

16TBIP -
C092528-
02

시공성과 판폭두께비를 고려한
팔각 콘크리트 충전 강관합성기둥

2017

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

Technology Business Innovation Program
— R&D Report

보안 과제(), 일반 과제() / 공개(), 비공개()

국토교통기술사업화지원사업 최종보고서

발간등록번호

11-1613000-001878-01

R&D
16TBIP - C092528-02

시공성과 판폭두께비를 고려한 팔각 콘크리트 충전 강관합성기둥 최종보고서

2017.08.11.

주관연구기관 / (주) 센벡스

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

2. 제출문

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

'시공성과 판폭투게비를 고려한 팔각 콘크리트 충전 강관합성기둥'(연구개발 기간 : 2015.04.27 ~ 2017.04.26) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2017.06.01.

주관연구기관명 : ㈜센벡스 (대표자) 이창남



주관연구기관책임자: 이승환

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

3. 보고서 요약서

보고서 요약서

과제 고유 번호	16TBIP - 0092528-02	해당 단계 연구 기간	24개월	단계구분	2단계 / 2단계
연구사업명	중사업명	국토교통기술사업화 지원사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	시공성과 판폭두께비를 고려한 팔각 콘크리트 충전 강관합성기둥			
연구책임자	이 승 환	해당단계 참여 연구원 수	총: 6 명 내부: 6 명 외부: 명	해당단계 연구개발비	정부: 115 천원 기업: 84 천원 정부 외: 천원 계: 199 천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 10 명 내부: 10 명 외부: 명	총 연구개발비	정부: 231 천원 기업: 168 천원 정부 외: 천원 계: 399 천원
연구기관명 및 소속 부서명	(주)센벡스 / 연구개발부			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
요약				보고서 면수	126

본 과제를 통하여 개발한 합성기둥은 4개의 유닛 강판을 기둥 모서리에서 상호 결합하여 강관이 전체적으로 팔각형을 이루도록 하는 팔각 콘크리트 충전 강관기둥으로 사각과 원형의 장점을 동시에 가져올 수 있을 뿐 만 아니라 현 합성기둥의 단점을 보완하면서 경제성, 시공성, 그리고 안정성을 확보할 수 있는 새로운 합성기둥공법이다.

기존 합성구조에서 나타나는 판폭두께비의 제한, 배부름 현상, 복잡한 단면보강의 문제점을 해결하고 강·약축에 따른 강판두께조절, 롤포밍 분절제작, 단면성능의 향상을 통한 물량절감 효과를 극대화하며 보-기둥 내진접합과 내화성능을 통하여 사용성 한계를 효과적으로 극복하는 신공법이다.

연구를 통하여 목업 실험, 구조성능 실험, 내화구조인증, 신기술 인증 등의 연구개발을 진행하였으며, 이를 통해 공법의 내진성능과 시공성을 확인하였다. 또한, 4개의 실제 공사현장에 본 공법을 적용하여 사업화 실적을 도출하였다.

4. 국문 요약문

연구의 목적 및 내용	본 과제를 통하여 팔각 콘크리트충전 강관기둥(Octagonal Concrete Filled Tube Column, OCFT 이하)의 제작성과 단면성능을 검증하고 접합부 내진성능, 내화성능, 그리고 기초성능을 확보하여 공법을 개발한다. 기술개발의 일정과 내용은 다음과 같다. 1차년도에는 Mock-Up을 통한 제작성, 시공성과 접합부 내진성능 및 내화성능을 확보한다. 1분기에는 Mock-Up을 통하여 제작과정에서 발생하는 문제점을 인식하고 해결책을 찾는 것과 실제 양산이 가능한 제작방법에 수렴하는 것을 목표로 진행한다. 유니트 강판의 롤포밍과 용접접합과 같은 제작과정에서의 문제점과 콘크리트를 타설하여 배부름 현상과 같은 시공 시 발생하는 문제점을 확인한다. 2~3분기는 접합부 상세개발을 통한 내진성능 검증과 내화인증을 추진한다. 접합부 상세는 유한요소프로그램을 이용하여 설계할 계획이며, 접합부 상세가 개발되면 보와의 접합부 실험체를 선정하여 도면을 작성하고 실험체 제작을 하여 반복가력 실험을 통해 내진 성능을 검증 할 것이다. 내화실험은 국내 내화인증 실험업체에 의뢰를 하여 진행할 계획으로, 2시간이상의 내력성능을 확보한 내화인증서 획득을 추진한다. 2차년도에는 OCFT기둥의 단면성능을 검증하는 것을 목표로 압축성능, 휨성능 및 기초실험 진행과 경제성을 검증한다. 1~2분기에 압축 성능 실험, 휨 성능 실험을 통한 단면성능 검증 실험을 시작으로 연구를 시작 할 계획이며, 실험 후 실험데이터를 수집하고 실험결과를 분석하여 연구개발 목표치인 KBC기준에 따른 합성보 설계식을 만족하는지 검토한다. 3분기에는 기초로써 사용성과 경제성을 만족하는지 기초재하실험을 진행 할 것이며, 4분기에는 선정된 실험체를 바탕으로 인증된 건축회사에 의뢰하여 OCFT의 경제성을 검증한다. 또한 실험결과를 토대로 표준 설계 및 제작 지침서와 논문을 작성하며 2차년도 보고서를 작성하는 것으로 과제 연구를 마무리 한다.				
연구개발성과	1. 기둥의 배부름 현상감소와 판폭두께비 검증 2. Mock-up실험을 통한 제작성 검증 3. 제작물량과 실험결과를 바탕으로 해당공법의 경제성 평가 4. 기둥의 단면성능실험 및 접합부실험에 대한 논문 작성 및 제출 5. 기둥의 내화성능 검증 6. 기둥을 기초로 활용할 시의 성능 검증 및 논문 제출				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	본 개발 OCFT기둥은 단면의 강약축에 상관없이 단면성능을 동일하거나 각 축의 요구내력에 따라 설계가 가능하다. 그리고 비틀림 내력이 우수하여 높은 내력을 발휘하므로 말뚝으로 사용시 안전성을 확보할 수 있다. 또한, 원형에 가까운 8각형으로 모서리의 간섭이 없어 천공홀 직경을 감소시킬 수 있다. 타 공법과의 호환성 우수하고 다이어그램의 형상이 간단하여 증타와 보강이 쉽다. 또한 보의 응력전달이 원활하여 다이어그램의 생략이 가능하다. 철골보, 합성 보, RC 보와의 접합 상세 개발과 내진접합부 성능 실험을 통해 접합부 성능을 확보하면서 적용 가능한 범위를 넓히고, 공장 선조립 후에 현장 설치로 설계오차가 줄어든다. 본 개발기술인 OCFT기둥은 압축과 휨에 대한 내력이 크기 때문에 고하중 구조물에 적용 가능할 뿐 아니라 선조립을 통한 수직도 확보로 고층 건물에도 활용할 수 있다.				
핵심어 (5개 이내)	팔각형	충전형강관기둥	배부름 현상	판폭두께비	역타공법

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	In this research project, an Octagonal Concrete Filled Tube column (OCFT column) will be developed. The OCFT is composed of four-banded plates, and the plates are welded at the conners. The OCFT column is a new composite column system, which could enhance economic feasibility, construction ability, and safety. Compared with formal composite column systems, the OCFT column system could resolve width-thickness ratio restriction, deflection by concrete pouring, and complicate connection detail. Also, by using different thicknesses of plates along the axis, the OCFT column system reduce steel quantity and enhance load-carrying capacity of the octagonal section. The OCFT column can be applied to Top-Down construction system. Compared with the rectangular section, the octagonal section could reduce boring diameter for PDR. From the advantage, the construction cost and period will be reduce.					
Results	1. reduce the deflection by concrete pouring and review the width to thichness ratio 2. review the fabrication procedure by mock-up 3. Evaluate the economic feasibility of the OCFT column system 4. research paper on the load-carrying capacity of the octagonal section and beam-column connections 5. Evaluate the fireproofing capacity 6. research paper on the top-down construcion system with OCFT column.					
Expected Contribution	By using different thicknesses of plates along the axis, the OCFT column system reduce steel quantity and enhance load-carrying capacity of the octagonal section. the octagonal section could reduce boring diameter for PDR. From the advantage, the construction cost and period will be reduce. Because the OCFT column is pre-fabricated in factory, construction tolerance will be reduced and installation in field become easy. Thus, the OCFT can be applied to structures, which demand high load-carrying capacity and precise construction, like large scale factory and high-rise building.					
Keywords	octagonal	concrete filled tube column	bulging	width to thickness ratio	top-down construction	

<차 례>

제1장. 연구개발과제의 개요	1
제1절. 연구개발 목적	1
제2절. 연구개발의 필요성	3
제3절. 연구개발 범위	12
제2장. 국내외 기술 개발 현황	13
제1절. 국내외 관련 연구 동향	13
제2절. 국내외 관련 기술 특허 동향	21
제3장. 연구 수행 내용 및 성과	23
제1절. OCFT기동 측압 안정성 목업 테스트	23
제2절. OCFT기동 접합부 성능실험 및 내진성능 평가	33
제3절. OCFT기동 내화성능	49
제4절. OCFT기동 압축성능 평가	58
제5절. OCFT기동 접합부 성능실험 및 휨 성능 평가	75
제6절. OCFT기동 기초공법 적용성 평가	89
제7절. OCFT기동 경제성 평가	100
제8절. OCFT기동 사업화 실적	101
제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	106
제1절. 목표 달성도	106
제2절. 관련 분야 기여도	108
제5장. 연구개발성과의 활용 계획	115
제1절. 연구성과 활용 계획	115
제2절. 연구성과 향후 활용방안	115
제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	118
제7장. 연구개발성과의 보안등급	120
제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	121
제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	122
제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	123
제11장. 기타 사항	124
제12장. 참고 문헌	125

제1장. 연구개발과제의 개요

제1절. 연구개발 목적

1. OCFT(Octagonal Concrete Filled Tube, 이하 OCFT)기둥 단면 개발

- 기존 사각형 및 원형 형태의 CFT(Concrete Filled Tube, 이하 CFT)기둥이 갖는 단점을 인지하고, 이를 개선하기 위한 새로운 형태의 팔각형 CFT기둥(OCFT) 단면 개발을 최종 목표로 설정하였다. OCFT 기둥이 갖는 이점을 확인하고 현장 적용 시 개선될 수 있는 문제점을 분석한다.
- 팔각형태의 강관을 만들기 위한 공장에서의 생산기법을 정립하고, 이후 운반 및 현장 시공에 이르는 각 단계별 과정을 연구하도록 한다. 이 때, 경제성 및 시공성을 고려하여 세밀하고 다각적인 방법으로 각 과정에서 여러 대안이 검토되어야 할 것이다.

2. OCFT기둥의 구조성능검증

- 새로 개발된 OCFT기둥의 구조성능 검증을 위하여 실험 및 해석적 연구를 수행하도록 한다. 기존 CFT기둥과 관련한 선행연구를 바탕으로 OCFT기둥의 구조적 성능을 입증하기 위한 실험 및 해석적 연구가 필요하다. OCFT기둥의 단면성능을 검증함은 물론 OCFT기둥이 적용된 보-기둥 접합부의 내진성능을 확보하기 위한 연구를 진행한다.
- 국내 건축구조기준(KCI 2016) 및 해외 기준(AISC, Eurocode)에서는 팔각형태의 CFT기둥에 대한 설계절차를 제시하고 있지 않다. 따라서 기준에서 제시하고 있는 사각 및 원형 CFT기둥의 설계 절차를 스터디하고, 이를 OCFT 기둥에 어떻게 적용할 것인지에 대한 연구가 필요하다. 또한, 실험 및 해석연구를 바탕으로 OCFT 기둥의 설계절차를 정립한다.

3. OCFT기둥의 내화성능검증 및 현장 시공오차 테스트

- 강관 내부에 콘크리트를 채운 형태의 CFT 시스템은 내부 콘크리트가 열용량을 키움에도 불구하고 열에 취약한 강재가 단면의 맨 외곽에 위치하여 근본적으로 화재에 취약할 수 있다. 따라서 내화성능실험을 수행하고 이를 바탕으로 내화성능 인증을 받는 것이 목표이다.
- OCFT기둥의 현장 적용 시 콘크리트 타설 및 기초 새움과정에서 발생할 수 있는 시공오차를 Mock-Up을 통해 확인하고 이를 완화시키기 위한 방법을 제시하도록 한다.

4. 1차년도 연구목표

- Mock-Up을 통해 제작과정에서 발생할 수 있는 문제점을 인식하고 해결책을 제시한다. 또한 다양한 대안검토를 통해 실제 양산이 가능한 제작방법을 수립하는 것을 목표로 진행한다. 유니트 강관의 롤포밍(roll-forming)과 용접접합과 같은 제작과정에서의 문제점과 콘크리트 타설로 인한 배부름 현상과 같은 시공 시 발생하는 문제점을 확인한다.
- OCFT기둥이 적용된 접합부 상세를 개발하고 내진성능 검증과 내화인증 받는 것을 목

표로 한다. 접합부 상세는 유한요소프로그램을 통해 설계하고, 접합부 상세가 개발되면 보와의 접합부 실험체를 선정하여 도면을 작성하고 실험체를 제작하여 반복가력실험(Cyclic loading test) 내진성능을 검증한다. 내화실험은 국내 내화인증 실험업체를 통해 진행할 계획이며, 2시간이상의 내력성능 확보를 목표로 둔다.

5. 2차년도 연구목표

- OCFT기둥의 단면성능을 검증하는 것을 목표로 압축성능, 휨성능 및 기초실험진행과 경제성을 검증한다. 압축성능 실험, 휨성능 실험을 통한 단면성능 검증 실험을 시작으로 연구를 진행하고, 이후 실험데이터를 수집하고 실험결과를 분석하여 연구개발 목표치인 KBC기준에 따른 합성구조 설계식을 만족하는지 검토한다. 또한 기초로써 사용성과 경제성을 만족하는지 기초재하 실험을 진행한다. 이후 선정된 실험체를 바탕으로 인증된 건축회사에 의뢰하여 OCFT 경제성을 검증하도록 한다. 또한 실험결과를 토대로 표준설계 및 제작 지침서와 논문을 작성하며 최종 보고서를 작성하는 것으로 과제 연구를 마무리한다.

제2절. 연구개발의 필요성

1. 기존 강재 구조물의 구조적 특징 및 한계와 합성부재의 장점

- 강재는 높은 내력과 우수한 연성능력을 갖는 재료적인 특징으로 건축구조분야에서 널리 사용되는 소재이다. 그림 1.1.1과 같이 인장과 압축 모두에 강한 강재는 현대건축에서 추구하는 고층화와 무주공간에 따른 큰 하중을 받는 구조물에 필수적으로 사용되며 원하는 형태로 성형이 가능하기 때문에 다양한 구조물에 적용 가능하다.
- 하지만 부재의 길이가 그 횡단면의 치수에 비해 클 경우 좌굴에 취약하기 때문에 효율적인 설계가 이루어지지 않을 경우, 그림 1.1.2와 같은 사고가 발생할 수 있다. 이를 보강하기 위하여 층 단위로 브레이스를 설치하거나 단면의 치수를 늘려 설계할 수 있지만 이는 경제적인 부담이 따른다. 또한 강재로만 이루어진 구조물의 경우 처짐 및 진동에 취약할 수 있다.



그림 1.1.1 건축에서 강재의 필요성



그림 1.1.2 철골부재의 좌굴현상

- 이에 대한 대안으로 철골과 콘크리트를 단면에 함께 적용하는 합성구조시스템이 있다. 강재와 콘크리트를 합성할 경우 강재의 우수한 하중저항능력과 콘크리트의 우수한 압축 저항능력 및 내구성을 함께 기대할 수 있다. 즉, 외곽에 배치되는 강재는 단면의 휨 성능을 극대화 시키고 (그림 1.1.3), 콘크리트는 강재의 국부좌굴을 방지해주는 역할을 하므로 합성부재 단면의 강성증가와 진동 및 처짐에 대한 높은 저항성능을 확보 할 수 있다.

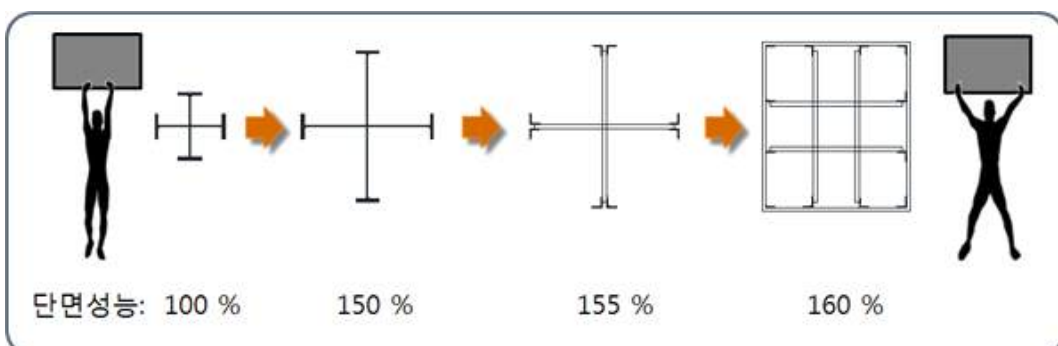
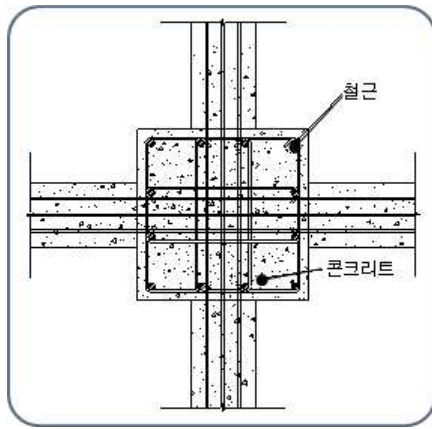


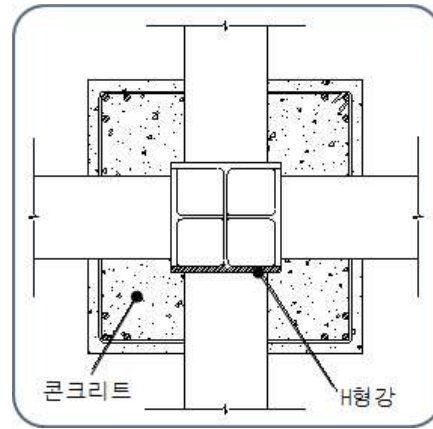
그림 1.1.3 철골물라의 최외곽 배치에 따른 휨내력 증가

2. 기존 합성구조의 특징

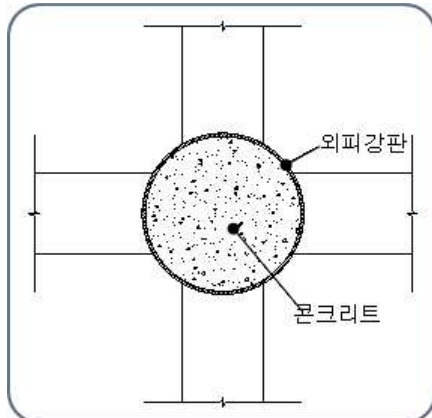
- 대표적인 기존 합성구조 시스템을 그림 1.1.4에 나타내었다. 그림 1.1.4(a)는 일반적인 철근콘크리트기둥(reinforced concrete)이고, 그림 1.1.4(b) 최소 단면의 H형강 기둥에 보를 접합하여 시공하중을 부담하게 한 다음, 주변을 철근콘크리트로 감싸 영구하중을 받도록 한 철골철근콘크리트(steel reinforced concrete) 단면이다. 이러한 형태의 합성구조는 콘크리트 타설을 위한 별도의 거푸집이 필요하고 접합부에서 철근보강상세가 복잡하다.
- 그림 1.1.4(c), (d)는 강재를 단면 최외각에 배치하고 내부를 콘크리트를 채운 형태의 CFT기둥이다. CFT기둥은 아직 국내 실제 건축공사에서 널리 사용되고 있지는 않으며, 주로 일본 및 미국을 중심으로 고층건물대상으로 많이 사용되고 있다. CFT의 구조적인 장점은 크게 두 가지로 구분 할 수 있다. 첫째, 강재가 단면 최 외곽에 배치되므로 휨성능이 매우 우수하다. 특히 강재에 가장 큰 변형률이 생기므로 RC 및 SRC보다 고강도 적용가능성이 더 좋다. 이는 그림 1.1.5에 나타낸 바와 같이, 강재의 탄성계수가 강도등급에 상관없이 일정하므로 높은 항복강도로 설계하기 위해선 큰 변형률을 확보해야 하기 때문이다. 또한 경우에 따라 CFT내부 콘크리트에 추가로 철근을 보강하여 기둥의 강성 및 하중재하능력을 더욱 키울 수 있다. 둘째, CFT기의 강관은 연속적으로 내부 콘크리트를 횡구속한다. 이러한 조건에서는 내부 콘크리트가 $0.85f_{ck}$ 이상의 압축응력을 발휘할 가능성이 매우 크다. KBC2009 및 AISC 360-10에서는 사각 CFT기둥의 콘크리트 횡구속효과는 고려하고 있지 않지만, 원형 CFT기둥에 대하여 콘크리트 압축응력을 $0.95f_{ck}$ 로 제시하고 있다.
- CFT기둥의 이러한 구조적 이점 외에도 시공성 측면에서 다음과 같은 이점을 기대할 수 있다. 기둥 강관과 강재보를 공장에서 선조립 가능하다. CFT기둥 및 보-기둥 접합부는 공장에서 단위별로 제작된 뒤 현장으로 운송하여 조립하게 된다. 따라서 현장에서의 복잡한 시공과정을 최소화 할 수 있고, 시공과정에서 생길 수 있는 여러 위험부담을 줄일 수 있다. 특히 현장에서 공장에 선조립된 보-기둥 접합부를 세우고 콘크리트를 타설하게 되는데 기둥 강관이 거푸집 역할을 하므로 별도의 거푸집 설치가 필요 없다.



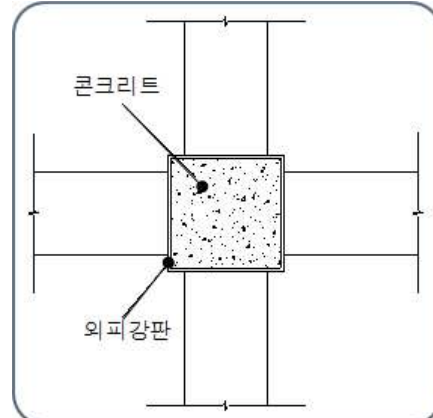
(a) 철근콘크리트 기둥



(b) 철골철근콘크리트 기둥



(c) 원형 콘크리트충전 강관기둥



(d) 사각 콘크리트충전 강관기둥

그림 1.1.4 다양한 철골 콘크리트 합성구조부재의 단면도

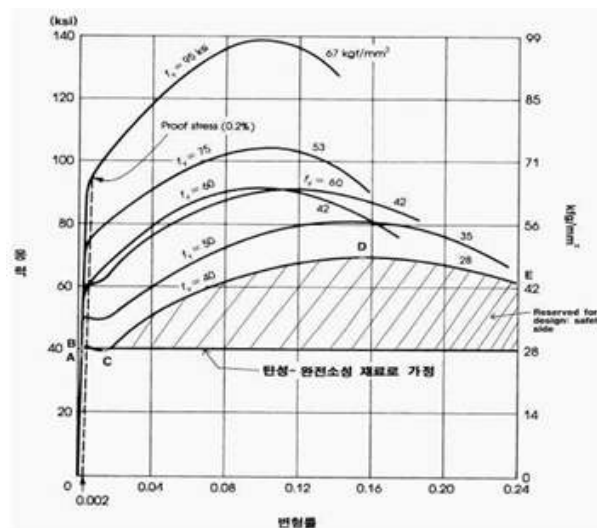
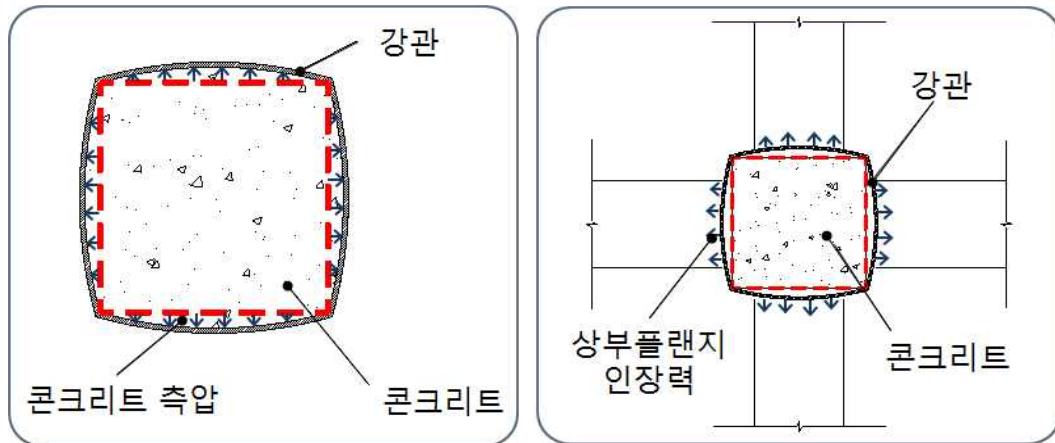


그림 1.1.5 강재의 강도등급에 따른 응력-변형률 관계

- CFT기둥 현장 적용 시 발생할 수 있는 문제점을 충분히 고려해야 한다. CFT기둥의 강관은 일반적으로 얇은 두께의 강재를 사용하므로 콘크리트를 채워 넣을 때 콘크리트 측압에 의해 배부름 현상으로 기둥 강관에 초기 면외방향 변형이 발생할 수 있다. 또한 보-기둥 접합부 보 플랜지의 강한 인장력으로 기둥 강관에 면외방향 국부좌굴이 발생하는 현상도 매우 일반적이다 (그림 1.1.6 참조). 이러한 강관의 국부좌굴을 방지하기 위하여, 그림 1.1.7에 나타난 바와 같이 다이어프램, 스티프너등의 별도 접합부 보강을 실시하거나 기둥 강관 내부에 스티드를 삽입한다. 이러한 방법은 효율적인 보강상세가 될 수 있지만 접합부 상세가 복잡해지고 공사비 상승에 직접적으로 연결된다.



(a) 콘크리트 측압에 의한 강재 면외방향 변형 (b) 보의 인장력에 의한 강재 면외방향 변형

그림 1.1.6 사각 CFT 기둥 강관의 면외방향 변형

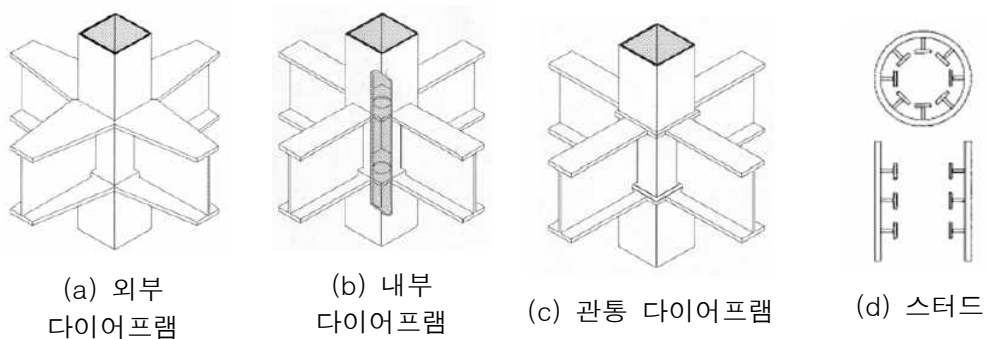


그림 1.1.7 강재보-CFT 기둥 접합부 보강상세 (Morino and Tsuda, 2003)

- 건축구조설계기준(KBC 2009)에서는 휨 및 압축을 받는 합성구조의 판폭두께비에 대한 제한값을 제시하고 있다. 이는 CFT기둥이 압축 및 휨을 받을 때 외곽의 강관에서 국부좌굴이 발생할 수 있기 때문이다. 특히, 사각형의 얇은 강관은 각 면의 강재가 모서리를 중심으로 접합되므로 강재 한 면의 비지지길이 증가에 따라 국부좌굴에 더욱 취약할 수 있다. 원형단면의 경우 강관의 국부좌굴 저항성능이 증가하고 내부 콘크리트의 횡구속 효과가 증가하지만 원형 단면에 대한 제작과정 및 접합부 시공이 까다로운 측면이 있다.

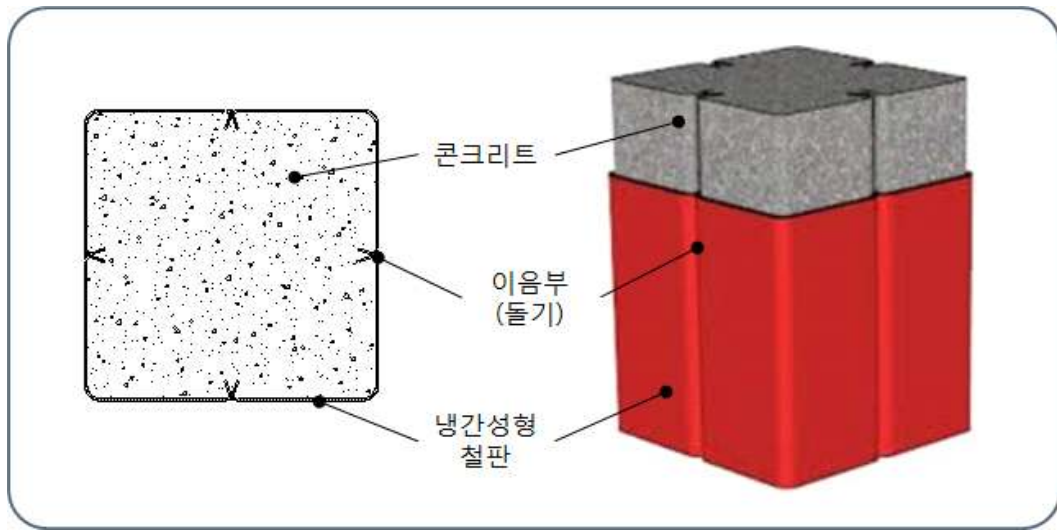


그림 1.1.8 내부 앵커형 조립식 냉간성형 CFT (ACT Column) 기둥 단면도

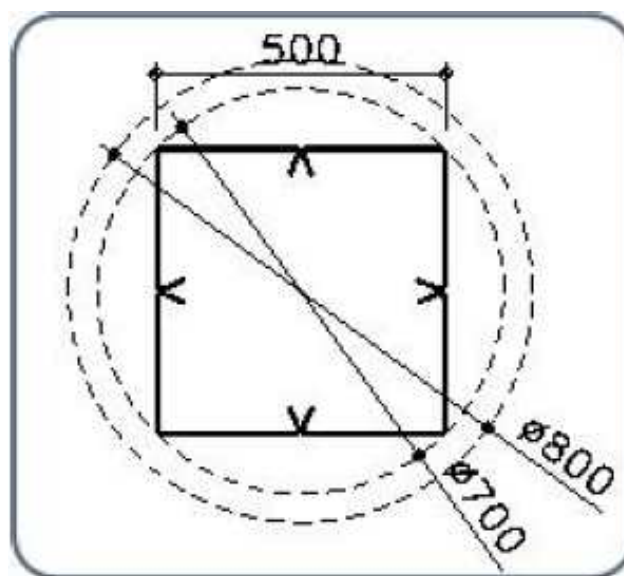


그림 1.1.9 ACT 기둥 사용시 천공홀 직경

- 이러한 CFT기둥의 문제점을 보완하기 위한 노력 중 하나로 그림 1.1.8과 같은 콘크리트 충전 앵커형 조립식 냉간성형 강관기둥(Advanced Construction Technology, ACT)이 개발 및 상용화 되었다. ACT 기둥은 사각형 튜브를 일체로 성형하지 않고 네 조각의 ‘ㄱ’형 유닛으로 분절하여 롤포밍으로 제작 가능하므로 생산단가를 감소시킬 수 있다. 각 변 중앙부에 위치하는 70° 내외의 돌기는 콘크리트 속에서 갈고리처럼 작용하여 외피강판이 밖으로 터져나가지 않도록 한다. 즉 이음부 돌기로 인하여 기둥면의 비지지 거리가 줄어들어 판폭두께비로 인하여 강재 단면의 국부좌굴 저항성능을 키울 수 있다. 하지만 이러한 이음부 돌기는 변 중앙에 위치하여 보와의 접합을 어렵게 한다. 또한 지상과 지하를 동시에 시공하는 역타(top-down)공법에 적용하는 경우에도 그림 1.1.9와 같이 천공홀의 직경을 필요이상으로 크게 해야 한다. 천공홀의 직경이 클수록 천공장비의 사용비용은 높아지므로 공사비상승의 요인이 될 수 있다.

3. OCFT기둥의 특징

- 앞서, 언급한 현 강재 콘크리트 합성시스템의 단점을 보완하여 경제성, 시공성, 그리고 안정성을 확보할 뿐만 아니라 물량저감도 가능한 새로운 OCFT기둥 단면을 개발하고자 한다.
- CFT기둥의 단점을 개선하고, ACT칼럼의 개념을 응용하여 4개의 절곡된 강재를 용접한 OCFT기둥을 개발하였다. 그림 1.1.10에 나타낸 바와 같이, OCFT기둥은 기존 사각 CFT기둥 형태의 네 모서리를 잘라낸 형태로, 좌굴가능한 CFT기둥 강재의 비지지길이를 줄일 수 있어 압축에 대한 저항성능을 키울 수 있다. 이는 모서리 부분의 돌기가 콘크리트에 매입되어 모서리 강재의 국부좌굴을 억제하기 때문이다. 또한 원형단면에 가까운 팔각형 형태이면서 한 변이 직선으로 되어 있어, 콘크리트 횡구속효과 증가를 기대할수 있음과 동시에 원형단면 대비 접합부에서 보와의 용접 시공성을 증가시킬 수 있다.

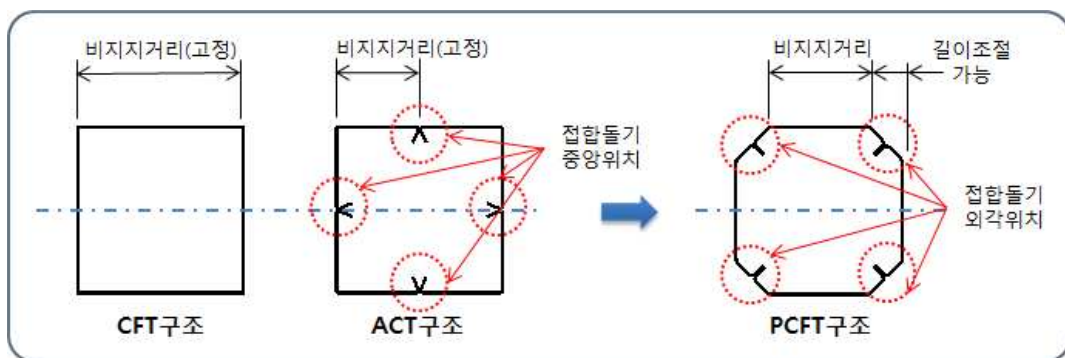
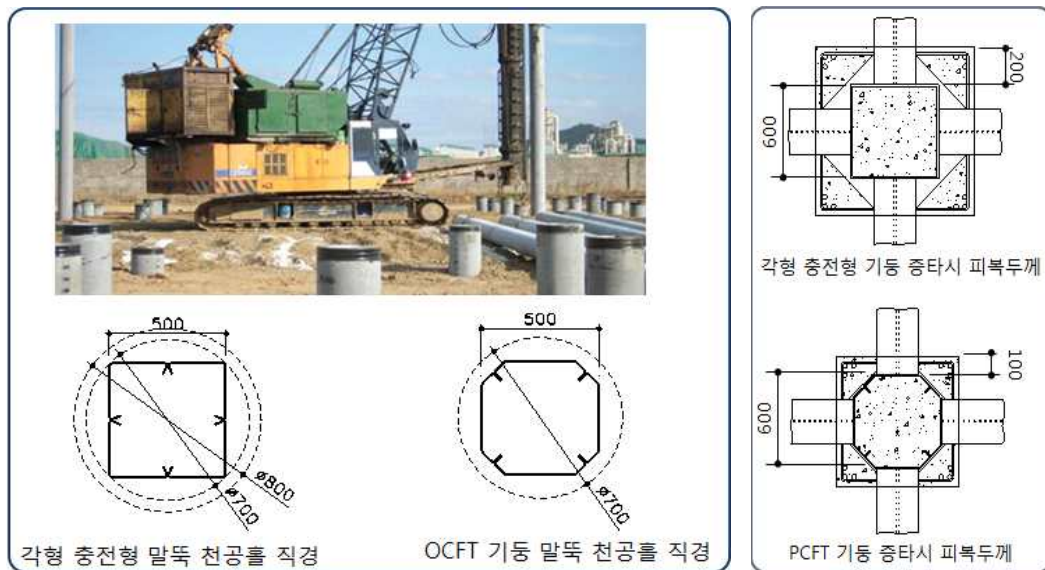


그림 1.1.10 OCFT 기둥 단면 개념도

- OCFT기둥을 역타(top down)공법에 말뚝으로 활용할 경우, 사각단면을 가진 기존 합성기둥보다 모서리의 간섭이 없으므로 천공홀의 직경을 줄일 수 있다. 그림 1.1.11(a)에 나타낸 바와 같이, 500 mm단면의 사각단면을 가진 기존 각형 합성기둥의 경우에는 직경 700 mm의 천공홀이 필요하지만 500 mm 단면의 사각단면을 가진 기존 각형 합성기둥의 경우에는 직경 800 mm의 천공홀이 필요하다. 이는 OCFT기둥을 사용하면 천공장비의 사용비용을 절감할 수 있음을 의미한다. 뿐만 아니라, 보를 설치한 후 증타할 경우 그림 1.1.11(b)에 나타낸 바와 같이, 각형 충전형 단면기둥과는 다르게 OCFT는 외다이어프램의 간섭이 없고 철근배근과 콘크리트를 타설할 구간이 자동적으로 생성되는 장점이 있다. 따라서 600 × 600 mm 단면의 기둥을 적용했을 경우, 각형 충전형 기둥은 200 mm의 피복두께를 요구하는 반면 OCFT는 100 mm의 피복두께만 필요하다.



(a) 역타공법 적용시 기둥별 천공직경

(b) 증타시 기둥별 피복두께

그림 1.1.11 OCFT의 단면형상에 따른 효율성

4. 대상 기술의 우수성

● 현장작업 간소화에 따른 빠른 시공성

기존 합성기둥 공법은 대부분 현장에서 철근배근을 한 후 거푸집 공사를 하여 콘크리트 타설 후 다음 층의 기둥과 이어가며 시공한다. 하지만 OCFT 기둥은 철근배근과 거푸집 작업의 삭제 등 현장작업이 최소화되고 별도의 거푸집 공사가 없으며 2개층 이상을 한번에 설치 가능하다. 단, OCFT 기둥은 철골이 외부에 노출되어 내화피복 공사를 포함하여야 한다. 그럼에도 불구하고 그림 1.1.12와 같이 2개층 공사 시 RC 기둥과 SRC 기둥 대비 각각 약 7일과 3일 공기단축이 가능하다. 이는 전체공사 기간을 고려할 때 큰 경제 효과를 기대할 수 있다.

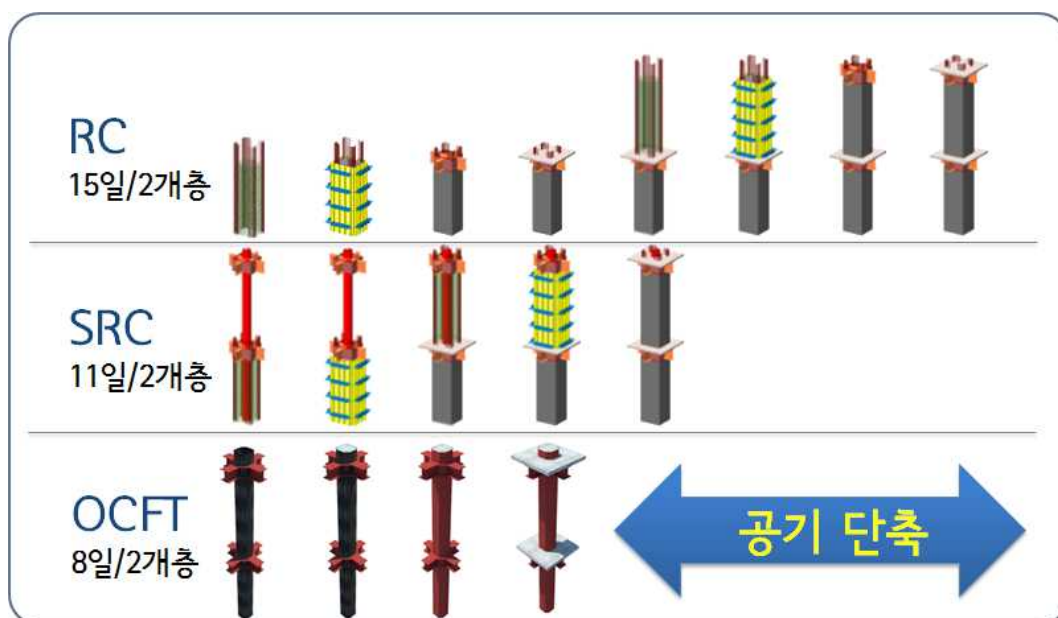


그림 1.1.12 OCFT 기둥과 기존 합성기둥의 시공일

● 동일성능 대비 경제적인 공법

그림 1.1.13에 나타난 바와 같이, SRC 기둥, ACT 기둥의 경제성을 평가하였다. 평가는 기둥 8 m 기준으로 12000 kN의 압축력과 200 kN·m의 휨내력을 요구하는 설계조건에서 각각의 단면을 선정하였다. 압축성능은 모든 기둥이 비슷한 내력을 발휘하여 요구내력을 만족하였으나 휨성능에서는 SRC 기둥의 내력이 부족하여 철골량과 단면 크기가 증가하였다. 그 결과 OCFT 기둥이 가장 경제적인 것으로 평가되었으며 OCFT 기둥 대비 SRC, ACT기둥이 각각 143%, 110%의 경제성으로 나타났다. 이는 OCFT 기둥의 뛰어난 단면 성능으로 단면크기를 줄일 수 있고, 이에 따라 철골량과 콘크리트량이 감소되기 때문이다. 또한, 단면크기가 줄어든 OCFT 기둥에서 압축력이 부족할 경우, 고강도 콘크리트를 사용하여 해결할 수 있다.

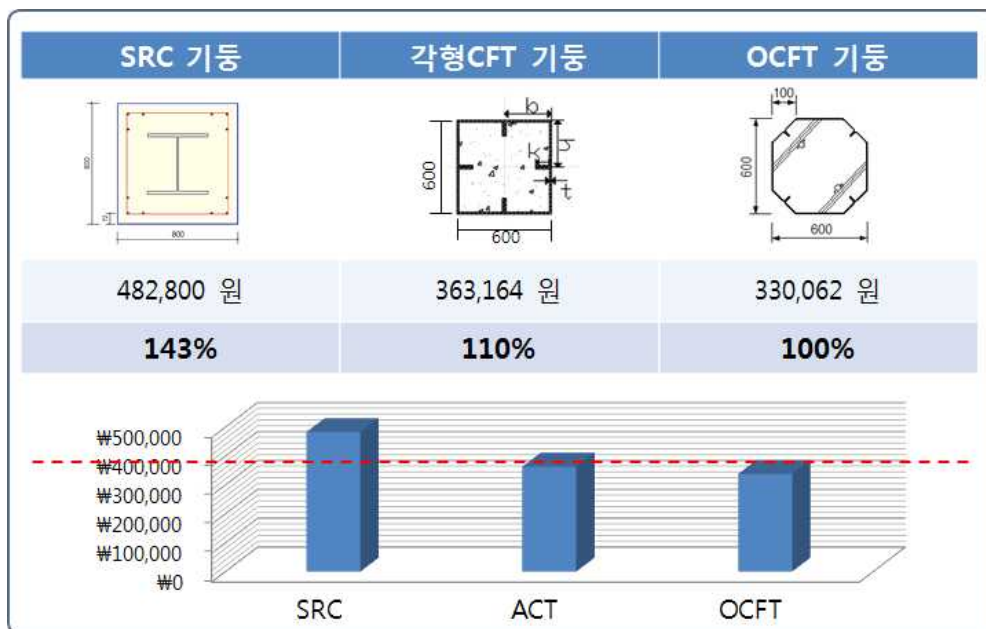


그림 1.1.13 OCFT 기둥과 기존 합성기둥 경제성 평가

● 품질관리 및 안정성 확보

OCFT기둥 공법은 그림 1.1.14와 같이 철골부분을 공장에서 선조립하여 현장에 설치하여 콘크리트를 타설하는 방식으로 관리를 통한 일정한 품질을 유지할 수 있으며, 현장 설치 시 수직도 확보를 통한 자립이 가능하고, 별도의 거푸집이 필요없다. 따라서 거푸집의 설치 또는 해체 시 생기는 사고를 막을 수 있고 공간확보가 용이하여 깨끗한 시공환경이 가능하기 때문에 청결하고 안전한 시공환경을 유지할 수 있다.



그림 1.1.14 OCFT 기둥의 안전성 평가

● OCFT 공법의 접합부시스템 개발로 타 공법과의 호환성

OCFT기둥을 사용하여 보-기둥 접합부를 설계할 경우, 기존 CFT기둥이 적용된 보-기둥 접합부의 상세 및 보강방법 등을 참고하여 적용할 수 있다. 즉 OCFT기둥과 기존의 H형 보 혹은 U형 단면을 갖는 TSC보가 적용된 합성보와의 접합부 상세를 개발 할 수 있다. 또한 기존의 다이어프램, 스티프너, 관통철근 등을 통하여 접합부를 보강할 수 있고, 내진 성능을 더욱 증진시키기 위하여 OCFT기둥에 맞는 적절한 접합부 보강상세를 새로 개발 할 수 있다.

● 높은 하중을 필요로 하는 고층구조 및 물류창고에 적용

현대 건축에서는 공간구획이 자유로운 대공간을 추구하므로 벽체구조보다는 라멘구조를 사용하여 기둥의 수 또한 최소로 설계하기 때문에 기둥이 받는 하중이 그만큼 증가하게 된다. 본 개발기술인 OCFT기둥은 압축과 휨에 대한 내력이 크기 때문에 고하중 구조물에 적용 가능할 뿐만 아니라 선조립을 통한 수직도 확보로 고층건물에도 활용할 수 있다.

5. 국내외 시장분석 및 사업화 전망

● 개발공법의 사업화를 진행할 주요국가는 국내시장으로 통계청에 따르면 2012년 기준으로 총 건축공사 시장규모는 약 140조원으로 조사되었으며 이중 OCFT기둥이 적용 가능한 시장규모는 약 2조 6000억원으로 판단되었다. 이는 전체 건축공사 중 기타설비를 제외한 순수 건축공사비 70%에서 골조공사가 33%를 차지하며 이 중 기둥비중인 20%에서 합성구조가 40%를 차지하기 때문이다. 또한 해외자료에 따르면 국제 건설시장은 2025년까지 약 75% 성장할 것이며 국내시장도 같이 성장할 것으로 예상된다.

● 이와 같은 건설시장에서 현재 다양한 기둥공법이 적용되고 있으나 최근 정부에서는 그림 2.28과 같이 내진설계, 시공안전, 녹색성장을 강조하고 있다. 이는 지진의 안전지대로 인식됐던 한국에 잦은 지진의 발생에 따라 정부에서는 건축구조에서 내진설계를 적극 권장하고 있으며, 잦은 시공 중 안전사고에 따른 인명피해와 경제적 손실에 따른 결과이다. 뿐만 아니라 세계적으로 오염을 줄이고 친환경을 추구하는 목소리에 따라 건설 산업에서도 물량절감을 통한 녹색성장을 강조하고 있다.

