : 1 건	한정적용 : 3 건 기술실시계약 : 1 건 건설기술인증추진 : 1 건		
			① 요구 구조성능 확보	100%	건축구조기준 부합여부	보고서	1					
		B-2	산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥의 구조성능 확보	① 실물실험	100%	건축구조기준 부합여부	시험성적서	2			시제품제작 : 1 건	시제품제작 : 3 건
		B-4	대상기술의 구조성능 검증을 위한 이론적 연구수행	① 요구 구조성능 확보	1건	건축구조기준 부합 여부	보고서	1				
C	산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥의 시공성, 친환경성 및 경제성 평가	C-1	시공성 및 현장적용성 평가를 위한 기술의 현장적용 추진	① 시공인력 투입물량감소	90%	전문가 활용 평가 및 실무현장 만족도	보고서	2	특허 출원 / 등록 : 1 건 시제품제작(Mock-up) : 1 건	특허 등록 : 1 건 시제품제작(Mock-up) : 1 건 제작결과보고서 : 1 건		
			② 요구 구조성능 확보	95%	건축구조기준 부합여부	보고서	1					
		C-2	개발기둥의 설계반영 및 실험을 통해 도출된 문제점 개선방안도출	② 제작과정개선 개발접합부에 대한 경제성 평가	95%	시제품제작(mock-up)	시험성적서	2				
		C-3	높이, 형태 그리고 단면적에 따른 기둥의 경제성을 평가하여 기술의 사업화 기반마련	① 녹색기술인증 추진	100%	전문가 활용 평가 및 실무현장 만족도	보고서	1			녹색기술인증신청 : 1 건	완기분석보고서 : 1 건 녹색기술인증신청 : 1 건
C-4	산업부산물을 건설재료로 사용함으로써 얻어지는 친환경성을 정량적으로 평가해 녹색기술인증 신청	① 녹색기술인증 추진	1건	녹색기술인증 추진 여부	녹색기술 인증신청서	1						
			계					20	특허 출원/등록 : 2 건 논문 : 2 건 설계시공지침서 : 1 건 기술실시계약 : 1 건 건설기술인증추진 : 1 건 한정적용 : 3 건 시제품제작 : 3 건 녹색기술인증추진 : 1 건	완기분석보고서 : 1 건 녹색기술인증추진 : 1 건		
									특허 출원/등록 : 2 건 논문 : 2 건 설계시공지침서 : 1 건 기술실시계약 : 1 건 건설기술인증추진 : 1 건 한정적용 : 3 건 시제품제작 : 3 건 녹색기술인증추진 : 1 건	완기분석보고서 : 1 건 녹색기술인증추진 : 1 건		

(3) 세부성과내역

(가) 논문게제 성과

게제 연도	논문명	저자			학술지명	Vol. (No.)	국내외 구분	SCI 구분
		주저자	교신저자	공동저자				
2016	Experimental Study on Reinforced Concrete Column Incased In Prefabricated Permanent Thin-Walled Steel Form	Oh, Jae Yuel	Kim, Kang Su	Lee, Deuck Hang Lee, JungMin Kim, Sung-Bae	Advances in Materials Science and Engineering	Vol. 2016, Article ID 3806549	국외	SCI(E)
2017	편심하중을 받는 철반 영구거푸집 적용 철근선조립 기둥의 구조성능평가	오재열	김강수	이득형, 양현모, 김민수	대한건축학회논문집	Vol. 33, No. 5	국내	국내등록

(나) 특허 성과

출원된 특허의 경우				등록된 특허의 경우			
출원 연도	특허명	출원인	출원국	출원 연도	특허명	등록인	등록국
2015	성형강판을 이용하여 내부에 T형 물기를 갖는 기둥 영구거푸집	㈜더나은, 서울시립대, (주)엔아이	대한민국	10-2015-0139357	성형강판을 이용하여 내부에 T형 물기를 갖는 기둥 영구거푸집	㈜더나은, 서울시립대, (주)엔아이	대한민국
2015	철근 기계식 이음장치	㈜더나은, 서울시립대, (주)엔아이	대한민국	10-2015-139359	철근 기계식 이음장치	㈜더나은, 서울시립대, (주)엔아이	대한민국

(다) 기술기사 및 학술발표대회

게제 연도	논문명	저자		학술지명	Vol. (No.)	국내외 구분
		주저자	공동저자			
2017	산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥의 실용화 설계-시공기술 개발	김강수	오재열, 허인욱, 이원복, 강성배, 권순영	한국콘크리트학회	Vol. 29, No. 1	국내 기술기사
2016	중심압축을 받는 철근선조립 기둥의 거동에 관한 연구	오재열	박민국, 김민수, 김강수	대한건축학회 추계 학술발표대회 논문집	Vol. 36, No. 2	국내 학술발표대회 논문

2. 관련 분야 기여도

(1) 기술적 측면

- 개발기술은 산업부산물로서 폐기물 처리되던 여철을 영구 강재 거푸집으로 선제적으로 친환경 기술이다. 영구 강재 거푸집을 활용함으로써 경제성을 도모하는 한편 모든

철근을 공장에서 일체배근하고 거푸집에 고정하여 그림 4.1에 나타난 것과 같이 현장에서의 배근작업 및 가설작업을 생략할 수 있으며, 이를 통하여 공기 및 노무비의 획기적인 단축이 가능할 것으로 판단된다.

