

## CFT기둥-RC 무량판 구조시스템 개발



이철호 서울대학교 건축학과 교수

### 1. 머리말

최근 CFT(Concrete Filled Steel Tubular Column)를 채용한 건축물의 설계가 활발히 검토되고 있으며 여러 가지 구조적/시공상의 장점으로 인하여 국내 건설현장에서 상대적으로 짧은 시간에 폭넓게 수용되고 있다. 또한 무량판 구조는 층고절감 및 공기단축 측면의 장점으로 국내에서 초고층 주상복합시설과 주거시설에 광범위하게 적용되고 있다. 이 두 구조시스템의 조합은 구조적 효율성 증대와 더불어 공기단축 효과를 극대화시킴으로써 건설공사의 효율성을 높일 것으로 사료된다. 그러나 현재 CFT기둥-RC 무량판 접합부의 효율적인 디테일은 국내·외적으로 아직 제시된 바가 없어서 이 분야의 연구가 매우 필요한 실정이다. 필자는 공기단축형 복합구조시스템 건설기술 개발 과제(2005년 5월~2010년 9월, 주관기관: 서울대학교) 중 1-4세세부 철골복합화 고층구조시스템 개발 연구를 수행하면서 일반 RC기둥-무량판 접합부의 내력과 동등하거나 또는 이를 상회하는 접합부내력을 갖는 동시에 뛰어난 시공성을 지닌 CFT기둥-RC 무량판 접합부를 개발하였다. 이에 본 고에서는 개발 내용을 간략하게 소개하고자 한다.

### 2. 경제성 평가

연구의 타당성 검증 및 경쟁시스템과의 시공성/경제성/공기단축성/부대이익 분석을 위하여 30층 규모의 주상복합 건물을 CFT기둥-무량판 구조 시스템과 4가지 경쟁시스템(1. RC 무량판, 2. 철골구조, 3. SRC기둥-철골조)으로 설계하

였다. 그림 1에 나타난 바와 같이 CFT기둥-RC 무량판 구조시스템이 다른 경쟁 구조시스템에 비해 공사기간이 획기적으로 단축되는 것을 알 수 있다. RC 무량판 구조시스템에 비해 약 50일 가량의 공기단축 효과가 있는 것으로 평가되었다.

건축물의 공사비는 골조공사에 대한 비용만으로 비교평가하였으며, 터파기 및 기초공사를 제외한 지상층의 골조공사에 대하여 비교평가 하였다. 그림 2는 30층 프로토타입 건물의 골조공사비를 나타낸 것이다. CFT기둥-RC 무량판 구조시스템은 철골조(or SRC기둥-철골보)에 비해 골조공사비가 절감되는 반면, RC 무량판 구조에 비해 약 1억원 가량 더 소요되는 것으로 평가되었다. CFT기둥-무량판 구조시스템은 RC 무량판 구조시스템과 공사비는 비슷하게 소요되지만 공사기간이 30% 정도 단축되기 때문에 공기단축으로 인한 금융비용 및 부대효과를 고려할 경우 충분한 경쟁력이 있다고 사료된다.