제3절. 연구개발 범위

1. OCFT 기둥 콘크리트 타설 과정에서 발생할 수 있는 기둥 강관의 면외방향 변형을 분석하였다.
 - Mock-Up 테스트
 - 유한요소해석
2. OCFT 기둥 압축재하능력을 평가한다. 이는 OCFT단면에 기대되는 비지지길이 감소에 따른 강관의 국부좌굴 저항능력과, 팔각형의 강관이 갖는 콘크리트의 횡구속 효과를 알아보기 위함이다. 이를 위하여 다음과 같이 실험 및 해석연구를 수행하였다.
 - 중심축압축실험
 - 해석을 통한 OCFT기둥의 콘크리트 컨파인먼트 모델 개발
3. OCFT기둥이 적용된 접합부의 내진성능을 검증한다. 이를 위하여 실물크기의 실험체를 제작하고 접합부의 강성, 하중재하능력, 파괴모드, 에너지소산능력을 평가하였다.
 - 외부접합부 반복가력실험
 - 내부접합부 반복가력실험
 - 접합부 보강을 통한 복합모멘트접합부(hybrid moment connection) 개발
4. 내화성능인증을 받기 위하여 실물크기의 접합부 실험체를 제작하고 내화실험을 진행한다.
5. OCFT기둥의 하중재하능력, 연성능력, 콘크리트 횡구속효과를 확인하고 최종적으로 OCFT기둥이 적용된 복합모멘트골조를 개발하여 충분한 내진성능을 확보한다.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

제1절. 국내외 관련 연구 동향

1. 다양한 형상의 콘크리트 충전형 강관 개발 (국내)

- 최근 국내에서는 기존 합성기둥의 단면 효율성을 극대화(강관의 좌굴저항성 증가, 콘크리트 횡구속효과 발휘)를 위해 얇은 강관을 절곡하여 제작한 신합성공법에 대한 기술개발과 현장적용이 크게 증가하고 있다. 이러한 신합성공법은 우수한 경제성·시공성으로 콘크리트 충전형 강관(CFT), 강재·콘크리트 합성기둥(SRC) 등 기존 합성공법을 빠르게 대체하고 있다.

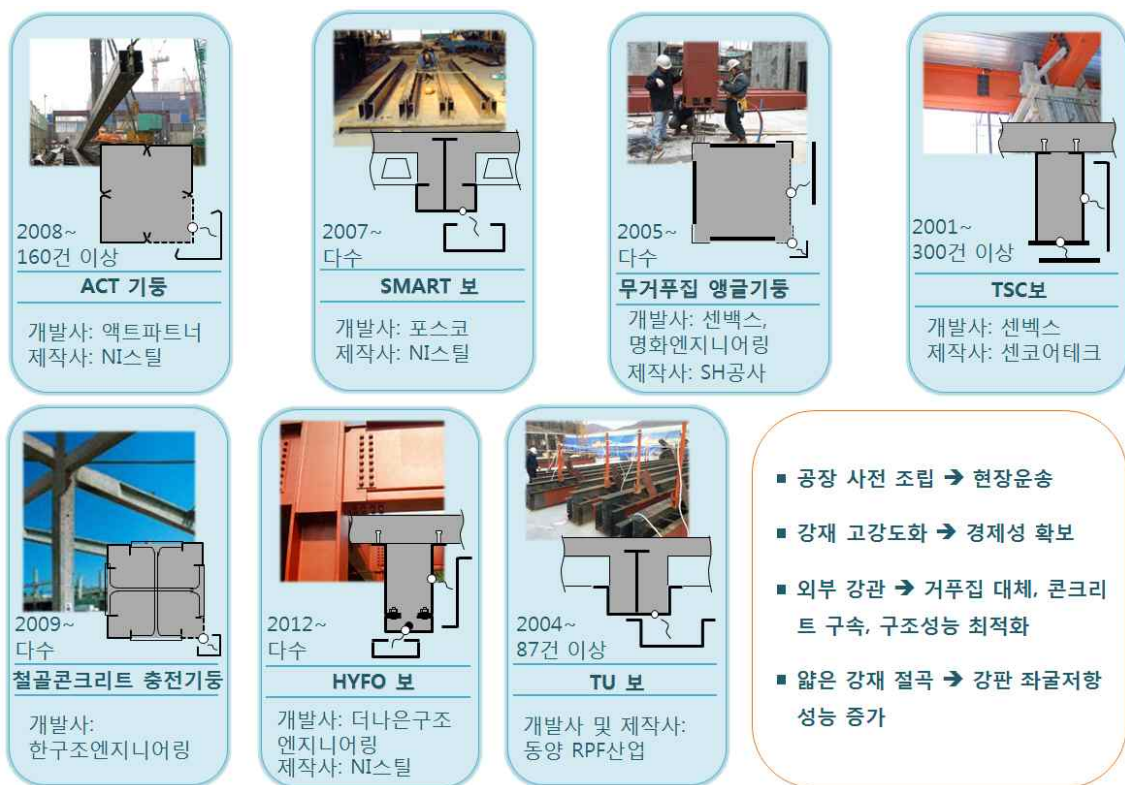


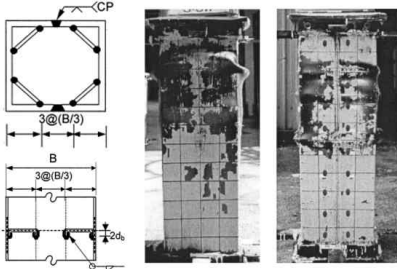
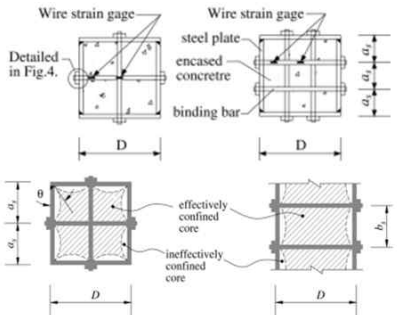
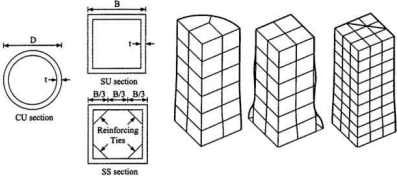
그림 2.1.1 얇은 강관을 절곡하여 제작한 다양한 형상의 합성부재

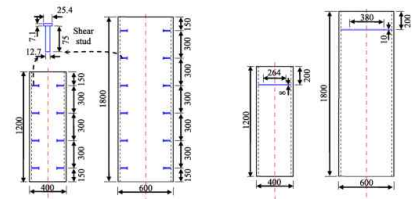
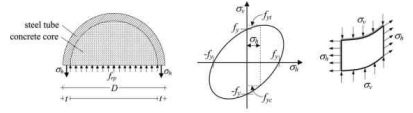
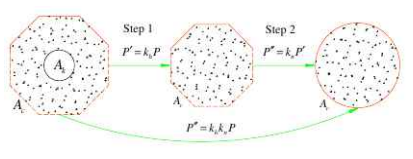
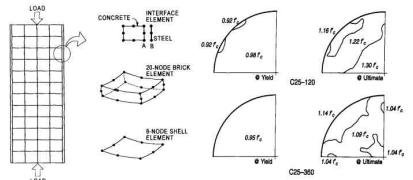
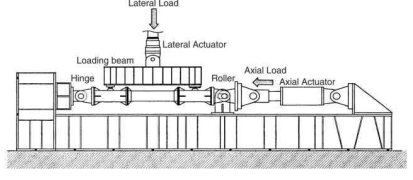
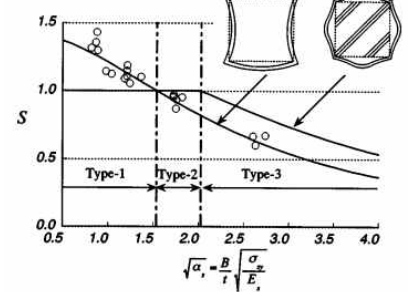
- 이러한 얇은 강관을 절곡하여 제작한 합성부재는 공장에서 사전 조립하기가 쉽고 현장 운송 이후 거푸집 없이 콘크리트를 타설할 수 있어 공사 기간을 줄일 수 있고 공사현장이 비교적 깔끔하다.
- 이러한 연구동향에 맞추어 OCFT기둥 또한 얇은 강관을 공장에서 절곡한 후 용접하여 제작한다. 단 팔각형태의 콘크리트 충전형 기둥으로 4 모서리에 형성된 돌기는 강관의 국부좌굴을 억제하고 강관의 팔각 형상은 콘크리트의 횡구속효과를 키울 수 있어, 기존의 개발된 합성부재와 차이점이 있다.
- 국내에서는 기존 사각 및 원형 CFT와 더불어 다양한 형상의 CFT단면에 대한 연구가 수행되었다. 주 연구내용은 기둥 자체가 갖는 구조성능(압축 및 휨)과 이들 기둥을 사용한 합성 보-기둥 접합부의 내진성능에 관한 것이다.

2. 콘크리트 충전기둥의 구조성능평가 (국외)

- 기존에 많이 사용해 온 사각 및 원형 CFT에 관한 연구는 기둥의 압축강도, 기둥의 휨강도, 기둥 강관의 좌굴저항성능, 기둥의 편심압축강도, 보-기둥 접합부 내진성능, 콘크리트 횡구속효과, 콘크리트 충전성 등에 관한 것으로 수많은 연구자들에 의해 수행(실험·해석)되었다. 이러한 실험·해석 결과를 바탕으로 CFT기둥에 관한 설계기준은 미국 및 유럽 등의 합성구조기준에 잘 정립되어 있다 (AISC 360-10, Eurocode 8).
- 원형 CFT기둥은 콘크리트 횡구속 효과가 가장 우수하고 강관의 국부좌굴 저항성능도 좋아 좋은 구조성능을 보여준다. 하지만 원형이라는 단면의 특성으로 인해 보와의 접합에 있어서 시공성이 떨어지고, 접합부 보강을 위한 추가 다이어프램 및 스틱프너 등을 설치하기가 쉽지 않다. 반면, 사각 CFT의 경우 강관의 국부좌굴 저항성이 떨어지고 콘크리트의 횡구속효과 또한 기대하기 쉽지 않다. 또한 보와의 접합에 있어서 보 인장력에 의한 기둥 강관의 면외방향 변형과 이에 따른 용접부 파단으로 내진성능이 저하될 가능성이 매우 높다. 이에 따라, 최근 CFT기둥의 단면성능을 개선시키는 상세 및 이를 사용한 보-기둥 접합부의 내진성능을 향상시키기 위한 연구들이 주로 이루어지고 있다.
- 국제 저널에 발표된 논문을 중심으로 조사한 대표적인 연구논문은 다음과 같다.

표 2.1.1 CFT기둥의 압축강도 및 콘크리트 횡구속효과 평가

연도	논문제목	주요내용	학술지
2002	Axial load behavior of stiffened concrete-filled steel columns	 (타이 바 용접) 사각 강관의 좌굴 저항성을 키우기 위한 연구	Journal of Structural Engineering
2006	Axial load behavior of square CFT stub column with binding bars	 (관통철근 용접) 사각 CFT기둥의 압축성능 증가를 위한 보강상세 개발	Journal of Constructional Steel Research
2002	Nonlinear analysis of axially loaded concrete-filled tube columns with confinement effect	 (횡구속효과 해석연구) 단면형상에 따른 강관 좌굴형상 및 콘크리트 횡구속효과 평가	Journal of Structural Engineering

2016	Bond behavior in concrete-filled steel tubes	 (기둥 강관-콘크리트 부착응력) 스티드 매입여부에 따른 콘크리트 부착응력 평가	Journal of Constructional Steel Research
2016	Numerical model for the behavior and capacity of circular CFT columns	 (충분할 해석연구) CFT 기둥의 회구속효과 평가를 위한 새로운 모델 개발	Engineering Structures
2013	A unified formulation for circle and polygon concrete-filled steel tube columns under axial compression	 (회구속효과 해석연구) CFT 기둥의 팔각단면 형상에 따른 콘크리트 회구속효과 연구	Engineering Structures
1998	Axially loaded concrete-filled steel tubes	 (회구속효과 해석·실험 연구) CFT기둥의 콘크리트 회구속효과 연구	Journal of Structural Engineering
2005	Finite element analysis of CFT columns subjected to an axial compressive force and bending moment in combination	 (휨·압축성능 평가) 축력과 휨력을 동시에 받는 CFT 기둥 구조성능 실험·해석 연구	Journal of Constructional Steel Research
2004	Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns	 (해석·실험연구 비교) 강관과 콘크리트가 동시에 압축을 받는 CFT 단주의 압축강도 리뷰	Journal of Structural Engineering

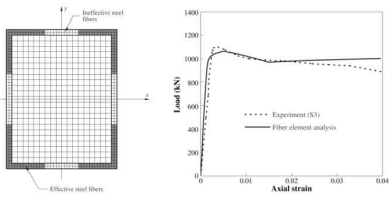
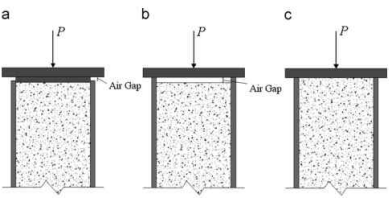
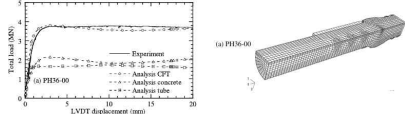
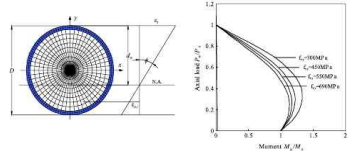
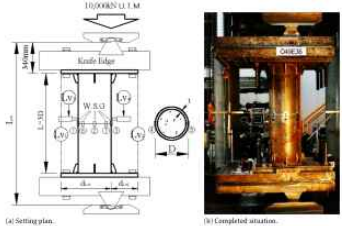
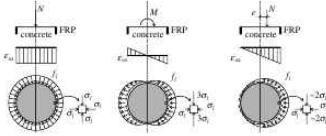
2006	Nonlinear analysis of concrete-filled thin-walled steel box columns with local buckling effects	 (압축강도 해석연구) 사각 CFT 기둥의 압축강도 평가 해석모델 개발	Journal of Constructional Steel Research
2008	A novel steel section for concrete-filled tubular columns	 (압축강도평가) 콘크리트 건조수축에 따른 CFT 기둥의 압축강도 평가	Thin-Walled Structures
2011	Nonlinear finite element analysis of CFT-to-bracing connections subjected to axial compressive forces	 (압축강도 해석연구) 브레이스 집합부 CFT 압축강도 평가	Engineering Structures

표 2.1.2 CFT 기둥의 편심압축강도 평가 (P-M상관도)

연구	논문제목	주요내용	학술지
2010	Nonlinear analysis of circular concrete-filled steel tubular short columns under eccentric loading	 (해석모델개발) 원형 CFT 기둥의 편심압축에 따른 P-M상관도 비선형해석	Journal of Constructional Steel Research
2011	Behavior of high-strength circular concrete-filled steel tubular column under eccentric loading	 (편심압축실험) 원형 CFT 기둥 편심압축실험	Journal of Constructional Steel Research
2012	Analysis of FRP confined columns under eccentric loading	 (횡구속효과) 콘크리트 횡구속효과에 편심에 따른 모멘트가 주는 영향 분석	Composite Structures

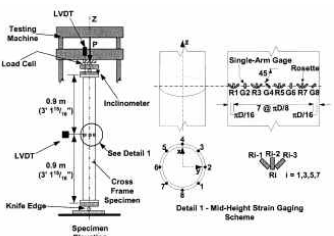
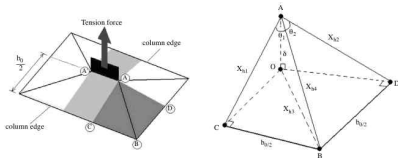
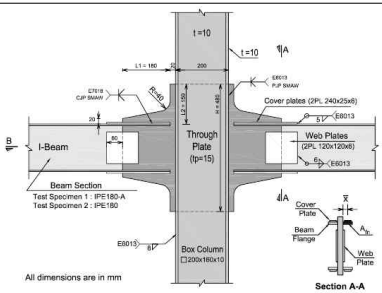
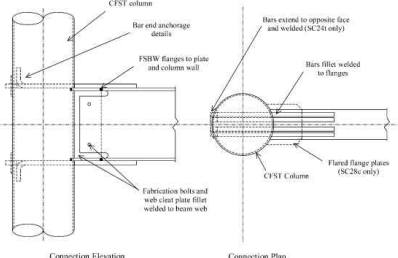
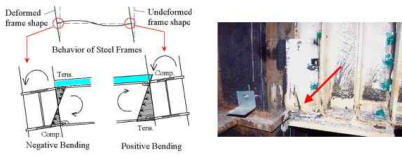
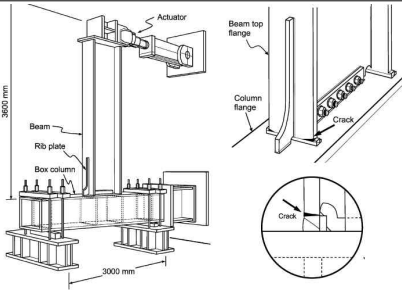
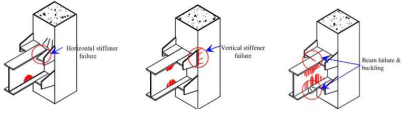
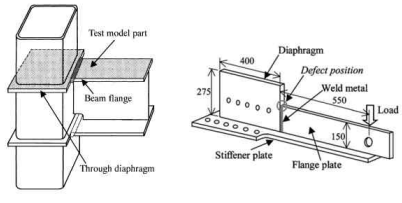
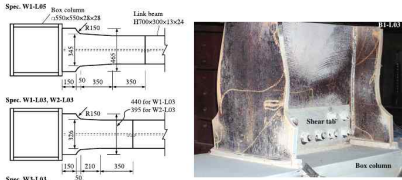
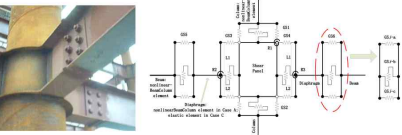
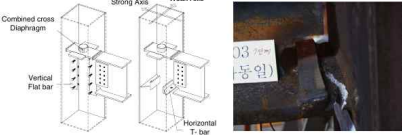
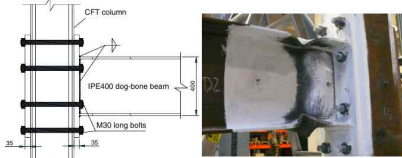
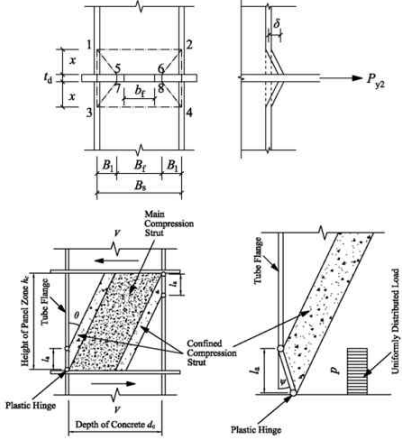
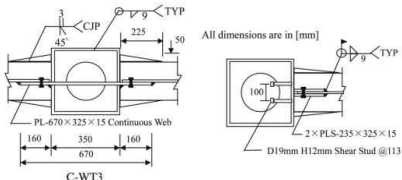
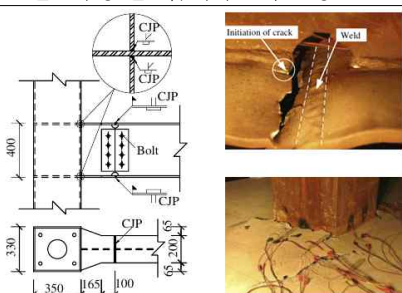
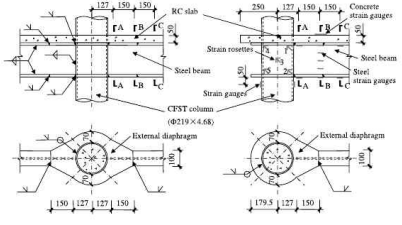
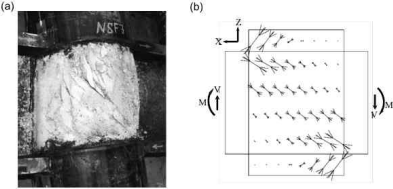
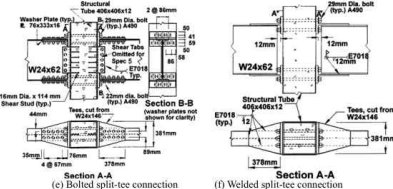
2012	Comparison of measured and predicted response of manufactured circular steel tubular members under concentric and eccentric compressive and tensile loads	 (편심압축실험) 원형 CFT 장주에 대한 편심압축실험	Engineering Structures
------	---	---	------------------------

표 2.1.3 CFT 기둥이 사용된 접합부 내진성능평가

연도	논문제목	주요내용	학술지
1998	Experimental behavior of connections to concrete-filled steel tubes	(접합부 내진성능) 관통철근을 사용한 접합부 내진보강	Journal of Constructional Steel Research
2010	Tying behaviour of fin-plate connection to concrete-filled rectangular steel tubular column	 (기둥강관 면외방향 변형) 접합부 인장력에 의한 기둥 강관 면외방향 변형 연구	Journal of Constructional Steel Research
2010	I-beam to box-column connection by a vertical plate passing through the column	 (접합부 내진성능) 관통 플레이트를 통한 CFT 기둥-H형 보 접합부 보강상세 개발	Engineering Structures
2002	Cyclic behaviour of concrete filled steel tubular column to steel beam connections	 (접합부 내진보강) 관통철근 용접 및 볼팅을 통한 CFT 기둥-보 접합부 보강상세 개발	Engineering Structures

2004	Seismic behavior and retrofit of steel moment connections considering slab effects	 (접합부 응력집중) 슬래브 압축 영향에 따른 접합부 하부 보 플랜지 용접부 응력집중	Engineering Structures
2004	Evaluation fo reinforced connections between steel beams and box columns	 (접합부 내진성능) 연속강판과 리브 플레이트를 사용한 접합부 보강상세 개발	Engineering Structures
2004	Behavior of welded CFT column to H-beam connctions with external stiffeners	 (접합부 내진성능) 접합부 CFT 기둥의 응력집중을 방지하기 위한 스티프너 설치	Engineering Structures
2010	Prediction of brittle fracture initiating at ends of CJP groove welded joints defects	 (접합부 보강상세) 관통 다이어프램과 플랜지 용접 접합부 구조성능 검증	Engineering Structures
2013	Seismic performance of steel beam-to-column moment connections with tapered beam flanges	 (접합부 내진상세) CFT 기둥-H 보 접합부 Tapered beam을 통한 내진접합상세	Engineering Structures
2014	A general analytical model for steel beam-to-CFT column connections in OpenSEES	 (접합부 해석모델) OpenSEES를 활용한 CFT 보-기둥 접합부 해석모델 개발	Journal of Constructional Steel Research
2010	A study on the seismic performance of concrete-filled square steel tube	 (접합부 접합상세 개발) CFT 기둥-H형 보 접합부 보강상세 개발	Journal of Constructional Steel Research

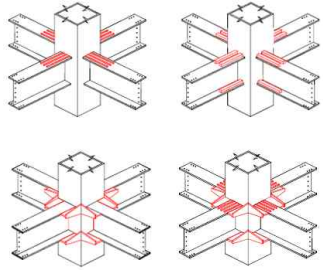
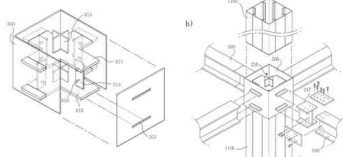
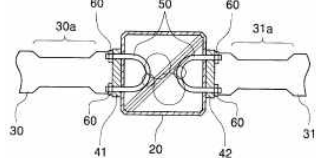
	column-to-beam connections reinforced with asymmetric lower diaphragms		
2015	Extended end-plate to concrete-filled rectangular column joint using long bolts	 (접합부 내진성능) 단부강관과 관통볼트를 사용한 CFT 기둥-H형 보 접합상세 개발	Journal of Constructional Steel Research
2010	Elastoplastic behavior of through-diaphragm connections to concrete-filled rectangular steel tubular columns	 (접합부 파괴거동) CFT 기둥 면외방향 거동 분석	Journal of Constructional Steel Research
2007	Seismic behavior of steel beams and CFT column moment-resisting connections with floor slabs	 (접합부 내진상세) 관통 플레이트 및 확대머리 철근을 사용한 접합부 내진성능 분석	Journal of Constructional Steel Research
2012	Seismic behavior of CFRSTC composite frames considering slab effects	 (접합부 내진성능실험) CFT 기둥-H형 내부·외부 접합부 내진성능평가	Journal of Constructional Steel Research
2010	Seismic performance of CFST column to steel beam joint with RC slab: Experiments	 (접합부 내진성능) CFT 기둥-H형 보 내부 접합부 외다이어프램 보강상세	Journal of Constructional Steel Research

2001	Design provisions for connections between steel beams and concrete filled tube columns	 (접합부 파괴거동) 관통형 보-CFT 기둥 내부 접합 파괴거동 분석	Journal of Constructional Steel Research
2013	Development of connections to concrete-filled tubular columns	 (접합부 내진상세) T앵글 및 관통 볼트를 사용한 보-기둥 접합상세 개발	Advanced Steel Construction

제2절. 국내외 관련 기술 특허 동향

1. OCFT 기둥과 관련하여 기존 건설신기술, 특허 등을 조사한 결과는 다음 표와 같다.

구분	기술 설명	
특허/ 건설 신기술	내부 앵커형 조립식 냉간성형 CFT기둥 (ACT Column) (건설신기술 제 631호) - 연관 특허: 절곡성형 철판을 이용한 조립식 폐쇄형 철골부재 및 이의설치구조 (특허 등록번호: 10-0684931) - 기술 설명: 두께 6~10.5 mm의 용접구조용 압연강재를 ‘ㄱ’형으로 냉간절곡성형하고 각 단위부재 4개를 각형 튜브형상으로 조립 => 강관 좌굴내력 증가	
	라운드 앵글을 이용한 콘크리트 충전형 합성기둥 (특허 등록일: 2013.08.09) (씨지스플랜) - 라운드 앵글을 이용하여 기둥의 틀을 잡고 내부 채움보를 관통시키고 외부 강판을 덮는 폐쇄식 합성 CFT구조 ==> 거푸집 대체	
	충전형 강관 (특허 등록일: 2013.01.08.) (포항산업과학연구원) - 내부 CFT기둥을 형성하고 돌기를 두어 이를 외부 CFT강관과 연결하는 이중 콘크리트 채움형 강관	
	콘크리트 충전강관과 보의 접합구조 (특허 등록번호: 10-1254983) - 용접부 응력집중을 완화하기 위해 보 플랜지를 관통시키고 기둥 내부에 추가 강관을 용접 - 기둥 콘크리트는 내부 강관에도 채워져 연속성 확보	
	내부보강판을 이용한 콘크리트 충전강관 기둥과 보접합부의 보강구조 (특허 등록번호: 10-0660522) - 기둥 강관의 면외방향변형 방지를 위한 스테드볼트가 설치된 내부 보강판 매입 및 용접	
특허/ 건설 신기술	콘크리트 충전 각형강관과 보의 접합구조 (특허등록번호: 10-1089561) - 결속 가능한 슬릿이 있는 연결부재는 기둥에 관통시키고 슬릿에 보 플랜지를 끼워 접합	
	콘크리트 충전 강관 기둥과 에이치형 단면 강재 보의 접합부 구조 및 이의 시공방법 (특허: 10-1186062) - 슬래브 철근 CFT기둥 내부 정착: 모멘트강도에 기여 - 기둥면에 용접된 T형 강관과 보 플랜지 볼트접합	

콘크리트 충전 각형 강관 기둥-보 접합부의 TSR 접합공법 (건설신기술 제 292호) - CFT기둥 - H형 강재보 내진 접합상세: 관통철근 + 철근용접, 관통스티프너 + 스티프너용접, T-스티프너 용접, 관통철근 + T스티프너 - 기둥면 보 용접부 응력집중 완화	
콘크리트충전강관기둥의 상하 분리식 접합부구조 (특허 등록번호: 10-1295740) - ACT기둥과 H형 보 접합부에서 관통(연결) 플레이트와 용접을 통해 보강	
콘크리트 충전 각형강관 기둥보의 접합구조(특허 등록번호: 10-0375499) - 내부 CFT기둥을 형성하고 돌기를 두어 이를 외부 CFT강관과 연결하는 이중 콘크리트 채움형 강관	
철골콘크리트 충전기둥 (특허 등록번호: 10-1062928) - 기존 H형 기둥에 모서리 강관을 사용하여 콘크리트를 채운형태의 CFT - 배부름 현상이 적고 강관의 국부좌굴저항성 증가	
각형철제박스기둥 (특허 등록번호: 2005-0979914) - 기존 사각형 강관 기둥의 4면 중앙에 돌기를 두어 강관의 국부좌굴 저항성 증가	

- 기존 충전형 합성기둥의 단면성능을 증가시키거나 보-기둥 접합부의 내진보강시키기 위하여 다이어프램, 슬릿강판, 스티프너, 관통 철근 등의 상세를 적용한 다수의 건설 신기술 및 특허가 등록되어 있다.
- 기존 충전형 합성기둥은 콘크리트 타설에 따른 배부름 현상이나 타설 구멍 증가에 따른 역타공법 경제성 저하등의 문제점을 갖고 있다. 네 모서리에 돌기를 갖고 팔각형태로 구성되는 OCFT기둥은 독창적인 형태고 강관의 국부좌굴 저항성과 콘크리트의 횡구속 효과를 기대할 수 있다. 또한 관통 보, 관통 철근, 관통 스티프너등 관통 보강상세를 적용하기가 기존 얇은 강관을 절곡하여 제작한 합성기둥에 비하여 용이하다.

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

제1절. OCFT기둥 측압 안정성 목업 테스트

1. 실험의 목적

- 충전형 합성구조인 CFT의 장점은 별도의 거푸집을 설치하지 않고도 그 자체로 구조체로 사용될 뿐만 아니라 이에 따라 거푸집 공사가 불필요하여 공기를 단축하는 효과를 낼 수 있다는 점이다.
- 종래의 CFT 단면형상인 사각형이나 원형의 경우 거푸집으로서의 역할 수행이 가능하다는 수많은 연구와 검증이 있었다. 그러나 새롭게 제안하는 팔각형 단면을 갖는 OCFT의 경우 그림에서 보는 바와 같이 콘크리트에 의해 강재의 면외변형이 일어남에 따라 거푸집으로서의 성능을 발현할 수 있을지 여부를 검증 받아야 한다.

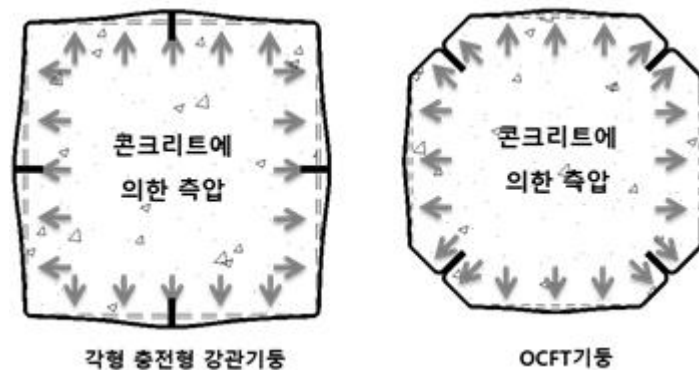


그림 3.1.1 콘크리트 측압에 따른 CFT 기둥의 단면 변형

- 국토교통부에서는 가설공사표준시방서를 통해 거푸집의 성능 기능을 고시하고 있다. 전술한 바와 같이 새로운 타입의 OCFT의 경우 타설시 거푸집으로서의 성능을 발휘해야 하므로 본 연구에서 OCFT 기둥이 콘크리트 측압에 의한 거푸집의 변형 기준을 확보하였는지 여부를 검증하였다.

2. 유한요소해석을 통한 결과

- 실제 OCFT 기둥 제작 및 Mock-Up 실험에 앞서 유한요소해석을 통해 OCFT의 콘크리트 측압에 의한 강관 저항 능력을 평가하였으며, 이를 기반으로 Mock-up 실험체 설계 및 실험 수행하였다.

● 측압산정

유한요소해석 프로그램을 이용한 OCFT의 구조성능을 검증하기 위해서는 먼저 측압을 산정해야 한다. 양생 전 굳지 않은 콘크리트는 액체로 분류할 수 있으며 물과 시멘트의 양, 혼화제 및 혼화제의 양에 따라서 반죽 질기가 달라진다. W/B (물과 결합재의 비율)가 클수록, 단위수량이 많을수록 또는 감수제 및 AE제의 양이 많을수록 콘크리트는 묽어지며 OCFT강관 측압에 영향을 미친다. 그러므로 콘크리트 측압은 콘크리트의 배합비에 따라서 변화하기 때문에 국토교통부에서는 '가설공사표준시방서 2014'에 식과 같이 콘크리트 측압을 계산할 수 있도록 하였다.

$$P = C_w \cdot C_c \left[7.2 + \frac{790R}{T+18} \right] \quad (3.1.1)$$

여기서 P 는 콘크리트 측압(kN/m^2), C_w 는 단위중량계수, C_c 는 첨가물 계수, R 은 콘크리트 타설속도(m/hr), T 는 타설되는 콘크리트 온도($^{\circ}\text{C}$)이다. 또한, 식과 같이 일반콘크리트 용 측압식을 넘어서는 안된다고 명시되어있다.

$$P = W \cdot H \quad (3.1.2)$$

즉, 콘크리트 측압의 최대치는 식을 따라야 하므로 시뮬레이션을 위한 콘크리트 측압은 그림과 같이 나타낼 수 있다.

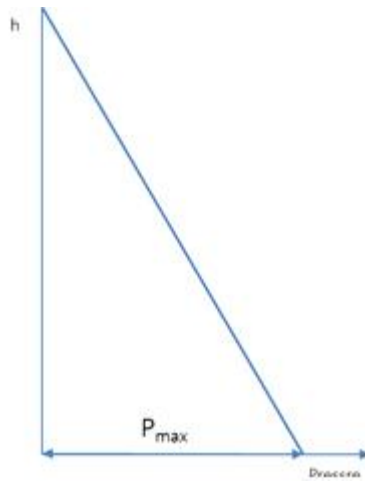


그림 3.1.2 측압 산정식 그래프

● 시뮬레이션 OCFT 물성치 및 조건

시뮬레이션에 사용된 OCFT 실험체의 물성치 및 조건은 표 3.1.1과 같다. 또한 시뮬레이션에 사용된 Q-Type과 T-Type의 OCFT의 크기와 형상은 그림 3.1.3과 같다. 그리하여 OCFT의 콘크리트 측압에 의해 안정성을 배부름에 의해 변형되는 변위와 재료의 특성을 반영한 항복강도를 기준으로 평가하였다.

표 3.1.1 시뮬레이션 조건

기둥 높이	지점	강재	콘크리트 중량	최대측압
6m	하단 고정 지점	SS400 ($f_y = 235\text{MPa}$)	24kN/m^3	144kN/m^2

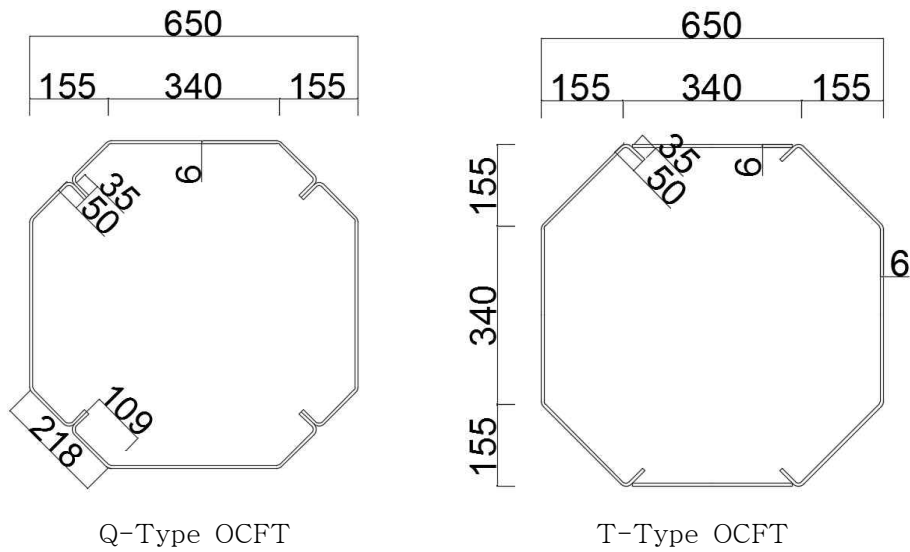


그림 3.1.3 OCFT 모델링 치수

● 배부름에 대한 유한요소해석 결과

그림 3.1.4와 그림 3.1.5는 콘크리트 축압에 의한 Q-Type과 T-Type의 변형 해석 결과이다. 최대 변형은 각각 1.7, 1.7mm로 동일하였다.

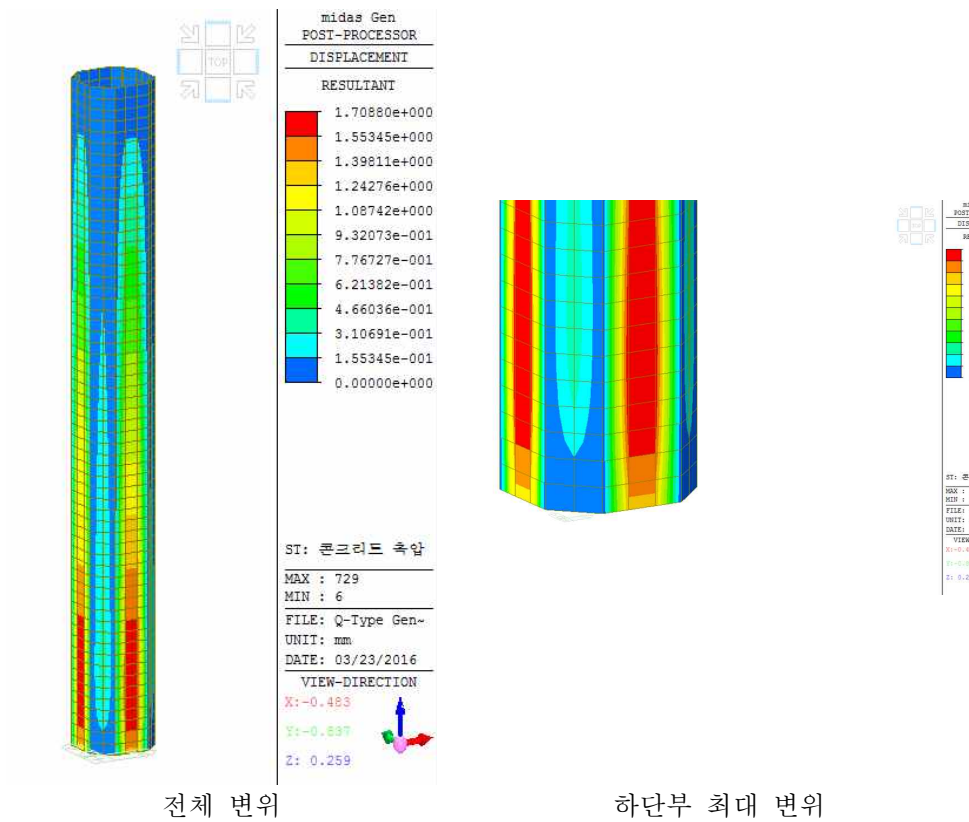
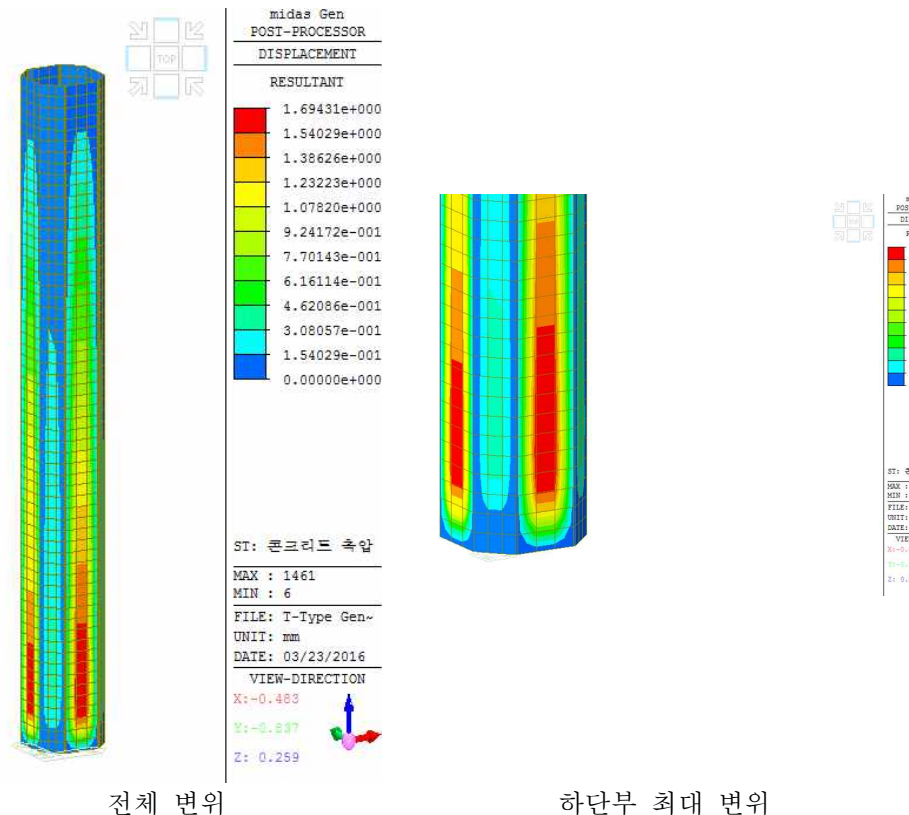


그림 3.1.4 Q-Type OCFT 변위 해석 결과



전체 변위

하단부 최대 변위

그림 3.1.5 T-Type OCFT 변위 해석 결과

‘가설공사표준시방서’에 따르면 거푸집의 변형기준은 공사시방서에 따르며, 달리 명시가 없는 경우는 표면의 평탄하기 등급에 따라 순간격 (ln) 1.5m 이내의 변형이 표의 상대변형과 절대변형 중 작은 값 이하가 되어야 한다고 명시되어 있다.

표 3.1.2 거푸집 널의 변형기준

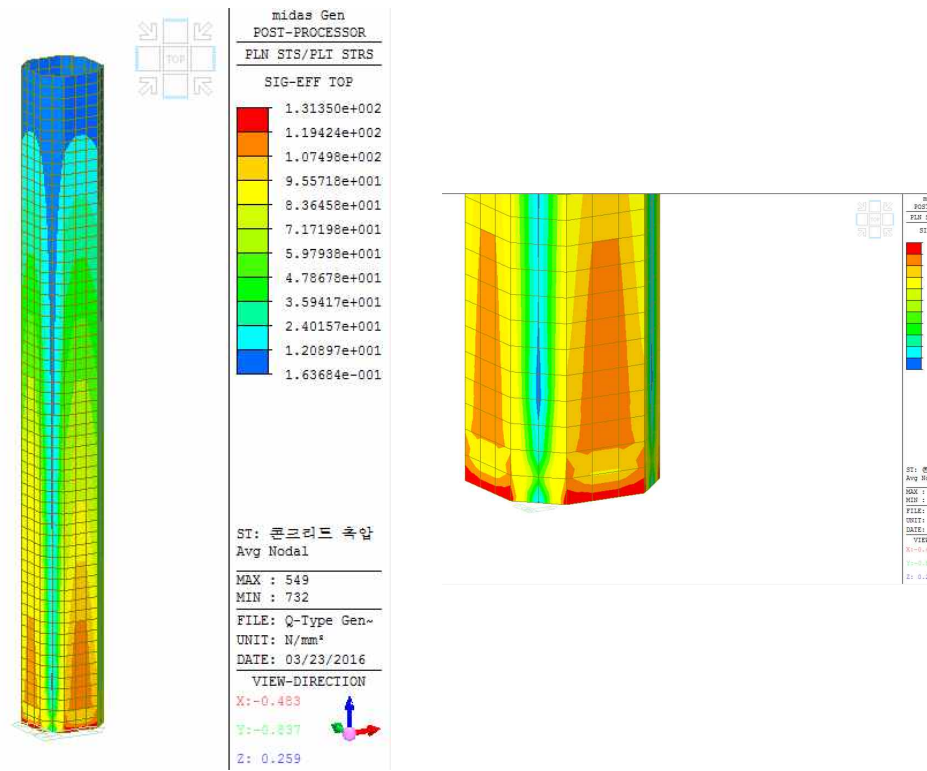
표면의 등급	상대변형	절대변형
A급	$l_p/360$	3mm
B급	$l_p/270$	6mm
C급	$l_p/180$	13mm

따라서, 시뮬레이션 결과인 1.7mm의 변형량은 ‘가설공사표준시방서’에서 제시하는 상대 변형기준이나 절대변형기준 모두 A등급의 표면에 만족하므로 OCFT의 모든 타입은 표면 등급에서 우수한 제품으로 판단할 수 있다.

또한, 축압에 의한 변형 양상은 다음과 같다. 최하단은 고정단으로 정하여 변위를 제어하였으므로 변위가 없었으며, Q-Type은 하단에서 약 300mm 지점에서 1300mm에서 최대 변형이 발생하였다. T-Type도 Q-Type과 동일하게 하단 약 300mm 지점부터 1200mm에서 최대 변형이 발생하였다.

반면, Q-Type과 T-Type의 최대 응력은 131, 128MPa로 SS400의 항복 강도인 235MPa 보다 적은 수치를 보였으므로 이는 6m 높이의 OCFT에서는 콘크리트 타설 시 강재에 영향이 없다고 판단할 수 있고, 별도의 안전장치가 필요하지 않는 것으로 판단된다.

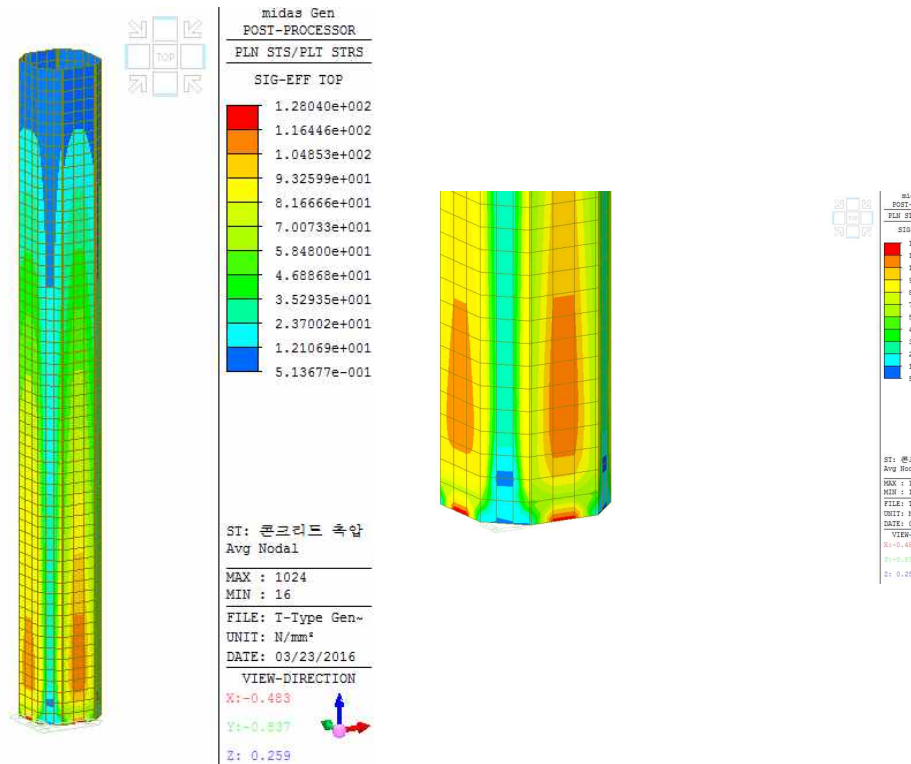
최대응력은 지점반력에 의해 발생하는 최하단부에서 발생하였고 변위가 가장 많이 발생하는 지점인 하단부의 약 300mm 높이에서 약 120, 116MPa의 응력이 발생하였으나 이 지점에서의 응력도 소성범위 안의 값으로 콘크리트 축압에 의한 강재의 영향은 없다고 사료된다.



