

T-스티프너로 보강된 CFT 기둥-H형강보 접합부의 내진성능

Seismic Performance of CFT column to H beam Connections

Reinforced with T-stiffeners

김 영 주¹⁾ · 채 영 석²⁾ · 신 경 재³⁾ · 오 영 석⁴⁾ · 문 태 섭⁵⁾

Kim, YoungJu · Chae, Young Suk · Shin, Kyung Jae · Oh, Young Suk · Moon, Tae Sup

요 약 : 이 논문은 모멘트 저항골조의 접합부에 이용하기 위한 T-스티프너로 보강된 접합부의 내진성능에 관해 나타냈다. 접합부는 보플랜지와 기둥플랜지에 T-스티프너의 수평 및 수직요소가 용접되어 보강되었다. T-스티프너 접합부의 거동을 명확히 파악하기 위해 유한요소해석과 실험이 수행되었다. 유한요소해석결과, T-스티프너의 수평요소의 길이가 길어짐에 따라 T-스티프너는 보플랜지와 수평요소사이의 응력집중을 줄이는데 효과적임을 나타냈다. 또한, 접합부의 이력 거동을 파악하기 위해 실험대형 접합부 실험을 실시하였다. 주요 변수는 보에 대한 T-스티프너의 강도비와 수평요소의 형상이다. 수평요소의 길이가 길수록 접합부의 변형능력은 증가하였고, 모든 실험체는 방추형의 안정된 이력거동을 나타내었다.

ABSTRACT : This paper presented the seismic performance of T-stiffener moment connections for use in steel moment-resisting frames. The connections were strengthened by welding the vertical and horizontal element of the T-stiffener to the beam flange and column flange. Finite element analysis and experiments were conducted to determine the behavior of T-stiffener-reinforced connections. The results of the finite element analysis confirmed the effectiveness of the T-stiffener, whose horizontal element lengthened to mitigate local stress concentrations of the beam flange on the horizontal stiffener. Full-scale specimens were also tested cyclically to study hysteresis behavior. The main parameters used were the ratio of the T-stiffener to beam strength and the shape of the horizontal element. As the length of the horizontal element increased, the deformation capacity of the connections enhanced. Likewise, all specimens behaved according to the Ramberg-Osgood curve and showed stable hysteresis behavior.

핵심용어 : T-스티프너, T-스티프너의 수직 및 수평 요소, 강도비, 소성변형능력

KEYWORDS : T-stiffener, vertical and horizontal element of T-stiffener, strength ratio, plastic deformation capacity

1. 서 론

1994년 캘리포니아 노스리지 지진과 1995년 효고현 남부 지진 이후, 새로운 모멘트 골조건설뿐만 아니라 기존의 모멘트 골조를 보수·보강하여 더 우수한 모멘트 접합부를 개발하기 위해 수많은 연구와 실험들이 실시되어 왔다.

미국에서는 SAC Joint Venture를 결성하여, 이러한 문제들을 해결하기 위해서 많은 다른 타입의 접합부 상세를 제시하였다. 이러한 대다수의 노력들은 접합부에서 용접의 문제와

접합형식의 향상에 초점을 두었다(SAC, 1995, FEMA, 2000). 그 결과, 접합부를 강하게 하는 많은 방법들이 제시되었다. 대표적인 예로, Cover-plate 보강(T. Kim et al., 2002), 삼각 리브(rib) 보강(Gross et al., 1999) 그리고, 헌치(Haunch) 보강(Lee et al., 1997) 등이 있다.