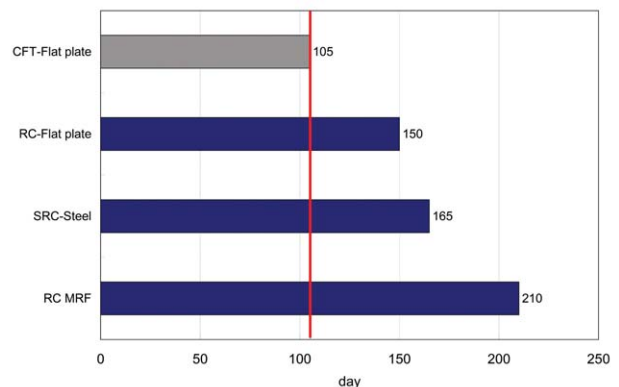


그림 1. 공사기간 평가

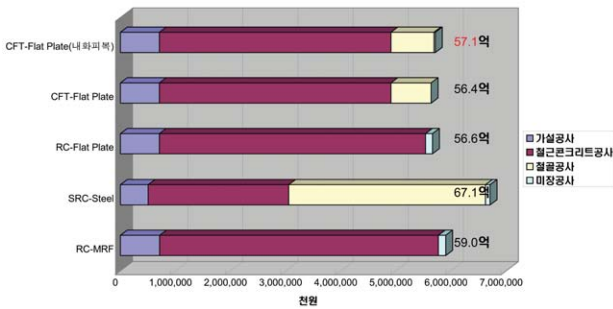


그림 2. 골조공사비 평가

### 3. 실험프로그램

#### 3.1 중력을 고려한 CFT기둥-무량판 구조시스템

콘크리트의 일체타설 이후의 양생을 통하여 접합부의 구조적 연속성이 시공과정에서 자동으로 확보되는 일반 RC기둥-무량판 접합부와는 달리, CFT기둥-RC 무량판 접합부에는 바닥의 중력하중에서 기인하는 전단력을 전달할 구조요소가 완전히 결여되어 있다. 따라서 CFT기둥-RC 무량판 접합부에는 어떤 형식이든 “전단키(shear key)”의 역할을 할 수 있는 접합요소의 도입이 불가피하다(그림 3 참조). 이 전단키의 강도는 목표로 하는 펀칭강도 이상이 되도록 확보되어야 할 것이다. 접합부의 안전성 및 현장에서의 시공성 제고를 접합부 개발의 최우선 기준으로 연구를 진행하였다. 통상 주열대 휨모멘트의 가운데 기둥쪽에 부과되는 휨모멘트의 전달을 위해 휨철근의 전강도이음을 위한 현장용접이 불가피하다. 그러나 본 연구에서는 휨철근을 현장용접하지 않고도 휨철근의 전강도를 발휘할 수 있는 효과적 정착방안을 모색하였다.

표 1. 실험체 일람

No	시험체명	슬래브 두께(mm)	기둥크기 (mm)	전단머리 길이(mm)	전단머리규격 (SS400)
1	BM-RCS300	300	400x400	-	-
2	SH620-S300	300	400x400	620	H-150x150x7x10
3	SH320-PR	200	400x400	320	H-100x100x6x8
4	SH-AR1.5	200	320x480	"290,370"	H-100x100x6x8
5	SH-AR2.0	200	2700x540	"230,340"	H-100x100x6x8
6	SH490	200	400x400	490	H-100x100x6x8
7	SH770-C500	200	500x500	770	2H-100x100x6x8 (SM490)
8	SH320-LS	200	400x400	320	H-100x100x6x8
9	SH320-WT19	200	400x400	320	H-100x100x6x8
10	SH670-WT19	200	400x400	670	2H-100x100x6x8

전술한 접합부 개발 전략을 바탕으로 다양한 전단키 상세와 휨철근 정착 방법을 제안을 하였다. 파일럿 실험결과 휨철근은 기둥면을 완전히 관통시켜서 정착하고 전단키로서 H형강 전단머리를 사용하여 접합부를 구축하는 것이 가장 우수한 성능을 발휘하는 것으로 평가되었다. 전단머리는 RC 무량판의 펀칭강도와 동등한 성능을 발휘하도록 단면과 길이를 설계하였다.

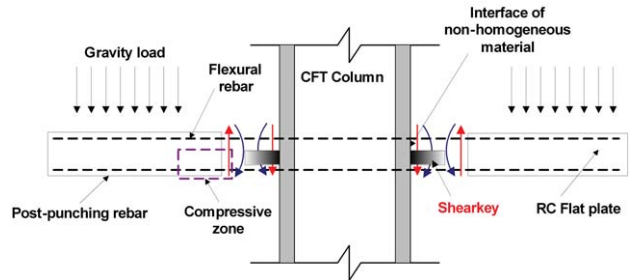


그림 3. CFT기둥-RC 무량판 접합부의 상세개발을 위한 응력전달 모형 (중력하중)

본 연구의 기본이 되는 FPP-SH 실험체의 경우, CFT기둥의 두께는 40mm, 전단머리 단면은 H-100x100x6x8 (SS400), 길이는 320 mm로 이 상세를 기본으로 펀칭강도를 증진시킬 수 있는 방안을 모색하여 총 9개의 실험체를 제작하여 실험대 실험을 수행하였다(표 1 참조). 아래 표 1에서 SH는 전단머리(ShearHead)를 나타내고 뒤의 숫자는 전단머리의 길이를 나타낸다. 변수에 따른 실험결과는 다음과 같다.