전체 변위

하단부 최대 변위

그림 3.1.6 Q-Type OCFT 응력 해석 결과



전체 변위

하단부 최대 변위

그림 3.1.7 Q-Type OCFT 응력 해석 결과

3. 실험체 계획 및 설계

- OCFT의 타설 Mock-Up에 사용되는 실험체는 앞서 언급한 유한요소 프로그램을 이용한 모델링과 동일한 단면형상과 크기, 높이의 실험크기 실험체를 제작하여 진행하였다. 그림은 Mock-Up 실험에 사용된 실험체의 입면이다.

실험체의 타설은 한번에 6m 높이까지 타설을 진행하였고, 타설에는 슬럼프 값 150 mm, 압축강도 30 MPa의 콘크리트를 사용하였다. 또한 OCFT 실험체의 모든 강재는 SS400을 사용하였다.

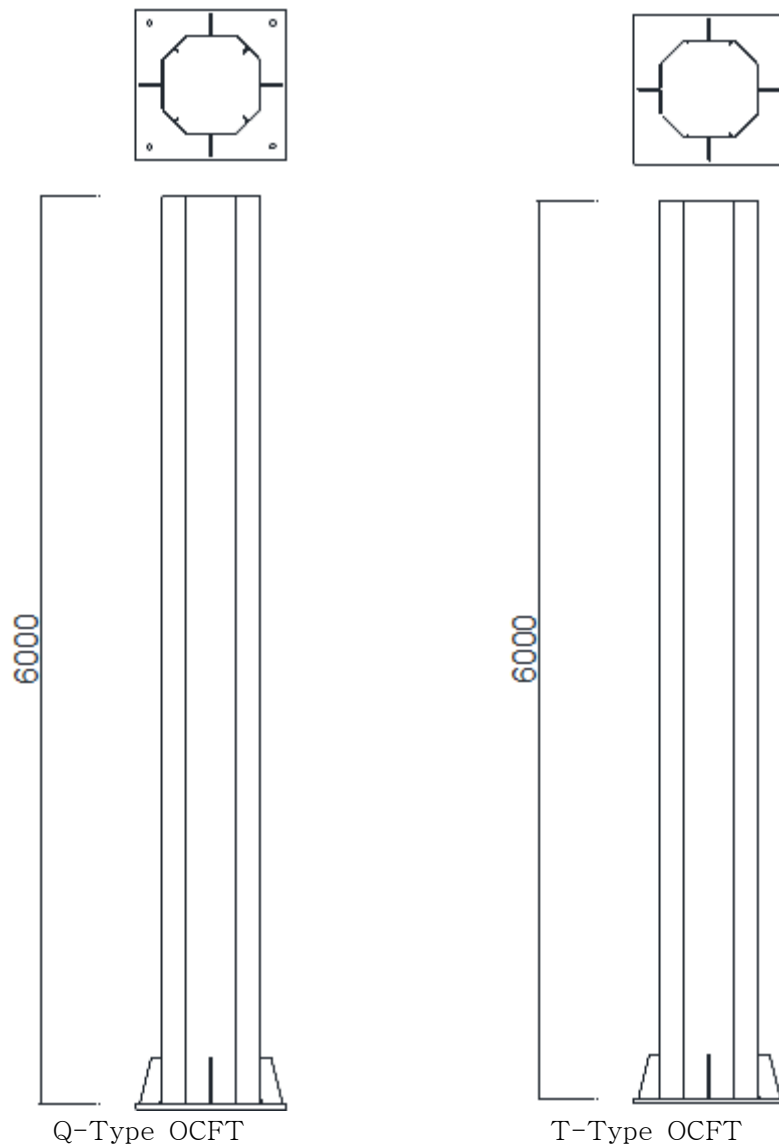


그림 3.1.8 Mock-Up 실험체 입면

4. 실험체의 제작

- OCFT 실험체 제작은 그림 3.1.9와 같이 진행하였다. 그림은 강관 준비에서 Erection까지의 모습을 나타낸다.



OCFT 강관 세팅



OCFT 강관 가용접



OCFT 강관 가용접 후 모습



OCFT 강관 완성 (Erection 전)



OCFT 강관 완성 (Erection 후)

그림 3.1.9 OCFT 실험체 제작 과정

5. 실험 수행

- Q-Type과 T-Type 두 개의 OCFT 실험체 타설은 그림 3.1.10에서 보는 바와 같이 모두 높이 6m 까지 한번에 진행하였다. 또한 타설 과정에서 OCFT가 거푸집으로서의 성능을 발휘할 수 있는지 여부를 검증하기 위하여 LVDT를 이용해 콘크리트 측압에 의한 변형을 측정하였다.



펌프카를 통한 콘크리트 타설



콘크리트 타설 후 모습

그림 3.1.10 OCFT 실험체 콘크리트 타설

- 콘크리트의 측압의 경우 그림 3.1.2에서 보는 바와 같이 기둥의 하단부에서 가장 크게 작용하며, 전술한 바와 같이 시뮬레이션 결과 기둥의 1/2 지점 아래에서 가장 크게 변형이

일어남을 예상할 수 있었으므로, 그림 3.1.12와 같이 하단에서 1200 mm와 3000 mm 지점에 LVDT를 설치하고 변형을 측정하였다. 또한 그림에서 보이는 것과 같이, T-Type의 경우 C형으로 가공된 웨브 부분에 LVDT 1, 3번을 설치하였고, 강판으로 제작된 플랜지 부분에 LVDT 2, 4번을 설치하였다.

- 콘크리트 타설속도는 현장에서 발생가능한 극한의 조건으로 실험을 수행하기 위해 6m/5min로 하였다.



그림 3.1.11 실험체에 LVDT가 설치된 모습

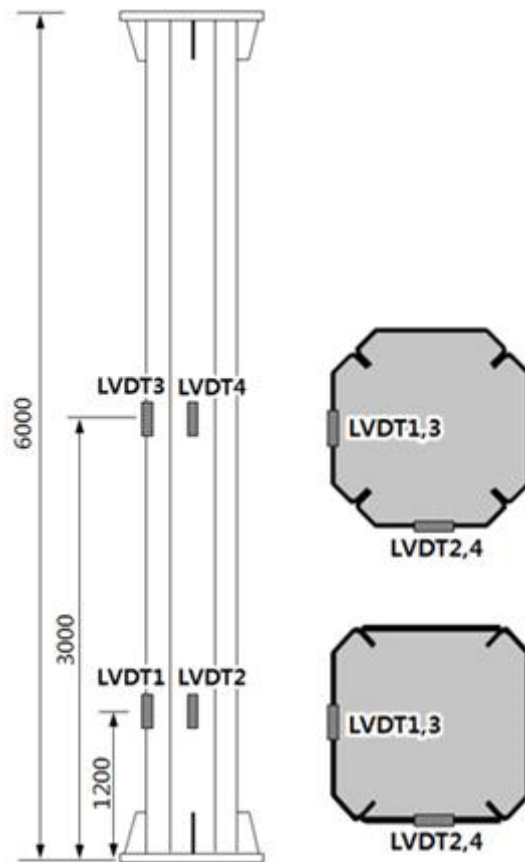


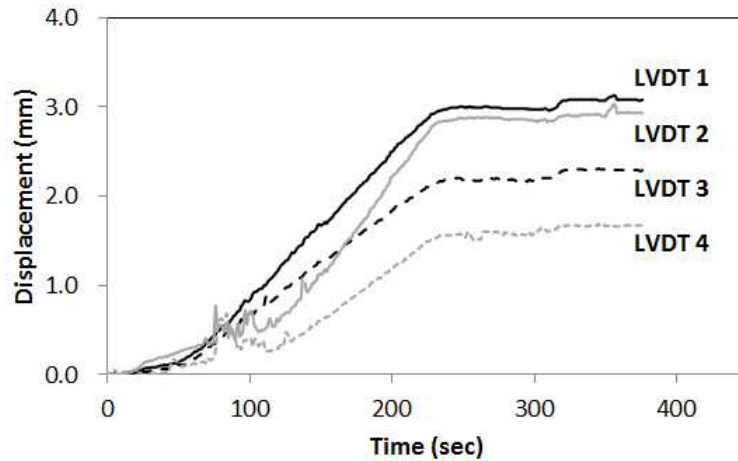
그림 3.1.12 OCFT Mock-Up 실험 LVDT 설치 위치 (mm)

6. 실험 결과

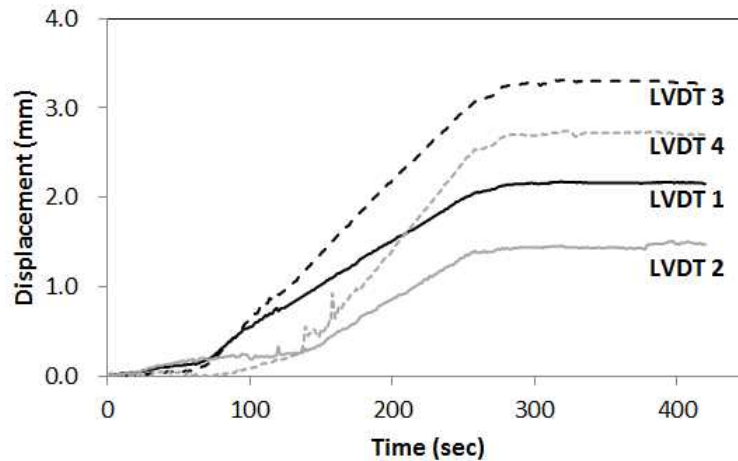
- 그림 3.1.13과 표 3.1.3은 콘크리트 타설 시점으로부터, LVDT 계측결과를 보여준다. LVDT에 의한 계측결과 콘크리트 타설 압력으로 인하여, Q-Type과 T-Type OCFT 모두 최대 3mm 이상의 강재의 면외방향 변위가 발생하였다. 이는 앞서 언급한 바와 같이

국토교통부에서 제시하는 가설공사표준시방서에 의하면 B급 변형의 최대치인 6mm에 크게 못 미치지만 A급인 3mm 매우 미미하게 상회하는 값을 알 수 있다.

- 현장에서 발생가능한 극한의 조건을 고려해 Mock-Up 실험시 6m/5min의 타설속도로 진행한 것을 감안한다면, 일반적인 타설속도인 4m/1hr에서는 더 적은 배부름의 면외변형이 일어날 것으로 예측된다. 이는 곧 OCFT의 모든 타입이 표면 등급면에서 매우 우수한 제품임을 입증하고 있다.
- 그림 3.1.13의 변형량 그래프 결과에 따르면 Q-Type의 경우 기둥하부가 기둥 중앙부분이 기둥 하부보다 강재의 면외방향 변위가 크게 발생하였다. 반면 T-Type의 경우 기둥하부가 기둥 중앙부분보다 강재의 면외방향 변위가 크게 발생하였다.



Q-Type OCFT 실험체



T-Type OCFT 실험체

그림 3.1.13 각 실험체의 LVDT 계측결과

표 3.1.3 실험체 및 LVDT별 변형 계측값

실험체	LVDT 위치	최대 변형 계측값 (mm)
Q-Type	LVDT 1	3.13
	LVDT 2	3.03
	LVDT 3	2.31
	LVDT 4	1.69
T-Type	LVDT 1	3.32
	LVDT 2	2.74
	LVDT 3	2.18
	LVDT 4	1.51

7. OCFT 타설 Mock-Up 실험에 대한 소결

- 본 연구에서는 8각형의 새로운 단면 형상을 갖는 OCFT 기둥의 콘크리트 측압에 구조적 안전성을 검증하였다. 즉, Q-Type과 T-Type의 OCFT가 콘크리트 타설 시 굳지 않은 콘크리트에 의한 측압을 견디고 안정적인 구조 성능을 발휘할 수 있는지 여부를 알아보기 위해 계획하고 실험을 수행하였다. 이에 대하여 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 높이 6m, 단면의 변 길이 650mm 의 실물크기 실험체를 설계, 제작 및 실험 수행을 하였다.
- 2) 콘크리트 측압에 의한 강재의 최대 면외변형은 시뮬레이션 값보다 크게 측정되었다.
- 3) 본 연구의 실험에 의한 변형값은 Q-Type 3.03mm, T-Type 3.32 mm이다.
- 4) 국토교통부의 가설공사표준시방서에 따르면, 표면 등급 B일 경우 최대 변형가능 값이 6mm이고, 표면 등급 A일 경우 최대 변형가능 값이 3mm인 것에 비교하면 A급을 매우 미미하게 상회하는 값으로서 OCFT의 모든 타입이 표면등급에서 매우 우수한 제품으로 판단할 수 있는 근거가 된다. 또한, 일반적인 타설속도가 4m/1hr인데 반해 Mock-Up 실험시 6m/5min로 타설되었다는 점을 감안한다면, A등급의 표면 판정이 가능하다고 볼 수 있어 OCFT가 표면등급이 매우 우수함을 뒷받침해준다.

제2절. OCFT기둥 접합부 성능실험 및 내진성능 평가

1. 합성 보-기둥 접합부의 내진성능 검증

- OCFT 기둥이 적용된 합성 보-기둥 접합부의 내진성능을 검증하기 위하여 외부접합부 (exterior beam-column connection)를 제작하고 반복가력실험(cyclic loading test)을 수행하였다.
- 접합부 반복가력실험을 통한 주요 연구내용은 다음과 같다.
합성효과 분석: 1) 합성보의 슬래브의 영향에 따른 접합부 파괴거동 분석 2) 보와 슬래브 합성작용에 따른 콘크리트 슬래브의 유효폭 분석
보-기둥 접합부의 힘의 흐름 분석: 1) 보의 부모멘트 및 정모멘트를 기둥으로 효과적으로 전달하기 위한 보강상세 개발, 2) 접합부 용접부에서의 취성과단 문제 분석, 3) 보-기둥 접합부 전단저항 분석

2. 기존문헌 검토

- 충전형 합성부재(CFT)의 보-기둥 접합부의 경우, 기둥 강관에 강재보가 직접 용접되고 보 내부 콘크리트 혹은 슬래브 콘크리트는 기둥 내부 콘크리트와 연속되어 있지 않다. 따라서 강재관의 용접부의 취성과단이 일찍 발생할 수 있으며, 보 단부에서의 소성힌지 거동을 통한 접합부의 연성능력이 확보되기 전에 취성적으로 파단되어 내진성능에 취약한 측면이 있다.
- 기존 연구는 합성 보-기둥 접합부의 이러한 문제점을 인식하고 용접부를 보강하는 방법과 보를 기둥으로 효과적으로 정착시키기 위한 보강상세 개발을 중심으로 수행되었다. 용접부 조기 파괴를 방지하기 위하여, 보-기둥 접합부에는 외다이어프램 (exterior diaphragm), 수직 및 수평 스티프너 (stiffener)등을 이용하여 기둥 외부와 보 접합부를 보강한다 (Lee et. al. 2016, Park et. al. 2003, Shin et. al. 2004, Chen et. al. 2004, Shanmugan et. al. 1991, Kim et. al. 2014, Kang et. al. 2002). 이러한 보강상세는 일부 용접부 응력집중을 완화시키고 접합부의 우수한 소성변형능력을 확보할 수 있지만, 근본적으로 보강재, 보 및 기둥이 서로 직각으로 용접되므로 모서리 부분(re-entrant corner) 응력집중이 발생하여 용접부 파단이 발생할 수 있다. 가장 바람직한 방법으로 보의 플랜지 및 웨브를 CFT기둥 내부 콘크리트로 직접 관통시키는 보강상세를 사용하는 것이 있다. 이를 위해 내다이어프램(Interior diaphragm), 관통철근(bars welded to beam flanges)등을 사용하여 보강하거나, 보 플랜지 및 웨브를 기둥 맞은편까지 직접 관통시키는 방법이 사용된다 (Beutel et al. 2002, Alostaz et al. 1996, Azizinamini et al. 1993, Mirghaderi et al. 2010).

3. 강재 보-OCFT 기둥 접합부에서 고려해야 할 파괴거동

- CFT부재는 강재가 단면 외곽에 배치되므로 보 강재와 직접 용접된다. 따라서 보 플랜지에 큰 인장력이 발생 할 경우 그림 3.2.1에서 나타낸 바와 같이 기둥 강관의 면외방향 변형이 발생할 수 있다. 또한 내부접합부에서 보 플랜지가 기둥 내부 콘크리트를 관통하더라도 기둥 강관 면외방향변형과 함께 보 플랜지의 매끄러운 면으로 인해 기둥 내부 콘크리트와 본드슬립이 발생할 수 있다. 이러한 슬래브 밑 기둥강관의 면외방향 변형은 용접부의 응력집중을 악화시켜 취성적인 용접부 파단을 발생시킨다. CFT기둥 내부 콘크리트

와 슬래브 콘크리트 또한 강관으로 인해 불연속적이다. 따라서 그림 3.2.1(c)에 나타난 바와 같이 기둥면에서 콘크리트 압괴가 집중되며 기둥 옆면에 콘크리트와 기둥 강관간의 슬립변형이 발생한다.

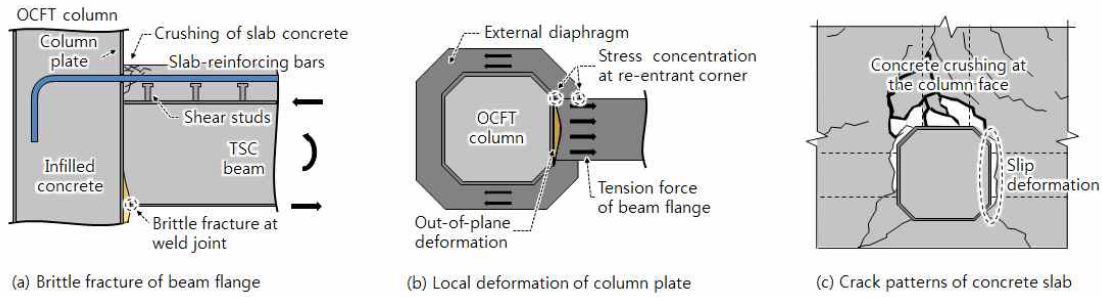


그림 3.2.1 TSC 보-OCFT 기둥 외부 접합부 변형형상

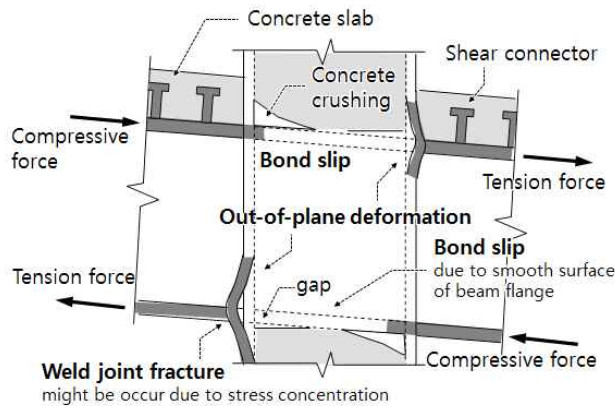


그림 3.2.2 TSC 보-OCFT 기둥 내부접합부 변형형상

4. OCFT 기둥이 적용된 보-기둥 모멘트 접합부

- OCFT기둥이 적용된 강-콘크리트 합성모멘트골조를 그림 3.2.3에 나타냈다. OCFT기둥과 브라켓은 공장에서 사전 조립되고 현장으로 운송된 후 세워진다. 이후 보를 연결하고 전단연결재 및 슬래브 철근을 배근하고 슬래브 거푸집을 설치한다. 최종적으로 콘크리트를 타설하여 모멘트골조를 완성한다. OCFT에 접합되는 보는 U단면의 TSC (The Sen Composite)보 혹은 H형보를 사용하고 전단연결재를 통해 콘크리트와 합성거동을 하도록 한다. U단면은 상부 플랜지와 웨브로 구성된 2개의 L형 강판을 하부 플랜지 강판의 양 단부에 용접하여 제작한다. 별도로 용접되는 U단면의 하부 플랜지는 중력모멘트 크기에 따라 크기를 조절할 수 있다. 보 이음은 마찰볼트접합(slip-critical beam) 혹은 기울어진 경사단부강판이음(inclined end-plate beam splice)을 하도록 한다.
- 기둥 폭 내에 배근되는 슬래브 철근은 부모멘트강도를 증가시키기 위해 OCFT기둥 내에 직접 정착하여 충분한 항복강도를 발휘하도록 한다. 또한 기둥 주위에 슬래브 횡철근을 촘촘히 배근하여 기둥에 정착된 슬래브 철근의 좌굴을 방지하고 콘크리트의 균열을 억제한다.

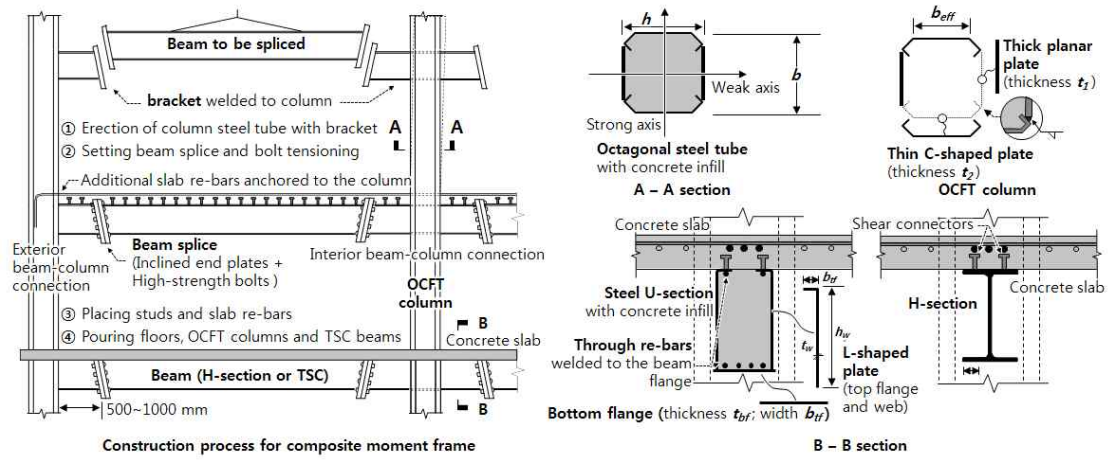


그림 3.2.3 OCFT기둥이 적용된 보-기둥 모멘트 접합부

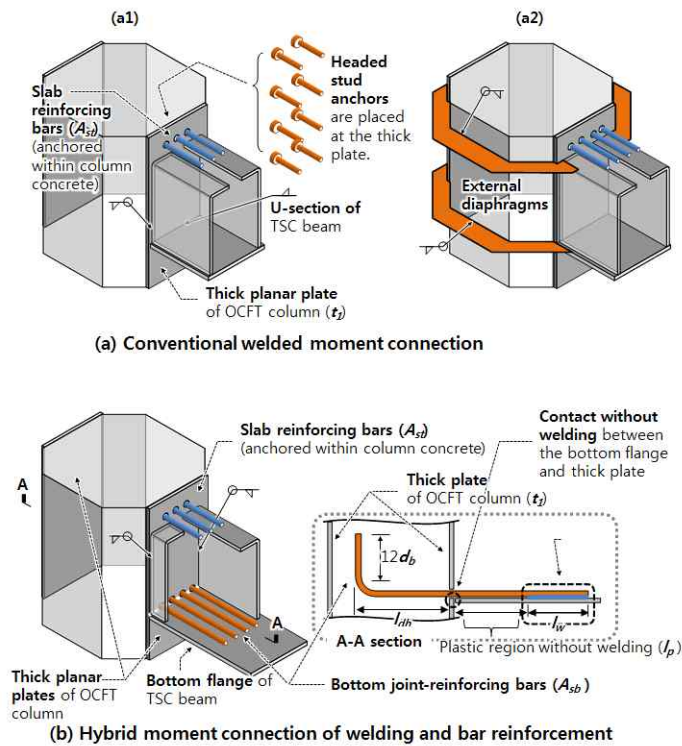
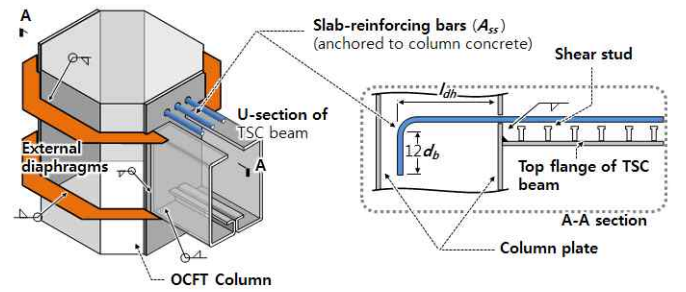
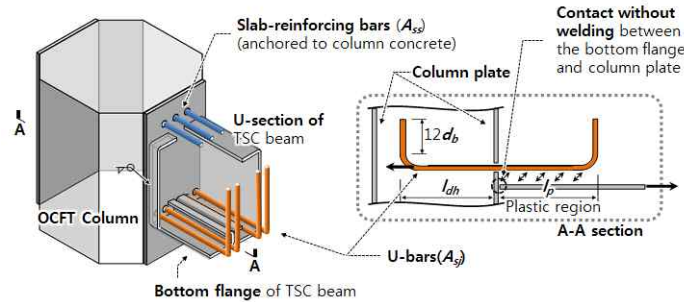


그림 3.2.4 외부접합부 TSC 보-OCFT 기둥 접합부 상세



(a) Moment connection with external diaphragms



(b) Moment connection with joint-reinforcing bars

그림 3.2.5 외부접합부 TSC 보-OCFT 기둥 접합부 상세 (계속)

5. 모멘트접합상세

- OCFT기둥과 TSC보의 모멘트접합을 외부접합부 기존 용접모멘트접합 상세를 그림 00 나타냈다. 보의 플랜지와 웨브는 그림 3.2.4(a1)과 같이 별도의 스티프너 없이 모살용접으로 기둥강판에 직접 용접된다. 이러한 용접모멘트 접합을 위해서는 강축 휨모멘트에 저항하는 OCFT기둥의 전면 및 후면의 두께가 충분히 두꺼워야 한다. 또한 기둥 강판의 면 외방향 변형을 방지하기 위하여 필요할 경우 스티드 앵커(headed stud anchors)를 기둥 강판의 내부에 용접하는 것이 좋다. 부모멘트방향 저항능력을 키우기 위한 슬래브 철근은 OCFT기둥 내부에 90° 갈고리로 직접 정착시킨다.
- 만약 기둥 판의 두께가 충분하지 않다면, 그림 3.2.4(a2)에 나타낸 바와 같이, 보 상부 및 하부 플랜지 위치에 외다이어프램(exterior diaphragm)을 사용할 수 있다. 이러한 보 강상세는 용접접합부의 취성과단을 방지하고, 접합부의 강성 및 변형능력을 키워준다.
- 보의 U형 강재는 2개의 C형 강재를 용접하여 제작할 수도 있다. 이 경우 보 하부 플랜지에는 나비모양의 돌기가 형성되게 된다. 그림 3.2.4는 이러한 형태의 보 상세를 적용한 외부접합부로 역시 외다이어프램 및 관통철근을 통해 접합부를 보강할 수 있다. 이 때, 관통철근은 기둥 하부 플랜지에 용접하지 않고 U형으로 제작하여 기둥 및 보 내부 콘크리트에 각각 90° 갈고리로 정착시켰다.
- 그림 3.2.4(b)는 본 연구에서 제안하는 복합모멘트접합(hybrid moment connection) 상세이다. 보의 상부 플랜지와 양 측면 웨브는 기둥 강판에 직접 모살용접한다. 하지만, 보의 하부 플랜지는 기둥 강판에 용접하지 않는데 이는 정모멘트가 작용할 때 하부 플랜지 용접접합부가 취성과단에 취약할 수 있기 때문이다. 특히 합성슬래브의 영향으로 단면 소성중심축이 상승하고 이에 따라 하부 플랜지 용접부에는 더 큰 인장력이 작용할 가능성이 크다. 하부 플랜지의 인장력은 플랜지에 용접된 철근(through reinforcement bars)이

- 기둥 내부 콘크리트에 정착되어 대신 전달해 준다. 이때 관통철근의 항복하중은($= f_{yj}A_{sj}$)은 보 플랜지의 항복하중($= F_y t_{bf} b_{bf}$)과 비슷하게 설계한다. 또한 관통철근의 기둥 내부 연장길이는 소요 정착길이 l_{dh} ($= 0.24f_{yj}d_b \geq \min\{8d_b, 150\text{mm}\}$) 이상이어야 한다 (KCI 2012).

6. 접합부 보 소성 모멘트강도

- 보 단부에서 OCFT기둥으로 전달되는 보의 모멘트를 계산하기 위한 소성응력 분포를 그림 3.2.6에 나타냈다. 합성보의 강재와 콘크리트 슬래브는 강재 보 상부 플랜지에 용접된 스티드로 인하여 완전합성거동을 하는 것으로 가정한다. 또한 보의 내부 채움 콘크리트는 강재면과의 본드 슬립이 발생할 수 있지만 이는 합성보의 휨성능에 큰 영향을 미치지 않는다.

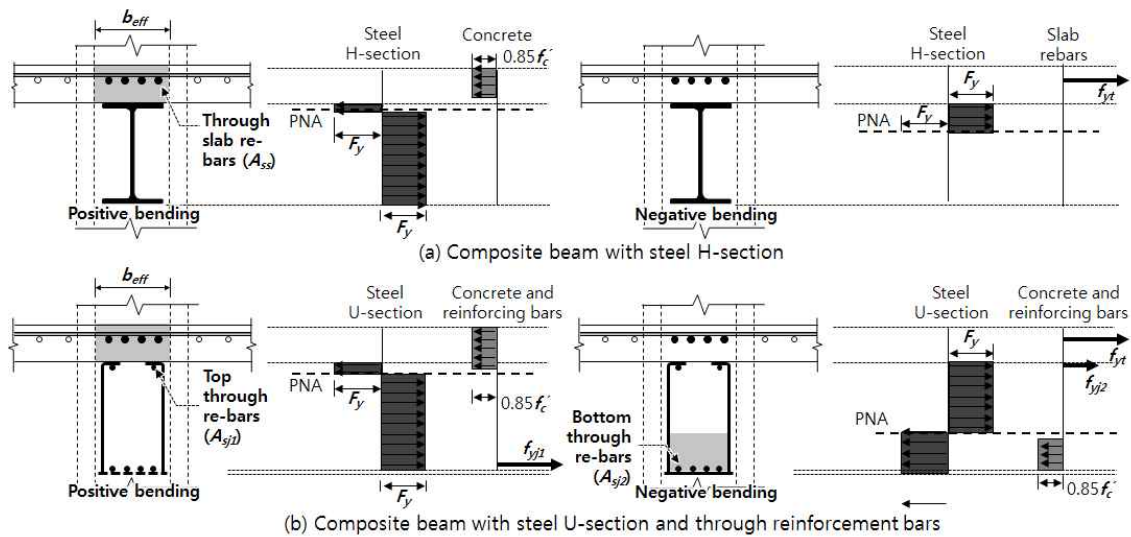


그림 3.2.6 기둥면 보의 소성응력분포

- 정모멘트가 작용하는 경우 그림 3.2.4(a)에 나타난 용접모멘트 접합상세에서는 H형 보의 하부 플랜지 및 웨브가 인장력에 저항한다. 이와 달리, 그림 3.2.4(b)에 나타난 복합모멘트접합에서는 하부 플랜지가 기둥 강판에 용접되어 있지 않으므로 인장저항을 발휘하지 못한다. 대신 하부 플랜지에 용접된 기둥관통철근이 웨브강판과 함께 인장력에 저항한다. 상부 슬래브 콘크리트의 압축저항은 OCFT기둥의 유효폭(b_{eff}) 내로 제한한다. 이는 슬래브 콘크리트와 OCFT 기둥 강재면 사이의 본드슬립이 발생할 수 있기 때문이다. 관통 슬래브 철근의 압축저항은 보수적인 평가를 위하여 무시한다.
- 부모멘트가 작용하는 경우, 합성보 단면 맨 위에 위치한 슬래브 보강철근에는 큰 인장응력과 변형률이 작용한다. 특히 내부접합부에서는 슬래브 철근이 맞은편 보까지 완전히 정착되므로 충분한 항복응력(f_{yt})을 발휘할 수 있다. 이러한 슬래브의 인장저항은 상부 보 플랜지 및 웨브와 기둥 강판 용접부의 응력집중을 완화시킨다. 단, 이러한 슬래브 철근의 인장저항 또한 슬래브와 OCFT기둥 강재면 사이의 본드슬립을 고려하여 기둥을 관통하는 슬래브 철근으로 제한된다. 그림 3.2.4(b)에 나타난 복합모멘트접합상세에서 기둥 강재면에 용접되지 않은 하부 플랜지는 기둥과의 접촉을 통해 압축 항복응력(F_y)을 발휘한다. 보 상부플랜지에 용접된 관통철근은 슬래브 철근과 함께 항복 인장응력(f_{yt})을 발휘한다. 단 관통철근의 압축저항은 보수적인 강도 평가를 위하여 무시한다.

7. 외부접합부 실험변수 및 단면상세

- 실제 크기의 외부 접합부 실험체 6개를 제작하여 반복가력 실험을 수행하였다. 각 실험체의 상세 도면을 그림 3.2.7과 3.2.8에 나타냈다. 모든 외부접합부 실험체의 OCFT기둥의 전체 길이는 3360 mm이고, 보의 전체 길이는 3880 mm이다. OCFT기둥은 T-type 형태로 한변의 길이가 450 mm인 정사각형 단면에서 네 모서리를 73 mm만큼 잘라낸 팔각형 단면이다 ($b_{eff} = 304$ mm). 보가 용접되는 전면과 후면의 강판 두께는 $t_1 = 14$ mm이고, 측면의 C형 강판의 두께는 $t_2 = 6$ mm이다.
- 외부 접합부 J1의 상세도면을 그림 3.2.7(a)에 나타냈다. 보 U단면은 상부 플랜지와 웨브 플랜지를 포함하는 L형 강판과 하부 플랜지 강판으로 구성된다. ($b_{tf} = 90$ mm, $t_{tf} = 6$ mm, $h_w = 450$ mm, $t_w = 6$ mm, $b_{bf} = 280$ mm, $t_{bf} = 6$ mm) U단면 강재 위에는 두께 150 mm, 폭 1200 mm의 콘크리트 슬래브를 설치하였고, 그 사이에는 완전합성을 위하여 직경 19 mm의 스티드를 2열씩 200 mm 간격으로 설치하였다. 슬래브 중앙에는 SD600급 D25철근 3개($A_{ss} = 1520$ mm² 및 $f_y = 673$ MPa)가 슬래브 보강철근으로 사용되었다. 슬래브 보강철근은 OCFT기둥 강판을 관통하여 내부 콘크리트에 90° 갈고리로 정착시켰다. 확보된 정착길이(= 320 mm)는 KCI 2012에 제시된 요구 정착길이($l_{dh} = 490$ mm)보다 작았다. 그 외에도, 슬래브의 좌·우 측면에는 SD500급 D25철근($f_{ys} = 550$ MPa)을 각각 3개씩 길이방향으로 배치하였고, 철근 단부에는 확대머리 정착을 적용하였다. 직각방향의 경우, D10철근을 300 mm 간격으로 배치하였다. 외다이어프램을 통해 접합부보강을 하였다. 이를 위하여 플랜지 두께와 동일한 두께의 외다이어프램을 플랜지 높이와 동일하게 설치하였다.
- J2는 스티드를 기둥 내부에 매입하여 기둥 강판의 면외방향 저항성을 높인 실험체이다. 보 및 슬래브 상세는 J1과 동일하다.

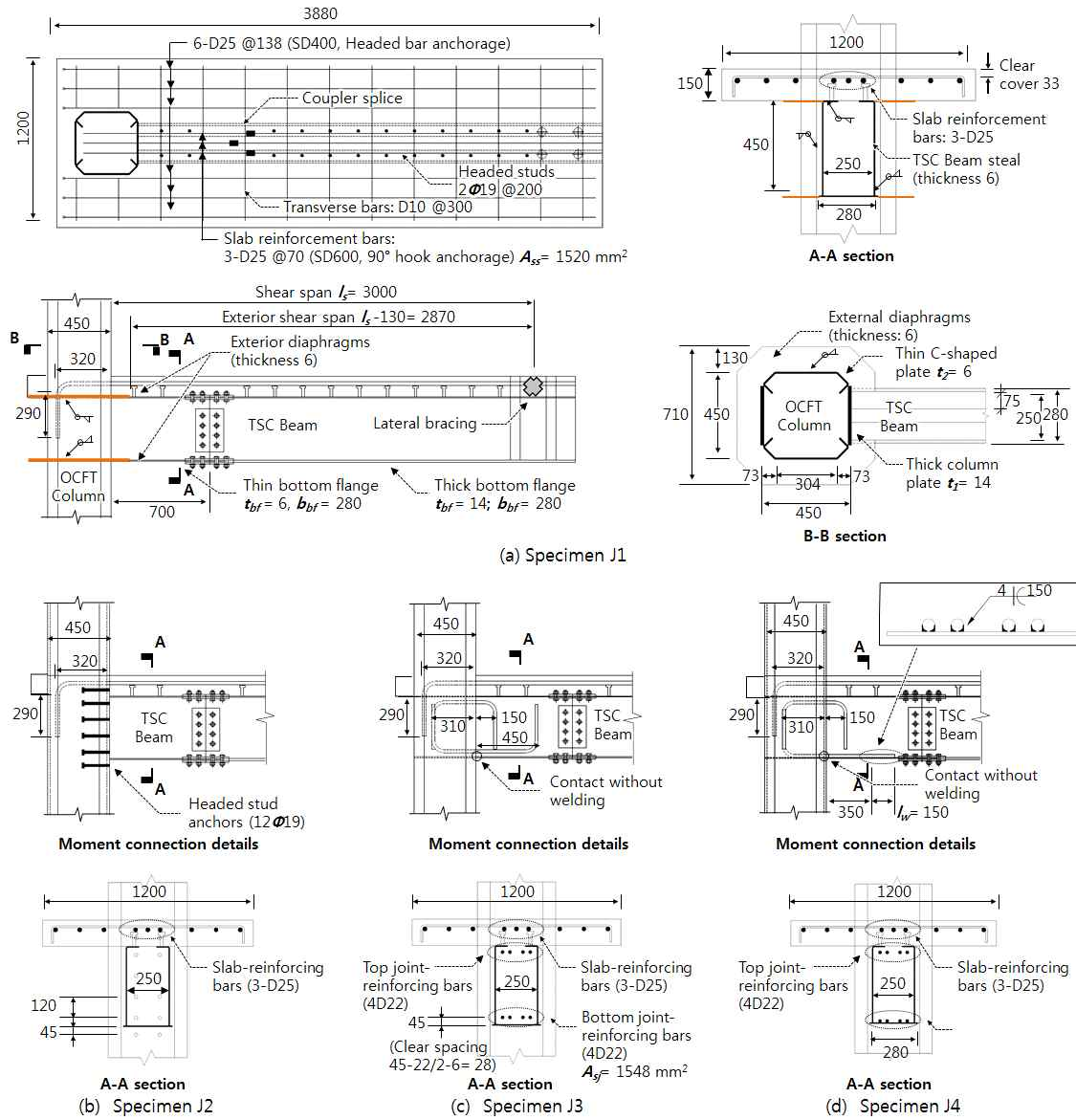


그림 3.2.7 외부접합부 단면상세

- 복합모멘트접합 상세를 사용한 J3와 J4의 상세는 그림 3.2.7(c)와 (d)에 나타내었다. 보의 상부 플랜지와 웨브는 기둥 강판에 직접 용접하였다. 하지만 하부 플랜지는 기둥 강판에 직접 용접하지 않았고, 그 대신 관통철근으로서 90° 갈고리를 갖는 4개의 D22 철근($A_{sj}=1548 \text{ mm}^2$ 및 $f_{yj}=421 \text{ MPa}$)을 단면 하부에 배치하였다. 그림 3.2.7(c)에 나타낸 바와 같이, 관통철근은 OCFT기둥과 보 내부에 90° 갈고리로 정착시켰다. 또한 관통철근과 하부 플랜지 사이에는 콘크리트가 잘 채워지도록 순간격 28 mm를 확보하였다. 반면 J4의 경우, 그림 3.2.7(d)에 나타낸 바와 같이 관통철근을 하부 플랜지에 직접 용접하였다. 관통철근 용접길이는 $l_w=150 \text{ mm}$ 이었고, 기둥면으로부터 350 mm 떨어진 위치에서 용접함으로써 관통철근이 항복하는 무용접 소성구간을 확보하였다.

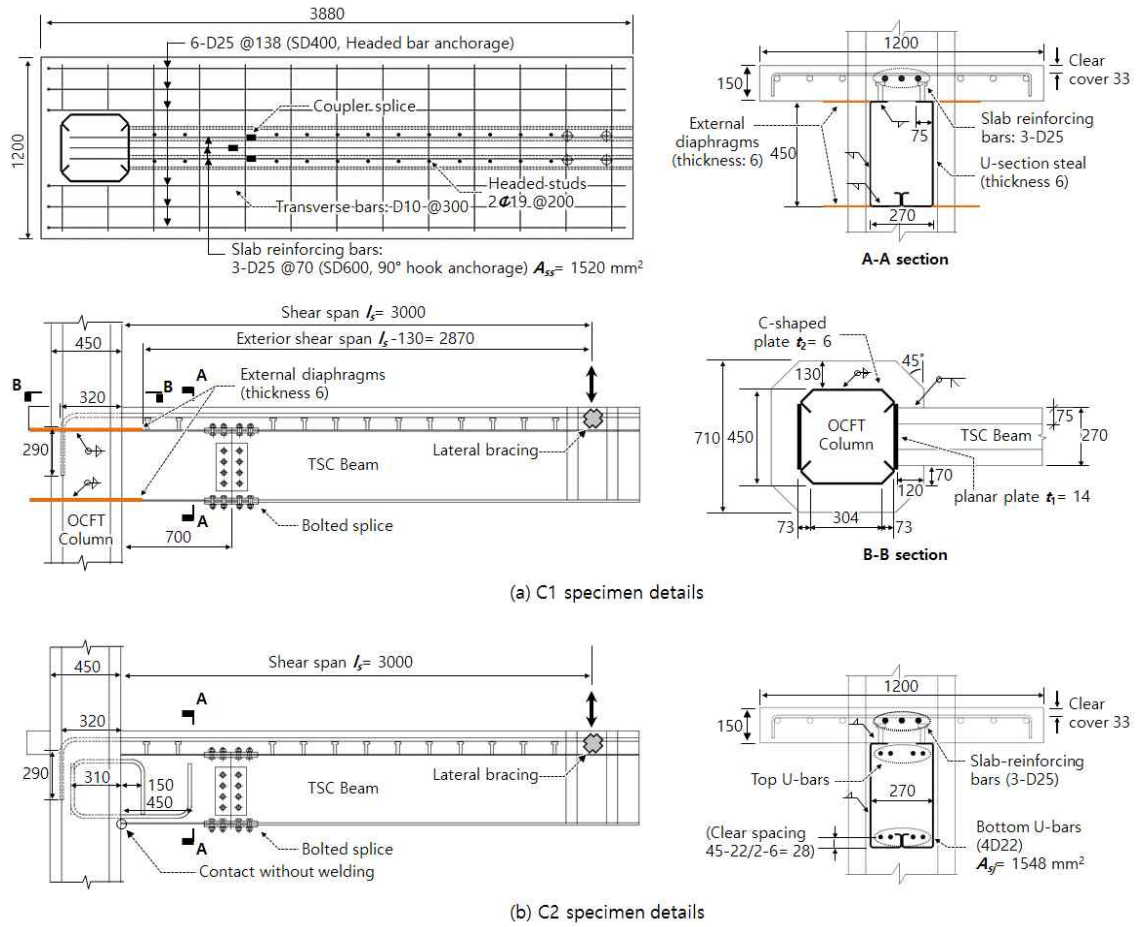


그림 3.2.8 외부접합부 단면상세 (계속)

- 하부 플랜지에 돌기가 형성고 2개의 C형 강판으로 제작된 보를 적용한 외부접합부 실험체를 그림 3.2.8에 나타냈다. C1의 경우 J1과 같이 외다이어프램을 통해 보-기둥 접합부의 응력집중을 완화시켰다. C2는 관통철근을 사용한 실험체로 보 내부와 기둥 내부 모두 갈고리로 정착시켰다. 이는 U형 관통철근을 감싸고 있는 콘크리트를 부착을 통해 하부플랜지의 인장력을 전달하고자 함이다. 관통철근 상세는 J4와 동일하다.

8. 외부접합부실험 재료강도

- 재료실험으로 구한 콘크리트의 압축강도는 $f_{ck} = 21.3 \text{ MPa}$ 이다. OCFT기둥과 보에 사용된 강판의 경우, 두께 6 mm 및 14 mm 강판의 항복강도는 각각 $F_y = 411 \text{ MPa}$, 391 MPa 이었다. 슬래브에 사용된 SD600급 및 SD500급 D25 철근의 항복강도는 각각 $f_{ys} = 673 \text{ MPa}$, 550 MPa 이었다. 또한 J3과 J4에 사용된 D22 관통철근의 항복강도는 $f_{yj} = 421 \text{ MPa}$ 이었다 (그림 3.2.9 와 그림 3.2.10 참조).



TEST REPORT

우 13810 경기도 과천시 교육원로 98 (중앙동)

TEL 02)2164-0011

FAX 02)2634-1058

성적서번호 : TAK-005651

접 수 일 자 : 2016년 03월 07일

대 표 자 : 박성완

시험완료일자 : 2016년 03월 16일

업 계 명 : 한국대학교산학협력단

주 소 : 경기도 용인시 수지구 죽전로 152 (죽전동, 한국대학교내)

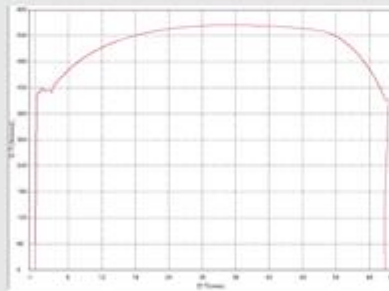
사 료 명 : 금속시험 (SM490) 1

시험결과

시험항목	단위	시험구분	결과치	시험방법
인장강도	N/mm ²	-	564	KS B 0802 : 2003(1A호 시험편)
항복강도	N/mm ²	-	411	KS B 0802 : 2003(1A호 시험편)
연신율	%	-	28	KS B 0802 : 2003(1A호 시험편)

* 용 도 : 철골용(주)냉간어테크

- 비 고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시험방법으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지 않으며, 성적서의 진위확인용 홈페이지(www.ktr.or.kr) 또는 QR code로 확인 가능합니다.
 2. 이 성적서는 복제, 전전, 광고 및 손송을 등으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
 3. 이 성적서는 원문(동문 포함)만 유효하며, 사본 및 전자 인쇄본/파일본은 결과치 참고용입니다.



Man Jonghun

작성자 : 문종훈
E-mail: no1jonghun@ktr.or.kr

Man Jong-oh

기술책임자 : 함종오
Tel : 1577-0091(ARS 01~03)

2016년 03월 16일



한국화학융합시험연구원장



위변조 확인용 QR code

그림 3.2.9 SM490 6T 강재시험 인장시험 결과

TEST REPORT

우 13810 경기도 과천시 교육원로 98 (중앙동)

TEL (02)2164-0011

FAX (02)2634-1008

상적서번호 : TAK-005653

접 수 일 자 : 2016년 03월 07일

대 표 자 : 박성환

시험완료일자 : 2016년 03월 16일

업 체 명 : 단국대학교산학협력단

주 소 : 경기도 용인시 수지구 죽전로 152 (죽전동, 단국대학교내)

시 료 명 : 금속시편 (SM490) 2

시험 결과

시험항목	단위	시험구분	결과치	시험방법
인장강도	N/mm ²	-	540	KS B 0802 : 2003(1A호 시험편)
항복강도	N/mm ²	-	391	KS B 0802 : 2003(1A호 시험편)
연신율	%	-	25	KS B 0802 : 2003(1A호 시험편)

* 용 도 : 재출용(주)센코어테크

비 고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 현재 제품에 대한 품질을 보증하지 않으며, 성적서의 진위확인용 홈페이지(www.ktr.or.kr) 또는 QR code로 확인 가능합니다.
2. 이 성적서는 총보, 전전, 절고 및 소송을 들으실 수 없으며, 품도 이외의 사용을 금합니다.
3. 이 성적서는 원본(통본 포함)만 유효하며, 사본 및 전자 인쇄본/파일본은 결과치 참고용입니다.



