

# 콘크리트 기둥-강재 보 외부 접합부의 내진성능(I. 실험) Seismic Response of Exterior RC Column-to-Steel Beam Connections (I. Experiment)

조 순 호<sup>1)</sup>                      선 성 규<sup>2)</sup>  
Cho, Soon Ho                      Sun, Sung Gyu

### ABSTRACT

The seismic behaviour of moment connections consisting of reinforced concrete columns and steel beams is investigated based on four 2/3 scale tests of exterior beam-column joints subject to reversed cyclic loading. The major test parameters were the number of hoops, the isolated concrete contribution, and the use of headed studs in the joint regions between columns and beams. Their influence on the seismic response of the connections is presented and compared. Among them, the CF3 specimen containing two hoops each in the joint and column regions above and below exhibited the most favourable hysteretic response. This indicates that this type of joint details can be used in the low seismic areas such as Korea.

### 1. 서론

지금까지의 콘크리트-철골 합성구조란 콘크리트 슬래브와 철골 보를 전단 스티드로 연결한 합성보<sup>(1)</sup> 및 일본에서 널리 사용되고 있는 SRC(Steel Reinforced Concrete) 구조 - 철골부재가 콘크리트에 묻혀 있는 보, 기둥 및 골조 구조 등을 의미하나<sup>(2)</sup>, 본 연구에서는 모멘트 저항 골조에서 콘크리트 기둥과 철골 보가 특별한 상세법으로 연결되어 각각의 기능을 상호 보완적으로 수행하는 시스템 수준의 합성구조를 의미하며, 여러 가능한 접합방식 중 철골 보가 콘크리트 기둥을 직접 관통하는 경우(Beam Through)만을 대상으로 한다. 이와 같은 콘크리트 기둥-강재 보 접합방식은 종래의 SRC 구조와는 달리 여러 이점을 내포하는 효율적인 구조시스템의 하나로, 국내 연구자들에게도 새로운 관심을 불러일으키고 있다.

콘크리트 기둥-철골 보 관통형 접합부에 대한 연구는 이미 미국 및 일본 등지에서 지난 15년 동안 상당히 활발하게 진행되어 왔으며, 그 결과로 1993년 ASCE(American Society of Civil Engineers)

1) 광주대학교, 건축학부, 교수, 정회원  
2) 광주대학교, 건축학부, 석사과정

구조분과 위원회(Task Committee)에서는 Univ. of Texas, Austin<sup>(3,4)</sup> 및 일본의 Building Research Institute<sup>(5)</sup> 등에서 수행한 몇몇 접합부 실험결과를 토대로 설계지침을 제시한바 있다<sup>(6)</sup>. 하지만, ASCE 제시안은 반복하중에 대한 실험자료의 부족으로 그 적용범위를 중, 저 지진지역으로 제한하고 있으며 또한, 내부 접합부를 주요대상으로 하고 있다. 이에 본 연구에서는 후프근의 수, 콘크리트의 잠재강도의 극대화, 전단키 사용 등의 접합부 상세를 주요변수로 하는 4개의 T형 접합부 시험체를 제작하여 반복하중에 구조실험을 수행하였다.