- 현장에서는 개발 기둥의 양측 및 설치와 동시에 콘크리트 타설이 가능하고, 강재 거푸집의 강성이 충분히 확보되기 때문에 별도의 가설재 설치가 필요하지 않다. 그러나 부재의 강도 설계시에는 강-콘크리트 합성기둥이 아닌 철근콘크리트 부재로 간주하기 때문에 합성기둥에서 요구되는 추가적인 제안조건이나 내화성능 확보를 위한 내화피복 공정을 생략하여 설계 및 시공이 가능하다.
- 기존에 개발된 철근콘크리트 시공 기술이나 접합부 상세는 물론 다양한 형태의 합성보에서도 즉시 적용가능 하며, 기둥간의 효율적인 연결부 개발과 고성능 철근의 활용을 통하여 국·외에서 시장경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

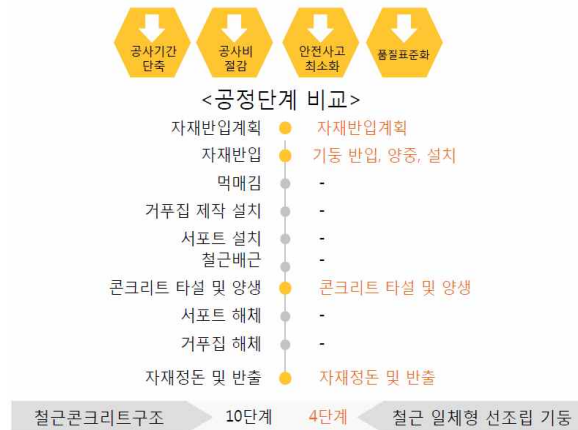


그림 4.1 RC기둥과 개발기둥의 공정단계 비교

(2) 경제적·산업적 측면

- 산업부산물을 활용한 친환경 기술로서 환경적 측면과 함께 경제적 측면에서도 잇점이 많으며, 단순히 물량을 감소함으로써 경제성을 확보하는 것이 아니라 공정을 최소화하고 가설재 및 내화피복 공정을 생략하면서 공기와 노무비 감축에 따른 경제성 확보 효과가 매우 우수할 기대된다.
- 이 연구를 통하여 구조적 성능 검증, 기둥 간의 연결부 상세 개발 및 고성능 철근의 활용 등을 통하여 국내는 물론 해외 시장에서도 충분한 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 건설기술인증 추진을 통하여 개발부재의 상용화가 이루어진다면 수요가 더욱 높아질 수 있을 것으로 기대된다. 특히, 건물의 층고가 높아지면 거푸집 설치를 위하여 수반되는 가설공사 비용이 크게 증가하기 때문에 이러한 공사에 적합한 개발 기술의 적용효과가 특히 높아질 것으로 기대된다. 이와 더불어, 산업부산물인 여철을 활용한 친환경적 측면을 부각하여 녹색기술인증을 확보함으로써 개발 기술의 진보성을 충분히 활용하여 시장을 선도할 수 있을 것으로 기대된다.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 연구개발성과

- 이 연구에서는 노동집약적인 기존의 철근콘크리트 공법이 내재하고 있는 문제점 중 거푸집 제작공정 및 비용을 개선할 수 있는 산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥을 개발하는 것을 주요목적으로 하였으며, 개발기둥의 Mock-up 부재 제작, 거푸집의 측압에 대한 성능 확보, 기둥의 중심 압축성능 및 편심 압축성능 확보, 횡력에 대한 구조성능 확보, 기둥-보 접합부의 구조성능 검증, 철근의 이음성능 확보, 경제성 및 시공성 분석 등을 수행하였다. 특히, 정량적인 성과로는 특허 등록 2 건, 논문(SCIE급) 1 건, 논문(국내학술) 1 건, 기술기사 1 건, 학술발표대회 1 건, 설계·시공지침서 1 건, 현장적용 3 건, 시제품제작 5 건, 시제품제작(Mock-up) 1 건, 제작결과보고서 1 건 등을 달성하였으며, 녹색기술인증 및 건설신기술 인증을 추진하고 있다.

2. 활용계획

- 이 연구개발결과의 향후 5년간 성과활용 목표 및 계획을 정리하여 표 5.1에 나타내었으며, 활용계획의 주요 활동내용은 표 5.2에 나타내었다.

표 5.1 향후 5년간 성과활용 목표 및 계획

단 계	종료 후 1년	종료 후 2년	종료 후 3년	종료 후 4년	종료 후 5년
I	기술 개발 단계 ☐ 완료	기술 개발 단계 ☐ 완료	기술 개발 단계 ☐ 완료	기술 개발 단계 ☐ 완료	기술 개발 단계 ☐ 완료
II	기술 검증보완 단계 ☐ 준비 ☐ 진행중 ☒ 완료	기술 검증보완 단계 ☐ 준비 ☐ 진행중 ☐ 완료	기술 검증보완 단계 ☐ 준비 ☐ 진행중 ☐ 완료	기술 검증보완 단계 ☐ 준비 ☐ 진행중 ☐ 완료	기술 검증보완 단계 ☐ 준비 ☐ 진행중 ☐ 완료
III	실용화 추진 단계 (마케팅) ☐ 준비 ☒ 진행중	실용화 추진 단계 (마케팅) ☐ 준비 ☐ 진행중	실용화 추진 단계 (마케팅) ☐ 준비 ☐ 진행중	실용화 추진 단계 (마케팅) ☐ 준비 ☐ 진행중	실용화 추진 단계 (마케팅) ☐ 준비 ☐ 진행중
IV	시장수용 단계 ☐ 초기발생 ☐ 지속발생	시장수용 단계 ☒ 초기발생 ☐ 지속발생	시장수용 단계 ☐ 초기발생 ☒ 지속발생	시장수용 단계 ☐ 초기발생 ☒ 지속발생	시장수용 단계 ☐ 초기발생 ☒ 지속발생