#### ① 전단머리 길이에 따른 영향

(FPP-SH, SH490, SH670-WT19, SH770-C500; 전단머리 길이=320: 490: 670: 770)

그림 4는 전단머리 길이에 따른 펀칭전단강도를 나타낸 것이다. 그림 4에서 가로축은 전단머리길이의 비를 나타낸 것이고, 세로축은 실험에서 얻어진 펀칭강도를 FPP-SH(전단머리 길이 320 mm) 실험체의 펀칭강도로 무차원화 한 것이다. 실험결과 전단머리를 갖는 CFT기둥-RC 무량판의 펀칭강도는 RC 무량판의 펀칭강도에 비해 약 20 ~ 93 % 상회하는 것을 확인하였다. 그림 4에 나타난 바와 같이 전단머리 길이에 따라 펀칭전단강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 요구 성능에 따라 별도의 전단보강 없이 전단머리의 길이를 조정하여 사용해도 됨을 시사한다.

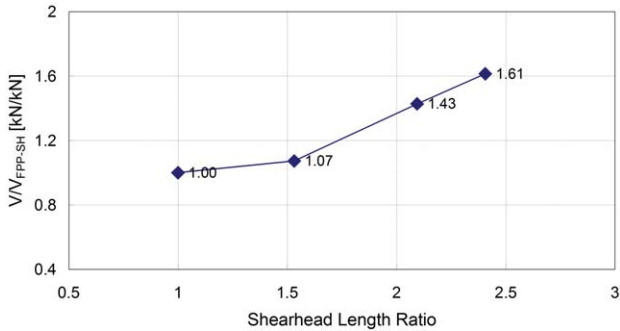


그림 4. 전단머리 길이별 편칭전단강도

그림 5 ~ 그림 8은 여러 변수에 따른 편칭전단강도를 나타낸 것으로 아래 ②-⑥ 항목의 설명을 위한 것이다.

② 고강도 콘크리트에 의해 압축대 부분보강에 따른 영향 (SH320-PR; Partial Reinforcement)

무량판 구조에서 하중의 증가에 따라 휨철근의 항복이 진행되면서 압축대(압축측 슬래브 면으로부터 0.25d 위치, 여기서 d는 슬래브의 유효두께)의 콘크리트 변형도가 증가하게 되고, 결국에는 콘크리트의 압괴에 이은 편칭 파괴가 최종 파괴모드로서 발생한다. 무량판 구조의 편칭강도를 증진시키기 위해서는 압축대를 보강하는 것이 중요하다. 압축대 부분 보강상세는 이런 개념을 응용하여 슬래브의 압축대에 고강도 콘크리트를 타설하여 접합부의 강도를 높이고자 하였다. 시공 편의상 고강도 콘크리트는 전단머리 끝단을 경계면으로 타설하였다. CFT기둥의 콘크리트 타설시 고유동성의 고강도 콘크리트를 사용하게 되는데, 이때 사용되는 고강도 콘크리트를 압축대에 타설하게 되므로 별도의 공정이 필요 없게 된다. 고강도 콘크리트를 사용하여 압축대를 부분보강하는 상세를 사용할 경우, 계면에 줄눈이 생기지 않도록 타설 계획에 주의를 요한다.

③ 횡지지 부재 설치에 따른 영향 (SH320-LS)

CFT기둥 세우기 작업시 발생할 수 있는 안전성 문제를 해결하기 위해 제안한 횡지지 부재(그림 7 참조)를 설치함으로써 RC 무량판 편칭강도에 비해 35%, FPP-SH에 비해 13% 증가된 편칭강도를 발휘하였다(그림 5 참조). 실험결과 편칭이 발생한 후에 급격한 하중저하가 발생하는 것이 아니라, 완만한 경사를 형성하면서 하중이 저하되는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상은 편칭파괴이후 횡지지 부재가 현수작용(Catenary Action)을 발휘하여 연쇄붕괴를 방지하는데 기여할 것으로 사료된다.