## 2. 시험체 설계 및 실험방법

그림 1은 전체 시험체의 설치상황을 나타내며, 기둥 상, 하단 및 보 단부에는 힌지단이 설치되었다. 기둥 내력의 11%(50t)에 해당하는 연직하중이 기둥에 미리 재하된 보 단부에 Actuator를 사용하여 정해진 가력계획에 따라 반복하중을 부가하였다. 시험체 CF1은 현재 국내실무에서 적용하고 있는 접합부 및 기둥 상, 하부 상세방법을 반영하였으므로 내진설계에 대한 별도의 상세를 포함하고 있지 않다(그림 2(a)). CF2는 패널지역에 70%정도의 강재 웨브부분을 제거하여 순수 콘크리트에 의해 전단강도가 결정되도록 유도하였다(그림 2(b)). 패널지역의 내, 외부 콘크리트가 일체로 작용하여 잠재 전단강도를 충분히 발휘할 수 있을 것으로 판단된다. CF3은 우리나라와 같은 중, 저 지진지역에 적합하리라 판단되는 접합부 상세안으로 기둥 상, 하단부 및 패널지역에 각각 2개의 후프근이 배치되어 있다(그림 2(c)). 패널지역의 후프근은 웨브에 미리 배치된 구멍을 통하여 U자형 철근을 양쪽에서 밀어 넣어 후프근을 형성하고 있다. CF4는 가능하면 후프근 사용을 억제하는 방향에서 강재 보 상, 하부에 스테드를 배치하여 외부 패널지역의 콘크리트 기여를 향상시키고자 하였다(그림 2(d)). 기둥에 사용된 콘크리트 설계기준 강도는  $700\text{kg/cm}^2$ 이며, 철근은 SD4000의 D22 및 D13이 주근 및 후프근으로 각각 사용되었으며, 보에 사용된 강재는 조밀단면(Compact Section)에 해당하는 SS400의 H-250x125x6x9, FBP(Face Bearing Plate)는 SS400의 PL-232x59.5x9, 스테드는  $\phi \times l = 13 \times 50$ 이 각각 사용되었다. 표 1 및 2는 콘크리트 및 강재의 기계적 성능을 나타낸다. 12개의 Potentiometer를 사용하여 다양한 수직, 수평변위 및 회전각을 측정하였으며, 강재 보 및 보강근의 주요위치에는 20개 정도의 1축 및 3축 게이지를 부착하였다(그림 3). 하중은 완전항복(General Yielding,  $\Delta_y$ )에 이르기까지는 미리 정해진 하중크기에 따라, 그 후에는  $\Delta_y$ 의 배수로 부가하였다. 대체로 1 Cycle은 초기 항복하중(First Yielding)의 1/2, 2 Cycle은 초기 항복하중, 3 Cycle은 완전 항복하중이 부가되었다.

## 3. 실험결과

그림 4는 4개의 시험체에 대한 보 전단력-보 단부변위 이력응답을 나타낸다. CF1은 3A(하향 하중, 8t) 및 3B(상향 하중, -8t) Cycle에서 남, 북쪽 기둥면의 철골 플랜지 상, 하부에 지압형태의 초기균열이 발생하였으며, 또한, 3B Cycle(-9.5t)에서 기둥 동쪽면에 초기 사인장 균열이 형성되기 시작하였다. 상, 하부 강재 보 플랜지가 항복하기 시작한 것도 3B Cycle(-10t)에 해당된다. 하중이 더

육 진전됨에 따라 3B(-12.5t)에서는 상부 보 플랜지의 국부좌굴이 분명하게 나타났으며, 4A Cycle(11ton)에서는 기둥 서쪽면에 사인장 균열을 형성하였다. 4A 및 4B Cycle에서는 기 발생된 균열이 더욱 확장, 심화되었고, 5A 및 5B Cycle에서는 패널지역에 무수히 많은 새로운 균열이 추가 되어 최대하중 상태에 가까움을 예고하였다. 5B Cycle에서 기둥 동쪽면에 상하로 형성된 사인장 균열은 6B 및 7B Cycle에 이르러 더욱 심화 확장되어 대부분의 기둥을 가로질렀다. 전체 이력거동 및 파괴상황은 그림 4(a) 및 그림 5(a)와 같다.

CF2는 패널지역에 강재부분이 제거된 시험체로서 2B Cycle(-5t)에서 기둥 남쪽면 철골보 상하 플랜지 모서리에 지압형태의 균열이 발생하였으며, 또한 2A(7.7t) 및 2B Cycle(-7t)에서 기둥 서쪽면에 사인장 균열(폭=0.4mm)이 발생하였다. 3A Cycle을 진행하는 동안 철골 보 하단 플랜지에는 국부좌굴이 발생하였으며, 기 발생된 사인장 균열은 더욱 심화되었고(1.7mm), 철골 보 플랜지의 상, 하단 모서리에 발생된 지압형태의 균열은 기둥 상, 하에 걸쳐 조개집(Splitting) 형태의 수직균열로 진전되었으나, CF1과는 달리 패널지역에 새로운 균열은 더 이상 발생하지 않았다. 전체 이력거동 및 파괴상황은 그림 4(b) 및 그림 5(b)와 같다.