표 5.2 활용계획의 주요 활동내용

단 계	단계명	주요 활동내용		
		주제*	성과물**/개수	시기
I	기술 개발 단계	-	-	R&D종료시점
II	기술 검증보완 단계	(주)더나은, 시립대, (주)엔아이	녹색기술인증/1건	~종료후 1년
III	실용화 추진 단계	(주)더나은, 시립대, (주)엔아이	건설신기술/1건	~종료후 2년
IV	시장 수용 단계	(주)더나은, (주)엔아이	현장적용/3회	~종료후 3년

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

(1) 한국

(가) 한국의 구조설계기술 현황

- CFT는 이전에도 일부학자들에 의해 국내에 소개된 적이 있으나, 1990년대에 들어서면서 본격적인 연구가 이루어지기 시작했으며, 현재까지도 활발한 연구가 진행되고 있다. 특히 1990년대 중반 대기업을 중심으로 고층건물 구조시스템에 대한 관심증대와 건설 계획 등의 수립으로 매우 활성화되었다. 그러나, 발표된 CFT관련 논문의 주제별 분포가 대부분 기둥이나 접합부에 편중되고 아직 선진외국에 비해 양적이 측면이나 다양성에서 다소 부족함을 보여주고 있다.
- 대기업을 주도한 기술개발연구로서는 1992년 삼성건설 등의 “합성강관구조의 접합부에 관한 연구”를 시작으로 1994년에는 대한주택공사의 주관하에 8개 기업이 공동으로 진행한 “철골조 초고층 아파트 시스템 개발(1,2,3)”에서 CFT의 적용기술을 연구하였고, 이후 “콘크리트충전 각형강관 구조의 내진안전성 확보를 위한 접합부 성능개발(1995~1997, 대림산업), “콘크리트충전 각형강관 기둥의 실용화 연구(1997~1999, 현대건설), “CFT 장기거동특성 연구(1998~2000, 삼성건설)”, “초고층 철골복합구조의 합성강관(CFT) 충전기술 및 재료개발(2000~2001, 대림산업)” 등의 연구가 각 기업의 독자기술 개발 및 보유의 차원에서 진행되었다.
- 한편, 민간연구소로서 (재)포항산업과학연구원 강구조연구소는 개별적인 연구결과의 축적보다는 실제 건물에의 설계적용이 CFT의 발전에 더욱 중요할 수 있음을 인식하고 “콘크리트충전 강관구조(CFT) 설계기준에 관한 연구(1998~2000)”를 한국강구조학회와 공동으로 진행하였다. 또한 강구조학회는 2003년 “콘크리트충전 강관구조 설계 및 시공지침”을 발간, 기술강습세미나등을 개최하였으나 실제 적용에 어려움이 많아 2004년 “CFT구조 설계 및 시공매뉴얼”까지 발간함으로써 CFT구조의 현장 적용에 대한 활용도를 높이는 계기를 마련하였다.

(나) 한국의 구조설계기법

- CFT의 허용휨응력도는 콘크리트의 휨저항을 무시하고 강관 부분만을 대상으로 하여 산정한다. CFT기둥이 폐단면을 이루어 비틀림에 대해 특별한 고려가 필요치 않고, 복잡한 계산이 요구되는 콘크리트의 압축측 기여분을 무시하는 것 등을 고려하여, 허용휨응력도(F_y)를 $0.75F_y$ 로 규정하고 있다. CFT의 허용전단응력(F_s)은 강관만이 전단력에 저항하는 것으로 가정하여 AISC-ASD와 동일하게 $0.4F_y$ 로 제한하고 있다.
- 휨과 압축력을 받는 부재는 압축재 설계부분에서 산정된 허용압축응력과 모멘트가 조합되는 내력상관식을 만족하도록 규정하고 있다. 표 6.1에 나타난 바와 같이 SRC기둥 설계와 동일하게 합성단면을 고려하여 휨과 압축력의 관계를 2차함수로 설정함으로써 부재의 과다설계를 방지할 수 있도록 제시되어 있으며, 이는 미국의 AISC-SSRC (Structural Stability Research Center)의 연구에 근거를 두고 있다. 또한 SRC기둥 설계와 동일하게 AISC-ASD에서 제시하고 있는 각 방향의 모멘트확대계수도 도입되어 있다.

표 6.1 한국의 CFT 관련 설계기준 조항

적용	CFT구조 설계 및 시공매뉴얼
폭두께비	$b/t \leq \sqrt{3E_s/f_y}$ (각형 CFT) $h/t \leq \sqrt{8E_s/f_y}$ (원형 CFT)
압축재 허용압축응력도	$F_c = \frac{\left[1 - \frac{1}{2}\left(\frac{KL}{r_m C_c}\right)^2\right] F_{ym}}{\frac{5}{3} + \frac{3}{8}\left(\frac{KL}{r_m C_c}\right) - \frac{1}{8}\left(\frac{KL}{r_m C_c}\right)^3} \quad \left(\frac{KL}{r_m} \leq C_c\right) \text{일때}$ $F_c = \frac{12\pi^2 E_m}{23\left(\frac{KL}{r_m}\right)^2} \quad \left(\frac{KL}{r_m} > C_c\right) \text{일때}$
휨과 압축력을 받는 CFT 부재의 내력상관식	$\left(\frac{f_c}{F_c}\right)^2 + \frac{C_{mx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F_{cx}}\right)} \cdot \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{C_{my}}{\left(1 - \frac{f_c}{F_{cy}}\right)} \cdot \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$
비고	- 압축재의 설계지침은 미국의 AISC-ASD의 설계식을 기본개념으로 함. - 폭두께비/지름두께비 제한식은 AISC-LRFD, ACI, BS5400 - 기준식과 동일하게 적용