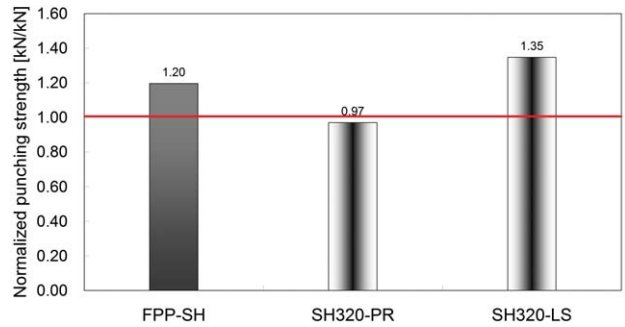


그림 5. FPP-SH, SH320-PR, SH320-LS의 편칭전단강도

④ 기둥 변장비에 따른 영향 (SH-AR1.5, SH-AR2.0)

무량판 구조에서 기둥변장비가 증가 할수록 기둥 단변방향의 전단력 전달면적이 감소하여 이곳에 응력이 집중되고, 결과적으로 편칭전단강도가 정사각형 기둥을 사용한 경우보다 감소하게 되는 문제점이 발생한다. 그림 8에 나타난 바와 같이 기둥변장비가 1.5인 CFT기둥-RC 무량판의 편칭강도는 RC 무량판 편칭강도에 비해 약 10% 가량 증가된 값을 갖고 2.0인 경우도 RC무량판의 강도와 유사한 것으로 평가되었다. 이는 기둥 변장비가 1~2인 CFT기둥-RC 무량판 접합부 설계시 RC 무량판 설계법을 사용할 경우 보수적인 설계가 가능함을 시사한다.



그림 6. 내부접합부 테스트 셋업



그림 7. 외부접합부 테스트 셋업

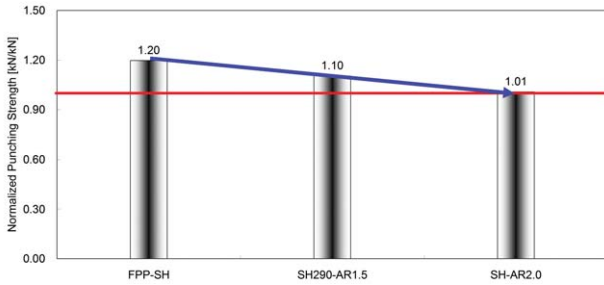


그림 8. 기둥 변장비에 따른 편칭전단강도

⑤ 롤 부재 사용에 따른 영향 (SH320-WT19, SH670-WT19; 롤 부재인 19mm 단면 사용)

롤 부재 사용에 따른 편칭전단강도를 그림 9에 나타내었다. 그림 9에 나타난 바와 같이 SH320-WT19는 RC 무량판 편칭강도에 비해 15 % 정도 증가한 값을 가지며, 40 mm 후 판재 빌트업 단면인 FPP-SH 편칭강도의 약 96 % 성능을 보였다. SH670-WT19는 박판의 롤 부재와 가용전단머리 길이 상한선으로 구성된 가장 불리한 조합임에도 RC 무량판의 편칭강도와 동등한 성능을 발휘하였다. 이는 CFT기둥-RC 무량판 접합부 구축시 제작시간과 단가의 상승을 유발하는 빌트업 단면이 아닌 롤 성형에 의한 강관을 사용해도 무방함을 시사한다.

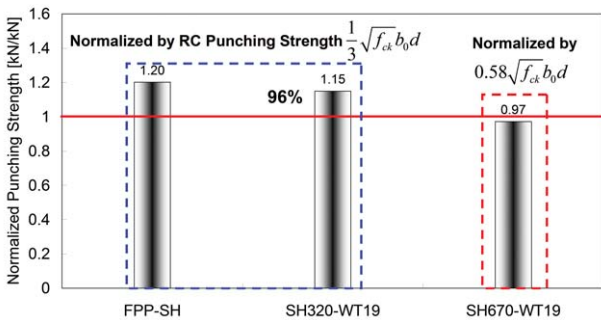


그림 9. 롤 부재 사용에 따른 편칭전단강도

⑥ 슬래브 두께 증가에 따른 영향

(BM-RCS300; 300mm 두께의 RC 무량판 vs SH620-S300; 이에 상응하는 강도를 발휘할 수 있는 300mm 두께의 CFT기둥-무량판)