일본에서는 콘크리트충전각형강관(CFT)을 기둥으로 한 접합부 상세를 지속적으로 연구하고 있다. 기존의 접합공법으로 외부다이어프램형, 내부다이어프램형과 관통다이어프램형의 세 가지가 주로 사용되고 있다(AIJ, 2001). 외부다이어프램형은 강관의 충전성확보에는 좋으나, 강관외부에만 다이어프

1) 정회원, 한양대 건축공학과 박사과정
(Tel: 02-290-0312, Fax: 02-2296-4145 E-mail: kyj282@empal.com)

2) 정회원, 우송공업대학 건축과 교수(chae@woosongtech.ac.kr)

3) 정회원, 한남대 건축공학부 교수(shin@mail.hannam.ac.kr)

4) 정회원, 대전대 건축공학부 교수(ysoh@dragon.taejon.ac.kr)

5) 정회원, 한양대 건축공학부 교수(blue-moon@hanyang.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2004년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

램을 두어 응력전달이 원활히 이루어지기를 기대하기 어렵고, 내부 및 관통다이아프램형은 응력전달은 원활히 이루어지나, 기둥 강관을 절단해야 하는 공정상 번거로움이 있다.

최근 CFT기둥을 사용한 다양한 접합형식이 보고 되었다. Elremaily(2001) 등은 강접골조에 고력볼트를 사용한 CFT 기둥-보 접합부에 관한 연구를 수행하였다. 또한, Beutel (2002) 등은 접합플레이트(flange connection plate)와 보 강 바(reinforcing bars)를 이용한 원형CFT 기둥-보 접합부에 관해 반복가력실험을 수행하였다. 또한, Kimura (2000) 및 Masuda(2000) 등은 접합부보강에 수직요소 플레이트를 이용하였다.

국내에서도 CFT기둥의 적용성 검토에 관한 논의가 활발히 진행되고 있는 가운데, 최근 필자등은 CFT 기둥-보 접합부에 대한 T-스티프너 보강방법(그림1)을 제시하고, 일련의 연구들을 실시하였다.

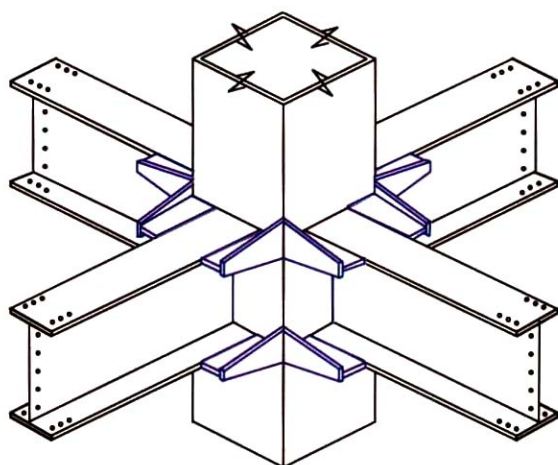


그림 1. T-stiffener보강 접합부

Shin(1998) 등은 T-스티프너와 강판으로 보강된 CFT 기둥-보 접합부에 관한 실험을 실시하였다. 실험결과, 대체로 안정된 이력거동과 우수한 내력특성을 나타내었으나 수직요소의 편칭쉬어에 의한 취성파단 현상이 관찰되었다. 이러한 단점을 해결하기 위해서, Oh(1999), Moon(2001)과 Kang (2002) 등은 T-스티프너 접합부에 관한 보완 실험을 실시하였다. 그 결과 기존문헌(Shin et al., 1998)에서 관찰되었던 수직요소의 편칭쉬어를 방지하였을 뿐만 아니라 접합부의 우수한 변형능력이 관찰되었다. 또한, 변수해석을 통한 T-스티프너 설계식도 제안하였다. 하지만 이러한 일련의 연구들은 실험이 아닌 축소모형 실험이었다. 따라서 실험(Mock-up test)을 통한 접합부의 실제거동 파악의 필요성이 요구되어, 필자(Kim et al. 2001)은 6개의 실험을

통해 기존문헌(Kang et al., 2002)에서 제시된 설계식들의 적용 타당성을 검증하였고, T-스티프너가 내진성능에 효과적임을 보였다. 하지만, 우수한 변형능력에도 불구하고 축소모형 실험에서는 잘 관찰되지 않던 수평요소 선단부가 응력집중에 의해 취성파단하는 현상이 관찰되었다.