(2) 일본

(가) 일본의 구조설계기술 현황

- CFT구조의 사용이 왕성한 일본에서는 세토해협을 횡단하는(아와지 섬부터 시코쿠까지) 송전철탑을 CFT로 건설하였으며, 이와 동일한 원형 CFT기둥에 대하여 실험 및 해석을 수행하였다. 이를 계기로 1967년 원형강관 기둥에 대한 구조설계 기준이 일본 건축학회에 의하여 제정되었다. 그러나 강관의 외측에 피복 콘크리트가 없기 때문에 건축기준법상 철골철근콘크리트 구조로 인정받지 못해서 널리 보급되지는 못하였다. 그 후 RC 구조에 대한 내진 보강공법의 하나로써 기존 RC 기둥에 철골의 막을 입히는 공법이 연구되었으며, 이에 대한 많은 시공 사례가 있다. 일본에서는 CFT구조가 RC조, S조, SRC조에 이어 제4의 구조시스템으로 널리 적용되고 있으며, 중·저층 건축물에서 초고층에 이르기까지 많은 시공사례가 있다. 특히 일본 건설성에서는 동경만 근처의 주거용 아파트에 CFT구조를 적용하도록 권장하고 있다. 또한 1989년에는 일본 대부분의 건설회사, 설계사무소, 철강제조사 등이 참여하는 신도시하우징협회가 구성되었으며, 이 협회를 통하여 CFT구조에 대한 기술지원, 기술지도, 구조심사 등의 활동이 활발하게 이루어지고 있다.

(나) 일본의 구조설계기법

- 일본건축학회는 1967년 원형강관을 대상으로 한「강관콘크리트 구조설계기준 및 해설」을 출판하였으며, 1980년에 개정되면서 각형강관도 적용범위에 포함하였다. 「철골철근콘크리트 구조설계기준 및 해설」(이하 SRC기준이하 함)은 1981년 내진설계에 관한 건축기준법의 개정과 합성, 혼합형식의 다양화 등에 대응하여 1987년까지 3차례 개정되었다. 이후 강관콘크리트구조는 철골철근콘크리트의 일종으로 취급되어, 강관콘크리트 구조설계기준의 내용이 SRC 기준에 포함되면서 두 개의 기준이 하나로 통합되었다.

- 이 지침의 적용범위는 강관속에 콘크리트를 충전한 부재 (Concrete Filled Steel Tubular Member, CFT 기둥) 및 철골부재 또는 강관콘크리트 합성부재를 대상으로 한다. CFT부재에 사용되는 강관의 폭두께비(직경두께비)는 「강구조설계기준」(이하 S규준이라 함)의 제한값의 1.5배 이내, 강재의 강도는 600 MPa 이내, 충전콘크리트의 압축강도는 60 MPa 이내로 한다.

(2) 미국

(가) 미국의 구조설계기술 현황

- 20세기 초 내화를 목적으로 철골기둥에 콘크리트로 피복한 것이 미국에서 합성기둥의 초기형태였다. 당시 콘크리트는 단순히 내화만을 위한 것으로 기둥의 내력산정에는 반영되지 않았다. 2차 세계대전 이후 경량의 내화재료가 개발되면서 이러한 형태의 합성기둥은 신축건물에 더 이상 사용되지 않았다. 70년대 초에 들어서면서 대규모의 철골건물에 경제적으로 적용할 수 있는 합성기둥이 재등장하게 된다. 텍사스주립대의 Furlong에 의해 콘크리트충전강관에 대한 연구가 발표된 것도 이 시기였다. Furlong에 의한 CFT 초기 연구결과는 현재 미국에서 사용되고 있는 설계지침의 근간을 이루고 있다.
- 일본에 비해 미국에서는 CFT구조가 상대적으로 널리 적용되지 않고 있다. 미국에서는 미국강구조학회(AISC, 2001)의 기준과 미국콘크리트학회(ACI, 1999)의 기준이 적용되고 있으며, AISC의 LRFD설계법은 압축력만을 받는 CFT기둥의 강도는 비교적 정확히 예측하는 반면, 휨과 압축을 동시에 받는 경우에는 실제 내력과 적지 않은 차이를 보이는 강도를 제공하는 것으로 보고되고 있다.

(나) 미국의 구조설계법

- 현재 미국에서 통용되는 CFT설계기준으로 미국콘크리트협회(ACI)의 ACI 318-02와 미국철강협회(AISC)의 LRFD 설계법이 있다. 1986년 이전까지 합성기둥에 대한 설계규정은 ACI 318에서만 다루어졌었다. 초기의 허용응력설계방법은 ACI 318-63 이후 강도설계법으로 전환되고 ACI 318-71을 통해 콘크리트와 합성되는 철근, 강관, 형강 등 모든 축방향 강재를 포함하게 되었다.
- 1970년대에 George Winter에 의해 조직된 Structural Specification Liaison Committee를 통해 AISC 합성기둥 설계방법에 대한 작업이 시작되었다. 허용응력법에 의한 설계규정이 먼저 개발되고 추후 극한강도단계로 전환되어 마침내 1986년에 합성기둥에 대한 설계규정이 AISC-LRFD에 도입되었다. ACI 318과 AISC-LRFD에서 CFT 부재설계에 대한 접근방식은 각 기준의 기본관점에 따라 차이를 보인다. ACI 318에서는 부재단면의 변형에 기초하여 CFT의 설계내력을 평가하지만 AISC-LRFD에서는 변형보다는 부재응력에 초점을 맞추어 설계식을 제시하고 있다.
- 즉, ACI에서는 강관을 등가의 철근으로 치환하여 CFT를 철근콘크리트 기둥의 설계방식으로 다루지만 AISC-LRFD는 철골기둥의 설계식을 그대로 사용하고 부재강도와 강성에 관련된 계수만을 보정하여 합성 기둥을 설계하도록 규정하고 있는 것이다. 표 6.2에 두 기준의 부재내력산정에 대한 설계식을 비교하여 나타내었다. CFT 강관에 폭두께비 제한은 강관의 항복 전에 국부좌굴이 발생하는 것을 방지하기 위해서이며, 일축방향