그림 10은 CFT기둥-RC 무량판 구조가 RC 무량판 슬래브 실용상의 상한 두께인 300 mm에 해당하는 성능을 발휘할 수 있는지 여부를 검증하기 위한 시험체의 편칭강도를 나타낸 것이다. SH620-S300은 BM-RCS300에 비해 26 % 증가된 편칭강도 값을 갖는 것으로 평가되었다. 또한 RC 무

량판의 경우 두께가 1.5배 증가 시 편칭강도가 93 % 증가하였고, CFT기둥-RC 무량판의 경우 두께가 1.5배 증가 시 RC 무량판 편칭강도 보다 174 % 증가하는 것으로 평가되었다. 동일한 슬래브 두께를 갖는 무량판 구조의 경우 CFT기둥-RC 무량판 구조가 RC 무량판 구조에 비해 별도의 전단 보강 없이 안전하고 우수한 성능을 지닌 접합부를 구축할 수 있을 것으로 사료된다.

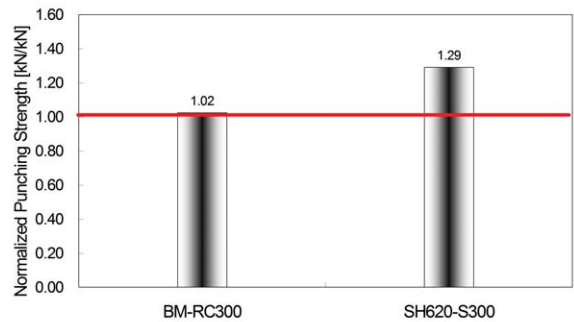


그림 10. BM-RC300, SH620-S300의 편칭전단강도

3.2 횡력을 고려한 CFT기둥-무량판 구조시스템

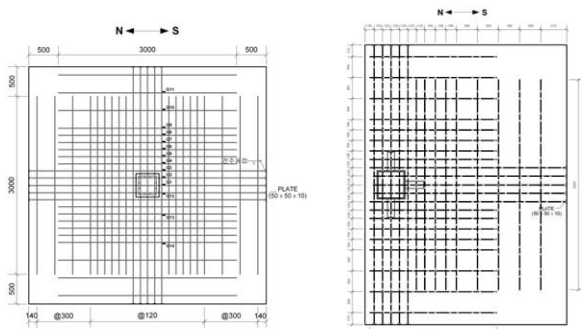
통상 무량판 구조는 전단벽과 같은 횡력저항 시스템과 같이 사용이 된다. 이때, 횡하중은 전단벽과 같은 횡력저항 시스템이 부담하고, 무량판 슬래브는 중력하중에 저항하도록 설계를 한다. 하지만 횡하중이 작용할 경우 기둥과 슬래브 접합부의 변형능력이 확보가 되어야만 한다. 무량판구조의 경우, 중력전단비( $Vg/\phi Vc$ ; 공칭 편칭전단강도에 대한 중력하중 비)가 40% 작용할 경우, 1.5%의 변형능력을 발휘해야 한다고 규정하고 있다(ACI-ASCE 352). 중력하중 실험을 통하여 RC 무량판 접합부에 비해 편칭강도 및 강성면에서 우수한 성능을 보인 전단머리 상세를 기본으로 한 CFT기둥-RC 무량판 내부 접합부에 대하여 횡하중 반복가력 실험을 수행하였다. 제안된 CFT기둥-RC 무량판 상세가 중력하중이 공칭 편칭전단강도의 40%의 수준으로 작용할 때 1.5% 변형능력을 발휘할 수 있고, RC 무량판 접합부에 비해 내진 성능이 우수함을 실험적으로 검증하고자 하였다. 성능을 검증할 시험체는 표 2과 같고 상세는 그림 11 ~ 그림 13에 나타내었다.

횡하중 반복가력실험의 경우 횡하중에 의한 경계조건만을 고려하여 실험을 수행하는 경우가 대부분이나, 본 연구에서는 중력하중과 횡하중에 의한 경계조건을 모두 고려하여 ERS (Edge Restrained System)와 HS (Hinge System)를

사용하였다(그림 14 및 15 참조). CFT1의 접합부강도(이하 모두)는 BM-RC에 비해 약 1.7배 가량 증가한 성능을 갖는 것으로 평가되었고, CFT3의 불균형 모멘트 성능은 CFT1과 유사하지만 횡변위비는 1.7배 가량 우수한 것으로 평가되었다.