CF3는 패널 및 인접기둥 지역에 각각 2개의 후프근이 추가 배치된 시험체로서 3A Cycle에서는 기둥 상하부에 지압형태의 균열(10t)이 분명하였으며, 상부 플랜지의 항복선(11.4t) 및 사인장 균열(11.8t)이 발생하여 더욱 진전되었고, 또한, 3B Cycle에서는 -3t에서 지압균열이 보다 분명하였으며, -4.5t에서는 초기 사인장 균열이 발생하였고, -7t에 이르러서는 보 상하부 플랜지에 항복선이 발생하여 하중이 증가함에 따라 더욱 활발하게 진행되었다. 4A Cycle에서는 상하부 보 플랜지의 항복선이 더욱 심화되었고, 15t에 이르러서는 하부 플랜지에 국부좌굴이 발생하였다. 5A 및 5B Cycle에서는 사인장 균열이 더욱 심화, 확장되었고, 급기야 6B Cycle에 이르러서는 기둥 상하를 가로지르는 사인장 균열이 중앙부에 집중되어 최대하중 상태에 도달하였다. CF3는 다른 시험체와는 달리 +방향 이력거동이 -방향 보다 우세한 경향을 나타내고 있는데 이는 지압 및 사인장 균열, 항복선이 낮은 하중에서 발생한 점으로 미루어 보아 콘크리트 타설(수평)시 보 상부 안쪽면에 콘크리트가 제대로 채워지지 않았던 것으로 판단된다. 또한, 본 시험체의 경우 보가 다소 위쪽으로 기울어졌음을 나중에야 발견할 수 있었다. 전체 이력거동 및 파괴상황은 그림 4(c) 및 그림 5(c)와 같다.

CF4는 전단키 역할을 하는 스티드가 보 상하 플랜지에 배치된 시험체로서 3A Cycle에서 지압 균열이 보 플랜지 상하부 모서리에 발생하였고(7.3t-7.9t), 초기 사인장 균열은 8.7t, 또한 웹 및 상하부 플랜지 항복선은 7.8t~8.2t에 걸쳐 발생하였다. 이들 균열 및 항복선은 하중이 증가함에 따라 점차 심화, 확장 되어갔다. 마찬가지로, 3B Cycle에서도 지압균열이 -6.7t에 발생하였고, 초기 사인장 균열은 -8.9t, 웹 및 플랜지 항복선은 -10.2t~10.5t에 걸쳐 발생하였으며 하중이 증가함에 따라 더욱 심화, 확장되었다. 4A Cycle에서는 보 플랜지 하단부에 국부좌굴이 분명하였으며, 사인장 균열 폭은 0.4mm에 달하였다. 또한, 4B Cycle에서는 사인장 균열 및 항복선이 더욱 활발하게 진행되었으며, 보 상부 플랜지에는 국부좌굴(-13.2t)이 나타나기 시작하였다. 5A 및 5B에서는 기둥 상하를 가로지르는 사인장 균열이 중앙부에 집중되어 최대하중 상태에 도달하였다. CF4는 다른 시험체와는 달리 스티드 상단을 기점으로 발생하는 사방향 압축 스티트의 영향으로 전체적으로 W자형 균열이 발생하고 있는 점에 주의할 필요가 있다. 전체 이력거동 및 파괴상황은 그림 4(d) 및 그림 5(d)와 같다.