으로 등분포의 면내 압축력이 작용할 경우 탄성좌굴응력은 다음 식 6.1과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_c = k \frac{\pi^2 E_s}{12(1-\nu^2)(b/t)^2} \quad (6.1)$$

- AISC-LRFD에서 규정하고 있는 각형강관의 폭두께비 제한치는 길이방향 경계조건을 단순지지로 하여 산정된 것이다. CFT와 같이 좌굴이 강관의 외부에 대칭적으로 발생하는 경우에는 b/t 제한값을 증가시킬 수 있지만 현재 AISC-LRFD에서는 반영되어 있지 않다.
- 그림 6.1과 같이 휨모멘트가 0인 경우, 각 기준에 따라 산정한 CFT의 축내력은 거의 유사하지만 모멘트가 증가함에 따라 큰 차이가 발생한다. AISC-LRFD는 세장한 철골기둥 설계에 근거하고 있기 때문에 CFT부재의 내력을 상당히 안전측으로 평가하고 있다.
- 이러한 이유로 AISC-LRFD에서는 강관의 단면적이 CFT 전체 단면적의 4%이하일 경우에는 철근콘크리트기둥으로 설계할 것으로 규정하고 있다. 연구결과에 의하면 ACI에 의한 보-기둥의 극한하중과 실험에서 평가된 내력은 거의 근접하는 것으로 알려져 있다. 하지만 ACI의 방법은 컴퓨터나 설계도표의 도움이 없이는 적용하기가 어렵다는 단점이 있는 반면에 AISC-LRFD는 쉽게 사용할 수 있다는 장점이 있다. 올해 발행된 ACI 318-02에서는 복합구조의 건물설계에 일관성을 갖도록 ASCE 7-98의 하중계수를 적용하고 있다. 즉, 계수하중 U=1.4D+1.7L이 U=1.2D+1.6L로 변경되었다. 다만, ACI에서는 이전 기준에 의한 결과와 일관성을 유지하기 위하여 강도저감계수 ϕ 도 같이 변경되었다.

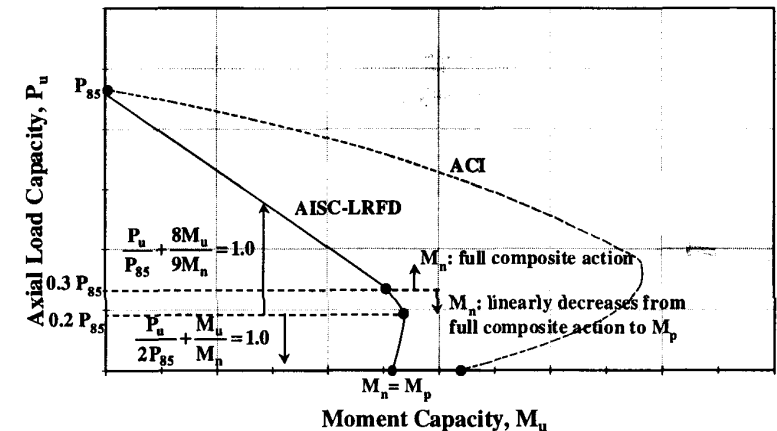


그림 6.1 각 기준별 모멘트-축하중상관도

표 6.2 미국의 CFT 관련 설계기준 조항

적용	ACI 318-02 (2002)	AISC-LRFD 3판 (2001)
폭두께 비	$b/t \leq \sqrt{3E_s/f_y}$ (각형 CFT) $h/t \leq \sqrt{8E_s/f_y}$ (원형 CFT)	$b/t \leq \sqrt{3E/F_y}$ (각형 CFT) $D/t \leq \sqrt{8E/F_y}$ (원형 CFT)
압축재	$\phi P_n = 0.85 \phi [0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}]$ $\phi = 0.70$ 또는 $\phi = 0.65$	$\phi_c P_n = \phi_c A_s F_{cr}$, $\phi_c = 0.85$ $A_g = A_s$, $F_{my} = F_y + 0.85 f'_c (A_c/A_s)$
비고	휨과 축력의 상관도는 철근콘크리트의 경우와 동일하게 구한다. 기본가정: (a) 단면은 변형후에도 평면을 유지. (b) 최대 콘크리트 변형도는 0.003 (c) Whitney 응력블록 크기는 $0.85f'_c$ (d) 콘크리트 인장강도는 무시 (e) 강재변형 - 응력도관계에서 변형경화 (strain hardening) 무시	휨과 축력을 받는 대칭 CFT의 설계강도 상관식에서 공칭휨강도는 다음과 같이 산정한다. $P_u=0$ 일때는 합성거동이 없다고 가정하여 강관의 소성모멘트(M_p)를 M_n 값으로 정한다. $P_u > 0.3(\phi_c P_n)$ 일 경우에는 완전한 합성거동을 하는 것으로 간주하여 합성단면에 대해 소성모멘트를 산정한다. $0 < P_u < 0.3(\phi_c P_n)$ 구간에서는 직선보간 한다.
	AISC-ASD	
휨과 압축력을 받는 CFT 부재의내력상관식	$\left(\frac{f_c}{F_c}\right)^2 + \frac{C_{mx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right)} \cdot \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{C_{my}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right)} \cdot \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$	

제7장. 연구개발성과의 보안등급

- 해당사항 없음.