Min Jonghun

Min Jong-oh

작성자 : 문종훈
E-mail: no1jonghun@ktr.or.kr

기술책임자 : 함종오
Tel : 1577-0091(ARS 01→08)

2016년 03월 16일

KTR

한국화학융합시험연구원장



위변조 확인용 QR code

그림 3.2.10 SM490 14T 강재시편 인장시험 결과

9. 가력 및 계측 계획/실험체 제작

- 반복가력을 위한 실험체 설치 방법을 그림 3.2.11에 나타내었다. OCFT기둥은 수평방향으로 설치하고 양단부의 지점을 힌지로 고정시켰다. 보와 슬래브는 수직으로 세우고 그 상단부에 액츄에이터를 연결하였다. 기둥면으로부터 액츄에이터까지의 전단경간은 $l_s = 3000$ mm이었고, 양단부 지점 사이의 기둥 순길이는 $l_c = 3000$ mm이었다. 실험체 가력은 AISC 2005a의 SAC 프로토콜을 따랐다.
- 그림 3.2.11에서 보는 바와 같이, LVDT 선형 변위 계측기를 사용하여 보, 기둥, 접합부, 지점의 변위를 계측하였다. 또한 보의 강재단면, 관통철근, 슬래브 철근 등에 변형률 게이지를 부착하여 철근 및 강재 변형률을 계측하였다.

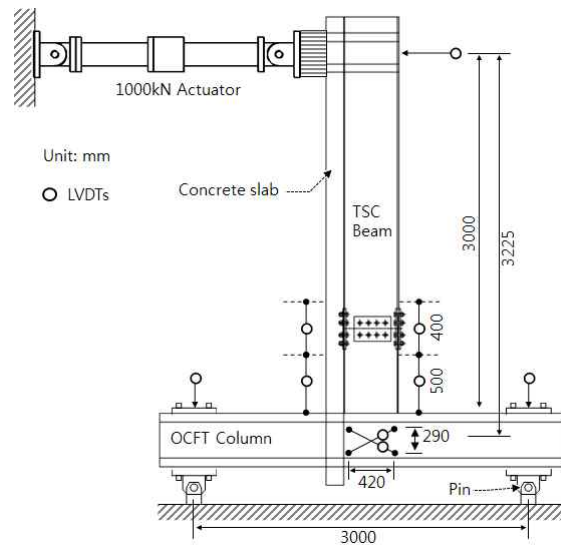


그림 3.2.11 실험 셋팅

- 실험체는 2015년 7월 20 ~ 8월 10일 페트라텍에서 제작하였다. (그림 3.2.12 참조)



그림 3.2.12 OCFT기둥-보 외부 접합부 실험체 제작 현장

10. 외부접합부 하중-변위비 관계 및 파괴모드

- 액츄에이터 횡하중-변위비($P-\delta$) 관계를 그림 3.2.13에 나타내었다. 변위비 δ 는 액츄에이터 위치에서 계측한 횡변위를 TSC보의 전단경간 $l_s (= 3000 \text{ mm})$ 로 나눈 값이다. 그림 3.2.13에서 정·부 방향의 횡하중은 각각 TSC보에 정모멘트와 부모멘트를 발생시킨다. 실험 최대하중(P_u^+ 및 P_u^-)는 원형표식으로 나타냈다. 또한 실제 재료강도를 바탕으로 구한 실험체의 공칭강도(P_n^+ 및 P_n^-)는 수평 점선으로 나타냈다.

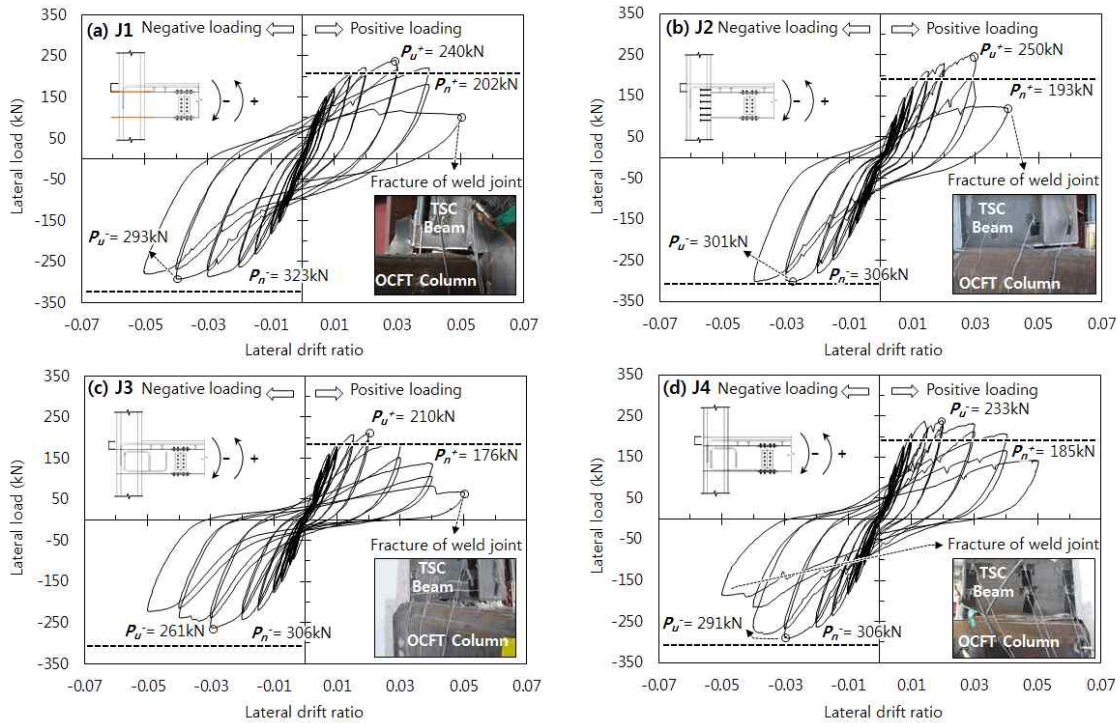


그림 3.2.13 하중-변위비 관계

- 외다이어프램으로 보강한 J1은 횡변위비 1%부터 강재항복에 의한 강성저하가 시작되었고, 횡변위비 2% 이후 횡하중 증가 없이 변형이 증가하는 연성거동을 보였다. 강재가 항복하는 시점에서 정모멘트에서 인장을 받는 보 하부 플랜지와 기둥 강판의 용접부에서 균열이 발생하였고, 3% 횡변위비에서 용접부 파단이 발생하였다. 슬래브 근처 보 상부 플랜지 용접부에서는 취성과파단이 관찰되지 않았다.
- 스테르도로 보강한 J2의 경우 강성저하 시점 및 보 강판의 항복시점은 J1과 유사하였다. 횡변위비 2%에서 하부 플랜지 용접부에서 인장과파단이 일찍 시작되었고, 최종적으로 횡변위비 3%이후 하부 플랜지 용접부 파단으로 인해 하중재하능력을 급격히 상실하였다. J2는 J1대비 작은 연성능력에도 불구하고 좀더 큰 하중재하 능력을 보였다.
- 복합모멘트접합을 사용한 J3과 J4는 최대하중이 설계하중보다 높게 나왔지만 주기거동동안 펀칭현상이 발생하여 외다이어프램으로 보강한 실험체에 비하여 에너지 소산능력이 감소하였다. 또한 보 플랜지에 용접되지 않은 관통철근 보강상세를 사용한 J3실험체는 최대강도 이후 하부 플랜지 및 웹 용접부 파단이 발생하면서 하중재하능력을 급격히 상실하였다. 반면 J4의 경우 플랜지 용접 철근이 효과적으로 하중을 전달하면서 연성거동을 보였다.

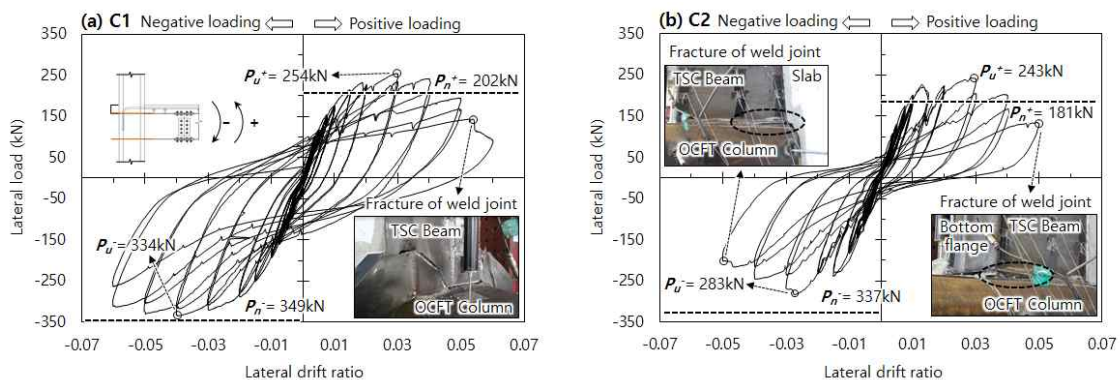


그림 3.2.14 하중-변위비 관계 (계속)

- 보 하부에 돌기가 형성되고 외다이어프램으로 보강한 C1의 경우 가장 좋은 하중재하능력, 연성능력, 에너지소산능력을 보였다. 이는 기존 외다이어프램 보강상세가 접합부의 응력을 효과적으로 분산시켜 주었음을 뜻한다. 최종적으로 접합부 용접부에서 균열이 시작되면서 용접부 파단이 발생하였다. U형 관통철근으로 보강한 C2실험체의 경우, 내부 갈고리 철근이 보 플랜지의 인장력을 효과적으로 전달하지 못하면서 취성적인 파괴거동과 함께 슬립에 따른 핀칭현상이 크게 발생하였다. (그림 3.2.14 참조)

	+3.0 % Positive M	-4.0 % Negative M	At the end of test
J1	(a) TSC Beam Fracture at weld joint External diaphragm OCFT Column $\delta = +3.0\%$	(b) TSC Beam (flange) TSC Beam (web) Local buckling (External diaphragm) OCFT Column $\delta = -4.0\%$	(c) TSC Beam Fracture at weld joint OCFT Column $\delta = -5.0\%$
J2	(d) TSC Beam (web) Fracture at weld joint OCFT Column $\delta = +3.0\%$	(e) Slab OCFT Column $\delta = -4.0\%$	(f) TSC Beam (web) TSC Beam (flange) Fracture at weld joint OCFT Column $\delta = -4.0\%$
J3	(g) Slab TSC Beam (web) Fracture at weld joint (Web of TSC beam) OCFT Column $\delta = +3.0\%$	(h) Slab TSC Beam (web) Fracture at weld joint (Top flange of TSC beam) OCFT Column $\delta = -4.0\%$	(i) Concrete crushing Slab TSC Beam (web) Fracture at weld joint OCFT Column $\delta = -5.0\%$
J4	(j) TSC Beam (web) Contact without welding Fracture at weld joint (Web of TSC beam) OCFT Column $\delta = +3.0\%$	(k) Concrete crushing Slab TSC beam (web) Fracture at weld joint (Web of TSC beam) OCFT Column 90° hooked bars $\delta = +4.0\%$	(l) TSC beam (web) Slab Fracture at weld joint (Top flange of TSC beam) $\delta = -5.0\%$

그림 3.2.15 파괴양상

	-3.0 % (Negative loading)	+4.0 % (Positive loading)	At the end of test
C1	(a) TSC Beam (bottom flange) Buckling of bottom flange Weld joint fracture Buckling of external diaphragm OCFT Column	(b) TSC Beam (bottom flange) Out-of-plane deformation of column plate External diaphragm Weld joint fracture at column face OCFT Column	(c) TSC Beam (bottom flange) Flange and web fracture Weld joint fracture at column face OCFT Column
C2	(d) Slab Web TSC Beam (bottom flange) Weld joint fracture OCFT Column $+3.0\%$ (Positive loading)	(e) Slab TSC Beam (web) Weld joint fracture OCFT Column -4.0% (Negative loading)	(f) TSC Beam (bottom flange) Web Slab Contact without welding Weld joint fracture OCFT Column At the end of test

그림 3.2.16 파괴양상 (계속)

11. 외부접합부 관통철근 변형률 계측 결과

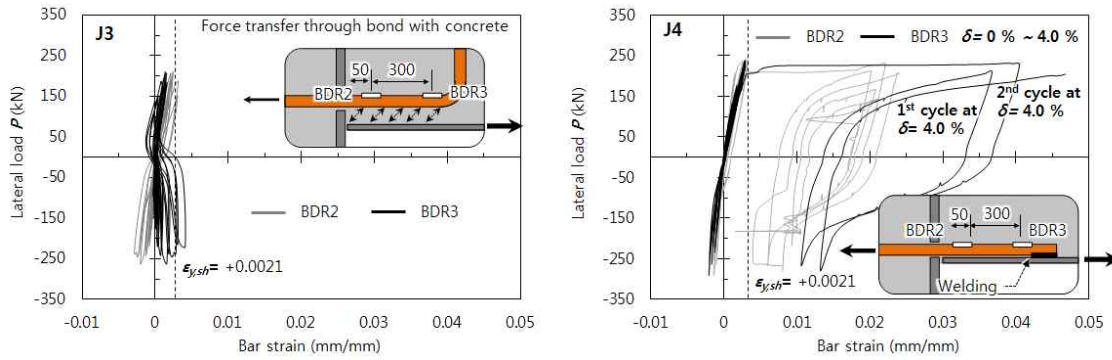


그림 3.2.17 관통철근 변형률

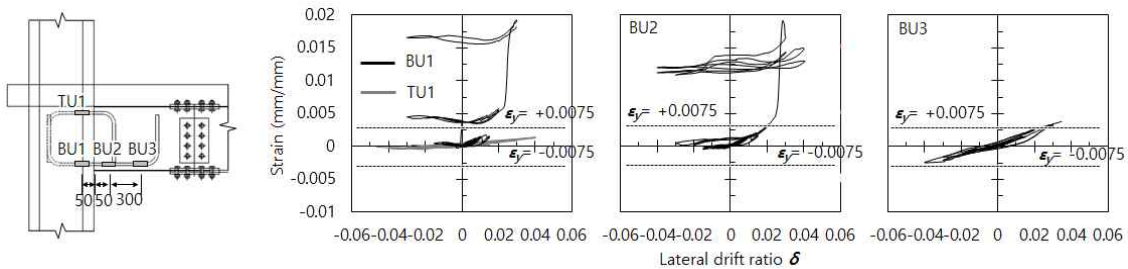


그림 3.2.18 관통철근 변형률 (계속)

- 용접없이 U형으로 관통된 보강철근의 경우 콘크리트 부착응력을 통해 관통철근과 하부 플랜지 사이의 응력 전달이 이루어진다. 하지만 하부 플랜지는 표면이 매끄러우므로 콘크리트 부착강도가 작고 슬립 변형이 쉽게 발생된다. 다시 말해, 철근과 강판 사이에서는 콘크리트 부착에 의존하는 하중 전달이 효과적이지 않다. 이는 변형률 계측결과에서도 확인할 수 있는데, 변형률이 크지 않았고 항복 이후에도 슬립에 의해 에너지 소산능력이 나타나지 않았다. 반면 기둥 하부 플랜지에 용접된 철근의 변형률은 항복변형률 이상의 큰 소성변형과 함께 에너지소산능력을 보였다.

12. 외부접합부 슬래브 콘크리트 파괴양상 및 철근 변형률

- 모든 외부접합부 실험체에서 슬래브 콘크리트의 균열과 파괴양상은 유사하였다. 슬래브가 인장을 받는 부모멘트의 경우, 횡변위비 1%에서 콘크리트 휨균열이 직각철근과 나란한 방향으로 발생하였다. 반면 슬래브가 압축을 받는 정모멘트에서는, 슬래브 콘크리트와 기둥 강판이 맞닿은 접합면에서 조깅균열이 횡변위비 1%부터 나타나기 시작했다. 슬래브 관통철근에서도 국부좌굴이 발생하여 콘크리트 피복파괴와 함께 표면으로 완전히 노출되었다. OCFT기둥 강재 옆면과 슬래브 콘크리트에서도 본드슬립이 발생하였다.
- 기둥에 관통되는 슬래브 철근은 정착길이가 부족하였음에도 불구하고 ($l_{dh}/l_{dh,req} = 320/490 = 0.65$), 항복변형률 이상의 큰 소성변형과 함께 주기거동동안 에너지소산능력을 보였다. 즉, 슬래브가 압축을 받는 경우에도 인장변형률이 계측되었는데, 이는 잔류변형의 영향으로 인하여 슬래브 보강철근이 인장변형률 상태에서 상당한 크기의 압축응력에 저항하고 있음을 가리킨다. 반면 기둥에 정착되지 않은 슬래브 철근은 주기거동 내내 변형률이 크지 않았다.

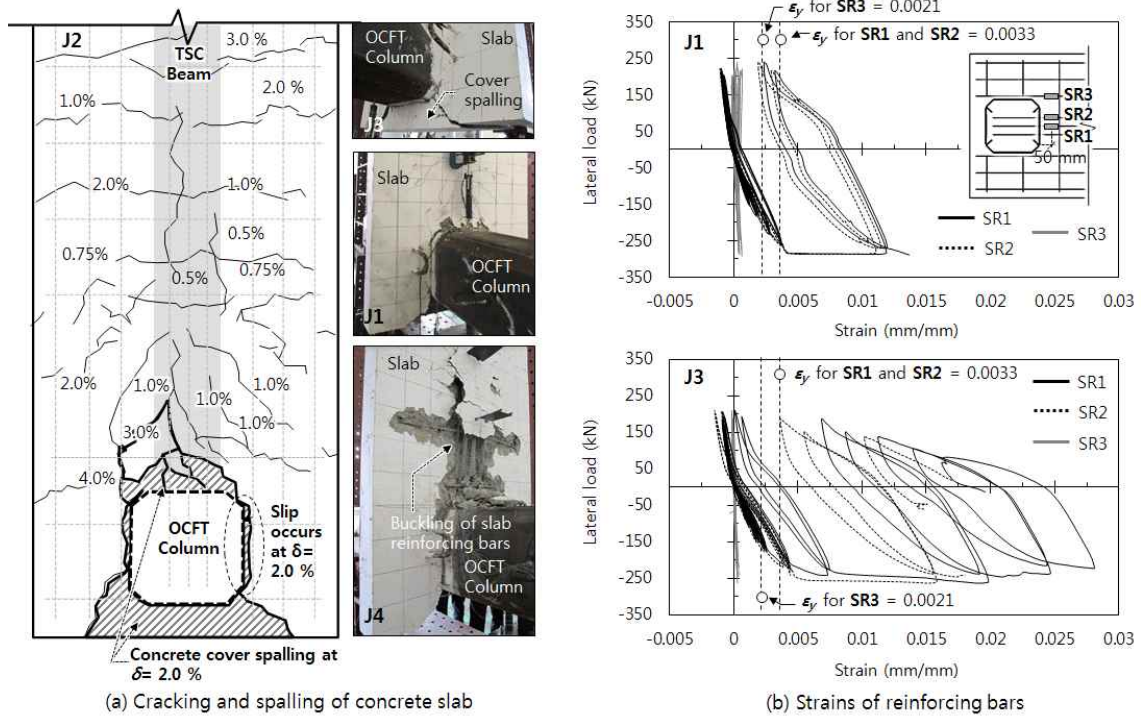


그림 3.2.19 슬래브철근 변형률

- 이러한 슬래브 콘크리트의 파괴모드와 철근의 변형률은 보-OCFT 기둥 외부 접합부에서 하중전달과 관련하여 다음 사항을 시사한다.
정모멘트가 작용하는 경우, 슬래브 콘크리트의 압축저항은 합성보의 휨저항에 거의 기여하지 못한다. 이는 슬래브 콘크리트와 기둥면에서 콘크리트 압괴가 일찍 발생하기 때문이다. 이러한 슬래브 조기 압괴는 AISC 358 Chapter 6에 언급되어 있다.
부모멘트가 작용할 경우, 기둥에 직접 정착된 슬래브 철근은 합성보 휨저항에 기여한다. 반면 기둥에 직접 정착되지 않은 슬래브 철근에 의한 휨저항은 기둥으로 거의 전달되지 않는다.
- 관통철근상세를 적용한 복합모멘트접합의 경우 보 단부에서 철근간섭으로 콘크리트가 제대로 채워지지 않을 수 있다 (그림 3.2.20 참조). 이러한 콘크리트 타설 불량과 함께 관통 철근을 감싸는 콘크리트는 주기거동동안 완전히 파쇄되어 하중전달을 하는 역할을 완전히 상실하였다. 따라서 관통철근은 그림 3.2.21에 나타난 바와 같이, 상부 및 하부 모두 보 플랜지에 직접 용접시키는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

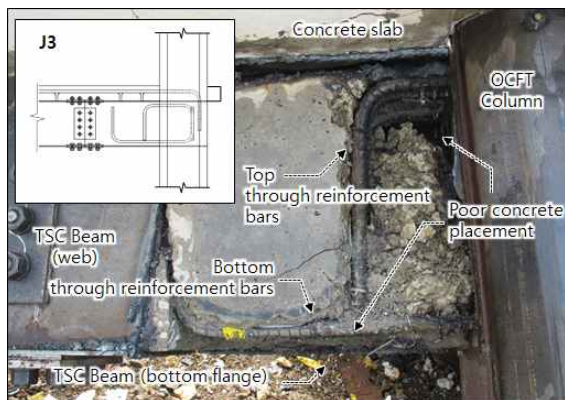


그림 3.2.20 보 내부 콘크리트 타설불량

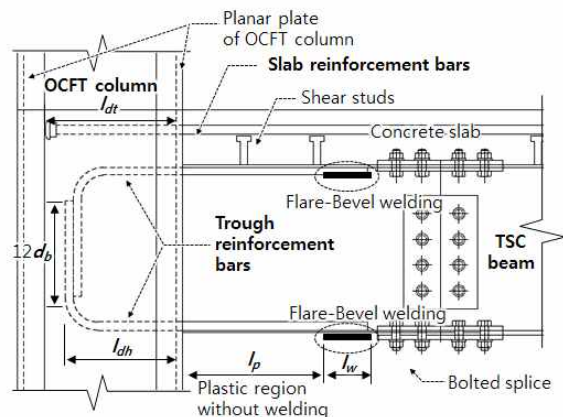


그림 3.2.21 접합부 개선사항

13. OCFT 접합부 실험에 대한 소결

- OCFT 기둥과 보가 사용된 합성모멘트접합부에서 원활한 힘의 전달을 위하여 용접과 철근보강을 병용한 복합모멘트접합 상세를 개발하였다. 또한 기존 외다이어프램 및 스티드 보강상세 외부접합부 실험체를 제작하고 반복가력실험을 통해 복합모멘트접합상세와 비교, 분석하였다. 실험은 반복가력실험으로 수행되었으며 내진성과 관련한 주요결과는 다음과 같다.

1) 모든 OCFT기둥은 6 mm두께의 얇은 강판을 절곡하여 제작하였다. 이에 따라 보 플랜지의 강한 인장력으로 비교적 작은 변위각 2%에서 기둥 강판의 면외방향과 함께 용접부 파단이 발생하였다. 이러한 파괴모드는 외다이어프램으로 보강한 J1, C1과 복합모멘트접합 상세가 적용된 J4에도 동일하게 나타났다. 하지만 외다이어프램 및 관통철근이 용접부 파단 이후 보 플랜지의 인장력을 기둥으로 전달시켜주면서 강도저하가 크지 않았고 최종적으로 변위각 4%의 변형능력을 보였다. 반면, J2의 경우 기둥 내부 매입된 스티드로 인해 기둥강판의 면외방향 변형은 제한적이었지만, 용접부 파단 이후 보 플랜지의 인장력을 기둥 강판으로 전달시키지 못해 하중재하능력을 급격히 상실하였다.

2) 복합모멘트접합 상세가 사용된 J3, J4, C2의 경우, 관통 철근은 보의 휨모멘트에 의한 플랜지 인장력을 OCFT기둥내부 콘크리트로 효과적으로 전달하였다. 특히 관통철근을 하부 플랜지에 직접 용접시킨 J4의 경우 플랜지 인장력이 관통철근에 직접 전달되므로 보-기둥 용접부 파단 이후 큰 강도저하 없이 연성거동을 보였다. 또한 항복 이후 주기거동동안 큰 소성변형과 함께 충분한 에너지소산능력을 보였다. 이는 보에 직접 용접된 관통철근의 변형률 계측결과를 통해서도 확인할 수 있었다. 이와 달리 콘크리트 부착을 통하여 보 플랜지의 인장력이 관통철근으로 전달되는 J3, C2의 경우 보 플랜지 항복이후(변위각 2%) 플랜지 강판 표면과 콘크리트의 부착슬립으로 인해 하중재하능력을 유지하지 못하였다. 이는 관통 U형철근의 변형률계측결과를 통해서도 확인할 수 있는데, 이들 철근의 변형률은 부착슬립으로 인하여 항복이후 재하방향이 역전되어도 변형률변화가 거의 없었다.

3) 모든 실험체는 정방향 재하 시 변위각 1%부터 OCFT기둥면에서 슬래브 콘크리트의 균열 및 압괴가 발생하였다. 이는 슬래브 콘크리트강도와 철근이 합성보의 정모멘트 강도 기여에 제한적임을 보여준다. 이와 달리, 기둥강판을 관통하고 내부 콘크리트에 직접 정착된 슬래브 철근은 항복변형률 이상의 큰 변형률을 보이며 부모멘트 강도에 기여하였다. 다만, 동일 실험체에서 기둥에 관통하지 않은 슬래브 철근은 항복변형률 미만의 작은 변형률을 보이며 합성보의 휨저항에 거의 기여하지 못하였다.

4) 모든 실험체는 변형각 2%이후 최대하중%이상의 능력을 나타내며 중간모멘트골조 이상의 내진성능을 보였다. 특히 기존 외다이어프램 보강 접합부와 관통철근을 사용한 복합모멘트접합의 경우 변형각 4%이상에서 최대하중의 80%이상의 하중재하능력을 보이며 특수모멘트골조의 내진성능을 보였다. 하지만, 기둥 강판의 면외방향 변형 및 용접부 파단에 따른 핀칭현상으로 에너지소산능력이 감소하였다.

5) U형 관통 철근이 사용된 복합모멘트접합부 J3, J4, C2의 경우 관통철근의 복잡한 상세 및 보 돌기와의 간섭으로 인하여 콘크리트 충전이 원활하지 못하였다. 이러한 불완전한 콘크리트 타설은 강판과굴과 용접부 파단을 촉진시킬 가능성이 크며 결과적으로 접합부의 하중재하능력 및 변형능력을 감소시켰다. 따라서 충분한 내진성능을 확보하기 위해서는 철근 용접 및 철근량 감소 등을 통해 배근상세를 단순화하는 것이 바람직하다.

제3절. OCFT기둥 내화성능

1. 실험 개요

- 철골구조의 H형강으로 구성된 철골기둥은 강재만으로 구성된 부재의 특성상 화재에 매우 취약하다. 강재 자체만으로는 열전도율이 높으며, 콘크리트에 비해 구성요소의 얇은 두께는 상대적으로 열용량이 작기 때문에 외부로부터 유입된 열에너지로 쉽게 온도가 상승한다. 화재로 인한 온도 상승은 화재의 종류 및 조건에 따라 다르겠지만, ISO 기준 및 국내 내화관련 기준에 있는 가상의 화재조건인 표준시간-가열온도 곡선에 따르면 화재시작 30분 만에 800℃를 초과한다. 따라서 400~600℃의 온도에서 항복강도가 급격히 떨어지는 강재의 특성상 내화피복은 필수이며, 온도 상승에 민감하므로 내화피복의 두께가 두꺼워진다.
- 강재와 콘크리트가 복합으로 구성된 합성구조로서 CFT 합성기둥은 순수 강재만으로 구성된 철골구조에 비하여 열용량이 큰 콘크리트에 의해 온도상승이 상대적으로 더디다. 강재에 쌓이는 열에너지가 내부의 콘크리트에 전달되기 때문에 열전도율이 좋은 강재의 단점이 장점으로 작용할 수 있다. 하지만 합성부재의 특성상 인장력을 부담하는 강재는 단면성능상 부재단면에서 외측에 배치되는 경우가 많고, CFT의 경우는 강재의 배치가 부재 단면 최외측에 모두 배치되기 때문에 상승하는 부재의 평균온도가 낮더라도 국부적인 강재의 온도는 이와 다르게 급격히 상승할 가능성이 있다. 특히 각형강관의 경우 원형강관에 비해 각이 진 모서리부의 온도 상승은 평활한 면에 비해 상대적으로 더 민감하고 항복강도의 차이가 크다. 또한 각형강관의 절곡부 특성상 생산 과정에서의 단면결손 혹은 국부적인 크랙으로 찢어짐의 가능성이 있기 때문에 화재의 극한 상황에서 온도에 따라 민감하게 반응하여 국부좌굴에 의해 터지는 형태로 파괴될 가능성이 있다. 특히 절곡된 각이 작을수록 열에너지가 집중되기 쉽기 때문에 온도 상승이 상대적으로 높아 강도 저감이 더욱 쉽게 될 것이다. 다음의 그림을 참고하면 이러한 측면에서 원형강관이 내화구조적인 측면에서 유리한 단면일 수 있으나 이는 단편적으로 내화구조로 국한되며, 시공적인 측면에서는 각형강관(4각 단면)일수록 유리한 측면이 있다.

각형 CFT

원형 CFT

4각형
내각 90°

5각형
내각 108°

6각형
내각 120°

7각형
내각 128.6°

8각형
내각 135°

원형

그림 3.3.1 CFT 기둥단면 형상별 시공성 및 화재시 온도분포

- 내화구조성능 및 시공성능 등의 복합적인 조건들을 고려하면 8각 단면의 OCFT 합성기둥은 각형 및 원형 CFT 합성기둥의 장점들을 종합한 합성기둥이라 할 수 있다. 이러한 OCFT 합성기둥의 내화구조성능을 실험적으로 검증한다.

2. 실험 목표

- 내화구조 성능시간의 의미는 해당 시간동안 건축물이 화재로부터 손상이 되더라도 내구성 측면에서는 구조물이 최대한 버텨므로써 대피시간을 확보하고 인명피해를 최소화하는

골든타임이라고 할 수 있다. 건축물의 규모가 커지면 대피경로에 따른 건축계획이 잘 되었더라도 절대적인 소요시간이 존재하며 기준에 따라 요구되는 성능시간이 있다. CFT 합성기둥의 경우 대형 구조물에 적용되는 경우가 많고, 최근 대형 IT 관련 생산시설에서 수요의 빈도가 높아지고 있다. 이러한 시설은 중요도에 따라 2~3시간의 내화구조 성능시간이 요구되며, OCFT 합성기둥은 이러한 빈도가 높은 2~3시간의 내화구조 성능시간에 대한 내구성을 확보하도록 계획되었다.

3. 내화시험 관련 기준

● KS F 2257-1 건축구조부재의 내화시험방법 - 일반요구사항

이 규격은 표준화재 조건에 노출시킨 건축 구조 부재의 내화 성능을 측정하기 위한 시험 방법을 규정한다. 화재상황을 모사하는 가열로 내부 온도 조건은 다음의 관계식을 따르도록 조절되어 시험체에 노출시켜야 한다.

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (3.3.1)$$

조건은 여기서 T = 노내평균온도(℃), t = 시간(분) 이다.

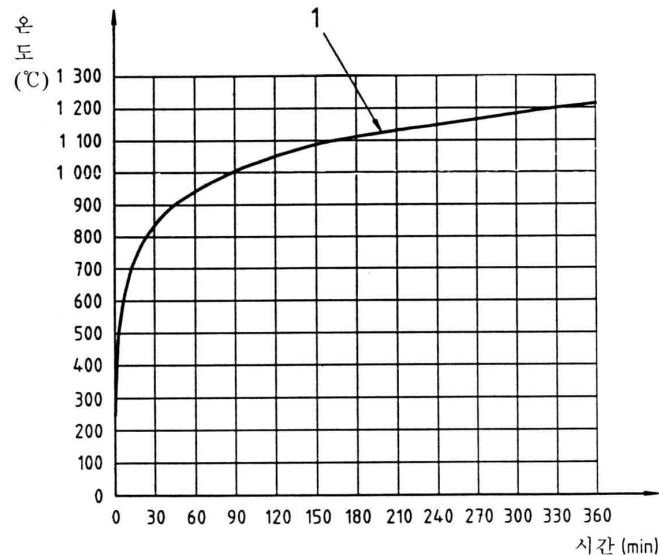


그림 3.3.2 표준 시간 가열 온도 곡선

내화 피복된 기둥의 성능을 시험하는 방법은 다음의 2가지 방법에 의해 가능하다. 재하가 열시험의 경우 사전 재하를 한 후 가열하여 기둥 자체의 내구성을 직접 시험하며 내화피복의 유무와 관계없이 시험이 가능하다. 내화구조성능에 대한 기존 사례가 없는 경우 최초로 시험이 진행될 때 이 방법으로 시험을 한다. 비재하가열시험의 경우 기둥의 내구성을 직접 시험하는 것은 아니며, 내화피복재가 특정 온도 이하로 차열성능을 발휘할 경우 부재의 내구성이 확보됨을 가정하여 시험을 한다. 기존의 유사한 내화구조 성능시험 사례가 있어 내화피복재의 성능 평가만으로 내화구조성능을 확인할 수 있는 경우이다.

OCFT 합성기둥의 경우 단면형상은 기존의 각형 또는 원형 CFT 합성기둥과 다르지만 내화구조적인 성능 측면에서 두 가지 유형의 중간 형태를 가지고 있고, 기존 각형 및 원형 CFT 합성기둥의 내화구조 성능시험 사례가 있어 합성구조로서 구조성능 발현에 문제가 없음을 간접적으로 확인할 수 있으므로 비재하가열시험을 통해 내화구조 성능시험 및 인정시험을 진행한다.

● KS F 2257-7 건축구조부재의 내화시험방법 - 기둥의 성능 조건

내화 피복재가 설계상 하중을 필요로 하지 않는 강재 기둥의 내화성능 평가에 적용한다. CFT 합성기둥의 경우 기준의 명시되어 있지 않지만 단면 최외곽에 강관이 배치되어 있고, OCFT 합성기둥의 경우 부재 각 단면에서 측정된 강재의 평균 온도가 538℃를 넘어서는 안 되며, 온도가 측정된 어느 곳에서도 649℃를 넘어서는 안 된다.

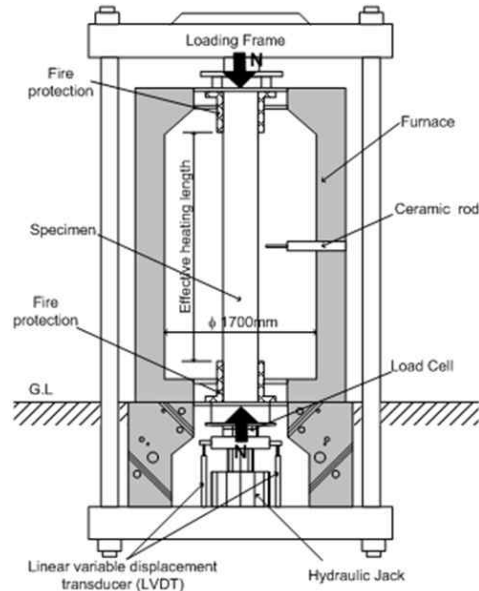


그림 3.3.3 기둥 부재의 내화시험을 위한 가열로 전경

4. 내화 OCFT 합성기둥 개요

- 내화 OCFT 합성기둥의 구성은 구조재로서 강재(OCFT 강관)와 콘크리트가 있고, 내화 피복재로서 내화도료가 적용된다.
- 1차적으로 내화피복재의 발포로 차열성능을 발현하여 외부로부터의 열에너지 유입속도를 최대한 낮춘다. 2차적으로 유입된 열에너지 중 강재에 전달된 열에너지를 열용량이 큰 콘크리트와 공유하여 강재의 온도 상승속도를 낮춘다. 강재의 온도가 소요 내화구조 성능시간 동안 내구성능을 유지할 수 있는 수준까지만 상승함으로서 내화 OCFT 합성기둥의 내화구조 성능을 발현한다.

5. 내화구조 성능시험 및 인정시험의 내화피복두께

- 일반적으로 무피복 CFT 합성기둥의 재하가열시험을 할 경우 최외곽에 배치된 강재가 화재에 직접 노출되기 때문에 쉽게 온도가 상승하여 항복강도가 빠르게 저감된다. 이로 인해 내화구조 성능시간은 30분 내외로 짧기 때문에 철골구조와 마찬가지로 내화피복이 필요하게 된다. 하지만 철골구조는 3시간 기준으로 내화피복두께가 10~20mm 정도가 필요한 반면 CFT 합성기둥은 내부에 열용량이 큰 축열체가 있기 때문에 10mm 이하의 내화 피복으로 동등한 내화구조 성능시간을 발휘할 수 있다.

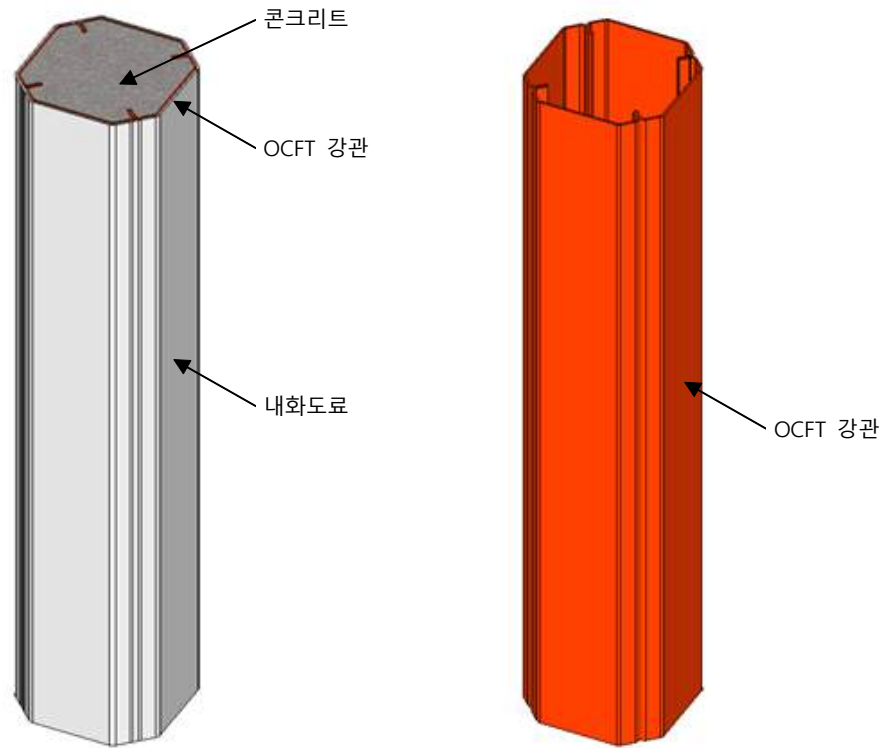


그림 3.3.4 내화 OCFT 합성기둥 구성 및 OCFT 강관 개념도

- OCFT 합성기둥의 경우 성능시험을 통해 내화피복두께 범위를 파악하고 적정한 내화피복두께를 검토한 후 2, 3시간의 내화구조 인정시험을 하도록 계획했다.

6. 내화구조 성능시험

- 시험체 계획

표 3.3.1 실험체 물성치

구 분	구 성 재 료	크 기
CFT 합성기둥	콘크리트 $f_{ck} = 40\text{MPa}$ (28일 압축강도 기준)	-
	OCFT 강관 : SM490A ($F_y = 325\text{MPa}$ 이상, $F_u = 490 \sim 610\text{MPa}$)	450mm x 450mm x 9t
내화도료	하도 : KS M 6030 1종 광명단 조합 페인트류 및 동등이상의 방청도료	0.05 이상
	중도 : 플레임체크 OCFT-200(기둥용)	1.95 이상

● 시험체 제작



OCFT 유닛 플레이트 제작



열전대 센서 설치



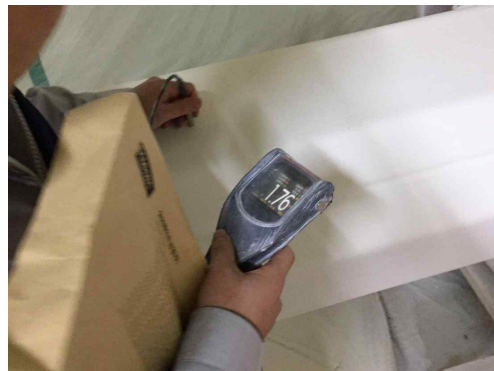
OCFT 유닛 플레이트 조립



내화도료 도장 (하도)



내화도료 도장 (중도)



내화도료 두께측정

그림 3.3.8 내화구조 성능시험 실험체 제작

7. 내화구조 인정시험

- 내화 OCFT 합성기둥의 내화구조 인정시험은 성능시험과 동일한 크기의 구조체로 구성되며, 내화피복재의 두께만 달리하여 계획되었다. 여기서 내화도료의 피복두께는 성능시험 결과를 바탕으로 2, 3시간 내화구조성능시간에 적합한 두께를 선정하여 적용했다.

표 3.3.2 내화구조 인정시험 실험체 정보

시험체명(시료명)	플레임체크 OCFT-200	플레임체크 OCFT-300
내화구조 성능시간	2시간	3시간
시험체 크기	OCFT - 450mm x 450mm x 9t, h = 3,000mm (성능시험체와 동일 크기)	
내화피복두께	1.90mm (하도 포함)	4.05mm (하도 포함)

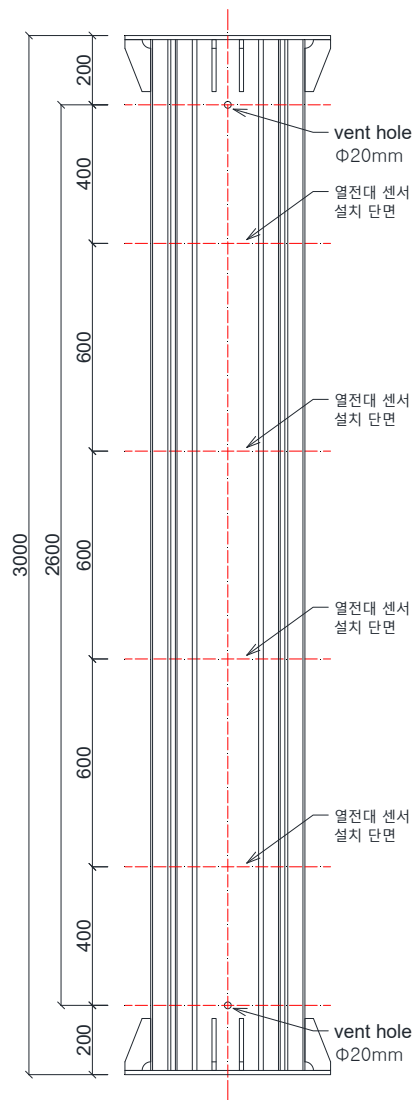


그림 3.3.9 인정시험용 OCFT
입면도

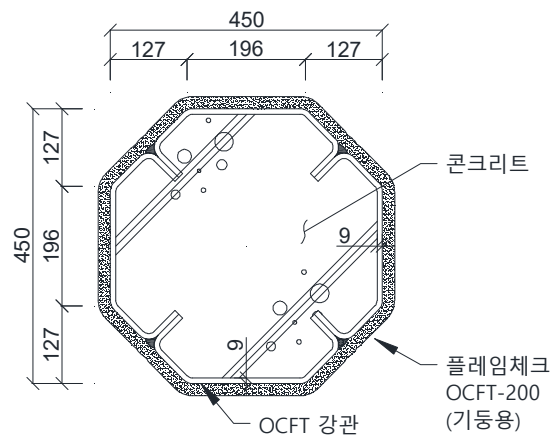


그림 3.3.10 내화 OCFT 합성기둥
-2시간용

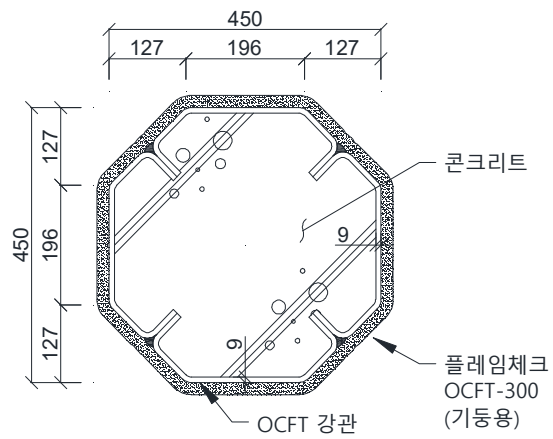
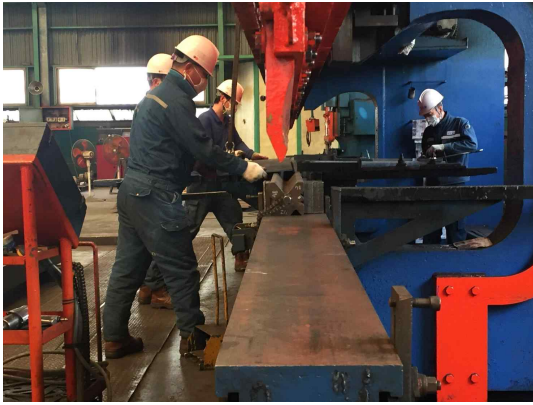


그림 3.3.11 내화 OCFT 합성기둥
-3시간용

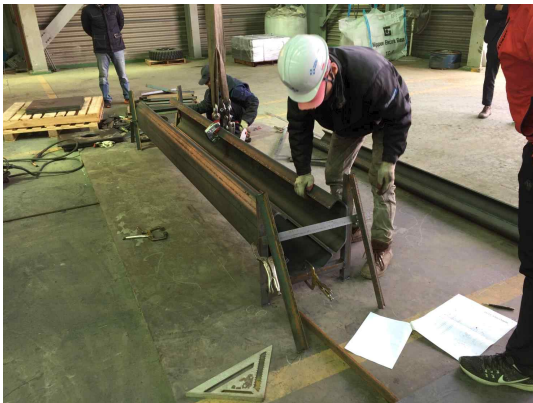
● 시험체 제작



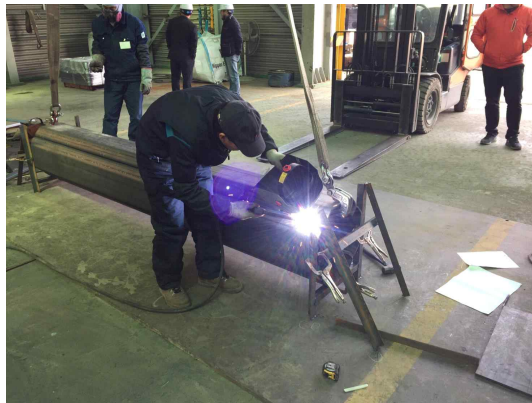
OCFT 유닛 플레이트 절곡



OCFT 유닛 플레이트



OCFT 강관 조립



OCFT 강관 가용접



OCFT 강관 본용접



OCFT 강관 완성

그림 3.3.12 내화구조 인정시험 실험체 제작

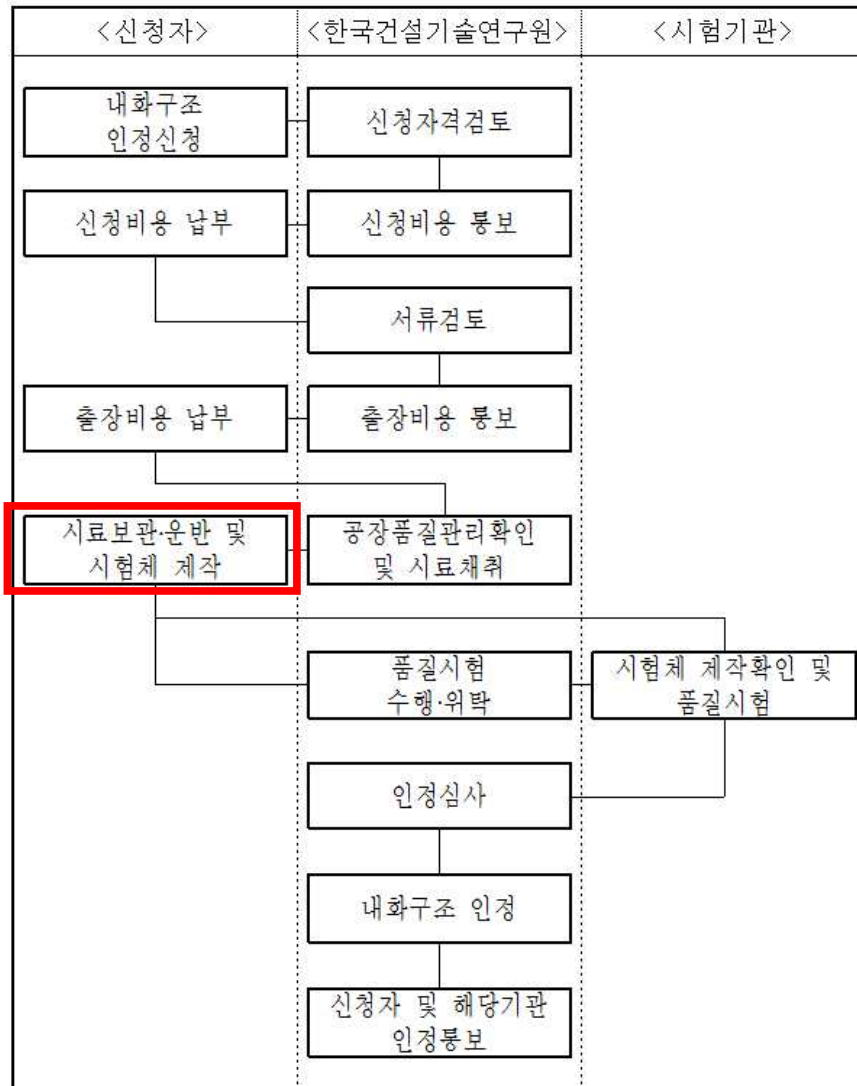
8. OCFT 내화시험 및 인정절차 현황

● 내화구조 성능시험 : '시험체 제작' 완료 -> 5월 시험 예정

● 내화구조 인정시험 : '공장검수 및 내화도료 시료채취' 완료

-> 채취된 시료로 시험체 제작 예정 (내화도료 양생 약3개월 소요)

내화구조 인정업무 절차



※ 자문회의는 필요한 경우에만 실시

그림 3.3.13 내화 구조 인정업무 절차

9. OCFT 내화시험에 대한 소결

- 내화 OCFT 합성기둥은 일반 철골구조에 비해 열용량이 크므로 같은 양의 열에너지가 유입되더라도 온도 상승의 폭이 낮다. 따라서 동일한 내화구조 성능시간에 도달하는데 상대적으로 더 얇은 내화피복으로 버틸 수 있다.
- 같은 CFT공법이더라도 단면 형태적으로 각형강관보다는 원형에 가깝기 때문에 노출되는 면적이 상대적으로 줄며 구조적인 합성효과에서도 보다 유리하다.
- OCFT 합성기둥에 적용된 내화피복재료의 경우 각형CFT 합성기둥에서 이미 내화구조인정을 받은 사례가 있고 거의 동일한 수준의 내화피복을 본 연구과제에서 적용하였다.
- 따라서 성능시험과 인정시험에 적용되는 피복두께의 차이가 크지 않으며 가능성을 높이기 위한 계획이라고 볼 수 있다. 이와 같은 성능 예측은 앞으로 진행될 내화시험에서 충분히 그 결과가 나올 것으로 예상된다.