#### 4. 실험결과의 분석

모든 시험체는 예상한바 대로 접합부 지역에 심각한 손상을 유발하여 파괴상태에 도달하였다. 접합부의 파괴형태는 주로 전단형(Panel Shear)이 지배하였으나, 초기부터 지압형(Bearing) 파괴를 동반하였다. 내부 패널지역의 스트럿(Strut) 작용에 의한 전단강도는 ASCE 지침에 따라  $1.65\sqrt{f_c}$  ( $f_c$  in MPa)로 결정하였으나, 실험결과는 대부분 이보다 작은 값을 나타내었는데( $1.16\sim 1.65\sqrt{f_c}$ ), 이는 이미 많은 연구자가 지적한 바와 같이 식 자체의 신뢰도가 적고, 또한 고강도 콘크리트의 영향을 전혀 반영하고있지 않기 때문이다. CF2는 패널지역의 웨브가 70% 제거되었음에도 불구하고 CF1과 비교하여 강도 차이가 거의 없음을 고려할 때, 콘크리트의 잠재강도가 충분히 발휘된 것으로 판단된다. 이는 웨브 구멍을 통하여 콘크리트가 일체로 작용하게되어, 강재 보 폭을 초과한 스트럿이 형성되었기 때문이다. 이러한 관점에서, 가장 효과적인 합성구조는 강재 및 콘크리트가 동시에 각각의 잠재강도를 최대한 발휘하도록 요소를 구성하는 것이다.

4개 시험체에 대한 이력거동(Hysteretic Response)을 평가하기 위하여 연성비, 완전항복 이후의 강도 보유능력, 강성저하 및 누적된 에너지 흡수능력에 대한 비교가 실시되었다. 표 3은 파괴형태 및 이들 값에 대한 최대 값을 의미한다. 연성비는 -방향 최대 처짐( $\Delta_u$ ) / 완전 항복변위( $\Delta_y$ )로 하였으며,  $V_u/V_y$ 비는 항복 이후의 강도 보유능력을 나타내는데  $V_u$  및  $V_y$ 는 보 단부에서 -방향 최대 및 항복 전단력을 각각 의미한다. 또한, 강성저하는 + 및 -방향 정점(Peak) 값을 기준으로  $k_u/k_y$ 를 산정 하였으며, 에너지 소산 누적 량은 하중-변위 곡선의 내부 면적으로 이력거동에 따른 감쇠(Hysteretic Damping)를 나타낸다.

표 3은 항복이후에 하중보유 능력을 보여주고 있는데, 대체로 후프근 및 스티드의 영향으로 CF1 및 CF2 보다는 CF3 및 CF4가 우세함을 나타내고 있다. CF1은 최대하중 이후 곧바로 그 능력을 상실함을 보여주고 있으나, CF3 및 CF4는 어느 정도 일정함을 나타내고 있다. CF3의 최대하중이 CF4 보다 작은 것은 -방향 Cycle을 기준으로 했기 때문이다.

표 3은 반복하중에 따른 강성 저하 정도를 보여주고 있는데, 초기에는 CF3 및 CF4가 약간 우세한 경향을 나타내었으나 Cycle 수가 증가함에 거의 유사한 경향을 나타내고 있다. CF2는  $\Delta_{peak}/\Delta_y = 0.5$  부근에서 우세한 경향을 나타내었으며, CF3는  $\Delta_{peak}/\Delta_y = 1.5$  부근에서 처지는 경향을 나타내었는데, 이는 강재의 국부좌굴이 심화되었기 때문인 것으로 판단된다.

표 3은 반복하중하의 가장 중요한 구조적 성능을 표시하는 에너지 소산능력을 나타낸다. CF3는 추가된 후프근의 영향으로 가장 우수한 소산능력을 보여주고 있는데 CF1에 비하여 53% 증가를 보여주고 있다. 한편, CF4는 CF1과 유사한 소산능력을 보여주고 있는데, 이는 스티드의 사용으로 강성은 증가한 반면에 연성 및 최대강도에는 큰 차이가 없음을 의미한다. 마찬가지로, 접합부에 웨브가 제거된 CF2는 강도 및 강성에는 큰 변화가 없으나 에너지 소산능력에는 커다란 저하를 나타냄에 주목할 필요가 있다.

## 5. 결론

이상과 같이 반복하중을 지지하는 4개의 외부 RC 기둥-강재 보 접합부의 실험을 수행한 결과 아래와 같은 결론을 유도해낼 수 있었다.