본 연구의 목적은 Kim(2001)의 연구에서 관찰된 수평요소 선단부의 응력집중이 나타나는 주요원인을 파악하고, 이러한 응력집중 현상을 해결할 수 있는 방법을 제시하는 것이다. 이를 위해 ABAQUS(1998)를 이용한 유한요소해석을 실험과 병행하여 실시하였다.

2. 유한요소 해석

전절에서 기술한 것과 같이, T-스티프너 접합부는 내력이나 변형능력에서 효과적임을 기존의 실험을 통해 확인하였다. 그러나 T-스티프너의 기하학적 특성상, 수평요소 선단부에서의 응력집중에 대해 효과적으로 대처하지 못하는 단점이 실험을 통해 관찰되었다. 이러한 단점을 해결하기 위해서는 다수의 실험을 통한 접합부의 성능평가 확인이 제일 명확하지만, 비용등의 문제 때문에 어려움이 많다. 따라서 유한요소해석을 수행하여 적절한 디테일을 선정한 후 실험을 실시하고자 하였다. 따라서 범용 구조해석 프로그램인 ABAQUS를 통해 해석을 실시하였다.

2.1 유한요소해석 모델

그림 2는 본 연구에 사용된 3차원 유한요소모델이다. 대부분의 3차원 해석의 모델링에 사용되는 요소는 Shell요소나 Solid요소로 모델링을 하게 된다. 본 연구에서는 접합부의 응력상태를 보다 상세히 파악하기 위해 1/2모델로 해석을 실시하여 시간의 단축을 꾀하였고, 사용된 요소로는 8개의 적분점이 모두 있는 1계요소인 C3D8을 사용하였다. 재료의 모델에 대해서는, True stress와 True strain의 관계를 ABAQUS 해석에 반영하였다.

접합부의 실험체는 전체거동과 보플랜지의 비대칭 좌굴을 파악하기 위한 전체 모델과 해석시간과 수렴성을 고려하여 1/2만 모델링하여 해석하였다. 해석에 사용된 보 부재로서는 H-506x201x11x19, 기둥부재는 □-500x500x12를 사용하였고, T-스티프너는 수평요소의 길이에 따라 보에 대한 수평요소의 강도비를 변수(100%-ITS100, 120%ITS120%, 및 140%-ITS140)로 하였다(그림 4).

강관과 콘크리트의 경계는 접촉면(Contact Pair)을 이용하였다. 접촉은 강관과 콘크리트가 연결되어 있는 상태로 인장

력을 받게 되면 콘크리트와 강관은 서로 분리되고, 압축력을 받게 되면 강관이 콘크리트면에 압축력을 전달하게 된다. 접촉의 설정시 강재는 Master Surface로 정하고 콘크리트는 Slave Surface로 설정하여 실제상황과 같이 강관이 콘크리트면에 압축력을 가해도 콘크리트가 강관을 관통할 수 없게 모형화 하였다. 그리고 가력방법은 반복가력이 아닌 단순가력으로 보의 Plastic Rotation이 3% rad.일 때까지 가력하였다.