표 2. 횡력 시험체 일람

No	시험체명	전단키	실험변수	전단보강
1	BM-RC (Bench Mark 시험체)	-	$V_g/V_c = 0.4$	-
2	CFT1	전단머리	$V_g/V_c = 0.4$	-
3	CFT2	전단머리	$V_g/V_c = 0.6$	-
4	CFT3	전단머리	$V_g/V_c = 0.4$	전단밴드 (Seismic Band)
5	ED-RC	-	$V_g/V_c = 0.4$	-
6	ED-CFT	전단머리	$V_g/V_c = 0.4$	-
7	ED-CFT-SB	전단머리	$V_g/V_c = 0.4$	전단밴드 (Seismic Band)



(a) 내부 접합부 상부철근 배근도 (b) 외부 접합부 상부철근 배근도

그림 11. 슬래브 배근도

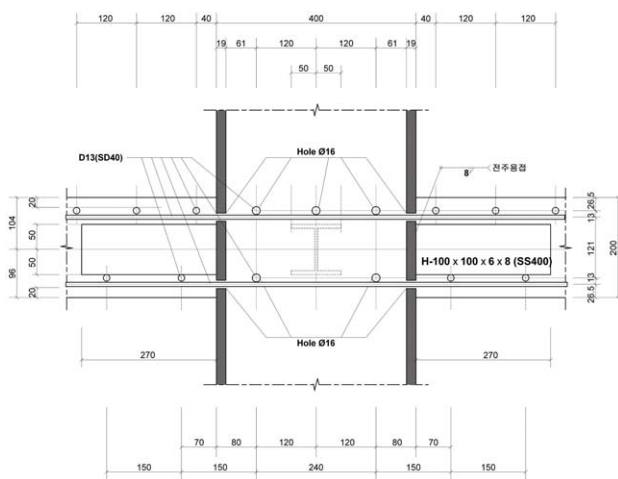


그림 12. CFT1 시험체 단면 상세



그림 13. 전단밴드 상세

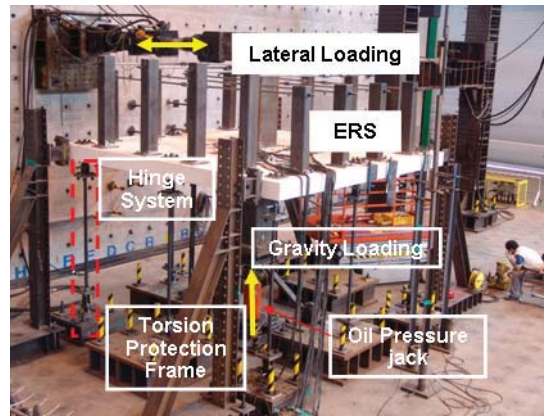


그림 14. 내부접합부 테스트 셋업

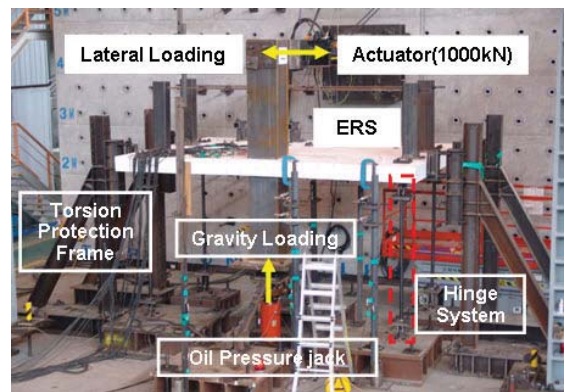


그림 15. 외부접합부 테스트 셋업

이상의 결과들은 제안된 상세를 지닌 시험체들이 RC 시험체에 비해 뛰어난 모멘트 성능과 변형능력을 지니고 있다는 것을 시사한다. CFT2의 결과는 중력하중의 크기가 무량판 접합부의 변형능력에 영향을 끼치는 중요한 인자로서 작

용한다는 것을 반영한다. RC 무량관 접합부에 비해 CFT기동 무량관 접합부의 초기강도가 22% 증가하였으며, 휨강도는 유사한 것으로 평가되었다. 내부 접합부의 경우, 전단밴드는 휨강도 증진에는 별 영향을 미치지 않았으나, 변형능력을 향상시키는 것으로 평가되었다. 반면 외부 접합부에 전단밴드를 설치할 경우, 휨강도, 강성, 변형능력 모두 증가되는 것으로 평가되었다. 따라서 우수한 내진 성능을 요구하는 구조물에 CFT기동-RC 무량관 접합부를 적용할 경우, 외부 접합부 구축시 시공성 및 경제성에서 우수한 전단밴드를 사용하면 적합할 것으로 판단된다.