(2) 실험실 정밀안전진단 실시

- 연구실의 안전점검 및 정밀안전진단은 시설물 안전점검 및 정밀안전진단 지침에 근거하여 마련된 연구실 자체 지침에 따른다.
- 안전점검으로 정기점검은 6개월에 1회 실시하는 것으로 하며, 정밀점검은 1년에 1회 실시하는 것으로 한다.
- 안전점검 및 정밀안전진단의 실시자는 주관연구 책임자 또는 박사과정 연구원으로 하되, 지침을 반드시 숙지하도록 한다.

(3) 교육 훈련

- 참여연구원의 교육훈련은 산업안전 보건교육규정에 의거하여 실시하는 것을 원칙으로 한다.
- 교육은 1년에 1회 현장교육을 실시하며 교육을 실시하는 자는 안전보건공단의 교육과정을 이수한자로서 주관연구 책임자 또는 박사과정 연구원에 한한다.
- 모든 참여 연구원은 1년에 1회 건강검진을 실시하며, 실험을 진행하는 자 및 참여하는 자는 교내에서 지원하는 상해보험에 가입한다.

(4) 보험 가입 현황

- 보험계약 일반
 - 보험(공제)적용 : 휴무·공휴일 관계없이 적용
 - 가입대상 : 서울시립대학교가 인정하는 서울시립대학교 연구활동종사자
 - 가입인원 : 5700여명 (대학 4000명, 대학원 1700명)
 - 보험(공제)종류 : 「연구실 안전환경 조성에 관한 법률」에 따라 연구실에서 발생한 사고로 인한 부상·질병·신체장해·사망 등 생명 및 신체상의 손해를 보상하는 내용이 포함된 보험(공제)
- 보험(공제)적용
 - 연구활동종사자 전공 및 신분에 따라 보험(공제)료 차등 적용
 - 계약 당시 내역에 없는 연구활동종사자라도 사고 당시 서울시립대학교 연구활동 종사자인 경우에는 보험(공제)적용(신고지체, 누락 등)
 - 연구개발과정과 교과과정에서 직접 필요한 시험, 실험, 측정, 분석 등 이와 유사한

활동 중의 손해

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

(5) 보험(공제) 제안 내용)

○ 보장내역 및 한도

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

○ 보장내역별 제안내용

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

○ 지급제한(면책사항)

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

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

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

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인 용 횟수 등)
1	논문 (SCIE급)	Experimental Study on Reinforced Concrete Column Incased in Prefabricated Permanent Thin-Walled Steel Form	시립대, (주)더나은	주저자 및 공동저자	Advances in Materials Science and Engineering	1.01	2016.08.07	단독사사	0
2	논문 (국내등록)	편심하중을 받는 철관 영구거푸집 적용 철근선조립 기둥의 구조성능평가 성형강판을	시립대	주저자 및 공동저자	대한건축학회 논문집	-	2017.05.01.	단독사사	0
3	특허 (등록)	이용하여 내부에 T형 돌기를 갖는 기둥 영구거푸집	(주)더나은, 시립대, (주)엔아이	출원인	대한민국	-	2015.10.02	단독사사	-
4	특허 (등록)	철근 기계식 이음장시	(주)더나은, 시립대, (주)엔아이	출원인	대한민국	-	2015.10.02	단독사사	-
5	특허 (등록)	성형강판을 이용하여 내부에 T형 돌기를 갖는 기둥 영구거푸집	(주)더나은, 시립대, (주)엔아이	출원인	대한민국	-	2017.04.13	단독사사	-
6	특허 (등록)	철근 기계식 이음장치	(주)더나은, 시립대, (주)엔아이	출원인	대한민국	-	2015.04.13	단독사사	-
7	기술기사	산업부산물로 제작된 친환경 영구거푸집을 적용한 고성능 철근 선조립 콘크리트 기둥의 실용화 설계·시공기술 개발	(주)더나은, 시립대, (주)엔아이	주저자 및 공동저자	한국콘크리트 학회 논문집	-	2017.01.01.	단독사사	-
8	학술발표 대회 논문	중심압축력을 받는 철근선조립 기둥의 거동에 관한 연구	시립대	주저자 및 공동저자	대한건축학회 추계학술발표 대회 논문집	-	2016.10.04	단독사사	-