2.2 해석 결과

그림 3은 ITS100의 변형상황을 나타낸 것이다. 그림에서 강관의 면외변형이 관찰되었다. 이러한 강관플랜지의 면외변형은 보웨브의 모멘트 전달효율을 저하시키므로, 그 응력을 보플랜지에 더욱 부담하게 하는 것이 보고 되었다(Matsumoto et al., 1999). 이러한 현상은 접합부에서 보플랜지가 조기에 취성파단하는 결과를 초래했다. T-스티프너는 이러한 강관플랜지의 면외변형에 저항하기 위해 적절한 수평요소의 길이가 요구된다. 이러한 수평요소의 저항으로 인해 수직요소로 통하여 기둥에 모멘트가 잘 전달되는 것이 요구된다. 문헌 15)에는 이러한 효과를 관찰할 수 있는데, 수평요소의 길이가 부족할 경우에 강관의 면외변형이 심화되어 결국 수평요소의 선단에서 파단되는 현상이 나타났다. 따라서 효과적인 모멘트의 전달을 위해서 전단력에 저항하는 수평요소의 길이와 인장력에 저항하는 수직요소의 높이를 적절히 정하는 것이 중요하다. 또한, Kim(2001)의 연구에서 제기된 수평요소의 끝단이 응력집중에 의해 취성파단하는 사실에 주목하여, 이러한 응력집중 효과를 관찰하고, 해결책을 모색하기 위해 다음과 같은 내용을 살펴 볼 필요가 있다.

해석결과의 판정을 위해 여러 가지 응력 및 변형도 지수를 사용하였다. 응력 및 변형도 값은 모두 항복응력(σ_y)과 항복 변형도(ϵ_y)로 나누어 무차원화 하였다.

2.2.1 PEEQ Index

등가소성변형도를 항복변형도로 나눈 값으로 정의한다. 이 지수는 재료의 항복여부를 알아보는 데 매우 유용하다. 식(1)은 PEEQ Index를 정의하는 식이다(Chen et al., 1988).

$$\text{PEEQ Index} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3} \epsilon_{ij}^2 \epsilon_{ij}}}{\epsilon_y} \quad (1)$$

여기서 ϵ_{ij} 는 소성변형 성분 텐서를 나타낸다.

2.2.2 MISES Index

Von Mises 응력을 그 재료의 항복응력으로 나눈 값으로 정의한다. 식(2)는 Mises Index를 정의하는 식이다.

$$\frac{\sigma}{\sigma_y} = \frac{\sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}}}{\sigma_y} \quad (2)$$

여기서 $S_{ij} (= \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij})$ 는 편차응력 성분 텐서를 나타낸다. σ_m 은 평균 정수압을 나타내고, δ_{ij} 는 Kronecker Delta이다. 이러한 지수들을 살펴볼 위치는 그림 4와 같이 수평요소 끝단(A점)에서 보플랜지 중심(B점)까지이다.

그림 5는 PEEQ 지수를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 수평요소의 강도비가 증가 할수록, 즉, 수평요소의 내측 길이(그림4)가 길어질수록 수평요소 끝단부의 소성변형집중도가 저하하는 것을 알 수 있다. 수평요소 끝단에서의 PEEQ 지수는 TS100을 기준으로 할 때, TS120은 47%이고 TS140은 27% 이다.

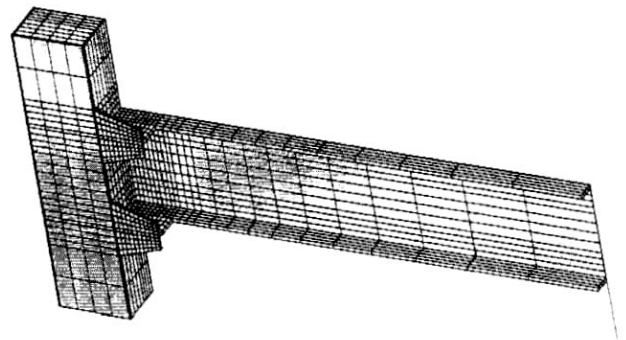


그림 2. 3차원 유한요소 모델

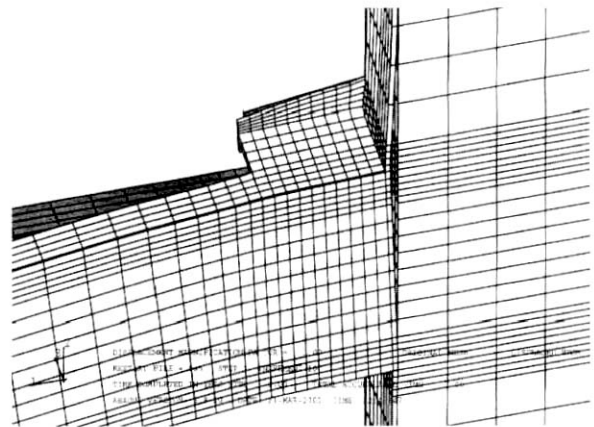


그림 3. ITS100의 변형.(BPR=3% rad.)