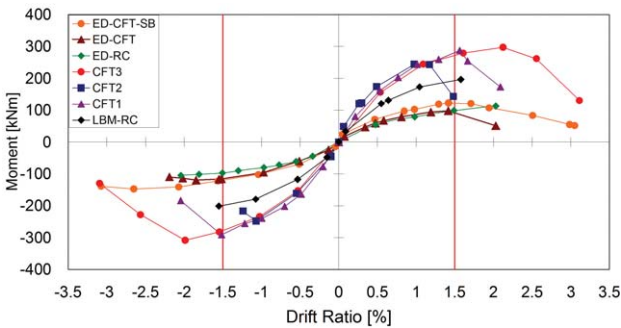


그림 16. 이력응답에 대한 포락곡선

그림 17은 실험결과를 바탕으로 중력하중에 따른 횡변위 비 관계를 나타낸 것이다. 그림 17에서 보듯이 모든 CFT기동-RC 무량관 시험체는 ACI에서 제한하고 있는 변형능력에 대한 기준을 상회하는 것으로 평가되었다.

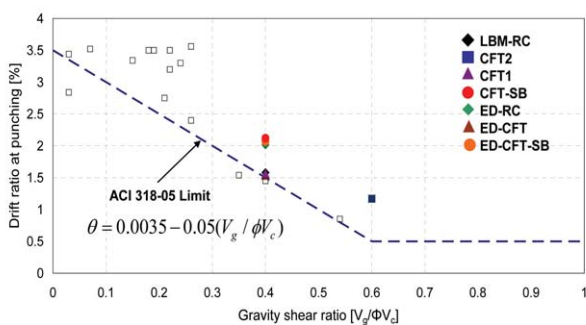


그림 17. 중력하중 비에 따른 횡변위 관계

그림 18은 각 시험체의 에너지 소산능력을 나타낸 것이다. 실험 초기에는 거의 비슷한 소산능력을 보였으나 사이클이 증가할수록 BM-RC 시험체에 비해 CFT기동-RC 무량관 시험체의 에너지 소산능력이 크게 나타났다. CFT1은 BM-RC에 비해 약 1.5배 증가된 에너지 소산능력을 나타내었고,

CFT3의 에너지 소산능력은 CFT1에 비해 약 2.5배 향상되는 것으로 평가되었다. 이는 전단밴드가 에너지 소산능력 향상에 큰 기여를 하는 것을 시사한다.

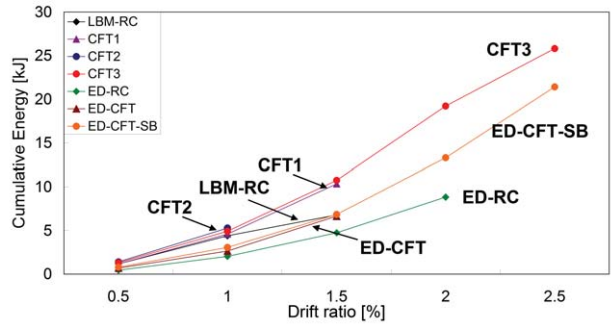


그림 18. 에너지 소산 능력

### 3.3 목업시공 및 실재하 실험

경기도 여주 소재의 PC 공장에 스펠길이 6m x 6m, 2 Bay의 목업 건물을 시공하였다. 제안된 상세를 적용한 CFT기동-RC 무량관 구조시스템을 시공하면서 시공성 및 공기 단축성을 평가하고, 시공지침서를 작성하는 데 반영하였다. 또한 사용하중 상태에서 처짐 및 균열측정, 바닥진동 성능평가, 실재하에 의한 각 접합부의 극한 내하력 등을 평가하였다. 접합부의 내력은 비선형 영향선 개념을 도입하여 다양한 재하 실험을 모사하고 접합부의 성능을 평가할 수 있는 방법을 고안하였다. 경계조건 구현이 어려운 외부/모서리 접합부의 내력을 평가할 수 있는 하중 재하 방식을 결정하고, 중력하중이 작용할 경우 기동에 발생하는 반력을 이용하여 각 접합부의 펀칭내력을 평가할 수 있는 방안을 모색하였다.