제4절. OCFT기둥 압축성능 평가

1. 실험의 목적

- 콘크리트채움형 강관 (CFT)의 가장 큰 장점은 합성단면이 갖는 구조성능의 이점이다. 강관은 길이방향으로 모든 콘크리트를 감싸고 있고, 이에 따라 콘크리트는 폐단면 형태로 콘크리트 압괴가 억제되고 횡구속에 따른 압축강도 증가를 기대할 수 있다. 또한 얇은 강관은 내부 콘크리트로 인해 국부좌굴에 대한 저항성이 증가하게 된다.
- 이러한 CFT의 장점을 더욱 극대화 시키고자 개발된 OCFT는 기존 사각 CFT 강관에 모따기를 한 후 돌기를 두어, 강관의 국부좌굴 저항성을 증가시키고 원형에 가까운 형태로 콘크리트의 횡구속 효과를 더욱 기대할 수 있다.
- 따라서 중심축 압축실험으로 OCFT기둥이 갖는 압축저항성능과, 강관의 항복 이후 거동, 콘크리트 횡구속효과 등을 알아보려고 하였다.

2. KBC 2009 및 AISC 360-10 기준 적용성 검토

- KBC 2014 및 AISC 360-10 기준에서는 합성단면의 압축 공칭강도 평가 시 소성응력분포법 및 변형률적합법을 사용한다. 특히 충전형합성부재는 강재의 국부좌굴을 고려하여 조밀, 비조밀, 세장단면으로 구분되며 각각 콘크리트와 강재의 압축강도를 계산하여 합산한다. 소성응력분포법 적용 시 원형강관합성기둥은 콘크리트의 압축응력 구속효과를 고려 하지만, 각형합성기둥은 콘크리트 횡구속효과를 전혀 고려하지 않는다. 본 연구에서 개발된 팔각강관합성기둥(Octagonal Concrete Filled Tube)은 사각단면에 모따기를 한 형태로, 원형단면에 가깝도록 설계되어 콘크리트의 횡구속효과에 따른 압축강도 증가를 기대할 수 있다. 표 00는 KBC 2014 및 AISC 360-10의 충전형합성부재의 단면구분을 위한 판폭두께비 제한값을 보여준다. 강재의 항복강도를 판폭두께비 제한식에 반영하여, 강재의 강도증가에 따른 압축부재의 파괴거동 변화를 고려하였다. 기준에서는 사각 및 원형단면의 판폭두께비 제한값이 제시되어 있으며, 팔각충전형합성부재의 기준 적용성을 위한 추가 검토가 필요하다. 본 실험에서는 다음의 3가지 방법으로 팔각기둥의 기준적용성을 검토하였다(표 3.4.1, 그림 3.4.1 참조).

방법 1: 사각단면기준 비지지길이(= b) 및 판폭두께비(= b/t) 제한식 적용

방법 2: 모따기에 따른 유효 비지지길이(= $b_{eff} = b - 2l_{ch}$) 적용

방법 3: 원형단면 가정, 원형단면기준 판폭두께비(= D/t) 제한식 적용

표 3.4.1 충전형 합성부재의 판폭두께비 기준

	판폭두께비	λ_p 조밀, 비조밀 단면	λ_r 비조밀, 세장 단면	λ_{max}
사각 CFT (방법 1,2)	b/t	$2.26 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$3.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
원형 CFT (방법 3)	D/t	$0.15 \frac{E}{F_y}$	$0.19 \frac{E}{F_y}$	$0.31 \frac{E}{F_y}$

- 팔각단면은 사각단면에 모따기를 한 형태로, 모따기길이(= l_{ch})만큼 사각단면의 비지지길이(= b)를 줄일 수 있다. 특히 모따기한 부분의 강재가 서로 절곡되어 용접된 OCFT상세의 경우, 절곡한 부분의 면외방향좌굴은 거의 무시할 수 있으며 유효 비지지길이(= b_e)의

좌굴만 고려하여 설계할 수 있다. 비지지길이가 줄어들 경우 강재의 면외방향좌굴에 대한 저항성이 증가하며, 이에 따라 강재의 강도발휘 및 콘크리트 횡구속효과를 기대할 수 있다. 방법 1은 보수적인 설계를 위해 OCFT의 이러한 장점을 전혀 고려하지 않고, 기존 사각단면의 비지지길이(= b) 및 판폭두께비 제한식을 적용하여 설계한 경우이다. 방법 2의 경우, 모따기에 따라 줄어든 유효비지지길이(= b_{eff}) 및 사각단면의 판폭두께비 제한식을 적용하였다. 방법 3은 OCFT의 단면형태가 원형단면 가까워진 만큼, OCFT부재를 자기 면적보다 작고 비지지길이(= b)와 같은 지름(= D)을 갖는 원형단면으로 가정한 설계법이다. 따라서 원형단면의 판폭두께비 제한식을 적용하였다.

3. 조밀, 비조밀, 세장단면에 따른 설계강도 산정

방법 1: 방법 1: $\lambda = b/t$, λ_r 및 λ_p = 표 3.4.1의 사각단면기준을 따름

방법 2: $\lambda = b_{eff}/t$, λ_r 및 λ_p = 표 3.4.1의 사각단면기준을 따름

방법 3: $\lambda = D/t$, λ_r 및 λ_p = 표 3.4.1의 원형단면기준을 따름

- 조밀단면: 조밀단면은 충분한 강재의 두께를 확보하고 한계상태에서 강관의 항복강도, 콘크리트의 구속효과 및 압축강도가 충분히 발휘되는 것으로 가정한다. 조밀단면의 압축강도 설계 식 (00)의 C_2 는 콘크리트 횡구속효과를 고려하기 위한 계수이다. 본 실험 설계시 방법 1 및 방법 2는 콘크리트의 횡구속효과를 전혀 고려하지 않고 $C_2 = 0.85$ 를 적용하였다. 방법 3의 경우 원형 CFT의 콘크리트 횡구속효과를 적용하였다. (식 (00) 참조)

$$P_{no} = P_p = F_y A_s + C_2 f_{ck} A_c \quad (3.4.1)$$

$$C_2 = 0.85 \left(1 + 1.56 \frac{F_y t}{D f_{ck}} \right) \quad (3.4.2)$$

- ① 비조밀단면: 비조밀단면은 한계상태에서 강관 항복이 발생되도록 강재의 충분한 두께가 확보되지만, 콘크리트가 $0.7f_{ck}$ 의 응력에 도달한 이후 강재가 콘크리트를 구속할 수 없고 현저한 피탄성거동 및 부피확장이 발생하게 된다.

$$P_{no} = P_p = F_y A_s + C_2 f_{ck} A_c \quad (3.4.3)$$

$$P_{no} = P_p - \frac{P_p - P_y}{(\lambda_r - \lambda_p)^2} (\lambda - \lambda_p)^2 \quad (3.4.4)$$

$$P_y = F_y A_s + 0.7 f_{ck} A_c \quad (3.4.5)$$

- ② 세장단면: 세장단면은 한계상태에서 강재의 항복강도가 발휘되기 이전에 강재의 면외방향 국부좌굴이 발생한다. 콘크리트는 $0.7f_{ck}$ 의 압축응력을 발휘한다.

$$P_{no} = F_{cr} A_s + 0.7 f_{ck} A_c \quad (3.4.6)$$

강재의 국부좌굴강도

$$F_{cr} = \frac{9E_s}{\lambda^2} \text{ (사각단면 CFT)}, F_{cr} = \frac{0.72F_y}{[(D/t)(F_y/E_s)]^{0.2}} \text{ (원형 CFT)}$$

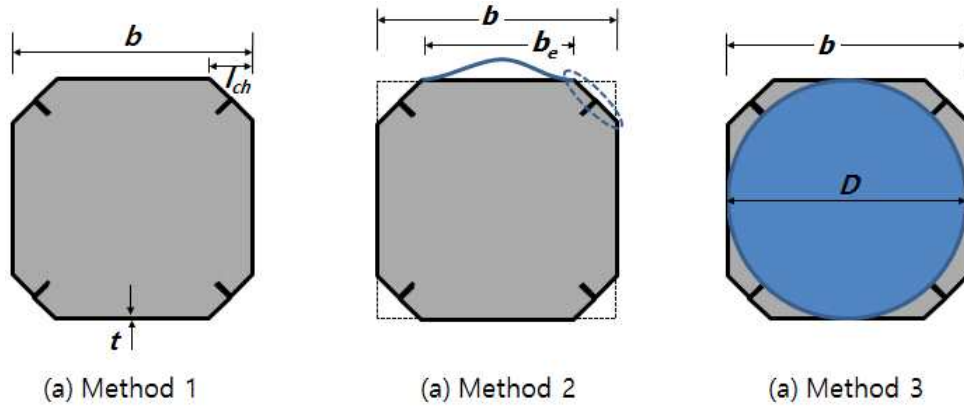


그림 3.4.1 팔각충전형합성부재(OCFT)의 기준적용을 위한 단면가정

4. 설계방법에 따른 압축강도 비교

- 그림 3.4.2는 상기에서 언급한 각 설계방법에 따른 압축강도 결과를 보여준다. 팔각단면에 대한 모따기를 고려하여 줄어든 유효비지지길이(= b_e)를 사용할 경우(방법 2), 세장비가 줄어든 만큼 방법 1로 평가했을 때의 비조밀 및 세장단면을 각각 조밀 및 비조밀단면으로 평가할 수 있다. 이는 실제 합성부재 설계 시, 파괴형상의 변화 및 우수한 압축강도를 기대할 수 있음을 뜻한다. 방법 3의 원형단면으로 평가할 경우, 콘크리트의 횡구속효과를 고려하는 만큼 압축강도가 다른 방법에 비하여 크게 나타났다.

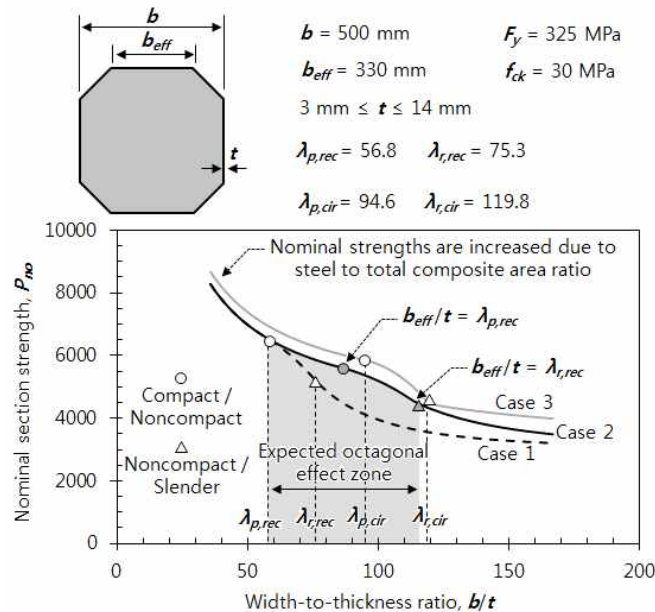


그림 3.4.2 각 설계방법의 판폭두께비에 따른 압축강도 비교

5. 실험변수 및 재료강도

- OCFT기둥 중심축압축 실험을 위한 단면상세 및 실험 변수를 그림 3.4.3과 표 3.4.2에 각각 나타냈다. 실험변수는 강관 두께 및 단면형상이다. 강재 두께는 그림 00에 나타난 바와 같이 방법 1과 방법 2에 따른 강도차이가 가장 큰 판폭두께비 구간을 고려하여 결정하였다.

- 그림 3.4.3은 OCFT기둥의 단면형상을 보여준다. 그림 3.4.3(a)의 Q타입 OCFT단면은 C

형으로 절곡된 4개의 동일한 강판이 길이방향으로 용접되는 형태로 모서리 중앙에 내부 콘크리트로 매입되는 돌기가 형성되는 것이 특징이다. 반면, T타입의 경우 C형으로 절곡된 2개의 강판과 일자형의 2개의 강판으로 제작되는데, 이는 일자형 강판의 두께를 조절하여 기둥을 강축 및 약축으로 구분하기 위함이다. 또한 강축방향 두꺼운 강판은 보 플랜지 인장력에 의한 면외방향 변형이 줄어든다.

- C1 및 C2실험체는 Q타입의 OCFT 실험체로 강재 두께(t)는 각각 4.5 mm 및 6 mm이다 (그림 3.4.3(a) 참조). 사각단면을 기준으로 평가할 경우 C1 및 C2는 각각 세장 및 비조밀 단면에 속하지만 유효판폭두께비(b_{eff}/t)를 적용할 경우 비조밀 및 조밀단면으로 평가되어 공칭강도를 높게 산정할 수 있다.

표 3.4.2 실험변수

	b_{eff} (mm)	t (mm)	b_{eff}/t	Section properties		Steel properties		Concrete properties	
				Case 1	Case 2	A_s (mm ²)	F_y (MPa)	A_s (mm ²)	f_{ck} (MPa)
C1	230	4.5	51.1	세장단면	비조밀단면	7,920	489	137,630	33
C2	230	6	38.3	비조밀단면	조밀단면	10,656	407	134,894	33
C3	315	4.5	70	세장단면	세장단면	7,398	489	149,074	32
C4	315	6	52.5	비조밀단면	조밀단면	9,912	407	146,608	32
C5	315	6	52.5	세장단면	세장단면	7,398	489	149,074	33
C6	315	6	52.5	비조밀단면	조밀단면	9,912	407	146,608	33
C7	168	4.5	37.3	세장단면	조밀단면	7,398	489	149,074	33
C8	168	6	28.0	비조밀단면	조밀단면	9,912	407	146,608	33

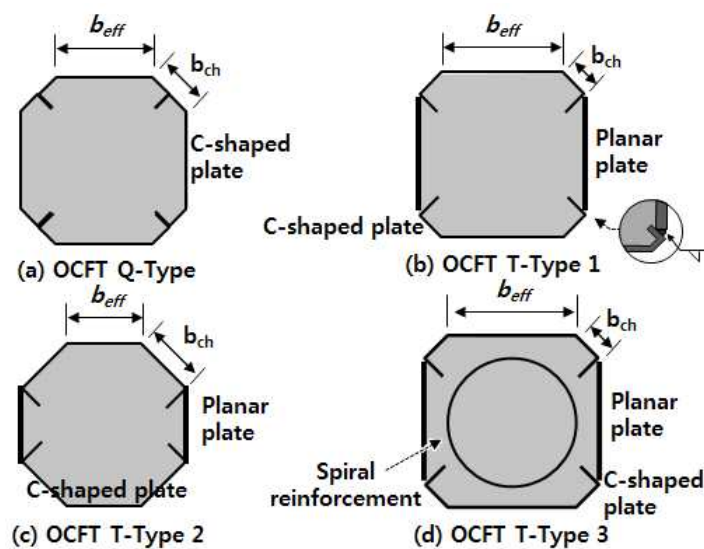


그림 3.4.3 OCFT 기둥 단면상세

- C3 및 C4실험체는 T타입의 OCFT 실험체로 강재 두께(t)는 각각 4.5 mm 및 6 mm이다 (그림 3.4.3(c) 참조). Q타입 대비 모따기 길이가 작아 C3의 경우 세장단면으로 구분하였다.

- C5 및 C6 실험체는 T타입 단면에 내부 나선철근을 통해 내부 콘크리트를 횡구속 하였다 (그림 3.4.3(d) 참조). 이는 강관 자체의 좌굴저항성은 C3 및 C4와 동일하지만 내부 콘크리트의 횡구속효과에 따른 압축강도 증가를 확인하기 위함이다. C5에는 D10의 나선 철근을 150 mm, C6에는 75 mm 간격으로 배근하였다.
- C7 및 C8 실험체는 T타입 단면에 절곡 길이를 길게 하여 정팔각형으로 단면을 구성한 것이다. 이 경우 단면의 모든 면에서 국부좌굴이 발생할 수 있지만 전체적으로 유효폭이 줄어 들어 원형단면과 비슷한 거동을 보일 것으로 기대하였다.
- 강관의 시편은 한국산업표준의 금속재료 인장시험 방법 (KS B 0802 : 2003 1A호 시험편)에 따라 인장시험을 수행하였다. 실험 결과 두께 4.5T의 항복강도는 489 MPa, 6T의 항복강도는 407 MPa 이다. C5 및 C6 실험체에 쓰인 나선철근의 항복강도는 355 MPa 이다. (그림 3.4.4와 그림 3.4.5 참조)

BEYOND ASIAN HUB, TOWARD GLOBAL WORLD



TEST REPORT



우 13810 경기도 과천시 교육원로 98 (중앙동)

TEL (02)2164-0011

FAX (02)2634-1008

성적서번호 : TAK-014244

대 표 자 : 이창남

업 체 명 : (주)센벡스

주 소 : 서울특별시 영등포구 버드나루로19길 6,204(당산동, 센스빌딩)

접 수 일 자 : 2016년 05월 24일

시험완료일자 : 2016년 06월 02일

시 료 명 : 금속시편 (Q3)

시 험 결 과

시험항목	단위	시료구분	결과치	시험방법
인장강도	N/mm ²	-	527	KS B 0802 : 2003(5호 시험편)
항복강도	N/mm ²	-	489	KS B 0802 : 2003(5호 시험편)
연신율	%	-	33	KS B 0802 : 2003(5호 시험편)

* 용 도 : 품질관리용

비 고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로써 전체 제품에 대한 품질을 보증하지 않으며, 성적서의 진위확인용 홈페이지(www.ktr.or.kr) 또는 QR code로 확인 가능합니다.
 2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용 등으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
 3. 이 성적서는 원본(등본 포함)만 유효하며, 사본 및 전자 인쇄본/파일본은 결과치 참고용입니다.

위 성적서는 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협정(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인받은 분야에 대한 시험결과입니다.

Park Ki Woong

작성자 : 박기웅
E-mail: impact@ktr.or.kr

Nam Jong-oh

기술책임자 : 함종오
Tel : 1577-0091(ARS ①-④)

2016년 06월 02일

한국인정기구 인정



한국화학융합시험연구원장



위변조 확인용 QR code

그림 3.4.4 4.5T SM490 강재시편 인장시험 결과



TEST REPORT



우 13810 경기도 과천시 교육원로 98 (중앙동)

TEL (02)2164-0011

FAX (02)2634-1008

성적서번호 : TAK-014245

접 수 일 자 : 2016년 05월 24일

대 표 자 : 이창남

시험완료일자 : 2016년 06월 02일

업 체 명 : (주)센벡스

주 소 : 서울특별시 영등포구 버드나루로19길 6,204(당산동, 센스빌딩)

시 료 명 : 금속시험 (O4)

시험 결과

시험항목	단위	시험구분	결과치	시험방법
인장강도	N/mm ²	-	557	KS B 0802 : 2003(5호 시험편)
항복강도	N/mm ²	-	407	KS B 0802 : 2003(5호 시험편)
연신율	%	-	32	KS B 0802 : 2003(5호 시험편)

* 용 도 : 품질관리용

- 비 고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로써 전체 제품에 대한 품질을 보증하지 않으며, 성적서의 진위확인용 홈페이지(www.ktr.or.kr) 또는 QR code로 확인 가능합니다.
 2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용 등으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
 3. 이 성적서는 원본(등본 포함)만 유효하며, 사본 및 전자 인쇄본/파일본은 결과치 참고용입니다.

위 성적서는 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협정(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인받은 분야에 대한 시험결과입니다.

Park Ki Woong

작성자 : 박기웅
 E-mail: impact@ktr.or.kr

Ham Jong-oh

기술책임자 : 함종오
 Tel : 1577-0091(ARS ①→④)

2016년 06월 02일

한국인정기구 인정



한국화학융합시험연구원장



위변조 확인용 QR code

그림 3.4.5 6.0T SM490 강재시험 인장시험 결과

- 콘크리트는 재료강도실험을 위해 지름 100mm의 표중 공시체를 제작하고 실험 당일 대우건설기술연구소(경기도 수원시 장안구)에서 3개의 공시체에 대하여 압축실험을 수행하였다. 평균 콘크리트 압축강도 $f_{ck} = 33\text{MPa}$ 이다. (그림 3.4.6 참조)



그림 3.4.6 콘크리트 공시체 압축강도 실험

- 모든 실험체는 부재단위의 좌굴을 고려하지 않기 위해 단주로 설계하였다(높이 1200 mm).

6. 실험 방법

- 기둥 중심축 압축실험을 위한 실험셋팅 방법을 그림 3.4.7에 나타냈다. 기둥 강관과 내부 콘크리트가 동시에 균일한 압축력을 받을 수 있도록 실험체 단부에 40 mm 두께의 단부 강판을 설치하고 스티프너 및 스티드로 보강하였다. 또한 콘크리트 수축으로 인한 단부 강판과 콘크리트의 틈을 없애기 위하여 콘크리트 건조 후 무수축 몰타르로 보강하였다.
- 상기 실험은 페트라텍(경기도 화성)에서 실험체를 제작하였고 2016년 4월 13일 ~ 20일 대우건설기술연구소(경기도 수원시 장안구)에서 수행하였다.
- 실험체 제작과정은 그림 3.4.8에 나타낸 바와 같다.

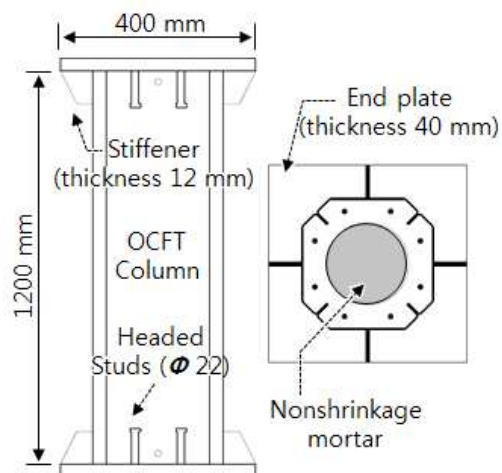


그림 3.4.7 OCFT 기둥 중심축 압축실험 및 단면상세



그림 3.4.8 OCFT 단주 실험체 제작과정 (2016.03.08. 페트라텍)

7. 실험 결과

- Q타입의 C1 및 C2의 경우 항복 이후 강도가 점차 증가하는 변형률경화와 함께 연성적인 거동을 보였다. 특히 강관의 두께가 4.5 mm로 설계한 C1도 연성적인 거동과 함께 세장 단면보단 조밀단면에 가까운 하중-변위 관계를 보였다. 또한 최대강도(P_u)가 방법 2의 유효폭을 고려한 공칭강도(P_{no})와 거의 동일하게 나타냈다 (표 3.4.3참조). 이는 Q타입의 압축강도 평가 시 유효폭을 고려하여 설계할 수 있어 팔각단면에 따른 압축강도 증가를 기대할 수 있음을 뜻한다. 그림 3.4.10(a) 및 (b)의 파괴모드에서도 나타난 바와 같이, 압축력으로 인한 강관의 국부좌굴이 유효폭 내로 제한되었다.
- T타입의 C3 및 C4의 경우 비슷한 단면적에도 불구하고 Q타입 대비 최대강도가 10% 이상 작게 나타났고, 최대강도 및 강관의 항복 이후에 압축강도가 증가하지 않고 점차 감소하는 모습을 보였다. 이는 강관의 항복 이후 국부좌굴로 인해 콘크리트의 압축강도가 제한적으로 발생하였기 때문으로 판단된다. 강관의 좌굴형상도 OCFT단면의 모서리 부분 까지 확장되었다. 이는 Q타입과 달리 콘크리트로 매입되는 돌기가 모서리 중앙에 형성되어 있지 않고 상대적으로 비지지 길이가 증가하였기 때문이다. 이러한 결과는 T타입의 압축강도 평가 시 유효관폭두께비를 도입이 제한적일 수 있음을 시사한다.
- C3 및 C4와 동일 단면에 나선철근을 150 mm 및 75 mm로 매입한 C5와 C6의 경우, 항복강도는 C3 및 C4와 거의 동일하게 나타났지만 이후 오히려 압축강도가 증가하는 모습을 보였다. 이는 나선철근이 콘크리트를 횡구속하면서 강관의 좌굴 이후 콘크리트가 분담하는 압축강도가 크게 증가하였기 때문으로 판단된다.
- 원형단면에 가까운 형태인 정팔각단면으로 설계된 C7 및 C8실험체는 강관의 항복 이후 변형률경화에 따른 압축강도증가가 뚜렷하게 나타났다. 실험최대강도 또한 방법 2에 따른 공칭강도와 비슷하게 나타났다(표 3.4.3 참조). 강관의 좌굴은 정팔각단면의 모든 모서리에서 고르게 분포하였다. 이러한 실험결과는 정팔각단면이 원형단면에 가까운 형태로 강관의 국부좌굴 저항능력이 증가하고, 콘크리트 횡구속효과가 높음을 뜻한다.

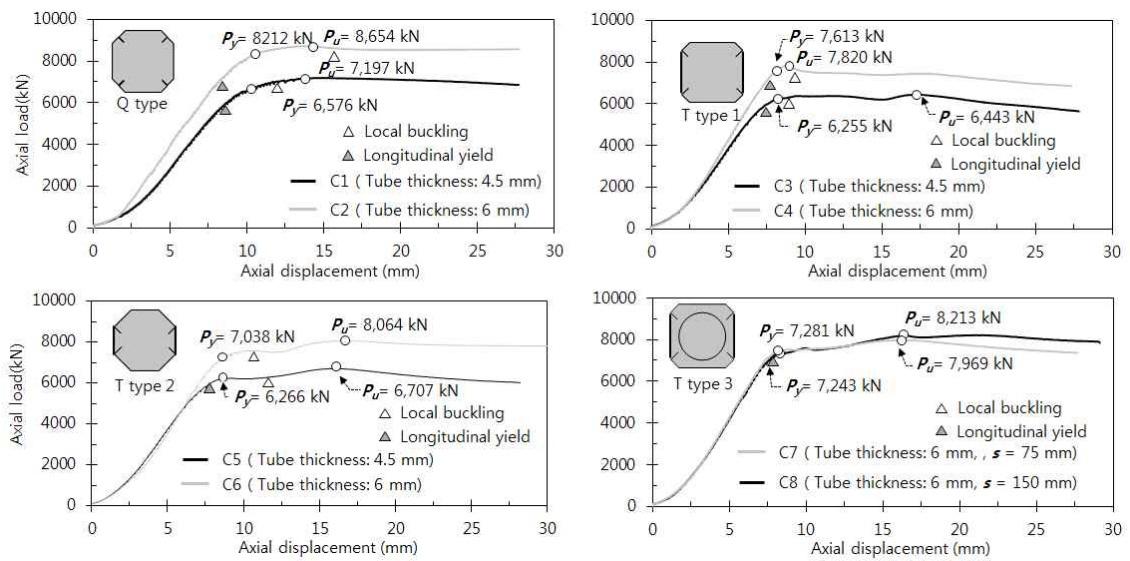


그림 3.4.9 하중-변위 관계



그림 3.4.10 하중-변위 관계

표 3.4.3 실험 최대하중과 공칭강도 비교

	b_{eff}/t	Test data			AISC Strength estimate		Measured versus computed	
		P_y (kN)	P_u (kN)	P_u/P_y	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
					$P_{no}(kN)$	$P_{no}(kN)$	P_u/P_{no}	P_u/P_{no}
C1	51.1	6,576	7,197	1.25	5,004	7,641	1.64	1.07
C2	38.3	8,212	8,654	1.06	7,462	8,028	1.17	1.09
C3	70	6,255	6,443	1.03	5,174	6,229	1.25	1.03
C4	52.5	7,613	7,820	1.03	7,489	8,103	1.04	0.97
C5	37.3	7,243	6,707	1.10	7,513	8,127	1.06	0.98
C6	28	7,281	8,064	1.13	7,513	8,127	1.09	1.01
C7	52.5	6,266	8,213	1.07	4,549	6,904	1.47	0.97
C8	52.5	7,038	7,969	1.15	6,670	7,202	1.21	1.12

8. 변형률 계측결과

- 기둥 중앙부에서 계측한 강재의 변형률측정결과를 그림 3.4.11에 나타냈다. 전체적으로 기둥 강관의 항복 및 국부좌굴 시점을 비슷하였다. 초기 강성이 작게 나타나는 것을 확인하였는데 이는 무수축 몰타르 및 스테드를 통해 단부보강을 하였음에도 불구하고 콘크리트 수축으로 인한 공극으로 초기 압축하중이 강관에 집중되었기 때문이다. 실제 제작 현장에서도 CFT의 구조적인 특성 상 접합부 등에서 콘크리트 수축이 발생할 수 있으며 강관에 초기 큰 하중이 작용할 수 있으므로 기둥 내부 스테드 매입, 콘크리트 끊어 치기 등 추가적인 보완방법이 필요하다.

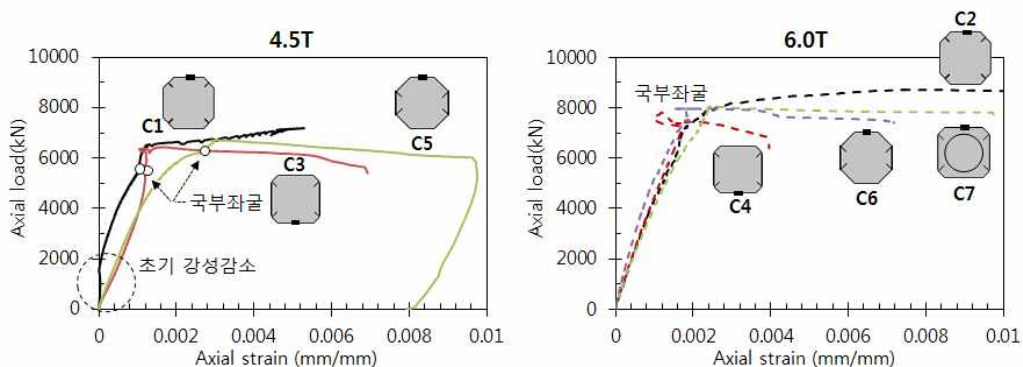


그림 3.4.11 기둥 강관 변형률 계측 결과

9. 유한요소해석을 통한 예측결과 및 실험결과와의 비교

- 강관 재료모델

강재의 포아송비 $\nu_s = 0.3$ 이고 탄성계수 $E_s = 205000$ MPa이다. 또한, 강관의 uniaxial 거동은 완전 탄-소성 모델을 통해 분석할 수 있다. 강관의 von Mises 항복선 F 는 식 00과 같다. 여기서 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 =$ 각 축방향으로의 주응력이다.

$$F = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (3.4.7)$$

강재의 항복 이후 변형률경화에 따른 응력은 OCFT중심축 압축실험에서 구한 강재의 응력-변형률 곡선을 그대로 사용하였다.

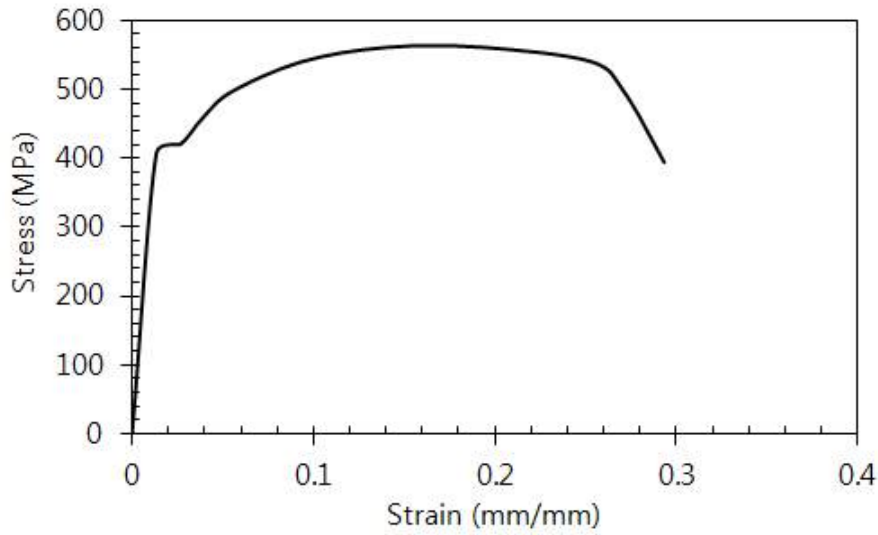


그림 3.4.12 강재 재료모델 (6T)

● 콘크리트 재료모델

콘크리트의 포아송비 $\nu_c = 0.2$ (ASCE)이고 탄성계수 $E_c = 30,168$ MPa이다. OCFT 내부 콘크리트는 강관에 의한 횡구속효과로 압축강도가 증가하므로 다음의 응력-변형률 곡선을 사용하였다. 콘크리트 압축강도 ($f'_c = 33$ MPa)는 중심축 압축실험으로부터 구한 재료강도를 사용하였다.

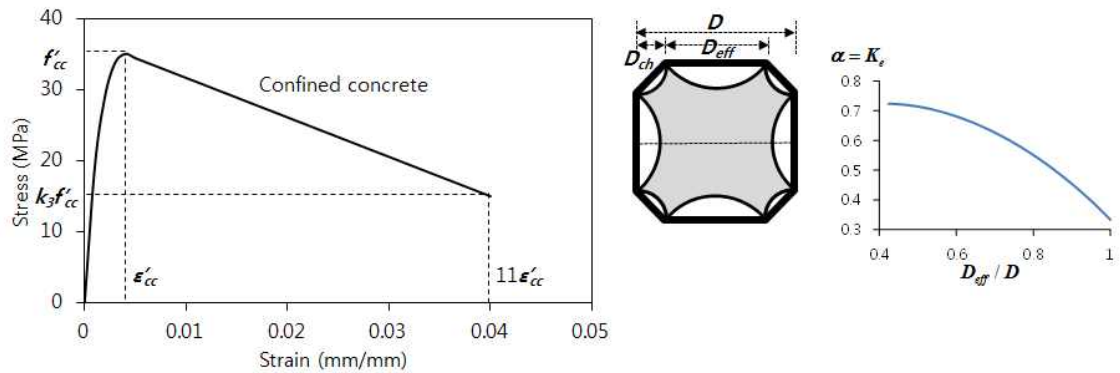


그림 3.4.13 콘크리트 재료모델 ($f'_c = 33$ MPa)

여기서, uniaxial compressive strength $f'_{cc} = f'_c + k_1 f_l$ 이고 이에 해당하는 변형률 $\epsilon'_{cc} = \epsilon'_c \left(1 + k_2 \frac{f_l}{f'_c} \right)$ 이다. (Mander, Priestley, and Park 1988) 실험값으로 정해지는 $k_1 = 4.1$, $k_2 = 20.5$ 이다. (Rechard et al. 1928) 이 때, OCFT의 횡구속효과에 따른 압축강도 증가를 알아보기 위하여 그림 00에 나타난 유효콘크리트 면적을 통해 횡구속 압축강도(f_l)를 산정하였다. (식 00 참조) 여기서, α 는 콘크리트 전체면적에 대한 유효콘크리트 면적의 비율이다. (그림 3.4.13 참조)

$$P_{no} = 0.85f_{ck} \left(1 + \alpha \frac{2t}{D-2t} \frac{f_y}{f_{ck}} \right) A_c \quad (3.4.8)$$

$$k_l = \alpha \frac{2t}{D-2t} \frac{f_y}{f_{ck}} \quad (3.4.9)$$

OCFT기둥의 내부 콘크리트는 3축방향으로 정압상태에 놓여있다. 따라서 압축력이 증가함에 따라 콘크리트의 파괴면도 점차 확장하게 된다. 이러한 거동을 반영하기 위하여 선형 Drucker-Prager 항복선(G)을 사용하였다. (그림 3.4.14 참조)

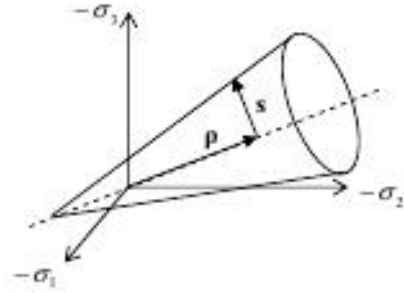


그림 3.4.14 Drucker-Prager
항복선

ABAQUS의 콘크리트 모델중 Drucker-Prager 모델을 사용하였다. 입력값으로 마찰각도 $\beta = 20^\circ$, Flow stress ratio $K = 0.8$ 을 사용하였다 (Wu 2000). 횡구속효과에 따른 콘크리트 응력-변형률 곡선에서 ϵ'_{cc} 까지의 곡선식은 다음과 같다. (Saenz 1964) 여기서, $R_\sigma = 4$, $R_\epsilon = 4$ 이다 (Hu and Schnobrich 1989).

$$f_c = \frac{E_c \epsilon_c}{1 + (R + R_E - 2) \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon'_{cc}} \right) - (2R - 1) \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon'_{cc}} \right)^2 + R \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon'_{cc}} \right)^3} \quad (3.4.10)$$

$$R = \frac{R_E (R_\sigma - 1)}{(R_\epsilon - 1)^2} - \frac{1}{R_\epsilon} \quad (3.4.11)$$

$$R_E = \frac{E_c \epsilon'_{cc}}{f'_{cc}} \quad (3.4.12)$$

● 접촉면(Contact)

Normal and tangential contact: 강관은 콘크리트의 압력에 대하여 항상 반력으로 작용한다. 콘크리트와 강재의 접촉면에서 주응력으로 인해 횡구속효과가 직접적으로 발휘된다. 강관과 콘크리트의 마찰계수는 여러 실험값의 평균인 0.47을 사용하였고 강재와 콘크리트의 분리를 허용하였다. 강재와 강재간의 용접부분은 모두 Tie를 통해 구속하였다.

● 모델링(Modeling)

실제 압축실험과 동일하게 모델링 하였다 (상부 플레이트, 스티프너, 기둥 길이 = 1200 mm, 단면형태 등). 하부 강관은 3축으로 모두 구속하였고, 상부 강관은 변위 제어를 통한 해석을 위해 z축 변위를 풀고 0~30 mm의 변위를 가하였다. 콘크리트, 강관, 플레이트, 스

티프너는 모두 솔리드 요소로 모델링하였고 mesh 크기는 20 mm로 설정하였다. 전체적인 모델 형상은 그림 3.4.15과 같다.

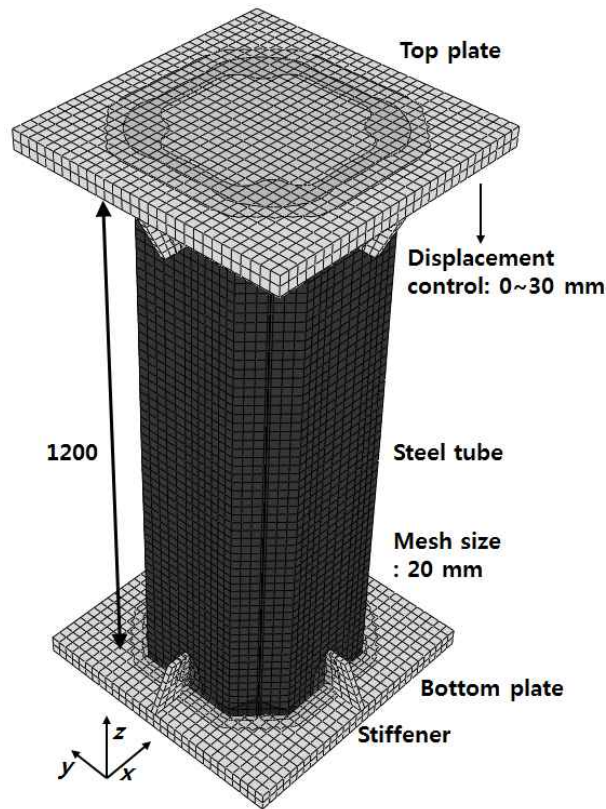


그림 3.4.15 OCFT 단주 ABAQUS 모델링

● 해석결과

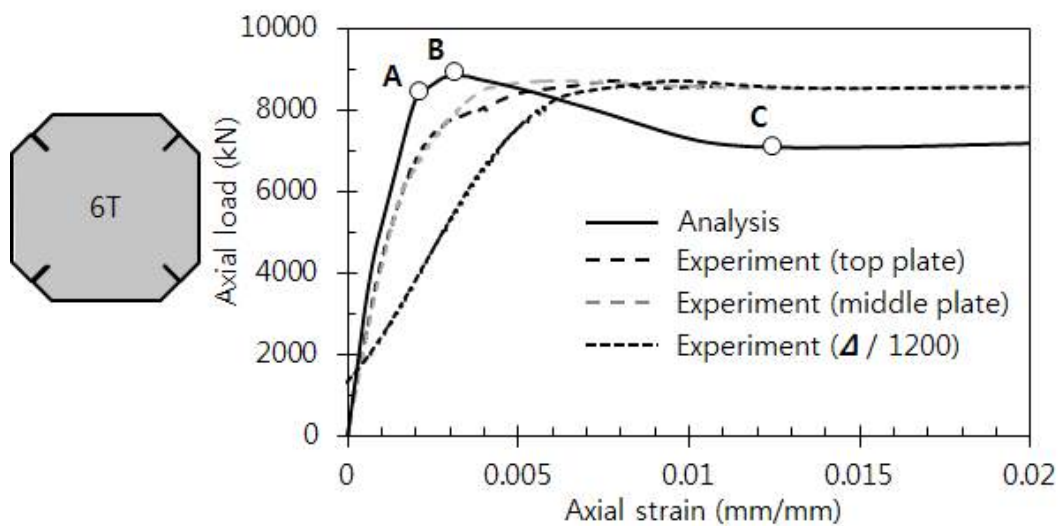


그림 3.4.16 변형률-하중 해석결과 (Q타입 6T)

그림 3.4.16은 Q타입의 OCFT기둥의 해석결과와 실험결과의 변형률-하중관계를 보여준다. 해석에 따른 변형률-하중곡선을 실선으로 나타냈고, 실험에 따른 결과를 점선으로 나타냈다. 기둥중심과 기둥중심으로부터 400 mm 위에 설치된 스트레인게이지로부터 측정한 변형률과, LVDT변위를 기둥 전체길이($L=1200$ mm)로 나눈 변형률을 각각 구하였다. 해석결과, 변형률 0.002지점에서 강관이 길이방향 및 전단면에 걸쳐 항복하면서 강성이 크게 감소하였다. 최대 강도 시점에서는 콘크리트 응력이 전단면에 걸쳐 압축강도(f'_c) 이상의 값을 보였다. 최대강도는 8845 kN으로 실험 최대강도 8719 kN과 거의 유사한 값

을 보였다. 하지만 이후 압축강도가 점차 감소하였는데 이는 강관의 변형과 콘크리트의 팽창으로 접촉면 사이의 슬립이 발생하였고, 또한 기둥의 네 면 모서리에서 재료모델에서 입력한 콘크리트의 응력감소가 발생하였기 때문으로 판단된다.