표 1. 실험체 일람

Specimens	Vertical Element		Horizontal Element		Beam	Column
	V/B ^a [%]	height[mm]	H/B ^b [%]	length[mm]		
TS100	100	220	100	230	H-506x201x11x19	□-500x500x12
TS120	100	220	120	270		
TS140	100	220	140	320		

V/B : ratio of Vertical Element strength to beam strength, H/B : ratio of Horizontal Element strength to beam strength

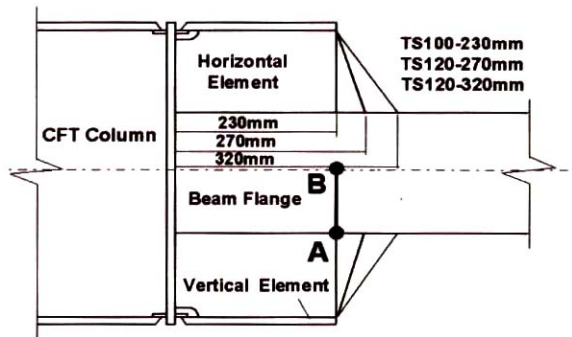


그림 4. 변수 및 해석위치

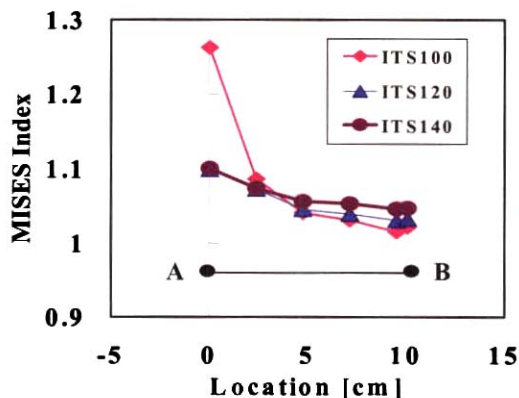


그림 5. PEEQ Index

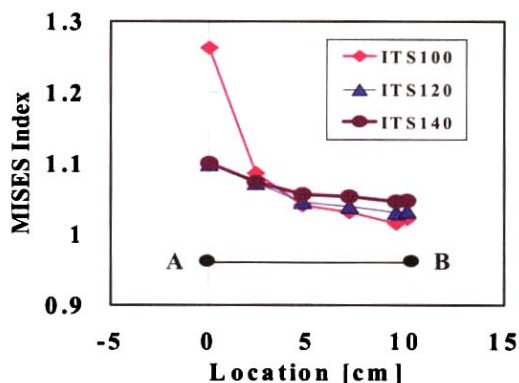


그림 6. MISES Index

그림 6은 MISES 지수를 나타내는데, 수평요소의 끝단에서 TS100에 대해, TS120 및 TS140은 공히 87%정도의 변형도 지수를 나타내었다. PEEQ 및 MISES 지수를 통해서, 수평요소의 강도비가 증가할수록 변형집중의 영향이 완화되는 것을 알 수 있으며, 이는 내측길이의 증가로 인해 단면의 변화가 완화된 것이 때문이라고 생각된다.

3. 실험 연구

본 연구에서 실험의 중점은 T-스티프너 접합부에서 수평요소 선단부의 취성파단을 방지하여 우수한 변형능력을 확보하는 것이다. 전절에서 실시한 유한요소해석 결과, 응력집중을 방지할 수 있는 가능성을 모색하였으며, 이를 바탕으로 실험을 통해 실제적인 거동을 확인할 필요가 있다.