- 1) 모든 시험체는 접합부의 전단파괴(Panel Shear Failure)가 지배하였으나, 초기부터 상당한 지압형(Bearing) 균열을 동반하였다. 이는 이전의 실험결과( $b_b/b_c=0.25-0.35$ )와는 다른양상으로서, 상대적으로 높은 보폭 / 기둥폭 비( $b_b/b_c=0.5$ )가 사용되었기 때문인 것으로 판단 되어 지압형 파괴 제어에 특별한 주의가 요구된다.
- 2) CF2는 패널지역의 강재 보 웨브가 70% 제거되었음에도 불구하고 CF1과 비교하여 강도 차이가 17% 정도 밖에 나지 않는 점을 고려할 때, 콘크리트의 잠재강도가 충분히 발휘된 것으로 판단된다. 이는 웨브 구멍을 관통한 콘크리트가 일체로 작용하여, 강재 보 폭을 초과한 두꺼운 스트럿이 형성되었기 때문이다. 이러한 관점에서, 강재 및 콘크리트가 동시에 각각의 잠재강도를 최대한 발휘할 수 있는 새로운 상세안을 개발할 필요가 있다.
- 3) ASCE 지침은 내부 패널지역의 스트럿(Strut) 작용에 의한 전단강도를  $1.65\sqrt{f_c}$ 로 할 것을 제안하고 있으나, 이보다 작은 값을 나타낸 실험결과( $1.16\sim 1.65\sqrt{f_c}$ )를 고려할 때, 고강도 콘크리트의 성질을 반영하여 계수를 축소 조정할 필요가 있다.
- 4) 대체적으로, CF3가 가장 우수한 이력거동을 나타낸 반면에, CF1과 CF4는 유사한 거동을 나타내었다. CF3는 추가된 후프근의 영향으로 CF1에 비하여 53% 증가된 에너지 소산능력을 증가를 보여주었다. CF4는 CF1과 유사한 에너지 소산능력을 보여주고 있는데, 이는 스티드의 사용으로 강성은 증가한 반면에, 연성 및 최대강도는 차이가 없음을 의미한다. 마찬가지로, 접합부에 웨브가 제거된 CF2는 강도 및 강성에서 CF1과 큰 차이는 없으나 에너지 소산능력에는 커다란 저하를 나타내었다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초 연구과제(과제번호 : 97060201013)의 일환으로 수행되었으므로 이에 감사를 드리며, 또한 실험 및 해석시설 사용을 허락해 준 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터(STRESS)의 지원에 감사를 드립니다. 실험수행 시, 여러모로 도움을 준 이한승 박사(STRESS), 직접 참가하였던 한현호, 김진욱 군께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. S. H. Cho, R.G. Redwood (1992), "Slab Behavior in Composite Beams at Openings: Tests and Verification", Journal of Structural Engineering, ASCE, 118(9), pp.2304-2322.

2. Wakabayashi, M. (1985), "Recent Developments for Composite Buildings in Japan", Composite and Mixed Construction, C. Roeder, ed., ASCE, New York, N.Y., pp.241-253.
3. Sheikh, T.M. et al. (1989), "Beam-Column Moment Connections for Composite Frames: Part I", Journal of Structural Engineering, ASCE, 115(11), pp.2858-2876.
4. Deierlein, G.G. et al. (1989), "Beam-Column Moment Connections for Composite Frames: Part 2", Journal of Structural Engineering, ASCE, 115(11), pp.2877-2896.
5. Nishiyama, I. et al. (1990), "Strength and Deformation Capacity of Reinforced Concrete Column to Steel Beam Joint Panels", Kenchiku Kenkyo Shiro No. 71, Building Res. Inst., Ministry of Construction, Japan.
6. ASCE Task Committee (1994), "Guidelines for Design of Joints Between Steel Beams and Reinforced Concrete Columns", Journal of Structural Engineering, ASCE, 120(8), pp.2330-2357.