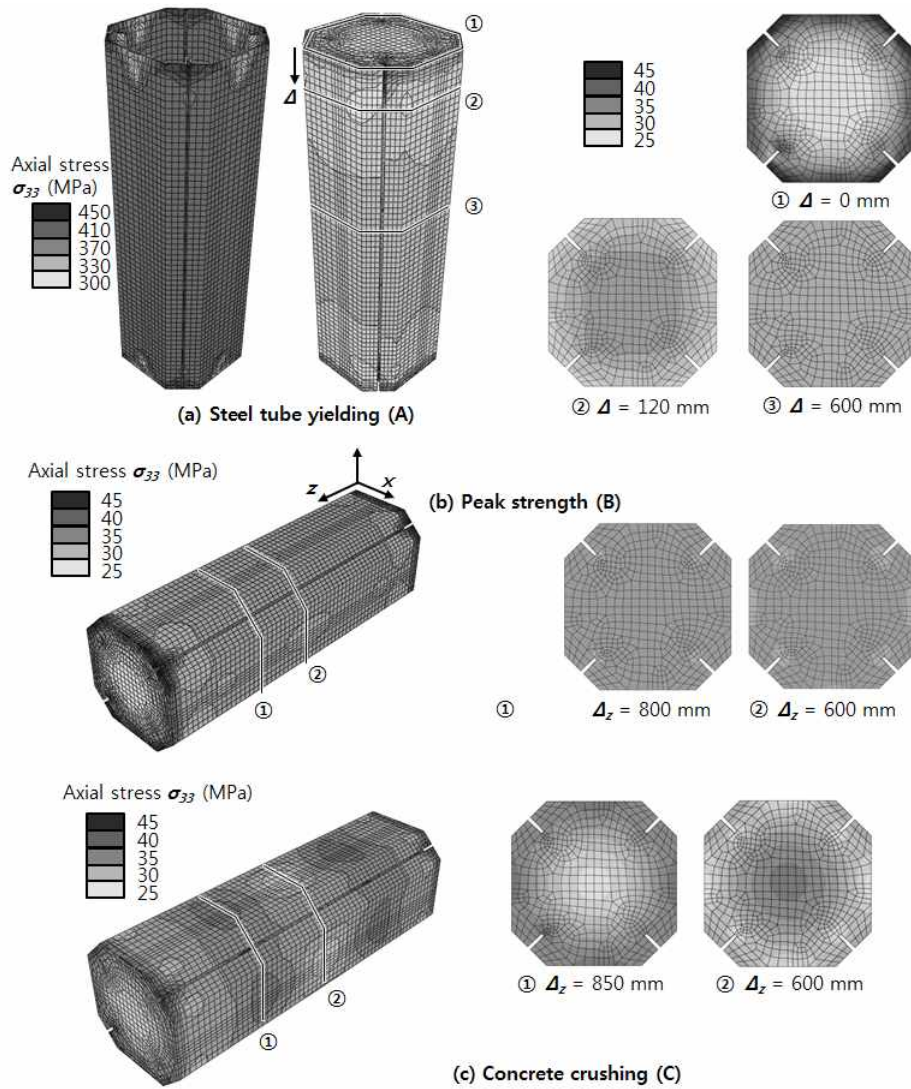


그림 3.4.17 강제 및 콘크리트 응력 분포 (Q타입 6T)

그림 3.4.17은 강제 및 콘크리트의 응력분포를 보여준다. 강관의 전단면이 항복하고 이후 최대강도 시점에서 콘크리트 또한 최대 압축강도에 도달하였다. 변형이 증가하면서 강관의 국부좌굴과 콘크리트의 응력감소로 콘크리트 응력분포가 달라졌다. 기둥 중앙부에서는 기존 사각단면과 마찬가지로 네면에서 콘크리트 응력이 감소하고 중앙부 횡구속 콘크리트의 응력이 컸다. 하지만 네면 모서리가 중앙부에 가깝게 위치하고 그 면이 길어 모서리 응력 또한 전체적으로 크게 나타났고 비교적 원형에 가까운 콘크리트 응력분포를 보였다. 실제 실험결과에서는 최대강도 이후 네면 중앙에서 국부좌굴이 발생하였음에도 불구하고 하중재하능력을 유지하였다. 이는 실제 실험에서 콘크리트의 횡구속효과가 더욱 뚜렷하게 나타났음을 뜻한다.

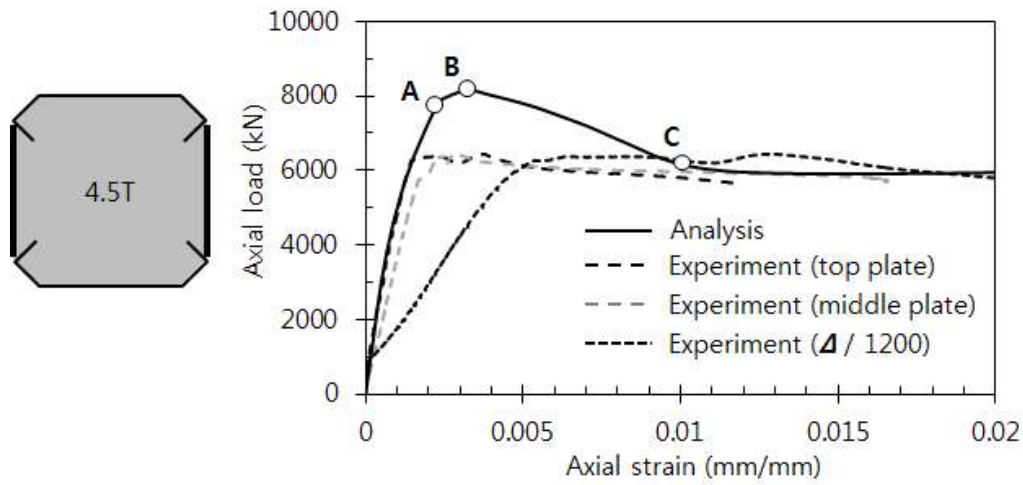


그림 3.4.18 변형률-하중 해석결과 (T타입 4.5T)

T타입의 강판두께 $t = 4.5 \text{ mm}$ 인 실험체의 해석결과 및 실험결과에 따른 변형률-하중 관계를 그림 3.4.18에 나타냈다. 실험에서 측정된 강판의 변형률로부터 구한 변형률-하중 관계 곡선의 초기 탄성계수는 해석결과와 잘 일치하였다. T타입으로 강판두께가 4.5 mm인 경우 사각단면 기준으로 세장단면에 속하며, 모따기 길이가 작고 돌기가 모서리 중앙에 형성되지 않아 강판의 국부좌굴저항성을 기대하기가 쉽지 않다. 실제 실험결과 최대 하중강도는 세장단면의 공칭강도와 유사하게 나타났으며($P_u/P_{no} = 64430/6229 = 1.03$), 강판의 국부좌굴과 함께 강도가 점차 감소하였다. 해석결과로부터 구한 하중-변형률 곡선에서는 강판의 좌굴모드가 고려되지 않은 만큼 강판 전체가 항복변형률에 도달하면서 실제 실험강도보다 큰 강도를 보였다.

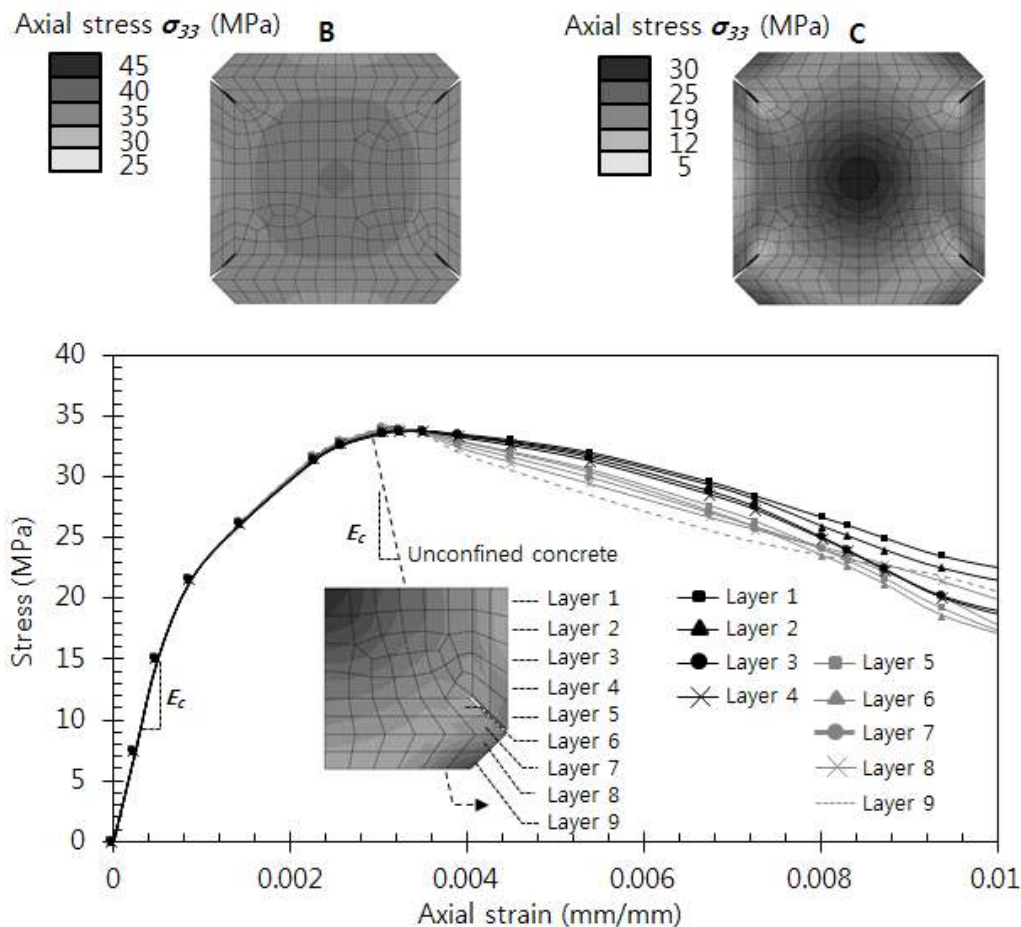


그림 3.4.19 콘크리트 응력분포 및 층별 변형률-응력관계 (T타입 4.5T)

그림 3.4.19는 T타입의 콘크리트 응력분포 및 층별 변형률-응력관계를 보여준다. 실제 조기 강판의 국부좌굴과 함께 콘크리트 횡구속효과가 뚜렷하게 나타나지 않은 실험과 달리 해석에서는 강판이 콘크리트 압력에 대해 효과적으로 저항하면서 콘크리트의 횡구속효과가 나타났다. 또한 기존 사각 CFT단면의 콘크리트 응력분포와 유사한 콘크리트 응력을 보였다. 이는 코어 콘크리트에 가까울수록 평균 응력이 크게 나타난 사실을 통해서도 확인할 수 있다.

10. OCFT 압축 실험에 대한 소결

- OCFT 압축 성능을 검증하기 위해 중심 압축 실험 및 유한요소해석을 수행하였다. 이에 대하여 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 모든 OCFT기둥은 축압축에 대하여 연성거동을 보였다.

기둥의 항복이후 연성거동(post-yield behavior)은 강판 항복/좌굴 이후 강판응력이 감소하고 그 대신 콘크리트 응력이 증가한다는 것을 의미한다. 즉 기둥의 전체 축압축에서 강판이 차지하는 비중이 줄어들고 팔각단면의 강판은 효과적으로 내부 콘크리트를 횡보강하여 조기 압괴를 방지하고 연성거동을 만들어 낸다.

또한 항복이후거동(post-yield behavior)은 OCFT기둥의 강판 상세와 나선철근 배치 유무에 따라 다르다. 나선철근이 배치되면 항복이후 강도가 증가하는 변형경화거동이 뚜렷하게 나타난다. 또한 T타입 기둥 중 정팔각단면에서도 변형경화거동이 나타났다.

2) 타입에 따른 파괴모드 차이는 다음과 같다. Q타입의 경우 각면에서 강판 국부좌굴이 독립적으로 발생하지만, T타입의 경우 모든 면의 강판 국부좌굴이 서로 연관되어 나타났다. 그 결과, Q타입 실험체의 실험강도가 공칭강도 대비 더 높음을 확인하였다.

3) 강판의 항복/좌굴 시점과 최대하중 시점이 다를 수 있다. 즉, 강판 항복/좌굴 시점은 강판의 변형률은 0.002이상으로 항복응력 F_y 을 발휘하였다. 하지만 콘크리트의 경우 수축으로 인하여 기둥 상부에서 강판과 콘크리트가 완전히 밀착하지 않을 수 있으므로, 콘크리트의 응력은 f_{ck} 에 미치지 못하였을 가능성이 높다.

그러나 최대하중 시점은 강판 좌굴 이후 추가로 축압축 변형률이 증가하여 콘크리트 압축변형률 ϵ_{co} (= 0.002)보다 커짐에 따라, 콘크리트의 압축응력이 f_{ck} 에 도달한다 (횡구속이 있을 경우 f_{ck} 이상의 응력 발휘). 반면 강판의 응력은 좌굴이후 강도저하로 인하여 응력이 F_y 보다 작아진다.

결국, 최대하중이 강판 항복/좌굴 이후에 발생한 실험체의 경우, 횡보강에 의한 콘크리트의 압축저항 증가가 좌굴에 의한 강판의 압축저항 감소보다 더 컸음을 의미한다.

4) 충전형 합성기둥의 축압축강도 모델을 다음과 같이 제시할 수 있다. 본 실험의 경우 제작특성상 기둥 상부의 수평강판 바로 아래에 콘크리트 수축에 의한 틈이 있어, 강판과 콘크리트의 압축저항에 시차가 발생하였다. 실제 충전형 합성기둥을 사용할 경우에도 내다이어프램 바로 콘크리트 수축에 의한 틈이 있을 수 있다. 따라서 하강판과 콘크리트 사이에 전단연결재가 사용되지 않았다면, 충전형 합성기둥의 축압축강도는 강판과 콘크리트 압축저항 발현의 시차를 고려하여 평가하여야 한다.

즉, 강판과 콘크리트는 별도로 거동하므로, 강판의 단면등급 구분은 합성기준이 아닌 강구조 기준에 따라 구분한다. 따라서 축압축강도는 강판항복 시점의 축압축강도와 콘크리

트 압괴시점의 축압축강도 중 큰 값으로 평가한다.

$$P_{no} = \eta_s F_y A_s + \eta_c (0.85 f_{ck} A_c)$$

위 식에는 강재 및 콘크리트 압축강도에 각각의 계수를 도입하였다. 이는 AISC의 축압축강도식과 달리 강관의 항복시점과 최대하중 발휘시점에서 강관과 콘크리트의 압축강도를 다르게 평가하기 위함이다. 이에 관하여 추후 해석연구 및 다양한 문헌 리뷰를 통해 상기 계수를 제시하고자 한다.

제5절. OCFT기둥 접합부 성능실험 및 휨 성능 평가

1. 내부접합부 상세

- OCFT기둥이 적용된 보-기둥 내부접합부 보강상세를 그림 3.5.1에 나타냈다. 그림 3.5.1은 OCFT기둥과 기존 H형 보 모멘트 접합상세를 보여주는데, 기둥강관의 면외방향 변형을 완화시키고 보에 작용하는 휨 모멘트 및 전단을 맞은편 보로 직접 전달시키기 위하여 보를 기둥을 그대로 관통시켰다. 이때 기둥 강관에는 보 관통을 위한 구멍이 형성되는데, 보 관통 후 보강판(cover plate)을 용접하여 접합부 기둥 강관의 연속성을 확보한다. 이는 보에 작용하는 압축 및 인장력을 기둥강관 및 기둥 내부 콘크리트로 직접 전달시키기 위함이다. 부모멘트 증가를 위한 슬래브 철근 또한 기둥을 관통하여 보 맞은편 까지 확장시킨다. 길이방향 관통보의 웹 중앙에는 가로보 관통을 위한 구멍이 형성되어 단면손실이 발생한다. 이는 별도의 스티프너 및 볼트 설계를 통해 보강될 수 있다. 이러한 관통 접합부 보강상세는 시공하는데 있어 다소 복잡하므로 공장에서 선조립 후 현장으로 운송한다.
- 보와 관통 보강철근을 사용한 복합모멘트 접합상세를 그림 3.5.1(b)에 나타냈다. 보는 기둥에 관통시키지 않고 기둥면에 모살용접으로 직접 접합된다. 보 하부 플랜지는 기둥면에 용접하지 않고 기둥을 관통하고 보 플랜지에 용접된 관통철근(through reinforcement bars)을 통해 플랜지의 인장력을 대신 전달한다. 이때 관통철근의 항복강도가 발휘될 수 있도록 충분한 용접 유효목두께와 용접길이(l_w)를 확보하여야 한다. 또한 관통철근의 용접위치를 기둥면으로부터 충분히 떨어트려 보 단부 소성힌지 구간을 확보한다.

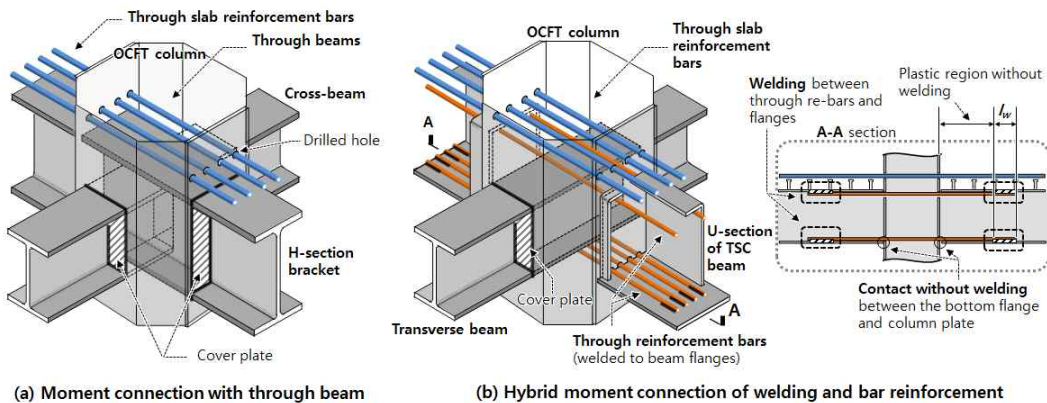


그림 3.5.1 OCFT기둥을 사용한 내부접합부

2. 내부접합부 실험변수 및 단면상세

- 모든 실험의 슬래브 두께는 180 mm이고 폭은 3000 mm이다. 내부접합부에서 슬래브 유효폭에 따른 압축저항을 평가하기 위하여 상대적으로 폭을 넓게 설계하였다. 또한 기둥면에는 D10 슬래브 횡철근을 150 mm간격으로 촘촘히 배근하여 주철근의 좌굴을 방지하였다.
- 모든 실험체는 보 단부에서 소성힌지가 발생하여 접합부의 연성거동을 확보하도록 설계하였다. 이를 위하여 보 단부 정모멘트 및 부모멘트의 합이 기둥 모멘트의 2배보다 작도록 설계하는 강기둥-약보 개념을 채택하였다.

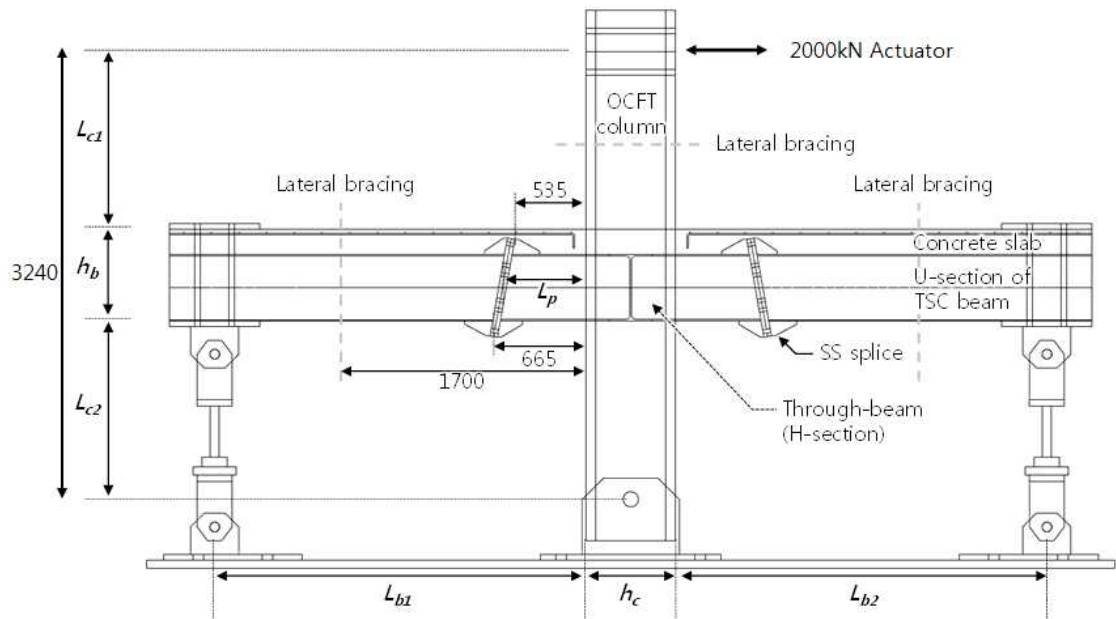


그림 3.5.3 내부접합부 단면상세 (IJ2)

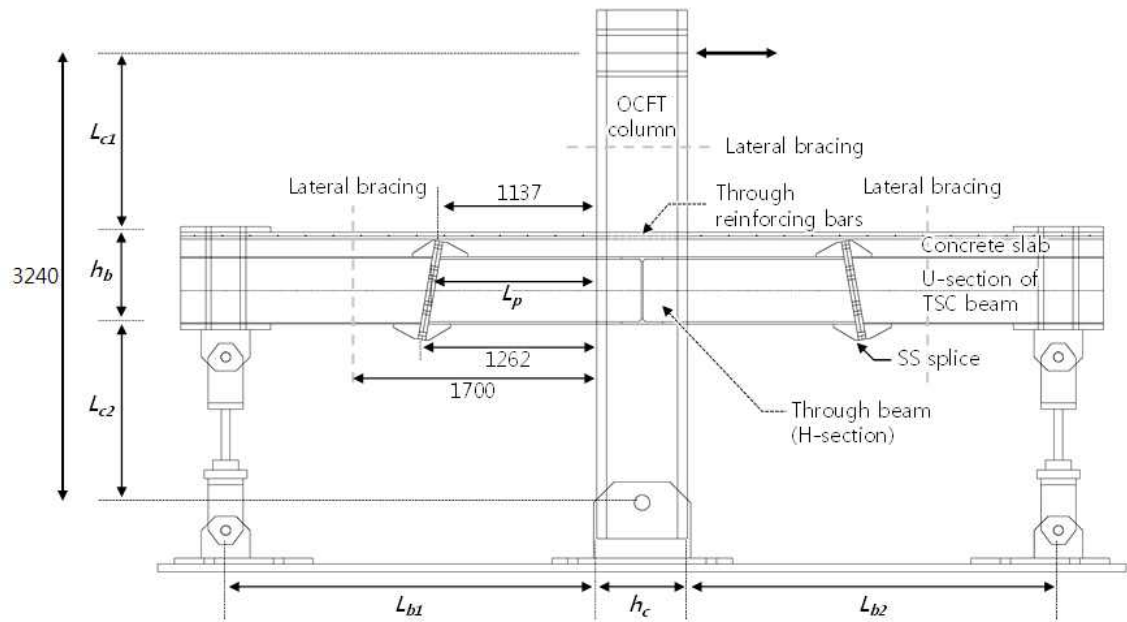


그림 3.5.4 내부접합부 단면상세 (IJ3)

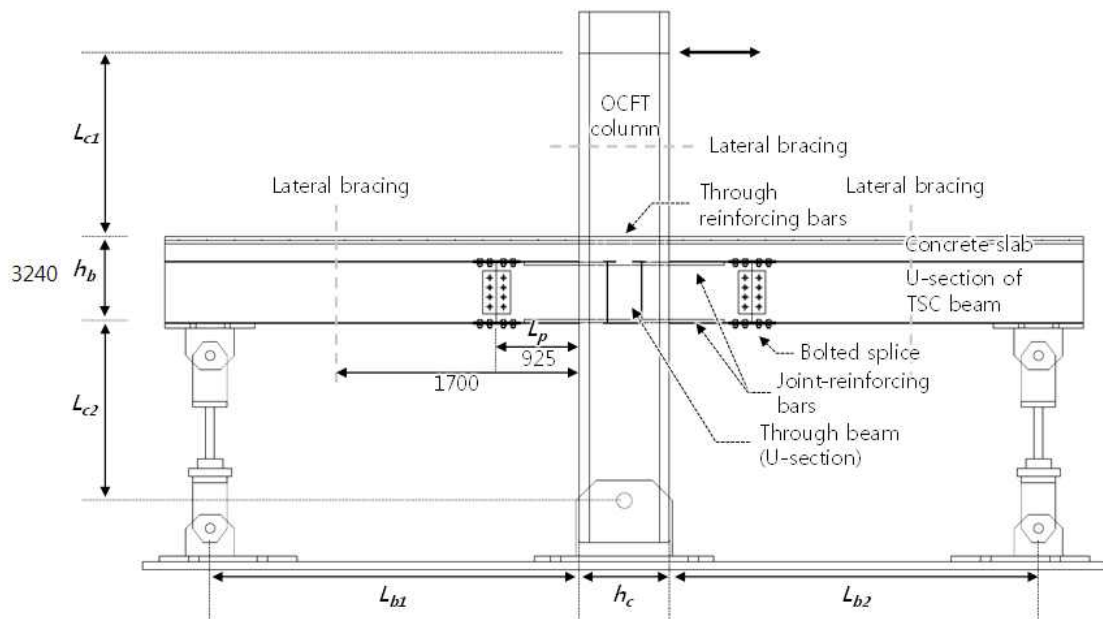


그림 3.5.5 내부접합부 단면상세 (IJ4)

3. 실험체 제작 및 계획

- 그림 3.5.6에서와 같이 2016년 10월 11일 페트라텍에서 실험체를 제작하였고, 그림 3.5.7에서와 같이 2016년 11월 7일 실험을 수행하였다.



그림 3.5.6 내부접합부 실험체 제작 (페트라텍, 2016.10.11.)



그림 3.5.7 내부접합부 실험체 설치
(대우건설기술연구소, 2016.11.07.)

4. 하중-변위관계 및 파괴양상

- 모든 실험체에서 초기 실험 셋팅상의 문제로 슬립이 발생하여 강성이 저하되었다.
- IJ1의 경우, 횡변위비 1.0%에 슬래브 콘크리트 균열이 발생하기 시작하였고, 횡변위비 2.0%부터 보 강재가 항복하면서 강성이 크게 감소하였다. 최대강도 도달 이후 보 하부 플랜지와 OCFT기둥 강관 용접부 파단과 함께 관통 보의 슬립이 발생하였다. 또한 기둥 강관의 면외방향 변형이 육안으로 관찰되었다. 전체적으로 기둥강관의 면외방향 변형, 기둥 내부 콘크리트와 관통 보의 슬립변형으로 인하여 주기거동 동안 편칭현상이 크게 발생하여 에너지 소산능력이 감소하였다.

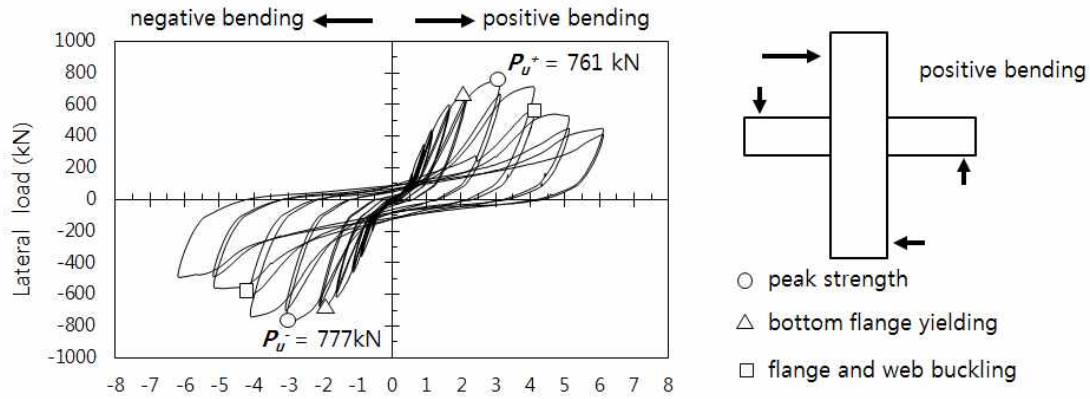


그림 3.5.8 하중-변위 관계 (IJ1)



그림 3.5.9 접합부 파괴 양상 (IJ1)

- IJ2의 경우, 보 항복이 발생하는 기둥면에서의 보 상세가 IJ1과 동일하므로, IJ과 거의 비슷한 하중재하능력 및 변형능력을 보였다. 기둥 접합면에서 콘크리트 균열은 크지 않았고, 기둥내부 보 슬립변형으로 편칭현상이 크게 발생하였다.

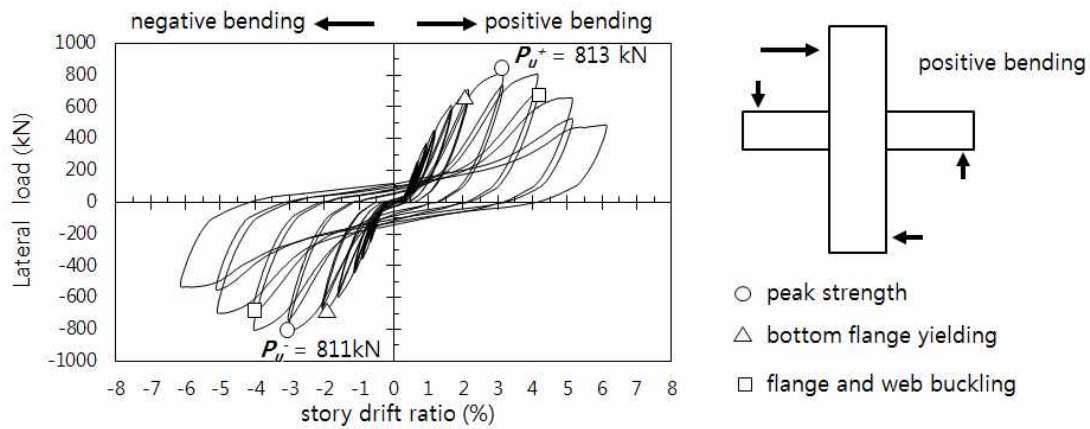


그림 3.5.10 하중-변위 관계 (IJ2)



그림 3.5.11 접합부 파괴 양상 (IJ2)

- IJ3의 경우, 앞선 실험체의 보 슬립을 확인하고 기둥 강판과 보 하부 플랜지 사이를 γ 앵글로 보강하였다. 이때 앵글은 기둥강판에 용접하지 않고 보 플랜지에만 용접하여, 보 플랜지가 인장을 받을 때 맞은편 보의 앵글이 슬립을 방지하는 역할을 하도록 설계하였다. 실험 결과, 슬래브 관통철근이 휨모멘트에 적극 기여함으로써 하중재하능력이 컸고, 변형 능력 또한 앞선 실험체에 비하여 우수하게 나타났다. 이는 하부 플랜지 용접부 파단 이후 γ 앵글이 보의 슬립을 효과적으로 방지하였기 때문이다. 하지만, 기둥강판의 면외방향 변형이 역시 관찰되었고 보 플랜지의 연신율에 따른 변형이 발생하면서 주기하중동안 펀칭현상이 발생하여 에너지 소산능력이 감소하였다. 슬래브 횡철근의 역할로 기둥면 관통 철근의 좌굴은 제한적으로 나타났다.

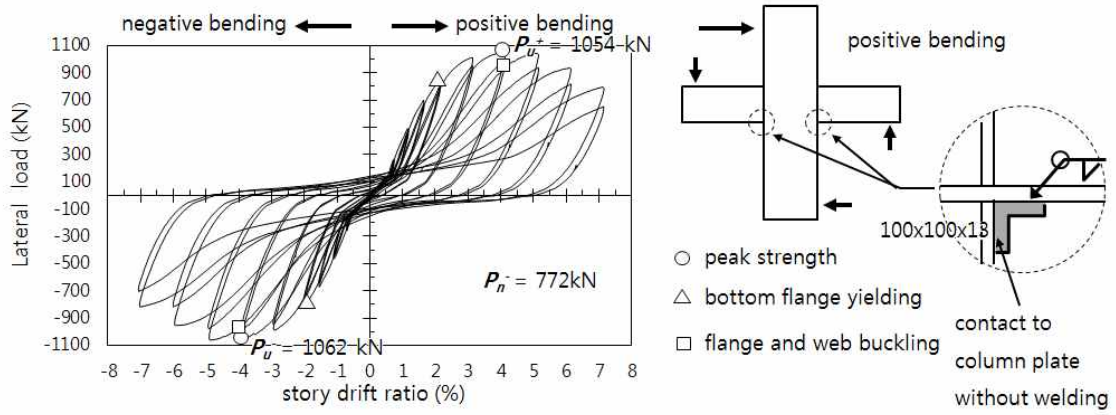


그림 3.5.12 접합부 파괴 양상 (IJ3)



그림 3.5.13 접합부 파괴 양상 (IJ3)

- IJ4의 경우, 최대하중 이후 보 웨브 용접부가 완전히 파단 되었음에도 불구하고, 보 플랜지에 용접된 관통철근이 효과적으로 보 플랜지의 인장력을 맞은편 보로 전달하면서 하중재하능력이 감소하지 않고 연성적인 거동을 보였다. 단 주기거동 동안 기둥강판의 면외방향 변형, 웨브 용접부 파단, 관통철근의 연신율 등에 따른 영향으로 펀칭현상이 크게 발생하여 에너지 소산능력이 감소하였다.

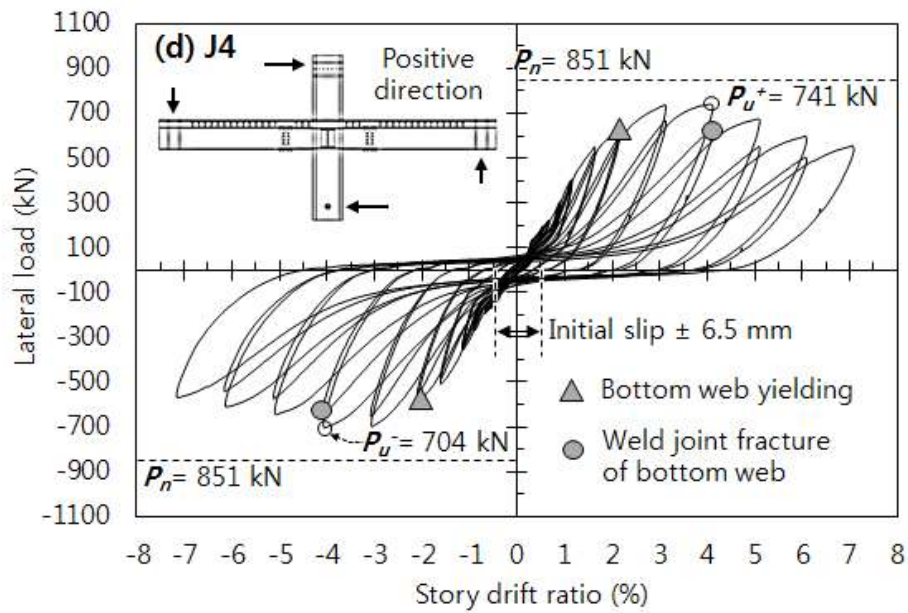


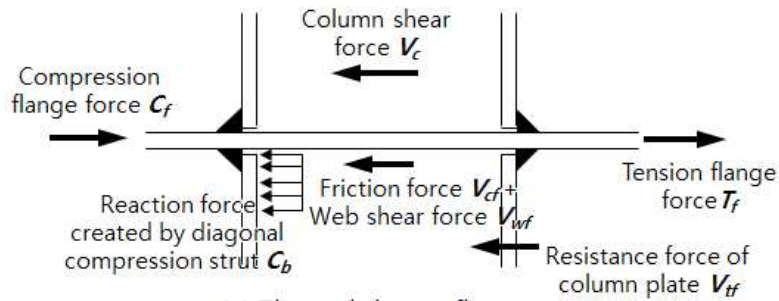
그림 3.5.14 하중-변위 관계 (IJ4)



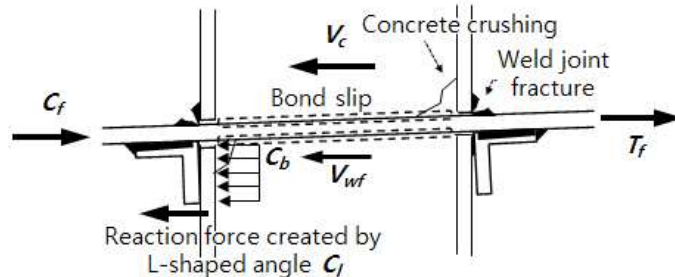
그림 3.5.15 접합부 파괴 양상 (IJ4)

5. 변형률 계측결과

- 하중-변위관계에서 언급한 바와 같이 OCFT의 얇은 강관에 용접된 보 하부 플랜지는 강한 인장력으로 OCFT 강관의 면외방향을 일으키고 응력집중에 따른 용접파단이 나타난다. 이러한 파괴거동으로 인해 IJ1 및 IJ2은 하중-변위관계에서 나타낸 바와 같이 핀칭현상이 크게 나타났고 용접부 파단 이후 관통 보의 슬립이 발생하면서 충분한 하중재하능력을 발휘하지 못하였다 (그림 3.5.16 참조).



(a) Through beam flange



(b) Through beam flange with L-shaped angle

그림 3.5.16 보 플랜지 힘 전달 메커니즘

- 이러한 접합부 슬립변형은 변형률 계측결과를 통해서도 잘 나타난다. 그림 3.5.17은 슬립이 크게 발생한 IJ1 실험체와 γ 앵글을 통하여 보강한 IJ3 실험체의 접합부 근처 보 플랜지 변형률, 기둥 강관 변형률, 슬래브 철근의 변형률을 보여준다. 상부플랜지 등의 영향으로 큰 인장을 받는 보 하부 플랜지의 경우 IJ1에서는 항복변형률($\epsilon_y = 0.002$)에 도달하였지만 이후 용접부 파단과 함께 슬립이 발생하면서 반복하중동안 일정한 변형률을 보였다. 반면 γ 앵글로 하부 플랜지의 슬립을 방지한 IJ3 실험체의 경우 항복변형률($\epsilon_y = 0.002$) 이상의 큰 변형률을 보였다.

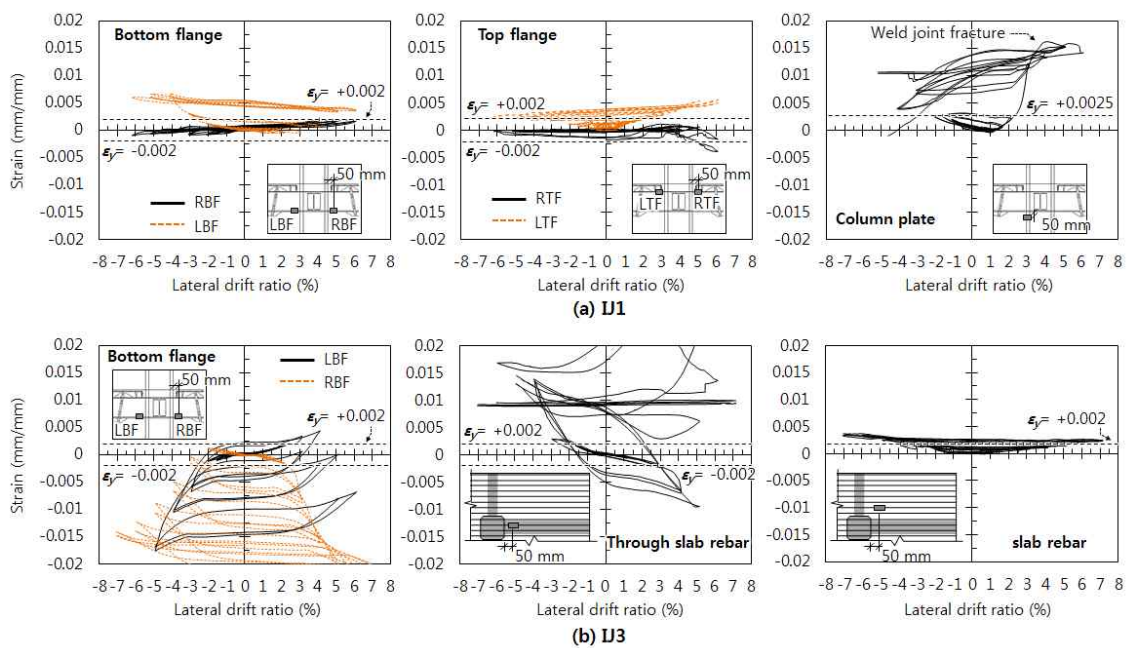


그림 3.5.17 내부접합부 변형률 계측 결과

- 기둥에 관통된 슬래브 철근은 압축 및 인장방향으로 항복변형률($\epsilon_y = 0.002$)이상의 충분한 변형률을 보였다. 이는 관통철근을 모멘트강도에 포함시키는 설계방법과 일치되는 결과이다. 반면 기둥에 직접 관통되지 않은 슬래브 철근은 횡변위비 3.0% 까지 항복변형률이

도달하지 못하였고 이후 뚜렷한 변형률 증가를 보이지 않았다.

- 하중변위비와 접합부 합성보의 높이에 따라 구한 변형률 분포를 그림 5.1.18에 나타냈다. IJ1과 IJ2의 슬래브 철근은 기둥을 관통하지 않았으므로 정·부방향 인장 및 압축변형률이 크지 않았다. 또한 하부플랜지의 인장력으로 인한 기둥강관의 면외방향 변형 및 용접부 파단으로 하부 플랜지의 인장·압축 변형률 또한 횡변위비 4.0%까지 항복변형률보다 작은 값을 보였다. 이러한 면외방향으로 웨브 전단면 또한 인장변형률보다는 압축변형률이 더 크게 나타났다.
- 반면 75°각도로 보강한 IJ3의 경우, 하부 플랜지 및 상부 플랜지가 큰 인장변형률 및 압축 변형률을 보였다. 하지만 보강재가 없는 웨브 강관의 경우 역시 기둥 강관의 면외방향 변형과 함께 웨브의 변형률이 전단면으로 퍼지는 모습이 보이지 않았다.
- 보 플랜지를 기둥면에 용접하지 않고 관통철근용접을 통하여 보강한 IJ4실험체의 경우 상부 및 하부플랜지의 인장·압축 변형률이 반복하중 내내 거의 증가하지 않았다. 하지만 하중재하능력은 유지하였는데 이는 관통철근이 충분한 하중전달능력을 갖고 있음을 보여 준다. 보 웨브는 기둥면에 용접되었는데 역시 기둥 강관의 면외방향 변형으로 인하여 변형률이 웨브 전단면에 걸쳐 충분히 나타나지 않았다.

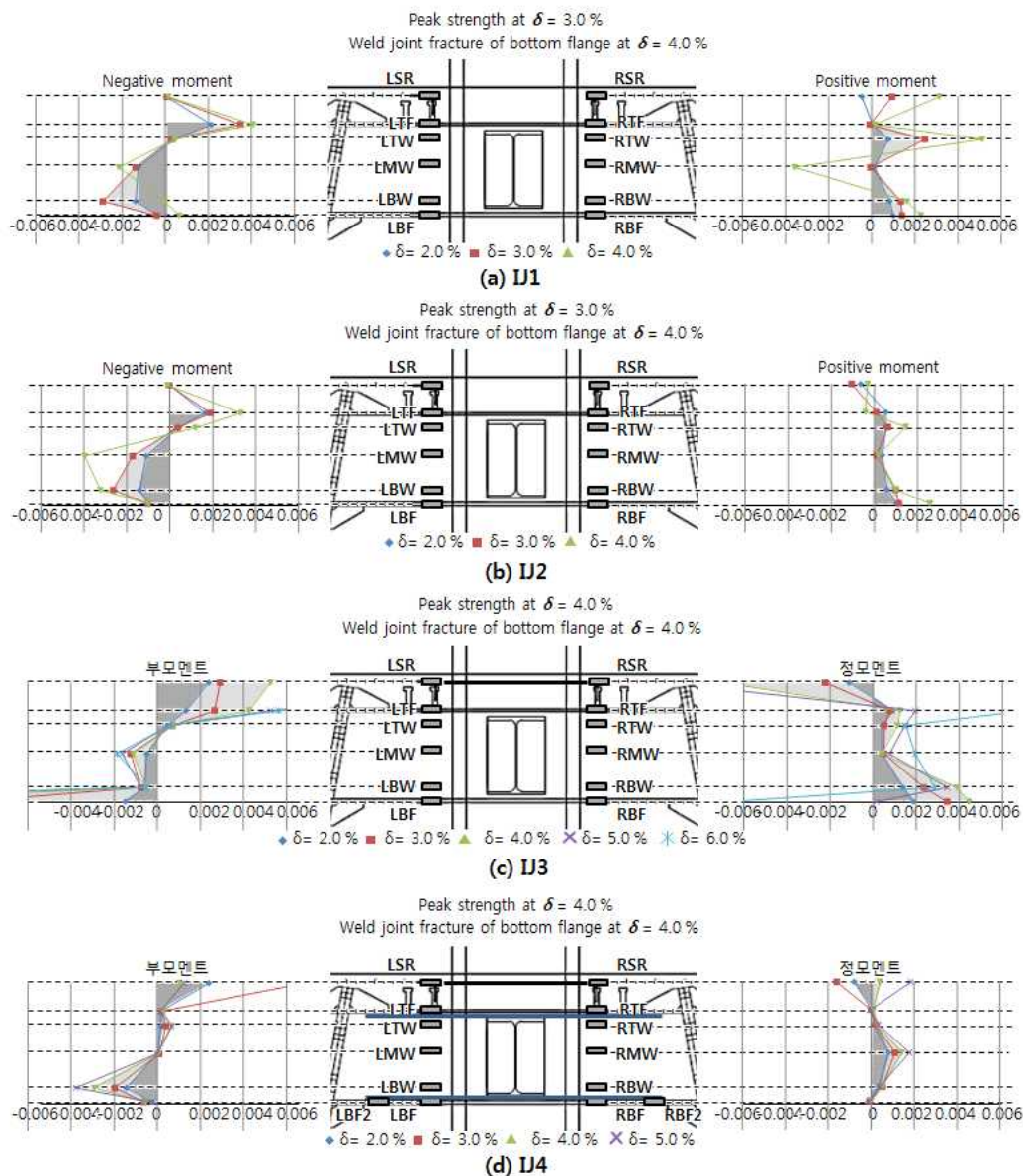


그림 3.5.18 하중변위비에 따른 접합면 변형률 분포

6. 접합부 전단강도 평가

- CFT기둥 접합부의 파괴는 기둥강관의 전단항복과 내부 콘크리트의 압축스트럿 압괴에 의해 발생할 수 있다. 보를 CFT기둥에 관통시킨 경우, 접합부의 전단성능은 보 플랜지의 프레임저항(V_f), 기둥 웨브 강관의 전단강도(V_{cw}), 보 웨브 강관의 전단강도(V_{bw}), 내부 콘크리트의 전단강도(V_{cs})의 합으로 이루어진다.
- 기둥 강관과 이를 관통하는 강재 보는 프레임을 형성하며 전단에 저항할 수 있다(그림 3.5.19 (a) 참조). 프레임 전단강도(V_f)는 기둥면에 형성되는 보 플랜지 소성힌지 구간의 휨강성을 통해 다음과 같이 계산할 수 있다. 여기서 F_y 는 플랜지 강관 항복강도(= 424 MPa)이고, h , t_f , b_f 는 각각 H형 보 높이(= 482 mm), 플랜지 두께(= 300 mm), 플랜지 두께(= 15 mm)이다.

$$V_f = \frac{4M_f}{h - t_f} \quad (3.5.1)$$

$$M_f = \frac{F_y t_f^2 b_f}{4} \quad (3.5.2)$$

- 그림 3.5.19 (b)는 기둥 웨브 강관의 전단강도(V_{cw})를 나타낸다. CFT기둥 팔각단면에서 모서리를 제외한 유효폭 내의 웨브 강관만 전단에 저항하는 것으로 가정한다. 이에 따라 구한 전단강도(V_{cw})는 다음과 같다. 여기서 기둥 웨브 강관의 항복강도 $F_y = 509$ MPa이고, 모서리를 제외한 기둥 유효폭 $b_{eff} = 500$ mm, 기둥 웨브 강관 두께 $t_1 = 6$ mm이다. 강관에 작용하는 전단 항복응력 $0.6F_y$ 는 AISC기준을 따른 것이다.

$$V_{cw} = 0.6F_y b_{eff} t_1 \quad (3.5.3)$$

- 같은 원리로 그림 3.5.19 (c)에 나타낸 기둥을 관통하는 보 웨브 강관의 전단강도(V_{bw})를 다음과 같이 구할 수 있다. 여기서 b (= 650 mm)는 기둥 너비이고, t_w (= 11 mm)는 보 웨브 강관 두께이다. 보 웨브 강관은 별도의 재료강도 실험을 수행하지 않았는데, 두께 12 mm의 보 강관의 항복강도($F_y = 414$ MPa)를 사용하였다.

$$V_{bw} = 0.6F_y b t_w \quad (3.5.4)$$

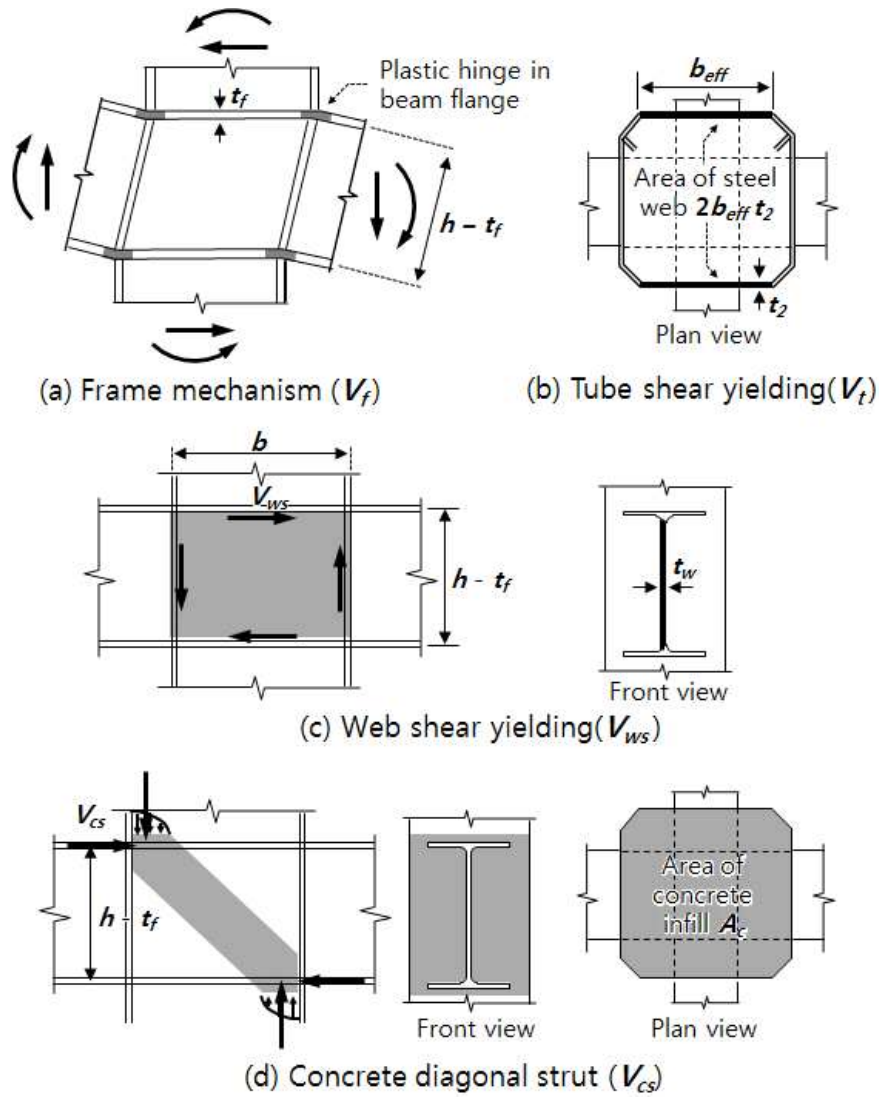


그림 3.5.19 관통 강재 보 - OCFT기둥 접합부 전단저항 메커니즘

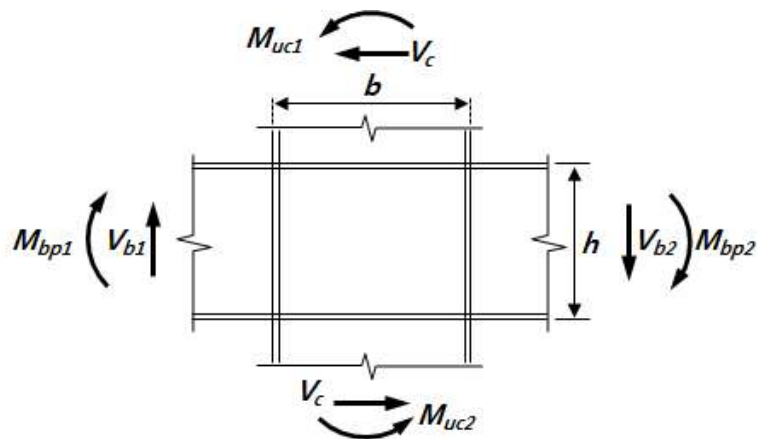


그림 3.5.20 내부 접합부 요구전단강도

- 기둥 내부 콘크리트 압축 스트럿에 의한 전단저항 메커니즘을 그림 3.5.19 (d)에 나타냈다. 관통형 내부접합부에서는 기둥 강관과 가로보의 지압력으로 내부 콘크리트 전단면이 압축 스트럿을 형성하며 전단저항력에 기여한다. 이 전단강도(V_{cs})는 다음과 같이 정의된다. 여기서 $A_c (= 382,726 \text{ mm}^2)$ 는 OCFT기둥 내부 콘크리트 면적이다. 이 실험에서 CFT기둥은 연속되어 있고 접합부 내부 콘크리트는 폐단면으로 구속되어 있다. 오른쪽항의 $1.99\sqrt{f_{ck}}$ 는 이러한 콘크리트의 구속효과를 반영한 것으로, ACI-ASCE의 기둥이 연속되고 4면에 보가 있는 경우를 따랐다.

$$V_{cs} = 1.99 \sqrt{f_{ck}} A_c \quad (3.5.5)$$

- ASCE Task committee (ASCE 1994)에서는 접합부에서의 모멘트 평형식을 통해 접합부의 전단강도를 평가한다 (그림 3.5.20 및 식 3.5.6 참조).

$$\sum M_{uc} - \sum V_b b/2 \leq \phi M_{nc} \quad (3.5.6)$$

$$\sum M_{uc} = \sum M_{bp} + \sum V_b b/2 - V_c h \quad (3.5.7)$$

$$M_{nc} = V_f(h-t_f) + V_{cw}h + V_{bw}(h-2t_f) + V_{cs}(h-t_f) \quad (3.5.8)$$

$$M_{nc} = V_{cw}h + V_{cs}(h-t_f) \text{ for IJ4} \quad (3.5.9)$$

- 여기서, M_{uc} , M_{nc} 는 각각 요구 전단 모멘트강도, 공칭 전단 모멘트강도이다. M_{bp} 는 기둥면 보에 작용하는 휨모멘트로 소성응력분포에 따라 구한 값이다. 슬래브 콘크리트 압축저항 및 슬래브 철근의 인장저항은 휨모멘트에 포함되지만, 전단 모멘트 강도 계산 시 이에 따른 중립축 변화는 고려하지 않았다. J4실험체의 경우 보가 기둥을 관통하지 않으므로, 기둥 웹 강판 전단강도와 기둥 내부 콘크리트 압축 스트럿에 의한 전단강도만 고려하였다.