3.1 실험체

본 연구에서는 중층 규모 철골 건물의 외측부분의 기둥-보 접합부를 대상으로 한 T자형 실험체를 이용했다(그림 7). 실험체에 이용된 강재는 모두 SS400이다. 보는 압연 H형강보(H-506×201×11×19)를 사용하였고, 기둥은 용접접합(Built-up)의 각형강관기둥(□-500×500×12)을 사용하였다. 기둥의 중심으로부터 가력점까지의 거리는 3500mm, 기둥의 상하 지점간 거리는 3000mm이다. 접합부는 각형강관 기둥과 철골보를 직접 용접한 후 T-스티프너(수평·수직요소)를 용접하였다. 플랜지는 스캘럽을 사용한 완전용입용접, 웨브는 모살용접이고, 스캘럽의 형상은 R=35mm인 종래형의 형상이다. 또한, 보플랜지와 수평스티프너의 용접의 경우, 완전용입용접을 세라믹 뒷담채를 이용하여 행하였다. 이는 기존 실험 15)의 결과에 따라 이 부분이 응력상 중요한 부분으로 판단되었기 때문이다.

실험체는 T-스티프너 상세(그림 8)를 가진 실험체로서, 각각 TS100, TS120, 그리고 TS140이다. 여기서, 실험체명 뒤의 숫자는 보에 대한 수평요소의 강도비(HE/B)를 백분율

로 나타낸 것이다. 예를 들어 TS140은 보의 전소성모멘트를 보플랜지 우력으로 치환한 플랜지력에 대한 수평요소의 강도비가 140%가 된다는 것이다. 기존연구에서 나타난 바와 같이 수평요소가 보플랜지와 용접되는 부분이 수직으로 만날 경우, 급격한 단면변화에 의한 응력집중이 매우 크다는 사실에 주목하였다. 따라서 이러한 응력집중에 효과적으로 대처하기 위해 그림4와 같이 수평요소의 내측길이를 변수로 놓고 플랜지와 일정한 각이 발생하도록 하였다.

실험체의 일람은 표1에 나타내었고, 사용된 강재의 인장시험결과는 표2에 나타내었다. 각형강관에 충전된 콘크리트 공시체의 28일 압축강도는 244kg/cm^2 으로 나타났다.