실제 목업 시공을 진행하면서 CFT기동-무량관 접합부의 양호한 시공성능을 확인하였고, 바닥진동 성능 평가와 실재하 내하력 평가를 수행하여 각 접합부의 요구성능을 만족하는 것을 검증하였다.

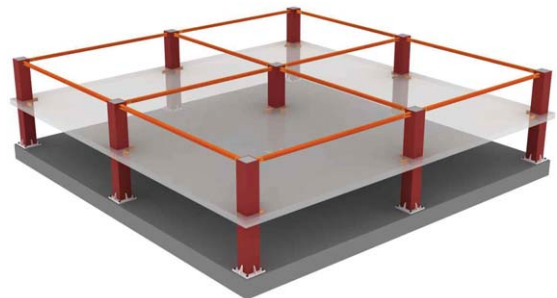


그림 19. 목업시공 모델



그림 20. 목업시공 전경



그림 21. 실 재하 실험



그림 22. 내부 접합부 균열패턴

#### 4. 맺음말

이상의 실물대 실험 및 목업시공 결과를 종합해 볼 때 본 연구에서 제안한 전단머리를 갖는 CFT기둥-RC 무량판 구조시스템이 경쟁시스템(RC 무량판, RC 모멘트 골조, SRC 기둥-철골보)에 비해 월등한 구조 및 시공상의 장점이 있는 것으로 평가되었고, 실용화를 위한 충분한 경쟁력을 갖춘 것으로 사료된다. 이외에도 역타(top-down)공법을 위한 원형 CFT-무량판 볼트(무용접) 자켓 상세 등도 개발하고 성능을 검증하였으나 지면의 제한으로 소개하지 못하였다.

본 연구를 통해 개발된 기술은 국내외에서 개발된 바가 없는 신기술로서 실용화가 될 경우 건설사에 충분한 경쟁력과 이익을 제공할 수 기술임이 여러 객관적 자료를 통해 입증되었다. 그러나 건설업의 보수적 속성으로 기술의 우수성이 분명한 경우도 이를 먼저 도입하여 시범 적용하는 것에 따르는 리스크 등으로 인해 현장적용에 매우 소극적인 것이 현실이다. 새로운 공법이나 기술을 적극적으로 도입하기 위한 현장에서의 마인드의 개선과 더불어, 신기술 도입이 가져다주는 이익을 관련 당사자에게 합리적으로 배분해 줄 수 있는 여러 제도적인 장치가 마련되는 것이 건설신기술의 전반적 활성화에 매우 중요한 것으로 판단된다.

#### 5. 참고문헌

1. 대한건축학회(2000) 건축물 하중기준 및 해설, 태림문화사
2. Cheol-Ho Lee, Jin-Won Kim, Jin-Gyu Song (2008) Punching Shear Strength and Post-Punching Behavior of CFT Column to RC Flat Plate Connections, Journal of Constructional Steel Research, V. 64, No. 4, pp. 418-428
3. ACI Committe 318, (2005) Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318R-05), American Concrete Institute (ACI), Detroit, Mich.
4. ACI-ASCE Commite 352, (1988) Recommendation for Design of Slab-Column Connections in Monolithic Reinforced Concrete Structures(ACI 352.1R-89). ACI Structural Journal, V. 85, No. 6, pp. 675-696.
5. Pan, A.D. and Moehle, J.P. (1989) Lateral Displacement Ductility of Reinforced Concrete Flat Plates, ACI Structural Journal, V. 86, No. 3, pp. 250-258.
6. Sozen, M.A., (1980) Review of Earthquake Response of Reinforced Concrete Building with a View to Drift Control, State of the Art in Earthquake Engineering. Istanbul, pp. 119-174.

· 이철호 e-mail : ceholee@snu.ac.kr