제11장. 기타 사항

(1) 연구실 안전조치 이행계획

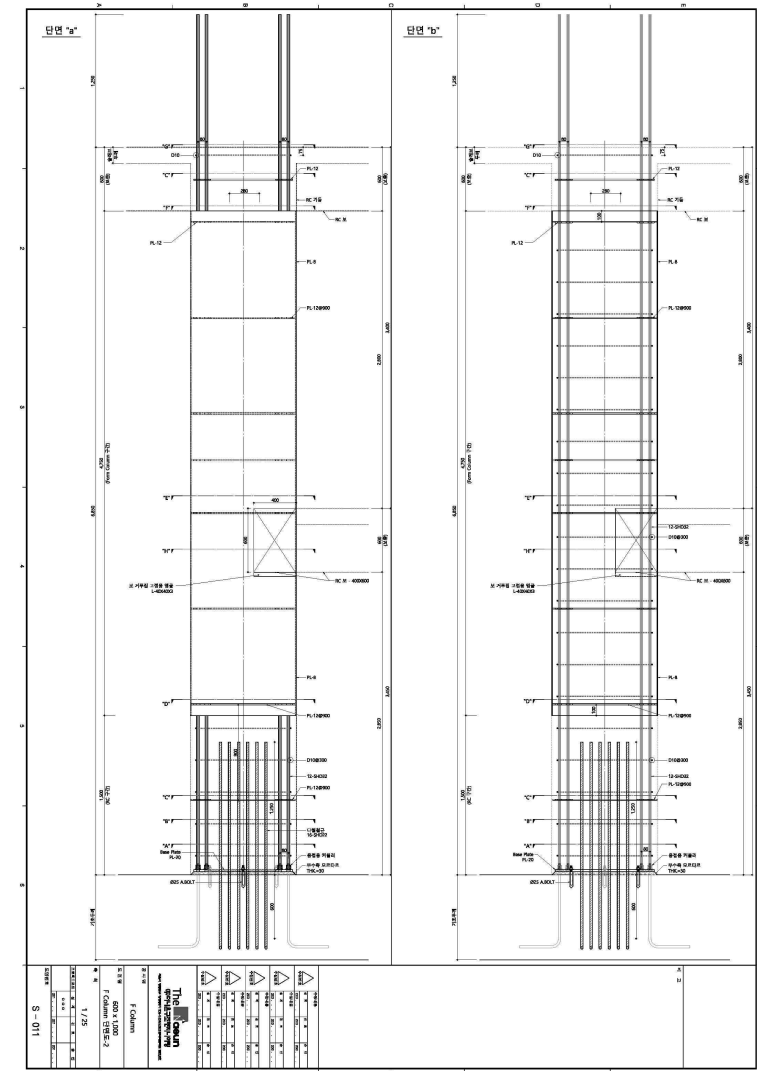
○ 실험동은 아래 그림과 같은 안전구획에 따라 관리한다.