표 3.5.1 내부접합부 전단강도 평가

	J1 and J2	J3	J4
Shear-moment demand $\sum M_{uc} - \sum V_b b/2$	2357	2488	2044
Shear-moment capacity by frame, $V_f(h-t_f)$ (ratio)	29 (0.8)	29 (0.8)	-
Shear-moment capacity by column web plate, $V_{cw}h$ (ratio)	442 (12.6)	442 (12.7)	442 (16.5)
Shear-moment capacity by beam web plate, $V_{bw}(h-t_f)$ (ratio)	803 (22.9)	803 (23.0)	-
Shear-moment capacity by diagonal concrete strut, $V_{cs}(h-t_f)$ (ratio)	2232 (63.7)	2210 (63.5)	2232 (83.5)
Shear moment capacity	3505	3484	2674
Capacity/Demand	1.49	1.41	1.31

7. OCFT 내부접합부 실험 및 휨성능에 대한 소결

- OCFT기둥과 보 및 H형보를 사용한 내부접합부의 내진성능을 평가하기 위하여 총 4개의 실험체를 제작하고 반복하중실험을 수행하였다. 합성모멘트골조의 내진성능에 있어, 슬래브, 관통 보, 관통철근이 주는 영향을 분석하기 위하여 각 상세를 실험변수로 결정하였다. 주 실험결과는 다음과 같다.

1) 모든 실험체는 6%이상의 횡변위각을 보이며 충분한 연성능력을 보였다. 하지만 하중재하능력은 각 실험체 상세에 따라 차이를 보였다.

2) OCFT기둥에 H형강을 관통시킨 J1의 경우 보 하부 플랜지의 인장력으로 인해 6 mm 두께의 OCFT 강판에 면외방향 변형이 조기에 발생하였고 이후 응력집중에 따른 용접부

파단이 나타났다. 이러한 파괴거동은 합성기둥·보를 사용하는 내부접합부에서 슬래브에 의한 중립축상승과 모멘트 작용 등에 의해 더욱 잘 나타날 수 있다. 단 용접부 파단 이후 하중재하능력이 일부 감소 하였지만 관통보가 모멘트를 전달하면서 하중재하능력을 유지하였다. 다만, 기둥강판의 면외방향 변형 및 용접부 파단에 따른 관통보 슬립으로 주기거동 내내 편칭현상에 의해 에너지 소산능력이 감소하였다.

3) H형 보를 관통시킨 J1 및 J2의 경우 하중재하능력이 기둥면을 기준으로 전단면 소성 모멘트로 구한 공칭강도에 미치지 못하였다. 이는 합성슬래브의 영향으로 하부 플랜지의 변형률이 조기에 크게 발생하고 이후 보 웹 전단면이 항복변형률에 도달하기 전에 얇은 기둥강판의 면외방향 변형 및 용접부 파단이 발생하였기 때문이다. 즉 인장영역 보 플랜지의 충분한 변형률을 확보하지 못하였다. 하지만, 보 하부 플랜지를 앵글로 보강한 J3 실험체의 경우 기둥강판의 면외방향 변형 및 용접부 파단 이후 관통보의 슬립을 앵글이 효과적으로 방지하면서 충분한 하중재하능력을 보였다.

4) 슬래브 철근을 관통시키고 보 하부 플랜지를 보강한 J3실험체의 경우 다른 실험체 대비 큰 하중재하능력과 변위각 7% 이상의 우수한 하중재하능력을 보이며 특수모멘트골조를 만족하였다. 슬래브 관통철근은 부모멘트 방향으로 항복변형률 이상의 큰 변형률을 보이며 모멘트 전달에 충분히 기여하였다. 다만, 기둥을 관통하지 않은 철근은 주기거동 내내 작은 변형률을 보였다. 보 하부에 설치된 앵글은 접합부 용접파단 이후 관통보의 슬립을 방지하였고 앵글 바깥쪽 보는 국부좌굴과 함께 소성힌지가 나타났다.

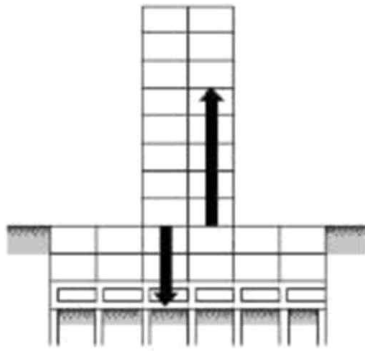
5) 보를 OCFT기둥에 관통시키지 않고 관통철근을 용접한 복합모멘트골조 J4의 경우, 기둥면 면외방향 변형 및 웹 용접부 파단 이후에도 관통철근이 하중을 효과적으로 전달해 하중재하능력을 유지하였다. 하지만, 관통철근의 정착길이가 충분하지 않았고 웹 용접부 기둥면 면외방향 변형 및 파단으로 인해 충분한 하중재하능력을 보여주지 못하였다. 또한, 주기거동 동안 편칭현상으로 인해 에너지 소산능력이 감소하였다. 슬래브 관통철근은 부모멘트 방향으로 항복변형률 이상의 큰 변형률을 보였다.

6) 얇은 강판이 사용된 OCFT기둥 합성모멘트 골조의 경우 보를 관통시키더라도 슬래브에 따른 중립축 상승 및 기둥의 얇은 강판과 보 용접부에서의 응력집중 등으로 인하여 기둥강판의 면외방향 변형, 용접부 파단이 조기에 발생할 수 있다. 이는 관통보와 내부 콘크리트의 부착 슬립으로 이어지며 하중재하능력감소와 함께 에너지소산능력을 감소시키는 결과를 낳았다. 이에 따라 보강 앵글 및 관통 철근 등의 사용으로 보-기둥 용접부의 응력집중을 완화시키는 별도의 보강상세가 필요할 것으로 판단된다.

제6절. OCFT기둥 기초공법 적용성 평가

1. 실험목적

- 현행 건축시공분야에서 골조공사의 공기를 단축하기 위하여 다음 그림과 같이 Top-Down 공법을 많이 적용하고 있다. Top-Down 공법은 지하구조물의 골조를 형성하기 위하여 터파기 및 흙막이를 하지 않고, 지표면에서 바로 말뚝을 시공하고, 이를 지하구조물의 기둥을 사용하여 공기를 단축하는 방법이다.



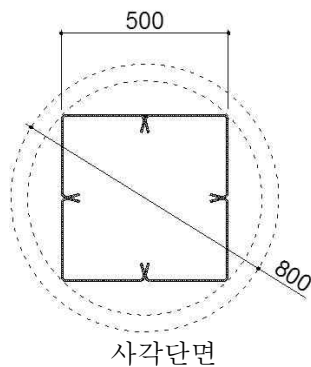
Top-Down 공법



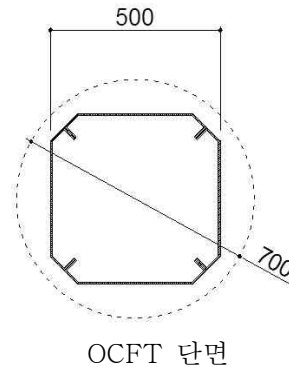
말뚝기초 시공

그림 3.6.1 건축공사 Top-Down 공법 및 말뚝기초 시공

- 이를 위하여 다음과 같이 말뚝기초의 근입을 위한 천공이 요구된다. 최소 천공직경은 근입되는 말뚝 크기와 관련있으며, 다음 그림과 같이 500 X 500 mm 크기의 사각단면을 근입하기 위하여 800 mm 직경이 천공되어야 한다.



사각단면



OCFT 단면

그림 3.6.2 단면형상에 따른 천공직경

- 하지만, 동일한 변을 갖는 OCFT 기둥의 경우, 직경 700 mm 로 천공이 가능하여 시공성 및 경제성을 확보할 수 있다. 이러한 시공성 및 경제성 측면에서 장점을 바탕으로 OCFT 기둥을 Top-Down 공사에 사업화 하기 위해서는 구조적 성능이 검증되어야 한다. 즉, 말뚝으로 시공된 OCFT 기둥이 시공하중에 대한 지지가능여부와 토사가 굴토되었을 경우 말뚝의 좌굴안전성 등이 검증되어야 한다. 따라서 본 과업에서는 원심모형시험기를 사용하여 OCFT 기둥을 기초구조로 사용할 수 있는 재하실험을 수행하여 구조적 안전성을 검증하였다.

2. 실험체의 설계

● 원심모형실험

본 과제에서 개발된 OCFT 기둥을 말뚝기초로 사용하기 위하여 구조적 성능검증이 요구된다. 따라서 본 과제에서는 최근 지반공학분야에서 널리 사용되는 원심모형시험기를 사용하여 OCFT 기둥의 구조적 성능을 검증하였다. 원심모형시험기는 다음과 같이 원심력을 가하여 지구중력의 20~80 배를 가하여 지반 등 대규모의 구조체의 응력상태를 축소모형을 구현하여 실험할 수 있는 장비이다. 따라서 이러한 원심모형실험 장비의 활용은 본 과제와 같이 대규모의 실험조건이 요구되는 경우에 적합하며, 다음 장에서 정리된 표의 상사법칙에 따라 실험체를 계획하였다.



그림 3.6.3 KAIST 원심모형실험 장비

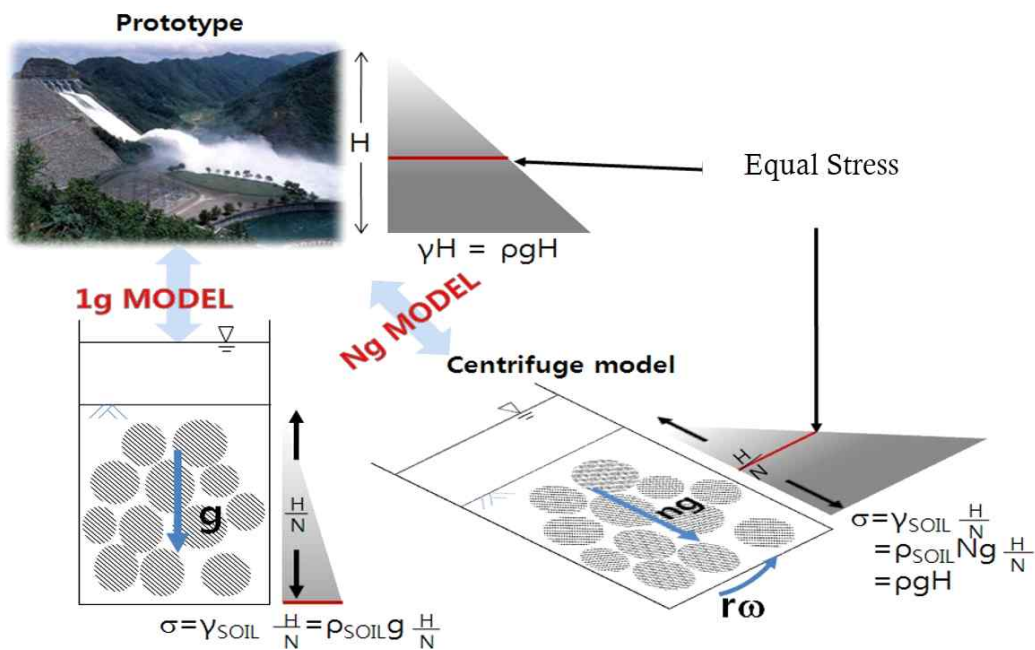


그림 3.6.4 원심모형실험에 의한 응력의 구현

표 3.6.1 원심모형실험에 대한 상사법칙

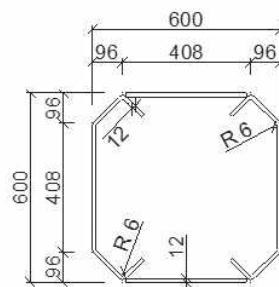
Quantity Name	Scaling Factor (model/Prototype)
Density	1
Gravity	N
Stress, Pressure, Moduli	1
Length, Displacement	1/N
Mass	1/N ³
Force	1/N ²
Dynamic Time	1/N
Dynamic Velocity	1
Dynamic Acceleration	N
Dynamic Frequency	N
Diffusion Time	1/N ²

● 실험체 계획

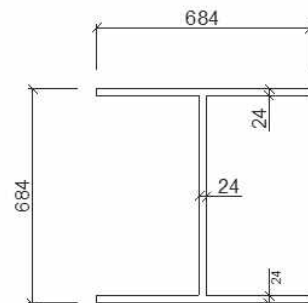
원심모형실험을 위하여 다음과 같이 실제 OCFT 기둥의 크기를 정하고 이를 1/12로 환산하여 실험을 수행하였다. 600 x 600 x 12t와 동일한 내력의 H형강은 684 x 684 x 24 x 24 이고, 이를 말뚝기초로 활용하기 위하여 요구되는 천공직경은 OCFT는 650 mm, H형강은 850mm 이다.

표 3.6.2 실제 크기를 환산한 축소모형 실험체 ($f_{ck} = 30\text{MPa}$, SM490 사용)

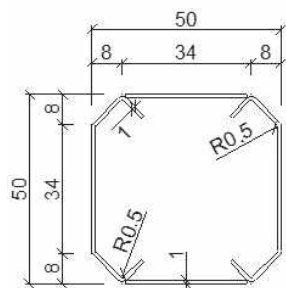
	OCFT	H형강
실제 크기	600 x 600 x 12t	684 x 684 x 24 x 24
천공 직경	650 mm	850 mm
설계 강도	13,089 kN	13,108 kN
축소 모형	50 x 50 x 1t	57 x 57 x 2 x 2



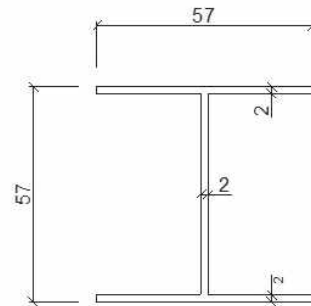
OCFT 실제 크기



H형강 실물 크기



OCFT 축소모형실험체 크기



H형강 축소실험체 크기

그림 3.6.5 1/12 축소실험체 설계

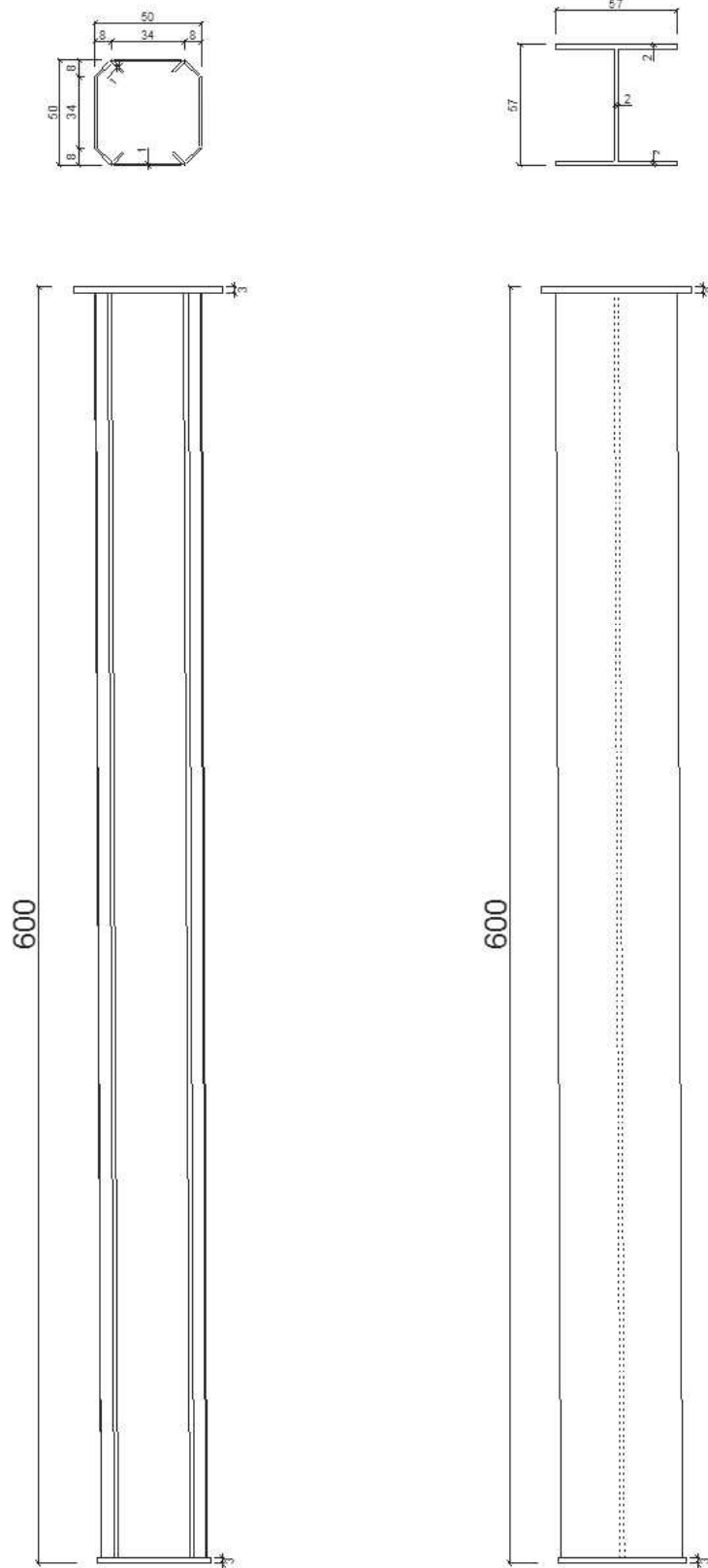


그림 3.6.6 실험체 입면

3. 실험체 제작

● 풍화암 조성

원심모형시험기 토조내에서 하부 풍화암을 조성한 절차는 다음과 같다. 풍화암을 조성하기 위한 시멘트 모르타르를 배치하고, 단단한 붓을 사용하여 치밀하게 다짐을 수행한다. 다짐된 풍화암 모형에 대한 수평도를 검측하고, 이와 동시에 시편을 채취하였다. 약 20일

동안 경화된 풍화암 모형에 대하여 시편 압축강도 시험을 수행하고, 이에 대한 파괴양상이 그림으로 나타났다. 모형으로 조성된 풍화암은 약 3.5 MPa의 압축강도가 발현되었으며, 이는 매우 단단하지는 않은 다소 무른 암반의 수준으로 판단된다.



낙사



다짐



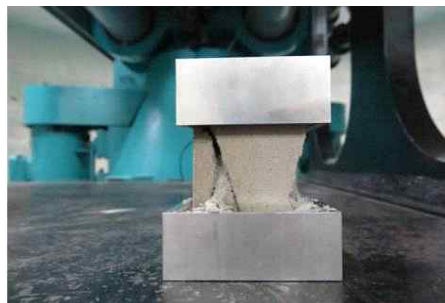
수평도 검측 및 경화



시편 채취



시편 압축강도 시험



시험 파괴형상

그림 3.6.7 풍화암 실험체 조성 및 압축강도 측정

● H형강 및 OCFT 축소실험체 제작

OCFT 축소실험체 제작과정은 다음과 같다. 전술한 바와 같이 단위 강판을 절곡하고, 이를 만나는 변을 용접하여 팔각형의 OCFT 단면을 구성하였다. 이때 본 축소실험에서 사용된 강재의 두께가 1 mm로서 매우 얇기 정밀한 레이저 용접으로 실험체가 제작되었다. 압축력을 가력하기 위하여 제작된 팔각형 단면의 상하부에 철판을 용접하였다. 다음과 같이 완성된 축소모형에 시멘트 모르타르를 채워 팔각형의 CFT 기둥을 완성한다.

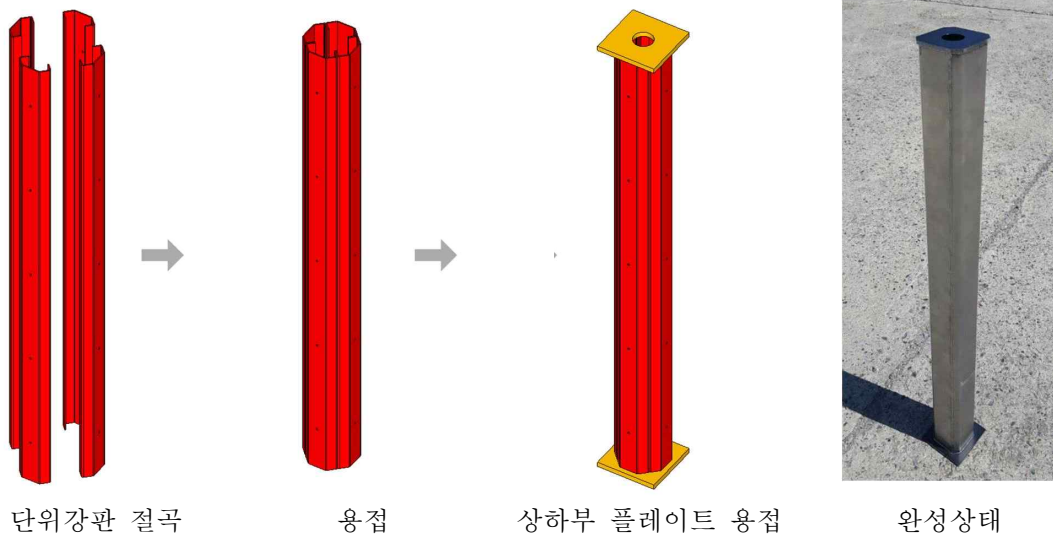
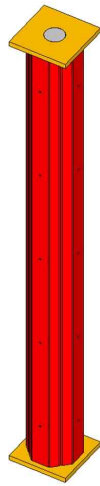


그림 3.6.8 OCFT 축소실험체 제작

시멘트 모르타르가 타설된 축소모형실험체는 다음 그림과 같이 시멘트 모르타르의 건조, 수축으로 인하여 OCFT 축소실험체의 상부 강관과 유격이 발생하였다. 이러한 유격은 압축력을 전달하는 기둥에 대한 실험시 발생되면 안되는 시공상의 문제이다. 따라서, 이에 대하여 본 과업에서는 다음과 같이 건조, 수축이 적은 보강재를 주입하고 유격을 보완하여 압축력을 전달하는 기둥의 실험이 잘 수행되도록 하였다.



콘크리트 타설후 유격 발생



보강 후 형상



Performance Data*

SHELF LIFE AT 75°F (24°C), minimum	24 month
SHORE D HARDNESS AT FULL CURE (24 hrs)	7
LAP SHEAR TENSILE STRENGTH On steel (1" x 1" x 1/16")	900 lbs (6.2 MPa)
COMPRESSIVE STRENGTH	8,000 psi (55 MPa)
DENSITY	15.8 lb/gal, 1.9 gm/cm ³
SHRINKAGE	<1%
NON-VOLATILE CONTENT	100%
ELECTRICAL RESISTANCE	30,000 megohm
DIELECTRIC STRENGTH	300 volts/m
UPPER TEMPERATURE LIMITS	
Continuous	250°F (121°C)
Intermittent	300°F (149°C)
CHEMICAL RESISTANCE	
Resistant to hydrocarbons, ketones, alcohols, esters, halocarbons, aqueous salt solutions and dilute acids and bases.	
NOT INTENDED FOR STRUCTURAL APPLICATIONS	
*Not to be used for specification purposes.	

보강재

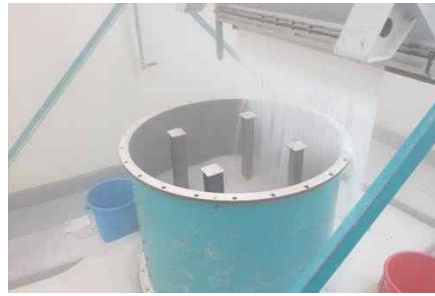
그림 3.6.9 OCFT 축소실험체 보강

● 말뚝 및 지반실험체 조성

원심모형실험을 위한 토조 내에 말뚝 및 지반실험체를 조성한 과정은 다음과 같다. 지반 내에 완전히 묻힌 H형강과 OCFT 기둥에 대한 실험과 1/2 묻힌 H형강과 OCFT 기둥에 대한 실험을 수행하기 위하여 총 4개의 실험체가 토조 내에 배치되었다. 이에 대하여 주문된 규사를 낙사하여 굴토 후 퇴매움 되는 지반조건을 형성하였다.



말뚝시험체 배치



낙사



낙사



말뚝 및 지반시험체 완성

그림 3.6.10 말뚝 및 지반시험체 조성

4. 실험 수행

- 원심모형 실험기에서 수행된 실험은 다음과 같다. 지구중력의 12 배인 12g의 원심력이 가해지는 상태에서 말뚝 두부에 하중을 가력하여 Top-Down 공법의 말뚝기초로서 활용될 수 있는지 평가하였다. 실험시 가력 로드셀에서 가해진 하중이 측정되고, 말뚝 상부의 좌우에서 LVDT로 변위를 측정하였다. 완전히 묻힌 H형강과 OCFT 기둥에 대한 압축실험을 수행하고, 지반을 굴토하여 1/2만 묻힌 지반조건에서 H형강과 OCFT 기둥에 대한 압축실험을 수행하였다. 이로부터 Top-Down 공법에 적용된 OCFT 기둥의 좌굴 등에 대한 시공안전성을 검증할 수 있다.



가력 및 변위 측정



완전히 묻힌 실험체에 대한 가력



1/2 묻힌 H형강 가력



1/2 묻힌 OCFT 가력

그림 3.6.11 실험체 가력 및 변위 측정

5. 실험 결과

● 하중-변위 곡선

원심모형실험기를 활용하여 수행된 H형강 및 OCFT 말뚝기초의 실험결과는 다음과 같다. 지구중력의 12 배인 12g의 원심력이 가해지는 상태에서 말뚝 두부에 하중을 가력하여 수행된 실험은 상사법칙에 의해 다음 표와 같이 환산하여 실험결과를 분석할 수 있다.

표 3.6.3 실제조건을 환산한 실험 결과

번호	실험체	암반까지의 깊이	지반 표고	말뚝의 묻힘비율	가력 최대하중	변위
1	H 형강	7.2 m	지표면	100%	5,750 kN	41 mm
2	OCFT 기둥	7.2 m	지표면	100%	5,776 kN	38 mm
3	H 형강	7.2 m	지표면에서 3.6m 이하	50%	5,974 kN	36 mm
4	OCFT 기둥	7.2 m	지표면에서 3.6m 이하	50%	5,935 kN	38 mm

H형강 말뚝기초가 지표면으로부터 7.2m 깊이에 선단지지 되고, 지반의 표고가 지표면이어서 말뚝이 완전히 묻힌 경우에 대한 실험결과는 다음과 같다. 8851 kN이 가력되었을 때, 말뚝은 약 51 mm 변형이 발생하였으며, 이때 말뚝기초는 탄성적으로 거동하였다.

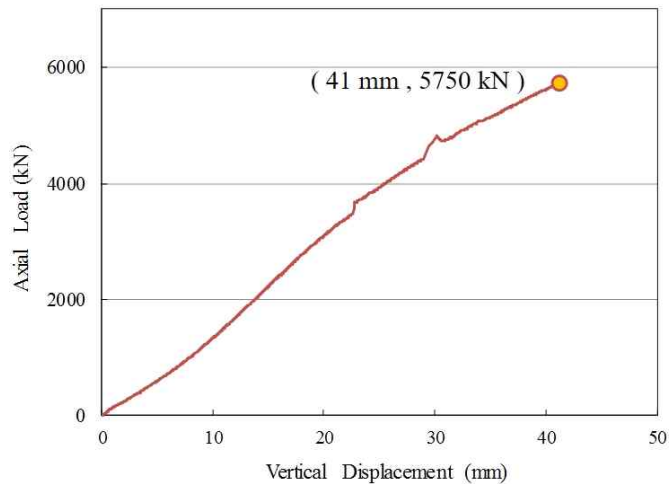


그림 3.6.12 완전히 묻힌 H형강 말뚝의 하중-변위 곡선

OCFT 말뚝기초가 지표면으로부터 7.2 m 깊이에 선단지지 되고, 지반의 표고가 지표면이어서 말뚝이 완전히 묻힌 경우에 대한 실험결과는 다음과 같다. 5776 kN이 가력되었을 때, 말뚝은 약 38 mm 변형이 발생하였으며, 이때 말뚝기초는 탄성적으로 거동하였다.

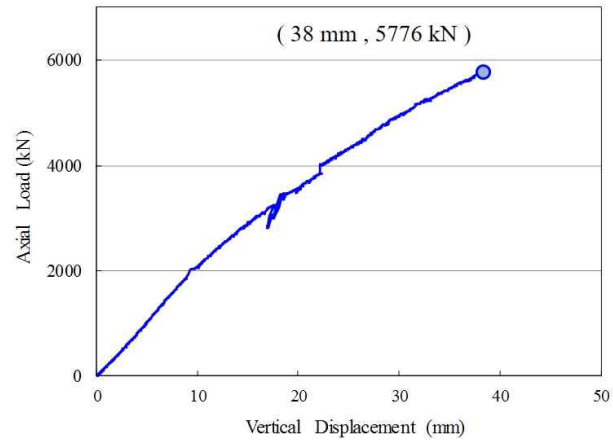


그림 3.6.13 완전히 묻힌 OCFT 말뚝의
하중-변위 곡선

H형강 말뚝기초가 지표면으로부터 7.2 m 깊이에 선단지지 되고, 지반의 표고가 지표면에서 3.6 m 이하로서 말뚝이 지반에 1/2만 묻힌 경우에 대한 실험결과는 다음과 같다. 5974 kN이 가력되었을 때, 말뚝은 약 36 mm 변형이 발생하였으며, 이때 말뚝기초는 탄성적으로 거동하였다.

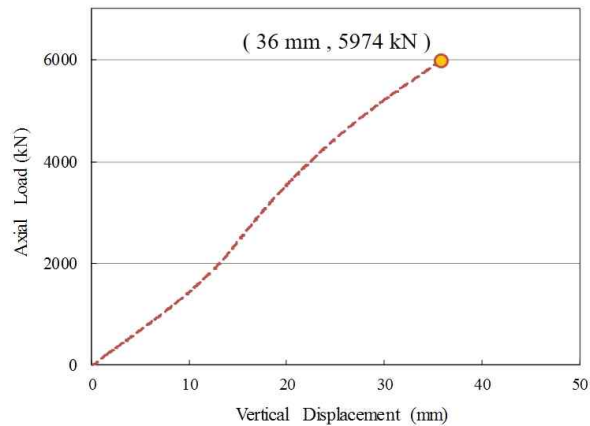


그림 3.6.14 1/2 묻힌 H형강 말뚝의
하중-변위 곡선

OCFT 말뚝기초가 지표면으로부터 7.2 m 깊이에 선단지지 되고, 지반의 표고가 지표면에서 3.6 m 이하로서 말뚝이 지반에 1/2만 묻힌 경우에 대한 실험결과는 다음과 같다. 5935 kN이 가력되었을 때, 말뚝은 약 38 mm 변형이 발생하였으며, 이때 말뚝기초는 탄성적으로 거동하였다.

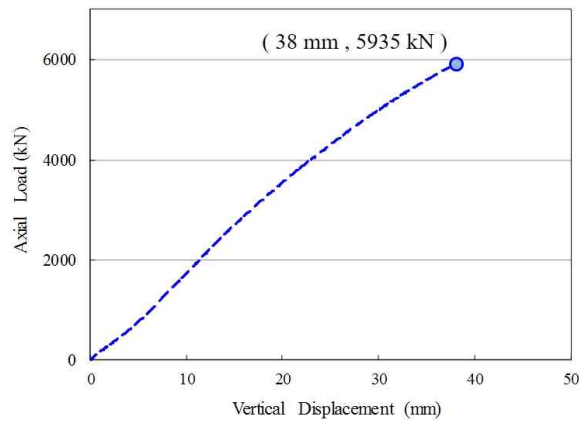


그림 3.6.15 1/2 문헌 OCFT 말뚝의
하중-변위 곡선

● 실험 후 풍화암의 형상

본 연구에서 개발한 OCFT 기둥이 말뚝기초로서 사용될 수 있는지 면밀히 관찰하기 위하여 하중재하 실험 종료후, 말뚝기초와 풍화암 사이의 변형을 관찰하였다. 다음과 같이 실험후 토사를 걷어내고, H형강 말뚝 하부와 OCFT 말뚝 하부 풍화암을 관찰한 결과, 3.5 MPa로 조성된 풍화암은 600 x 600 mm OCFT 기둥의 설계강도의 45%도 안정적으로 지지할 수 있는 것으로 판단된다.



토사를 걷어냄



H형강 말뚝 하부



OCFT 말뚝 하부



OCFT 말뚝 하부 변형

그림 3.6.16 실험 후 풍화암의 형상

6. OCFT 기초실험에 대한 소결

- 본 과업에서는 시공성 및 경제성 측면에서 장점을 갖는 OCFT 기둥을 Top-Down 공사에 사업화하기 위하여 원심모형실험 장비를 활용하여 구조적 안전성을 검증하였다. 즉, 말뚝으로 시공된 OCFT 기둥의 시공하중에 대한 지지가능여부와 토사가 굴토되었을 경우 말뚝의 좌굴안전성 등을 관찰하기 위하여 압축강도에 대한 실험을 수행하였다. 이에 대하여 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 원심모형실험을 위하여 상사법칙에 맞게 실제 가정된 단면의 1/12 축소시험체를 설계 및 제작하였다.
- 2) 말뚝기초가 지반에 완전히 묻힌 실험체의 경우, 약 13000 kN의 설계강도를 갖는 H형 강과 OCFT 기둥단면에 약 45%의 시공하중을 재하한 결과 두 실험체 모두 탄성상태에서 거동하였다.
- 3) 말뚝기초가 지반에 1/2만 묻힌 실험체의 경우, 좌굴이나 구조적 불안전성이 발견되지 않고, 완전히 묻힌 실험체와 동일한 내력이 계측되었다.
- 4) 하중재하실험 종료 후, 풍화암과 말뚝하부를 관찰한 결과 풍화암이 손상되지 않았으며, 이로부터 3.5 MPa로 조성된 풍화암은 600 x 600 mm OCFT 기둥의 설계강도의 45%도 안정적으로 지지할 수 있는 것으로 판단된다.

제7절. OCFT기둥 경제성 평가

- OCFT공법의 경제성 평가는 사단법인 한양경제연구원에 원가계산서 작성의뢰를 통하여 진행하였다. OCFT공법 적용실적 중 하나인 보령메디앙스 공사를 기준으로, 해당 공사에 OCFT기둥을 적용한 경우와 일반 CFT기둥을 적용한 경우를 비교하여 경제성 분석을 진행하였다.

결과적으로, 대상 공사프로젝트에 각각의 공법을 적용한 경우, OCFT공법이 일반 CFT공법보다 약 5% 수준의 원가절감을 보여주었다.

하기 표는 각 공법의 산출원가를 비교한 자료이며, 자세한 내용은 본 최종보고서 부록에 나타내었다.

표 3.7.1 OCFT 원가계산 총괄표

단위 : 원

No.	구 분	단 위	수 량	산 출 원 가	산 출 원 가 (VAT 포함)	비 고
1.	OCFT 공법	식	1	1,033,387,000	1,136,726,000	95.41%
2.	CFT 공법	식	1	1,083,074,000	1,191,381,000	100.00%

제8절. OCFT기둥 사업화 실적

- 본 OCFT 공법이 실제 적용된 실적은 현재까지 총 4건이며, 그 중 2건은 기둥제작 및 시공, 나머지 2건은 기둥제작 실적이다. 하기의 표는 각각의 적용실적 정보를 나타내며, 그림은 증빙서류(를 나타낸다.

표 3.8.1 OCFT 공법 사업화 실적

No.	발주기관명	시공업체명	적용현장명	공사시작일	공사종료일	비고
1	SK건설	센코어테크	이천 하이닉스 자재창고 공사	20140725	20151130	제작/시공
2	S&S INC	(주)웰크론한텍	보령메디앙스 물류창고 공사	20150401	20151130	제작납품
3	삼송모터스	유정종합건설	삼송자동차 정비소 공사	20150610	20150630	제작납품
4	LG서브윈	센코어테크	LG생명화학 공장 공사	20160525	20160831	제작/시공

건설공사 기성실적증명(신청)서					처리기간
					즉 시
신청인	① 상 호	(주)센코어테크		② 대표자성명	이승환
	③ 본사 소재지	서울 영등포구 당산동6가			
공 사 내 역					
④ 일련번호		20160122_2051_0		⑤ 공사업종	강구조물공사업
⑥ 공 사 명		M14 PH-1 Project - PC 제작 및 설치공사5			
⑦ 현 장 소 재 지 (번지까지 기재)		경기도 이천시 부발읍 경충대로 2091			
⑧ 계약 연월	14 년 07 월	⑨ 착공 연월	14 년 07 월	⑩ 준공 연월	15 년 11 월
⑪ 총 계약금액		⑫ 당년도 계약액 또는 이월금액		⑬ 당년도 기성액	
⑭ 당년도 기성지급액					
⑮ 기 타 (공사의 규모, 공법, 공동 도급 내역 등)					
2015 년도 중 위와 같이 건설공사 기성실적이 있음을 증명하여 주시기 바랍니다.					
2016년 01월 21일 신청인(대표자) 이승환 에스케이건설(주) 					
위 사실을 증명합니다.					
2016년 01월 25일					
발주자(또는 원도급자) 확인 상 호 : 에스케이건설(주) 법인(주민) 등록번호 : 110111-0038805 대 표 자 성 명 : 조기행 주 소 : 서울특별시 종로구 인사동7길 32 전 화 번 호 : (02) 3700 - 7114					

그림 3.8.1 이천 하이닉스 자재창고 공사 증빙서류

건설공사기성실적증명(신청)서

처리기간

즉 시

신청인	(1)상 호 (주)센코어테크	(2)대표자	이승환
	(3)영업소재지 서울특별시 영등포구 버드나루로19길 6 센스빌딩 1층		
공사내역 ()			
(5)공사명	생명과학 오송공장 신축(3단계)(일반철골/2)	(6)-2 총공사금액	해당사항 없음
(6)-1 현장소재지 (번지까지 기재)	충청북도 청주시 흥덕구 오송생명1로 151LG생명과학	(8) 인허가기관	인허가연월일
(7)공종 (건설법시행규칙제25조)	해당사항 없음		
(9)계약연월일	2016-05-24	(10)착공연월일	2016-05-25
		(11)준공(예정)연월일	2016-08-31
(4)업종 및 등록번호	(12)당년도계약액또는이월액	(14)당년도 기성액	(16)당년도기성지금액
	(13)총계약금액	(15)전년도까지 누계기성액	(17)전년도까지 누계지금액
	백 십 억 천 백 십 만 천 백 십 억 천 백 십 만 천 백 십 억 천 백 십 만 천	백 십 억 천 백 십 만 천 백 십 억 천 백 십 만 천 백 십 억 천 백 십 만 천	백 십 억 천 백 십 만 천 백 십 억 천 백 십 만 천
	3 2 3 5 5 4	3 2 3 5 5 4	3 2 3 5 5 4
	3 2 3 5 5 4	0	0
(18)기 타 (공사의규모·공법·공동도급내역등)			
2016년도중 위와 같이 건설공사기성실적이 있음을 증명하여 주시기 바랍니다. (※ 단순용역은 제외)			
수수료 없음			
2017년 1월 16일			
신청인		(주)센코어테크	
		(주)서브원 귀하	

위 사실을 증명합니다.

2017년 1월 18일

발주자(수급인)

상 호 (주)서브원

·법인(주민)등록(고유)번호 110111-2411520

·대표자 성명 이규홍

서명완료

·주 소 서울 종로구 신문로2가 92

·전화번호 02-6924-5817

※ 발급번호 : CM20161000671500217

※ 본 문서는 전자로 발급되었으며, <http://www.spms.co.kr>에서 발급번호로 확인 가능합니다.

그림 3.8.2 LG생명화학공장 신축공사 증빙서류

2015년도 건설공사기성실적증명(신청)서

처리기관

즉시

증명서 번호 : 2015-155080-201501292-2025788

신청인	① 상 호	동부제철(주)	② 대표자	김청수		
	③ 영업소소재지	서울특별시 중구 추암로 98 STX남산타워 (남대문로5가) 21층	④ 압중 및 등록번호	강구조물공사업 (94-서울-21-64)		
(단위 : 천원)						
공 사 내 역						
⑤ 공 사 명	예산 보령메디앙스 물류센터 신축공사 철골공사					
⑥-1 현장소재지 (번지까지 기재)	충청남도 예산군 용봉면 중곡리533	⑥-2 총공사금액	3,285,920			
⑦ 공 종 (건설산업기본법 시행규칙 제25조)	강구조물공사업	⑧ 인허가기관	인허가년월			
⑨ 계약 연월일	⑩ 착공 연월일	⑪ 준공(예정) 연월일	⑫ 총계약금액	⑬ 전년까지누계기성	⑭ 당년이월계약액	⑮ 당년기성금액
2015.04.01	2015.04.01	2015.11.30	3,285,920	0	3,285,920	3,285,920
가 타						
(공사의 규모,공법,공동도급내역등)						
2015 년도 중 위와 같이 건설공사기성실적이 있음을 증명하여 주시기 바랍니다.						수 수 로 없 음
2016년 02월 04일 신청인 동부제철(주) (서명 또는 날인)						
계룡건설산업(주) 귀하						

위 사실을 증명합니다.