표 1 콘크리트의 기계적 성질

$f_c$ , kg/cm <sup>2</sup> (MPa)	$E_c$ , kg/cm <sup>2</sup> (MPa)	$f_{ct}$ , kg/cm <sup>2</sup> (MPa)
651 (66.4)	332739(33953)	34.9 (3.6)

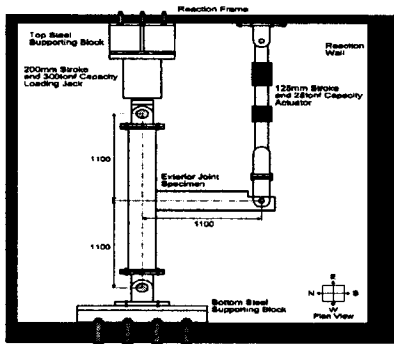
표 2 보강근 및 강재의 기계적 성질

Bar Size or St. Steel	Description	$f_y$ , kg/cm <sup>2</sup> (MPa)	$f_u$ , kg/cm <sup>2</sup> (MPa)
D10	Transverse Reinforcement	4256(436.9)	6089(664.1)
D22	Longitudinal Reinforcement	4079(416.2)	6292(642.0)
Flange	H-250x125x6x9	3158(322.2)	4429(451.9)
Web		3445(351.5)	4705(480.1)

표 3 이력거동 요약

Specimen No.	Failure Modes	Joint Details	$\Delta_u/\Delta_y$	$V_u/V_y$	$k_u/k_y$	Energy, t·m (kN·m)
CF1	Beam and Joint	No hoops in joint, One hoop each in column above and below joint.	2.36	1.14	0.58	1.70 (16.66)
CF2	Joint	70% Cut-out steel web	2.57	0.96	0.37	1.13 (11.07)
CF3	Beam and Joint	Two hoops each in joint and column above and below joint.	2.77*	1.26	0.61	2.69 (26.36)
CF4	Beam and Joint	No hoops in joint, One hoop each in columns above and below joint, Two shear studs each on top and bottom flanges.	1.99	1.33	0.74	1.80 (17.64)

\* Referred to positive cycle 5A



Test Setup for Reversed Cyclic Loading of Specimens

그림 1 시험체 설치

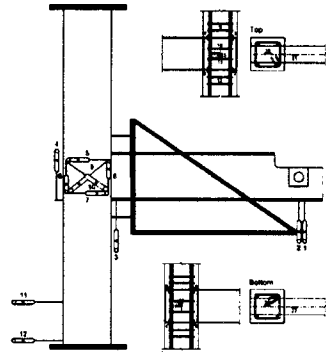
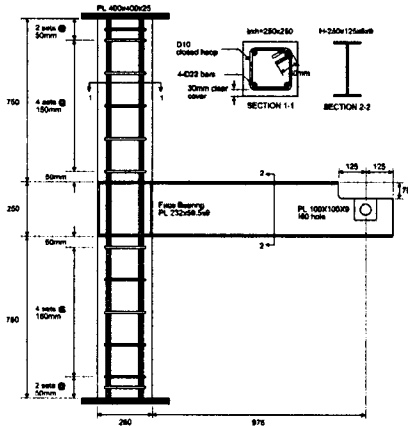
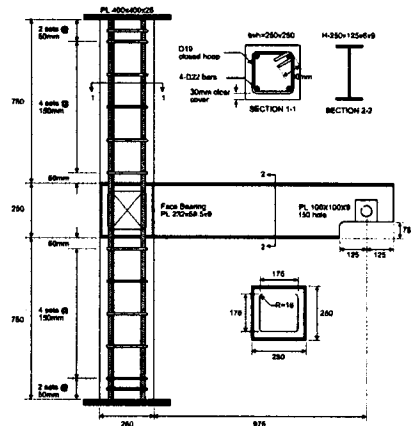