제12장. 참고 문헌

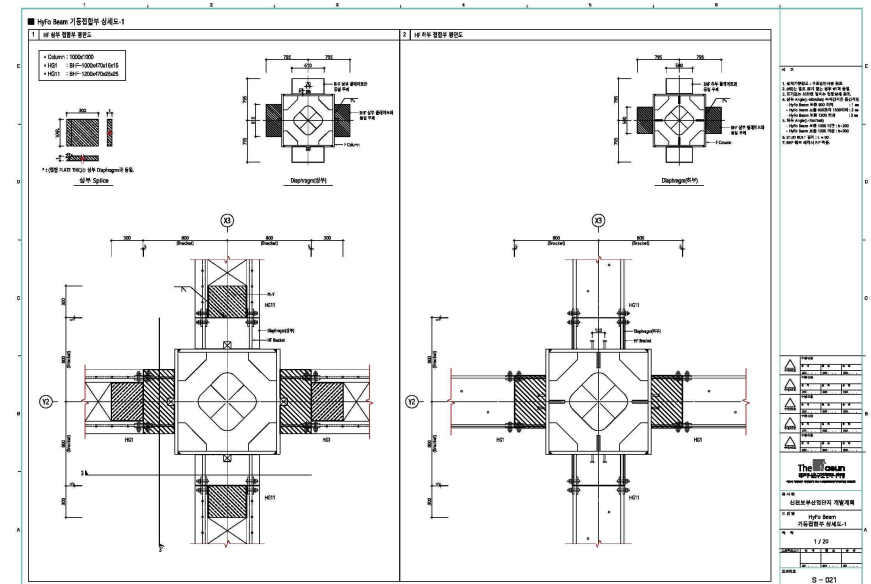
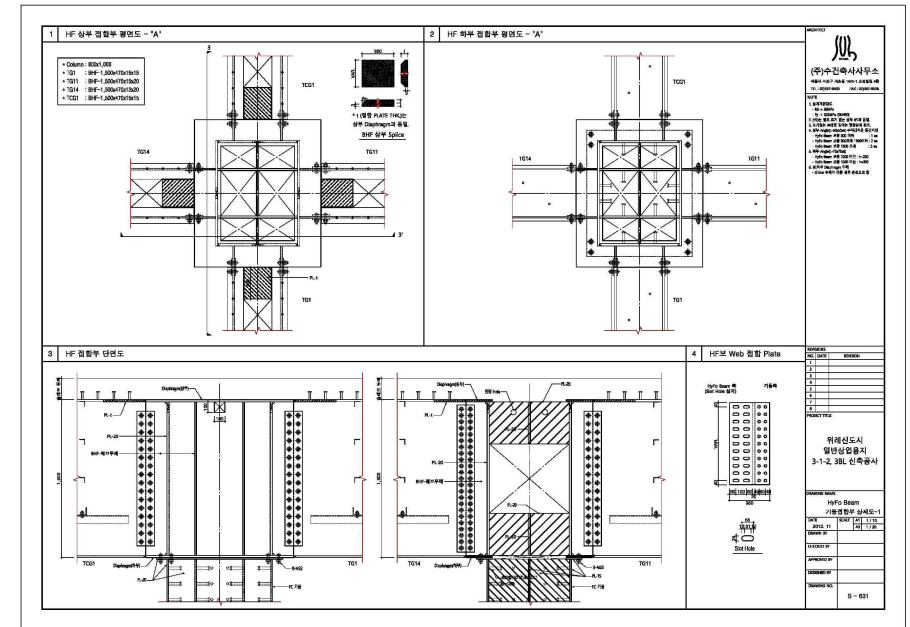
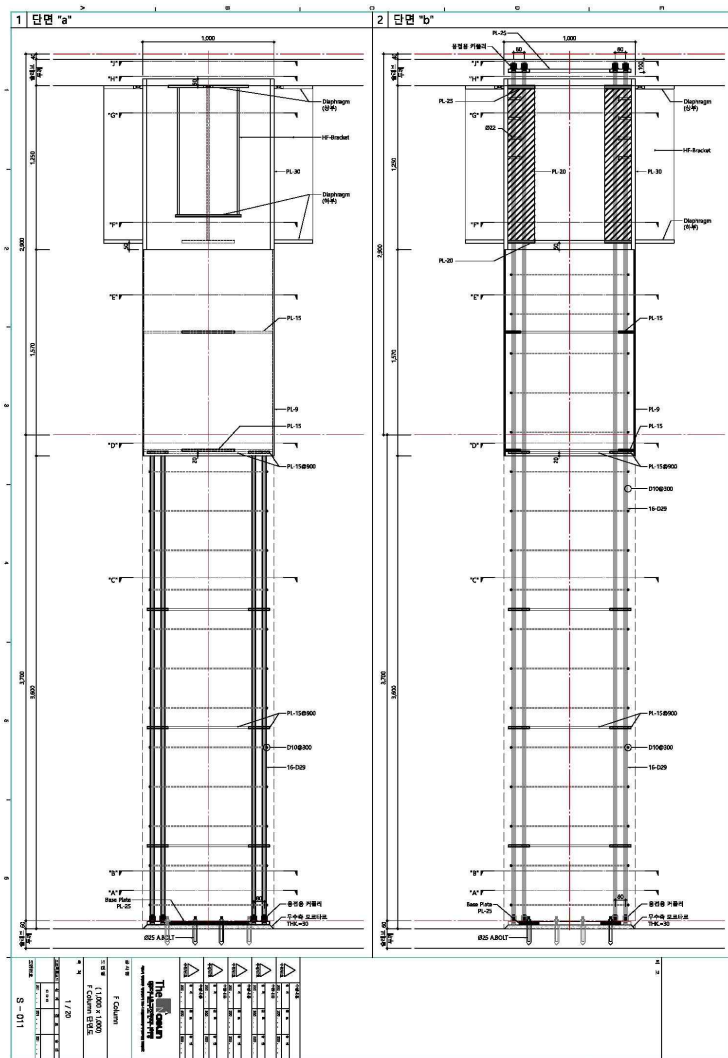
- [1] A. Mwafy, N. Hussain, and K. El-Sawy, "Seismic performance and cost-effectiveness of high-rise buildings with increasing concrete strength," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 24, no. 4, pp. 257.279, 2015.
- [2] H. Sezen and M. Shamsai, "High-strength concrete columns reinforced with prefabricated cage system," *Journal of Structural Engineering*, vol. 134, no. 5, pp. 750.757, 2008.
- [3] M. Shamsai, E. Whitlatch, and H. Sezen, "Economic evaluation of reinforced concrete structures with columns reinforced with prefabricated cage system," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 133, no. 11, pp. 864.870, 2007.
- [4] T. T. Lie and T. D. Lin, "Fire performance of steel reinforced concrete columns," *Journal of Structural Engineering*, vol. 141, no. 4, 2014.
- [5] T. T. Lie and T. D. Lin, "Influence of restraint on fire performance of reinforced concrete columns," *Fire Safety Science*, vol.1, pp. 291.300, 1986.
- [6] M. Johansson and K. Gylltoft, "Mechanical behavior of circular steel-concrete composite stub columns," *Journal of Structural Engineering*, vol. 128, no. 8, pp. 1073.1081, 2002.
- [7] J. Liu, X. Wang, and S. Zhang, "Behavior of square tubed reinforced-concrete short columns subjected to eccentric compression," *Thin-Walled Structures*, vol. 91, pp. 108.115, 2015.
- [8] X. Zhou and J. Liu, "Seismic behavior and strength of tubed steel reinforced concrete (SRC) short columns," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 66, no. 7, pp. 885.896, 2010.
- [9] X. Zhou, B. Yan, and J. Liu, "Behavior of square tubed steel reinforced-concrete (SRC) columns under eccentric compression," *Thin-Walled Structures*, vol. 91, pp. 129.138, 2015.
- [10] S.-J. Lee, D. H. Lee, K. S. Kim, J.-Y. Oh, M.-K. Park, and I.-S. Yang, "Seismic performances of RC columns reinforced with screw ribbed reinforcements connected by mechanical splice," *Computers and Concrete*, vol. 12, no. 2, pp. 131.149, 2013.
- [11] AISC-LRFD, *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*, AISC, Chicago, Ill, USA, 1999.
- [12] Eurocode4, *Design of steel and composite structures, Part 1-1 General rules and rules for buildings*, 1994.
- [13] KBC, *Korean Building Code*, Architectural Institute of Korea, Seoul, Republic of Korea, 2009.
- [14] ACI-318, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, ACI, Detroit, Mich, USA, 2014.
- [15] J. G. MacGregor, J. K. Wight, S. Teng, and P. Irawan, *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 1997.

제13장. 보완 자료

- RC구조 집합부 상세



- SRC구조 접합부 상세(단면)



주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술사업화지원사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발 성과를 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.