2016년 02월 04일

[발주자(수급인)]

상호 및 대표자 : 계룡건설산업(주)
 법인(주민)등록번호 : 160111-0003121
 주소 및 전화번호 : 대전광역시 서구 안방동 문정로48번길 48 070-4470-7456
 사업자등록번호 : 314-81-07954

이승찬, 한승



실 적 확 인

본 증명서는 당사 협력업체포탈사이트를 통하여 진위여부의 조회가 가능합니다.
<http://eps.kyeryong.net>

그림 3.8.3 보령 메디앙스 물류창고 납품공사 증빙서류

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

제1절. 목표 달성도

1. 연구개발 수행 진도율

구 분 개발내용					연 구 개 발 기 간																								진도
					1차년도												2차년도												
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
핵심성과	단위성과	질적 상과지표	세부추진내용 (연구수행 Activity)	Activity별 산출물																									
A	A-1	A-1-①	목업 실험체 제작	목업 실험결과 보고서																									100%
A	A-1	A-1-②	내진성능 실험	논문																									100%
B	B-1	B-1-①	내화실험	인증서																									80%
C	C-1	C-1-①	압축실험	공인 성적서																									100%
C	C-1	C-1-②	휨 실험	공인 성적서																									100%
D	D-1	D-1-①	기초공법 실험	논문																									100%
E	E-1	E-1-①	신기술 인증	인증서																									50%
총 진도율																													90%

 당초계획
 실 적

2. 연구개발 목표의 달성도(성과점검기준표)

구분	핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		최종 성과점검기준					달성도 (%)	양적 성과목표	최종 성과	
					질적 성과지표	목표치	측정방법	검증방법	가중치				
총괄	A	내진성능	A-1	목업 실험체 제작	①	시료수	1	검수	보고서 및 동영상	10	100	논문: <u>1</u> 건	논문: <u>1</u> 건
			A-2	접합부 실험 수행	①	시료수	6	검수	논문	20	100	결과보고서: <u>1</u> 건	결과보고서: <u>1</u> 건
	B	내화성능	B-1	내화실험 수행	①	시료수	2 (KS F 2257 기준 2시간 내화)	검수	인정서	15	80	내화인정서: <u>1</u> 건	내화인정서: <u>진행중</u>
	C	힘-압축성능	C-1	압축실험 수행	①	시료수	8	검수	공인성적 서	10	100	공인성적서: <u>2</u> 건	공인성적서: <u>2</u> 건
			C-2	힘 실험 수행	②	시료수	5	검수	공인성적 서	10	100		
	D	기초공법	D-1	기초 공법 실험 수행	①	시료수	3	검수	논문	15	100	논문: <u>1</u> 건	논문: <u>1</u> 건
	E	신기술 인증	E-1	신기술 인증	①	인증서	1	검수	인증서	20	50	인증서: <u>1</u> 건	인증서: <u>진행중</u>
	계									100	90	논문: <u>2</u> 건 결과보고서: <u>1</u> 건 내화인정서: <u>1</u> 건 공인성적서: <u>2</u> 건 신기술인증: <u>1</u> 건	논문: <u>2</u> 건 결과보고서: <u>1</u> 건 내화인정서: <u>진행중</u> 공인성적서: <u>2</u> 건 신기술인증: <u>진행중</u>

제2절. 관련 분야 기여도

1. 기술적 효과

- 기존 합성기둥공법에서 기술적 문제가 되었던 기둥 단면에 따른 제한, 접합부 설계의 어려움, 안정성 문제 등을 해결하여 전반적인 단면 효율을 향상시켰다.
- 구체적인 기술적 효과는 다음과 같다.

1) 판폭두께비 제한 완화

아래 그림 4.1.1과 같이 기둥의 단면에서 모서리 부분을 접어 8각형으로 구성함으로써 판폭두께비의 제한을 대폭 완화시킬 수 있다.

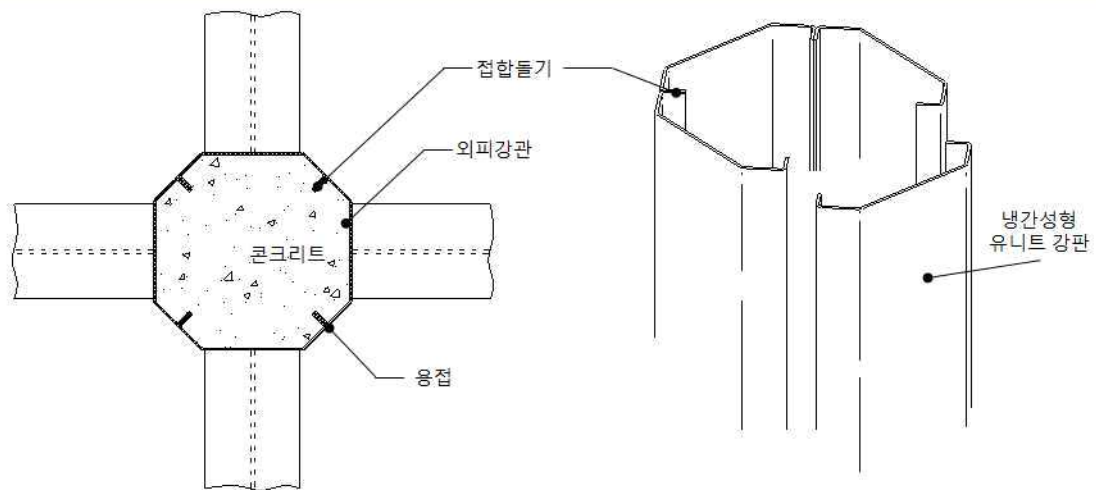


그림 4.1.1 OCFT의 단면 특성

$$b/t \leq 2.26 \sqrt{E/F_y} \quad (4.1.1)$$

여기서, b = 유닛 강관의 비지지 거리, t = 유닛 강관의 두께, E = 강재의 탄성계수, F_y = 강재의 항복 응력

위의 식에 대하여 건축용 강재 SM490($F_y = 325\text{MPa}$)을 적용할 경우 강재의 두께(t)에 따른 비지지 거리 제한값은 아래와 같다.

표 4.1.1 강재의 두께(t)에 따른 비지지 거리(b) 제한값

두께 (t)	폭 (b)
4.5 mm	255.4 mm
6.0 mm	340.6 mm
9.0 mm	510.8 mm
12 mm	681.6 mm

위 표 4.1.1에서 기둥의 폭이 500mm 이상이 되면 건축구조설계기준에 따라 내력과는 상관 없이 무조건 9mm 이상의 철판을 사용하여야 한다. 즉, 판폭두께로 인하여 기존 각형 CFT 기둥의 경우 두께를 불필요하게 증가시켜야 하므로 공사비 상승의 요인이 된다. 하지만 OCFT의 경우 아래 그림 4.1.2와 같이 단면상 모서리의 길이를 조절할 수 있어 판폭두께비에 유연하게 대응할 수 있으므로 강재량을 최적화할 수 있다.

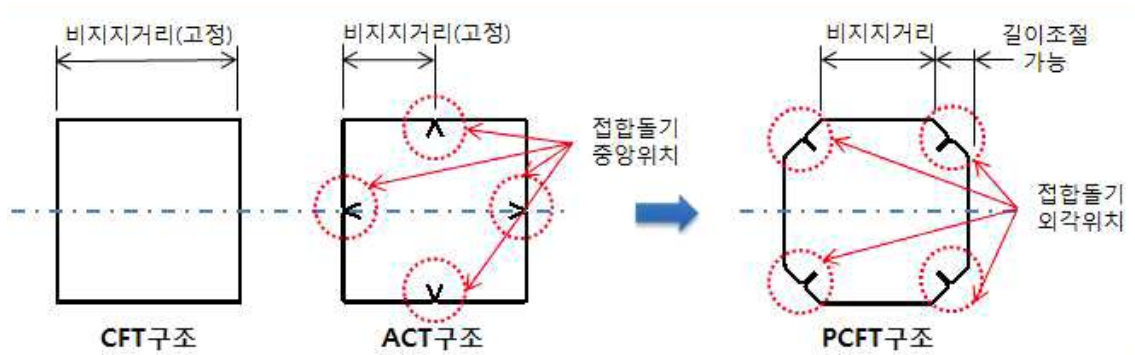


그림 4.1.2 OCFT의 비지지 거리

2) 접합 방식에 따른 다면 성능 및 제작 편의성

아래 그림 4.1.3에 나타난 바와 같이 OCFT에서 기둥의 접합돌기를 외곽부 모서리에 위치시킬 경우 기존의 각형 CFT 기둥이나 ACT 기둥보다 더 큰 단면성능 확보가 가능하다. 따라서 동일한 강재량을 사용하더라도 본 OCFT 기둥의 내력이 더 크다.

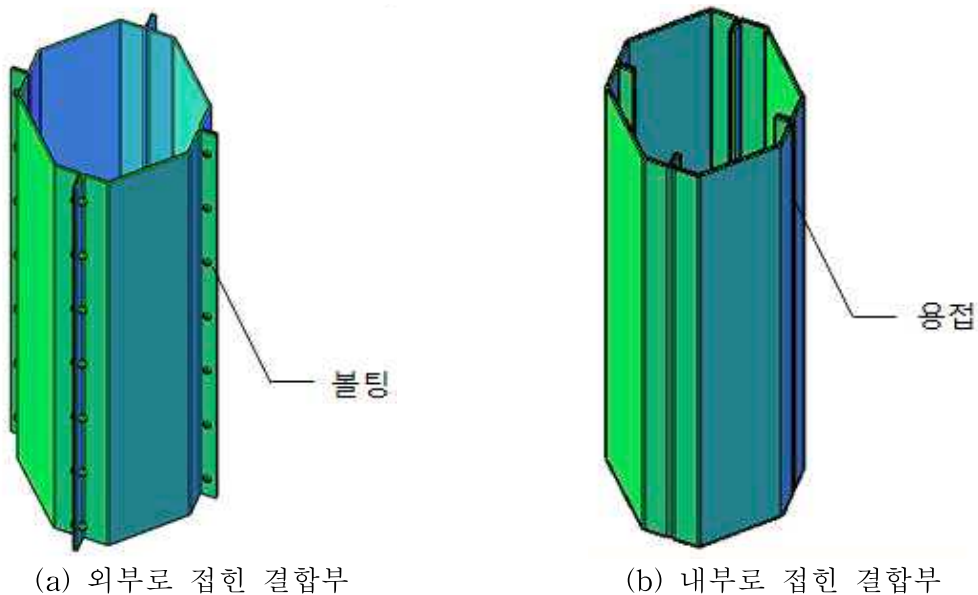


그림 4.1.3 OCFT 기둥의 유닛 강관 접합 방법

또한, OCFT는 아래 그림 4.1.4와 같이 2개 용접 라인을 동시에 수행할 수 있기 때문에 기존 ACT 기둥에 비해 제작성이 2배 향상된다.

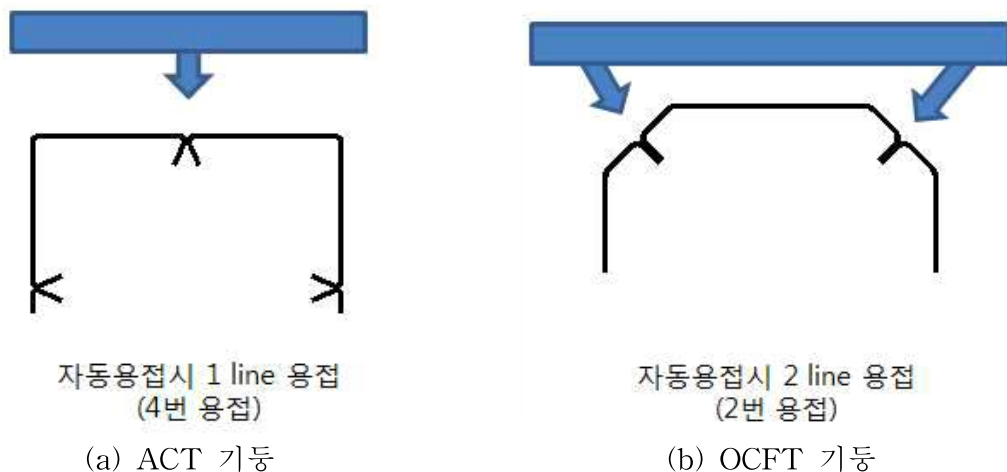


그림 4.1.4 OCFT 기둥의 제작 시 용접 방법

3) 강축·약축에 따른 단면 대응

현재 개발된 콘크리트 충전 강관 기둥은 단면 특성상 기둥의 모든 면의 두께를 동일하게 구성해야 하므로 강축과 약축에 따른 내력 변화를 줄 수 없다. 이에 반해 OCFT는 하나의 유니트 강관이 하나의 기둥면을 형성하므로, 기둥 각 면의 유니트 강관의 두께를 다르게 하여 강축과 약축에 따라 내력 변화에 대응할 수 있으므로 경제적인 설계가 가능하다.

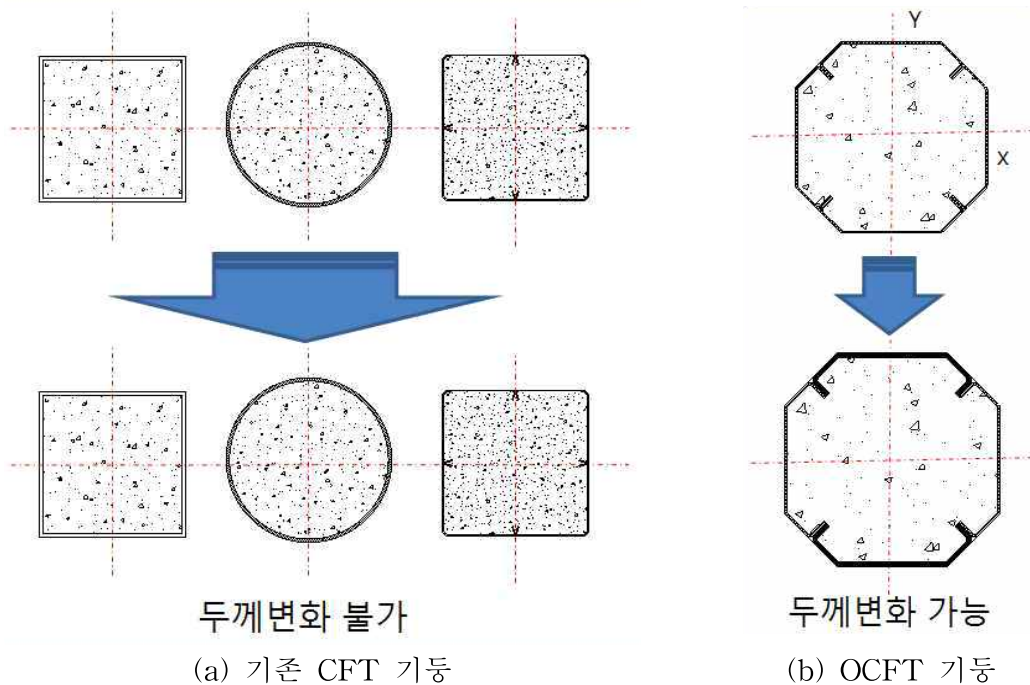
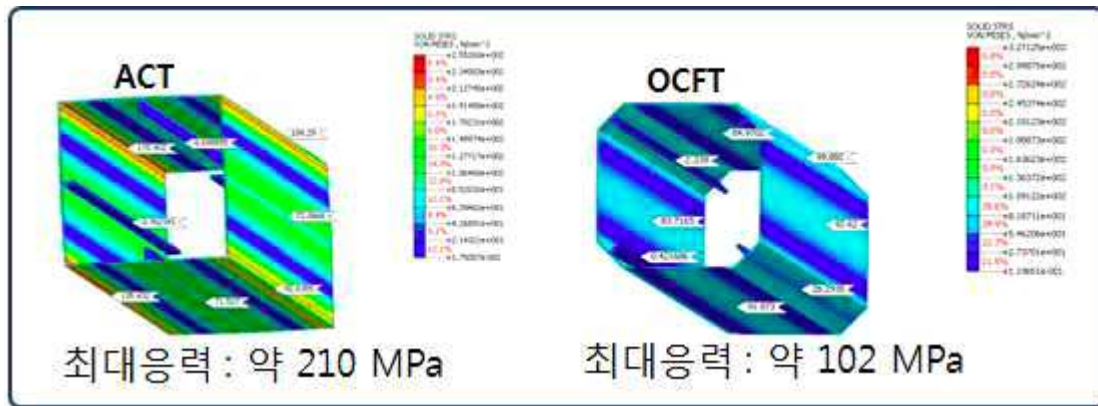


그림 4.1.5 강·약축에 따른 유니트 강관 두께

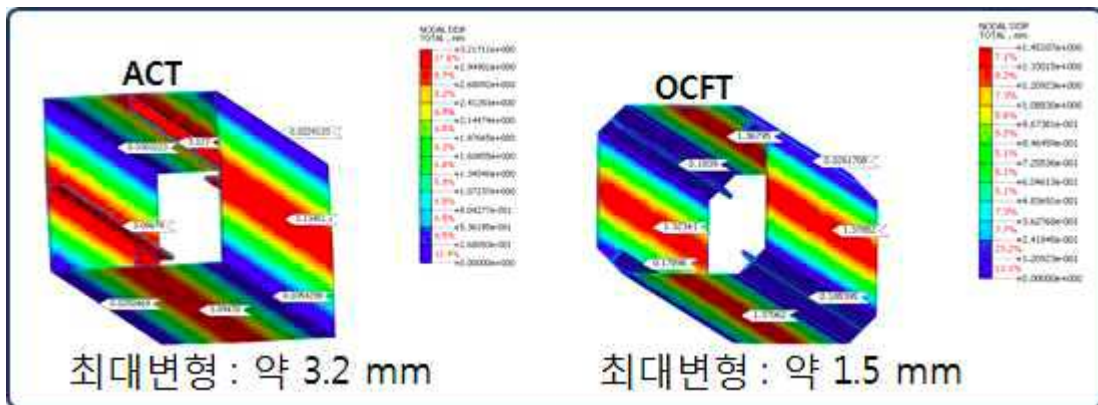
4) 콘크리트 측압 대응

OCFT 기둥의 단면 형태는 기존 콘크리트 충전 강관 기둥에서 문제가 되었던 콘크리트 측압에 의한 배부름 현상을 감소시킬 수 있다.

유한요소해석에 의하면 OCFT 기둥은 기존 각형 강관기둥 대비 작용하는 최대 응력이 약 51% 가량 감소하며, 변형 또한 약 53% 감소하는 것으로 나타났다. 즉, OCFT는 기둥의 형태가 원형에 가까워 강관의 강성이 향상되므로 기존 각형 기둥에 비해 콘크리트 측압에 대하여 더욱 효과적이고 안정성이 우수하다.



(a) 응력 비교



(b) 변형 비교

그림 4.1.6 ACT 기둥과 OCFT의 응력 및 변형 비교

5) 보 접합 용이성

기둥과 보와의 접합부에서 평탄부가 있는 팔각형의 OCFT 기둥이 원형 CFT 기둥이나 각형 CFT 기둥보다 접합이나 보강이 용이하다. 기존의 각형 CFT 기둥은 보와의 접합 시 보에서 전달되는 응력에 의하여 배부름 현상이 나타나며, 이를 보완하기 위하여 관통에 의한 내다이어프램이나 복잡한 형상의 외다이어프램이 필요하다. 하지만 OCFT는 보 접합 위치에 유니트 강판의 접합부가 간섭되지 않아 내다이어프램도 쉽게 설치 가능하고 보의 응력이 기둥 모서리의 경사진 면을 통하여 전달되므로 응력 전달이 원활하다. 또한, 접합부에 큰 하중이 작용하여 보강이 필요한 경우 아래 그림 4.1.7과 같이 기둥 모서리를 따라 외다이어프램을 형성할 수 있으며 다이어프램의 형상이 간단하고 그 폭을 최소화할 수 있다.

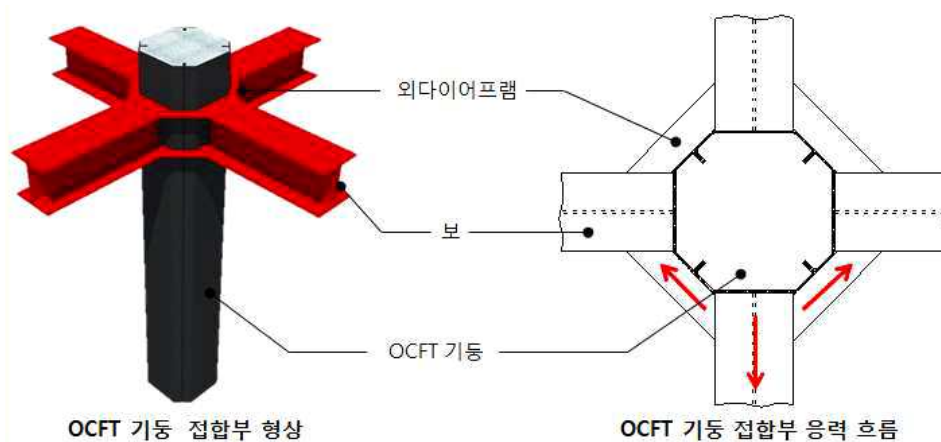


그림 4.1.7 OCFT 기둥의 접합부 및 다이어프램 형상과 응력 흐름도

6) 역타 공법 활용

OCFT 기둥을 역타(Top Down) 공법에서 말뚝으로 활용할 경우, 사각 단면을 가진 기존 합성기둥보다 모서리의 간섭이 없으므로 천공홀의 직경을 줄일 수 있다.

아래 그림 4.1.8과 같이 500mm 단면의 사각 단면을 가진 기존 각형 합성기둥의 경우에는 직경 800mm의 천공홀이 필요한 반면, 500mm 단면의 OCFT 기둥을 근입하기 위해서는 직경 700mm의 천공홀이 필요하여 천공장비의 비용 및 천공 시간을 크게 절감할 수 있다.

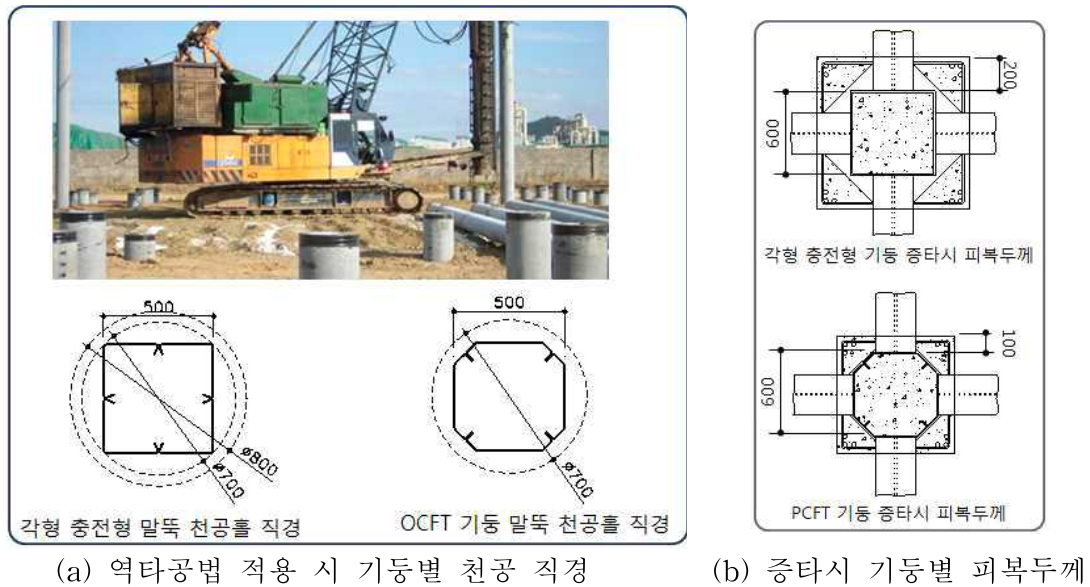


그림 4.1.8 OCFT의 단면 형상에 따른 효율성

뿐만 아니라, 보를 설치한 후 증타할 경우 위 그림 4.1.8의 (b)와 같이 각형 단면 기둥과는 다르게 OCFT 기둥은 외다이어프램의 간섭이 없고 철근 배근과 콘크리트 타설할 구간이 자동적으로 생성되는 장점이 있다. 따라서 600mm 단면의 기둥을 적용했을 경우, 각형 단면 기둥은 200mm의 피복 두께가 요구되는 반면 OCFT 기둥은 100mm의 피복두께만이 필요하다.

2. 경제적 효과

- OCFT 기둥의 경제적인 효과를 설계, 시공 그리고 유지관리 측면에서 살펴보면 다음과 같다.

1) 설계·시공비 절감 효과

OCFT 기둥의 적용을 통한 원가 절감 효과를 분석하기 위해 종래 각형 CFT 공법과 OCFT 공법 적용 시 기둥공사에 대한 공사비를 분석하였다.

CFT 기둥과 OCFT 기둥 적용 시 원가를 분석한 집계표는 아래 표 4.1.2와 표 4.1.3과 같다.

표 4.1.2 CFT 공법의 집계표

구분		재료비	노무비	경비	계
CFT기둥 공사	공장제작	420,511,119	252,342,461	11,969,054	684,822,635
	현장설치	17,811,041	85,624,909	21,981,686	125,417,635
	도장공사	3,975,259	4,698,232		8,673,492
콘크리트공사		4,959,360	159,701		5,119,061
계		447,256,779	342,825,303	33,950,740	824,032,823

표 4.1.3 OCFT 공법의 집계표

구분		재료비	노무비	경비	계
OCFT기 둥 공사	공장제작	400,684,028	240,325,366	11,399,063	652,408,456
	현장설치	17,285,685	81,642,693	20,961,394	119,889,772
	도장공사	3,966,447	4,687,817		8,654,264
콘크리트공사		4,959,360	159,701		5,119,061
계		426,895,519	326,815,578	32,360,457	786,071,554

위 집계표에 의한 공사비에 간접노무비, 일반관리비 및 이윤 등을 포함한 원가 비교는 다음 표 4.1.4와 같다.

표 4.1.4 OCFT 공법과 CFT 공법의 원가 대비

OCFT 공법(A)	CFT공법(B)	증감비(A/B)
1,136,726,000	1,191,381,000	95.41%

※ 경제성 분석보고서의 원가계산서 참조

분석 결과, 종래 CFT 기둥에 비해 강관 제작 비용이 크게 절감되어 기존 CFT 공법 대비 약 5%의 원가 절감 효과가 있는 것으로 분석되었다.

뿐만 아니라 기존 SRC 기둥이나 ACT 기둥과 대비하여도 경제성이 큰 것으로 평가되었다.

평가는 기둥 8 m 기준으로 12000 kN의 압축력과 200 kN·m의 휨내력을 요구하는 설계조건에서 각각의 단면을 선정하였다. 압축성능은 모든 기둥이 비슷한 내력을 발휘하여 요구 내력을 만족하였으나 휨성능에서는 SRC 기둥의 내력이 부족하여 철골량과 단면 크기가 증가하였다. 그 결과 OCFT 기둥이 가장 경제적인 것으로 평가되었으며 OCFT 기둥 대비 SRC, ACT기둥이 각각 143%, 110%의 경제성으로 나타났다. 이는 OCFT 기둥의 뛰어난 단면성능으로 단면크기를 줄일 수 있고, 이에 따라 철골량과 콘크리트량이 감소되기 때문이다. 또한, 단면크기가 줄어든 OCFT 기둥에서 압축력이 부족할 경우, 고강도 콘크리트를 사용하여 해결할 수 있다.

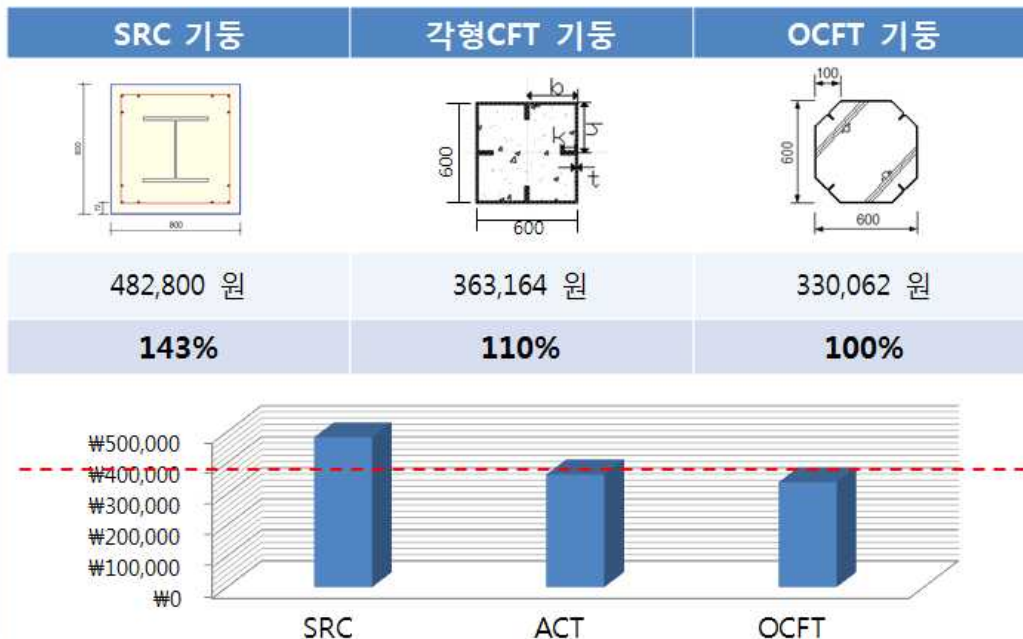


그림 4.1.9 OCFT 기둥과 기존 합성기둥의 경제성 평가

1) 유지관리비용 절감 효과

OCFT 기둥은 기둥 시공을 위한 별도의 가설자재가 필요 없으므로 가설자재 비용과 가설자재의 설치 및 해체 시 인건비가 절감되고, 거푸집 사용으로 인한 폐기물처리비 역시 절감된다. 또한, 종래 RC 기둥 또는 SRC 기둥에서와 같이 콘크리트 타설 후 거푸집 조인트부 또는 미충진부 손보기 작업이 불필요하다. 뿐만 아니라 현장 공정 단순화에 따른 안전 관리 포인트 감소, 자재 양중 감소에 따른 물류동선관리 포인트 감소, 공장 제작에 따른 환경관리 포인트 감소 등의 장점이 있다.

- 공기단축 효과 측면에서, 기존 합성기둥 공법은 대부분 현장에서 철근배근을 한 후 거푸집 공사를 하여 콘크리트 타설 후 다음 층의 기둥과 이어가며 시공한다. 하지만 OCFT 기둥은 철근배근과 거푸집 작업의 삭제 등 현장작업이 최소화되고 별도의 거푸집 공사가 없으며 2개층 이상을 한번에 설치 가능하다. 단, OCFT 기둥은 철골이 외부에 노출되어 내화피복 공사를 포함되어야 한다. 그럼에도 불구하고 2개층 공사 시 RC 기둥과 SRC 기둥 대비 각각 약 7일과 3일 공기단축이 가능하다. 이는 전체공사 기간을 고려할 때 큰 경제효과를 기대할 수 있다.
- 토공사에서 경제적인 효과를 살펴보면, 합성기둥이 적용된 현장에서 파일기초를 기둥과 동일한 단면으로 사용하고자 하는 경우, 충전형 각형강관 합성기둥에 요구되는 천공구멍의 직경대비 약 79% 수준(600mm x 600mm기둥, 천공여유 폭 50mm 기준)으로 시공이 가능하여 토공사 비용을 절감할 수 있다.

3. 정책적 효과

- OCFT 기둥은 건축폐자재 감소를 통해 최근 건설산업의 핵심가치이자 정책적 핵심가치 중 하나인 녹색성장에 기여 가능하다.
- OCFT 기둥은 선조립과 거푸집설치의 생략에 따른 안정성 향상으로 안전사고에 의한 인명피해를 줄이고자 하는 정부 정책 만족 가능하다.

제5장. 연구개발성과의 활용 계획

제1절. 연구성과 활용 계획

- 본 연구개발의 주체이자 주관기관인 (주)센벡스는 다수의 합성구조공법을 개발하여 2001년 이래 300건 이상의 건설 프로젝트에 성공적으로 적용한 실적이 있고, 본 연구의 OCFT는 이미 건설현장에 성공적으로 적용중이기 때문에 본 개발 기술은 기존 합성구조공법이 적용되는 건설 현장들을 중심으로 즉시 대체 적용할 수 있을 뿐만 아니라 고층고, 장스팬, 고층건물, 반도체 공장 등의 건물, 증축시공, 그리고 역타공법에 활용 계획이다.
- 현재 다수의 합성골조들은 경제적 장점에도 불구하고 국제적으로 권위 있는 내진성능 인증사례가 적어 강진대 및 중진대 국가 건설시장에 적용이 어려웠으나, 본 연구개발을 통해 OCFT기둥이 중간모멘트골조(IMF) 이상의 성능을 확보하였음을 입증했고 새로운 내진접합 상세를 개발 및 성능을 입증함에 따라 그러한 해외시장 진출에 활용 계획이다.

제2절. 연구성과 향후 활용방안

1. 제품의 경쟁력 확보



그림 5.1.1 센엔지니어링 그룹의 사업화 과정

- 본 연구개발의 주체인 (주)센벡스가 갖는 강점은 센벡스에서 개발한 혁신적인 신 건설공법이 최종 건설현장 적용에 이르기까지 필요한 다양한 사업화 과정을 그림 5.1.1과 같이 센엔지니어링 그룹 내의 계열사들이 협력하여 추진할 수 있다는 점이다.

➔ 발주자 이윤 극대화

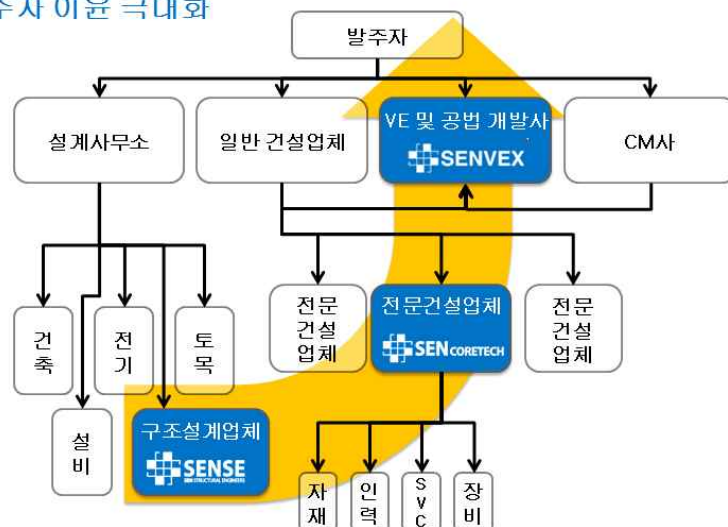


그림 5.1.2 센엔지니어링 그룹의 조직도

- 그림 5.1.2에 나타난 바와 같이 (주)센벡스에서 개발된 신공법은 (주)센구조연구소가 건축구조설계에 반영하고, 철골제작 공장인 (주)센코어테크에서 제작하며, 마케팅 및 건설 현장 적용은 센엔지니어링그룹 차원에서 공동으로 담당한다.
- 센엔지니어링 그룹은 (주)센벡스를 중심으로 신공법인 TSC 합성보 공법, 철근 선조립 RC 공법, 거푸집 선부착 철골 철근 선조립 RC 공법, 중공형 데크슬래브 OMEGA DECK, 기초단보강공법 등 다수의 공법을 개발하였고, 2001년 이래 250여 건설 프로젝트에 성공적으로 적용한 실적을 갖고 있다. 따라서 본 개발기술은 개발 즉시 국내 수많은 건설현장에 적용 가능하며 특히 (주)센벡스가 갖고 있는 기타 신공법들과 복합적용이 가능하기 때문에 타공법 대비 비용절감과 공사기간 단축에 대한 경쟁력이 더욱 부각되어 신축 및 보강 공사 현장에서 본 개발기술의 적용 가능성은 매우 크다.
- 연구개발의 결과로 구조재 및 영구 거푸집 성능 확보, OCFT 기둥의 압축 성능과 접합부의 내진 및 휨 성능 확보, 내화성능 확보, 기초부 성능 확보, 공법적용을 위한 사용자매뉴얼 마련 등을 실현하여 공법의 적용성이 보다 확보되었으며, 3차례 시공실적을 확보하였다.

2. 판매계획 및 전략

● 국내 건설시장 전망

인력 및 자재수급에 비해 자금조달 상황의 어려움은 거설경기 회복에 저해요소로 작용하고 있으며, 경제성, 시공성이 우수한 경쟁력 있는 신공법의 필요성이 점차적으로 증가하는 상황이다. 또한, 신축 건설시장이 축소되는 환경 가운데서 신기술, 마케팅, 설계/엔지니어링을 기반으로 적극적인 시장 창출형 영업이 요구되고 있다.

● 판매 전략

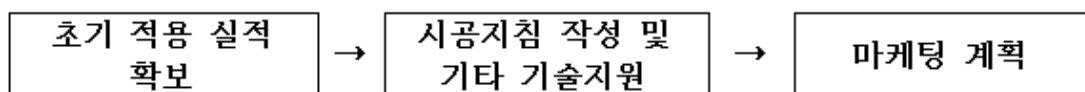


그림 5.1.3 판매계획 및 전략 단계

초기 적용실적 확보 단계에서는 자체적으로 구조설계를 수행하고 신속한 피드백으로 초기 fine-tuning 단계를 최소한으로 단축하고 시장 신뢰 구축을 위한 초기 적용실적 확보 및 업계 내 인지도 확산을 위한 노력을 한다.

시공지침 작성 및 기술 지원 단계에서는 기존 구조부재보다 우수한 설계 및 시공 편의성 확보를 목표로, 업계 표준 CAD/BIM 프로그램에서 편리하게 사용할 수 있도록 표준 object와 template를 개발 배포한다. 또한, 구조설계사무소의 집중적 기술지원으로 자체적으로 기술 적용 설계 능력을 갖추도록 한다.

● 판매 계획

마케팅 계획

- 지면을 통한 광고 ; 건설경제신문, 물가정보 가격등록 등
- 기술력 홍보 ; 관련학회 기사 투고 및 학회 홍보
- 건설사 대상 기술 세미나 실시 및 설계부서 방문 설명

- 영업팀 인력충원 및 설계사무소 홍보
- 기존 PHC파일 제작 업체인 아이에스동서(CRC 생산 협력업체) 와 자매기업인 센코어테크(CRC 철근망 생산 협력업체)의 영업망을 최대한 활용
- 센코어테크의 MOU협약 추진중

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

- C.-C. Chen., C.-C. Lin., and C.-L. Tsai (2004)의 Evaluation of reinforced between steel beams and box columns

This paper focuses on the experimental and analytical behavior of concrete filled tubular (CFT) column to H-beam welded moment connections with external T-stiffeners. Six full-scale specimens were tested cyclically. All specimens were designed and manufactured using the following main test parameters: (a) the strength ratio of the horizontal stiffener to the beam flange; and (b) the strength ratio of the vertical stiffener to the beam flange. Three types of failure modes, horizontal stiffeners failure, vertical stiffener failure and beam failure, were obtained. The connections reinforced with T-stiffeners having 130% of strength to beam flanges showed stable hysteretic behavior and good ductility. The ABAQUS finite element package was used to simulate the experimental behavior. The results obtained from the finite element were evaluated by comparing the load-displacement responses and the potential of failure modes.

- Shanmugan, N.E., Ting, L.C., and Lee, S.L. (1991)의 Behavior of I-beam to box-column connections stiffened externally and subjected to fluctuating loads

This paper is concerned with an experimental investigation into the cyclic behaviour of seven full size I-beam to box-column connections. Two of the specimens were stiffened internally using continuity plates while the rest were stiffened externally with T- or angle-stiffeners. They were subjected to cyclic loading and tested to failure. Hysteretic curves obtained experimentally were found to be stable in all cases, and the connections exhibited good ductility values. Different failure modes were observed; some specimens failed by fracture of welds at the joints while most failed by excessive yielding of stiffeners followed by buckling of either the column webs or beam flanges at the joint. External T stiffeners were found to perform better than external angle stiffeners. They were also marginally better than those connections with internal continuity plates.

- Beutel, J., Thambiratnam, D., and Perera, N. (2002)의 Cyclic behavior of concrete filled steel tubular column to steel beam connections

An experimental investigation into the behaviour of composite column-to-beam connections using ten large-scale connections has been conducted, four under monotonic loading and six under cyclic loading. This paper presents the details and results of the six cyclic tests. Details and results from the monotonic tests are reported in a companion paper. All connections consisted of a concrete-filled steel tube (CFST) column (circular), a compact universal beam section and a shop fabricated connection stub. Monotonic testing was first carried out and the results, were used to conduct the cyclic tests. Each specimen tested cyclically had the same general form, consisting of a direct connection of the beam to the tube wall (using flange connection plates, and web cleat plates) and reinforcing bars welded to the top and bottom flanges, embedded into the concrete core. It was found that provided the connection to the face of the column had the capacity to force the hinge into the beam itself, the specimen behaved in a very stable fashion, and achieved ductility levels which were only limited by the beam and the nature of the test itself.

- Mirghaderi, S.R., Torabian, S., and Keshavarzi, F. (2010) I-beam to box-column connection by a vertical plate passing through the column

Box-columns are convenient structural members for moment resisting frames, but providing a proper beam to box-column connection is still under investigation due to the closed shape of box-columns and difficult access to the column inside for developing a reliable load path. To resolve the problem, a new easy-to-fabricate moment connection is proposed for connecting I-beams to box-columns. The connection consists of a vertical plate passing through the column and welded to the column flanges, and beams connected to the plate named the Through Plate. In this paper, the force transfer mechanism of the connection is described and a design method to determine the dimensions of the through plate and other pertinent parts is proposed. An experimental program consisting of two relatively identical cyclically loaded specimens was conducted to evaluate the seismic performance of the connection. The results showed that the specimens reached at least 0.06 rad total story drift before experiencing strength degradation. Moreover, the connection behavior for a range of parameters including member sizes and through plate dimensions were investigated by a verified finite element model to examine the proposed basic design criteria for the connection.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		○

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

해당사항 없음

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

- 실험 진행 시 연구원들의 안전을 위하여 실험에 참가하는 전체 연구원들에 대한 보험가입 및 안전장치 지급을 통해 실험 발생 가능한 사고로부터 연구원들의 안전을 보호했다.

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 (단독사사 또는 중복사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	학술 발표회 논문	TSC보-OCFT기동 접합부의 내진성능평가	(주)센벡스	저자	한국 콘크리트학회 2015년 가을 학술대회	-	발표일 (15.10.25)	단독 사사	-
2	학술 발표회 논문	콘크리트 충전 U단면 보-팔각강관 기동 외부접합부의 내진성능평가	(주)센벡스	저자	한국 콘크리트학회 2016년 봄 학술대회	-	발표일 (16.05.12)	단독 사사	-
3	학술 발표회 논문	팔각형 CFT 기동의 중심축 압축실험	(주)센벡스	저자	한국 콘크리트학회 2016년 가을 학술대회	-	발표일 (16.11.03)	단독 사사	-
4	학술 발표회 논문	Cyclic loading tests of Concrete-Filled Composite Beam-Column Connections with Hybrid Joint Details	(주)센벡스	저자	The 2016 Structures Congress (Structures 16)	-	발표일 (16.08.29)	단독 사사	-
5	KCI등 재지	복합모멘트접합을 갖는 콘크리트 충전 보-기동 합성접합부의 반복하중 실험	(주)센벡스	저자	한국강구조학 회지	-	게재일 (16.10)	단독 사사	-
6	한국산 학기술 학회 논문	역타공법에 적용되는 팔각 콘크리트충전 강관의 구조성능을 위한 원심모형실험	(주)센벡스	저자	한국산학기술 학회지	-	제출일 (17.04)	단독 사사	-

제11장. 기타 사항

해당사항 없음

제12장. 참고 문헌

1. 한국콘크리트학회 (2012), 건축구조기준 및 해설, KCI, 대한민국
2. 이성희, 김영호, 최성모(2016) 용접조립 각형 CFT 기둥.보 외다이어프램 접합부의 구조거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제28권, 제2호, pp.75-83.
3. 박종원, 강승민, 김옥중(2003) 사각판 스틱프너로 보강한 콘크리트 충전강관 기둥과 H-형강 보 접합부의 내진성능, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제15권, 제2호, pp.167-175.
4. 김영주, 배재훈, 안태상, 김진원, 유홍식(2014) SRC기둥. H형단면과 U형단면으로 구성된 합성보 접합부의 반복가력실험, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제4호, pp.263-275.
5. 강해관(2002) 사각판 스틱프너로 보강한 콘크리트 충전 각형 강관 기둥. H 형강 보 접합부 연구, 박사학위논문, 서울대학교.
6. 이철호, 정중현, 김정재(2014) 철골모멘트 용접접합부의 내진성능에 미치는 합성슬래브의 영향, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제5호, pp.385-396.
7. AISC Committee. Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-10). American Institute of Steel Construction, Chicago-Illinois (2010).
8. America Institute of Steel Construction (AISC), Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, ANSI/AISC 358-10, Chicago, 2010.
9. The European Standard, Eurocode 8, Design of structures for earthquake resistance, BS EN 1988-1:2004, 2004.
10. Morino, Shosuke, and Keigo Tsuda. "Design and construction of concrete-filled steel tube column system in Japan." Earthquake Engineering and Engineering Seismology 4.1 (2003): 51-73.
11. Ding, Fa-xing, et al. "Composite action of octagonal concrete-filled steel tubular stub columns under axial loading." Thin-Walled Structures 107 (2016): 453-461.
12. Yu, Min, et al. "A unified formulation for circle and polygon concrete-filled steel tube columns under axial compression." Engineering structures 49 (2013): 1-10.
13. Abedi, K., A. Ferdousi, and H. Afshin. "A novel steel section for concrete-filled tubular columns." Thin-walled Structures 46.3 (2008): 310-319.
14. Yuan, Wei-bin, and Jun-jie Yang. "Experimental and numerical studies of short concrete-filled double skin composite tube columns under axially compressive loads." Journal of Constructional Steel Research 80 (2013): 23-31.
15. Zuo, Zhi-Liang, et al. "Axial load behavior of L-shaped CFT stub columns with binding bars." Engineering Structures 37 (2012): 88-98.
16. Hu, Hsuan-Teh, et al. "Nonlinear analysis of axially loaded concrete-filled tube columns with confinement effect." Journal of Structural Engineering 129.10 (2003): 1322-1329.
17. Huang, C. S., et al. "Axial load behavior of stiffened concrete-filled steel columns." Journal of Structural Engineering 128.9 (2002): 1222-1230.
18. Mander, John B., Michael JN Priestley, and R. Park. "Theoretical stress-strain model for confined concrete." Journal of structural engineering 114.8 (1988): 1804-1826.
19. Shin K. J., Kim Y. J., Oh Y. S., Moon T. S. (2004) Behavior of welded CFT column to H-beam connections with external stiffeners, Journal of Engineering Structures, Vol. 26, No 13, pp. 1877-1887
20. C.-C. Chen, C.-C. Lin, C.-L. Tsai (2004) Evaluation of reinforced between steel beams and box columns, Journal of Engineering Structures, Vol. 26, pp. 1889-1904.
21. Shanmugan, N.E., Ting, L.C., Lee, S.L. (1991) Behavior of I-beam to box-column connections stiffened externally and subjected to fluctuating loads, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 20, No. 2, pp. 129-148.
22. Beutel, J., Thambiratnam, D., Perera, N. (2002) Cyclic behavior of concrete filled steel tubular column to steel beam connections, Journal of Engineering Structures, Vol. 24, No. 1, pp. 29-38.

23. Alostaz, Y.M., Schneider, S.P. (1996) Connections to concrete-filled steel tubes, A report on research sponsored by the National Science Foundation, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois.
24. Azizinamini, A. Prakash, B. (1993) A tentative Design Guidelines for a New Steel Beam Connection Detail to Composite Tube Columns, AISC Engineering Journal, 3rd quarter, pp. 108-115.
25. Mirghaderi, S.R., Torabian, S., Keshavarzi, F. (2010) I-beam to box-column connection by a vertical plate passing through the column, Journal of Engineering Structures, Vol. 32, No. 8, pp. 2034-2048.
26. C. W. Park, S. Y. Moon, S. H. Yun, A Study on the Sub-elements of the Top-down Construction Method Selection Model using Weighting Factor in Downtown Area, Journal of the Korea Institute of Building Construction. 8, 4, 2008.
27. H. Y. Cheong, S. S. Kim, K. S. Kim, Evaluation on Axial Resisting Capacities of Embedded Steel Column Base to be applied to Top-Down Method, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction. 16, 5, 2000.
28. D. J. Kim, Y. Choo, J. H. Kim, S. Kim, D. S. Kim, Investigation of monotonic and cyclic behaviors of tripod suction bucket foundations for offshore wind towers using centrifuge modeling, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. 140. 5. 2014
29. A. N. Schofield, Cambridge Geotechnical Centrifuge Operations, Geotechnique. 30, 2, 1980.
30. Y. D. Lee, S. J. Jung, A Study on Void Check for Top-Down Column Joint by Field Experiment, Journal of the Korea Institute of Building Construction. 5, 1, 2005.

주 의

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