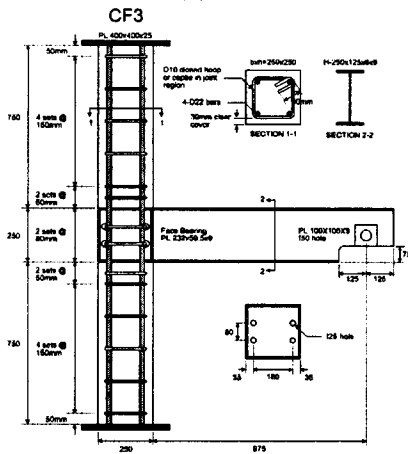
그림 3 측정방법



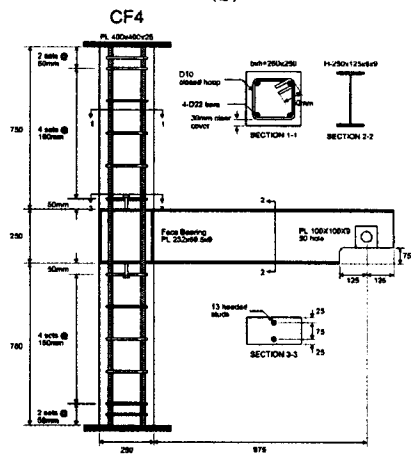
(a)



(b)

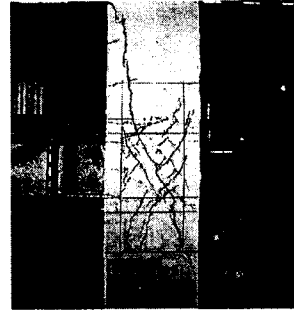
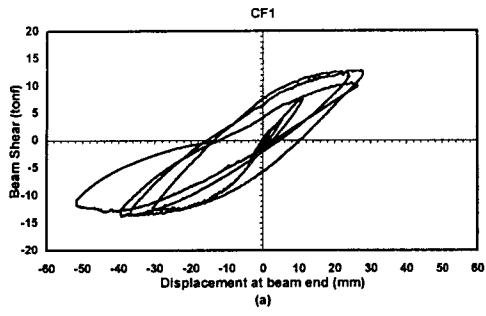


(c)

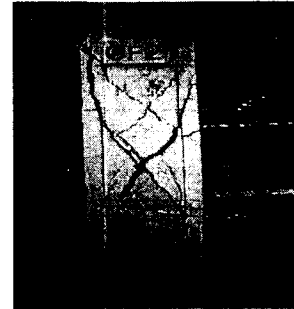
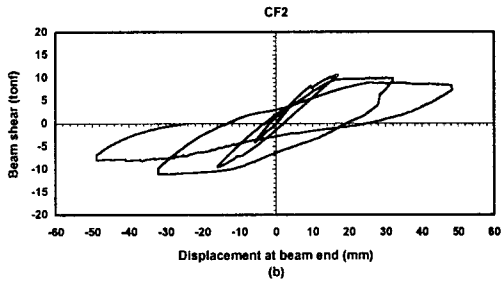


(d)

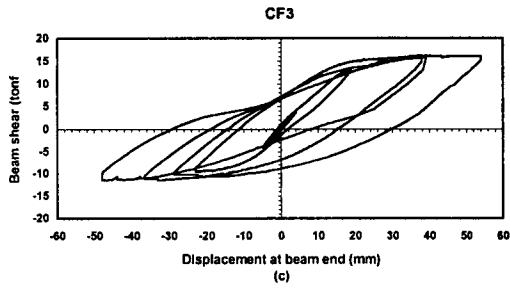
그림 2 시험체 상세



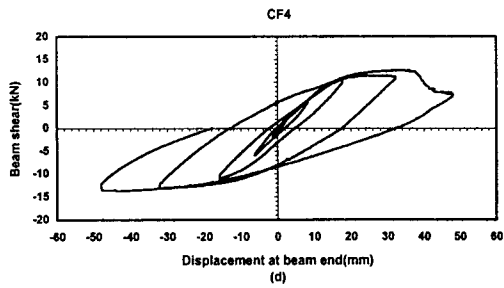
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 4 하중-변위 관계

그림 5 최종 파괴상황