3.2 가력장치 및 가력방법

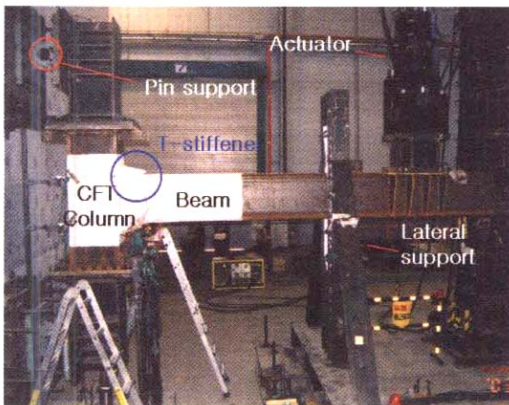


그림 7. 실험 셋팅도

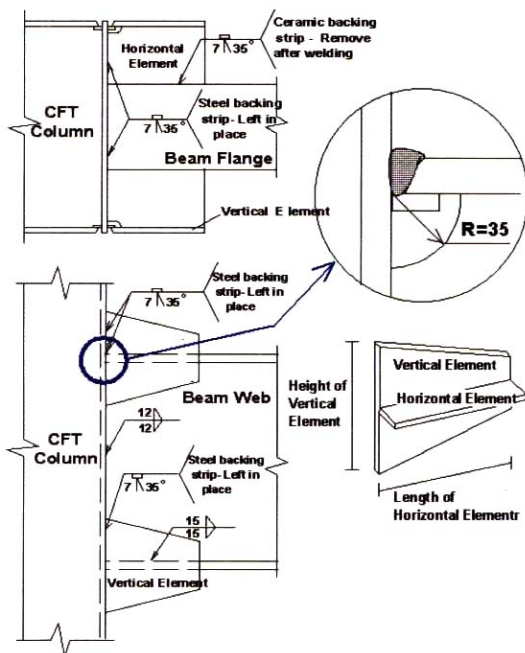


그림 8. T-스티프너 접합부 상세

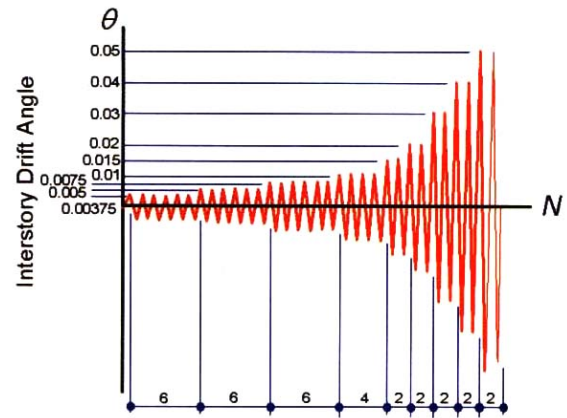


그림 9. 목표가력 패턴

실험에서는 최대하중용량 200t, 스트로크 용량 $\pm 300\text{mm}$ 의 성능을 가진 정적 액추에이터를 사용하여 가력을 하였으며, 실험체 셋팅도를 그림 7에 나타냈다. 실험체와 반력벽과의 접합은 기둥상하단에 대해 편접합부이고, 시험체 자유단은 액추에이터와 연결되어 수직하중을 작용시키도록 했다. 또한, 실험 중에는 구면외의 면외변형을 구속하기 위한 횡좌굴 방지 장치와 변위계 설치를 위한 계측프레임을 설치하였다.

가력은 SAC protocol에 의해서 그림 9의 목표 가력패턴에 따라서 실시하였다(SAC, 1997).

표 2. 강재인장시험 결과

Specimens	Yield stress (tf/cm^2)	Tensile stress (tf/cm^2)	Elongation (%)	Yield Ratio (%)
BF-19	3.39	4.98	26	68
BW-11	4.00	5.22	24	77
PL-12	2.87	4.54	28	63
PL-19	3.22	4.62	30	70

4. 실험결과

4.1 모멘트-회전각 및 실험경과 상황

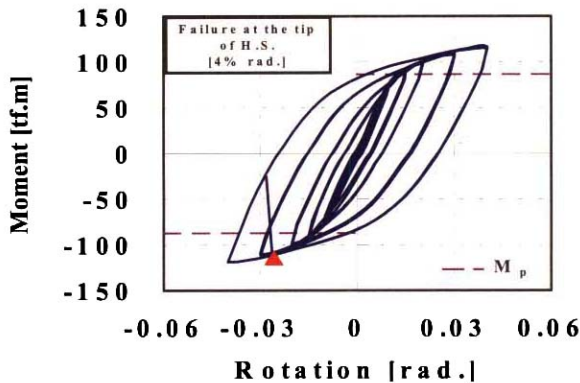
표 3과 그림 10-12에 각각 전체적인 실험결과와 모멘트-회전각 관계곡선 및 파괴상황을 나타내었다. 실험체 3개 모두, T-스티프너 선단부 지점에서 즉, 기둥면에서 일부 떨어진 지점에 석고박리로 인한 소성화면적의 확대현상을 확인할 수 있었고, 대체로 안정된 이력루프를 형성하였다. 각 실험체의 최대내력은 3개 모두 거의 비슷한 값을 나타내었고, 전소성모멘트에 대한 최대내력의 비율이 1.26-1.36의 분포를 나타내었다. 이러한 결과는 T-스티프너 접합부가 보의 전소성모멘트를

상회한 이후에도 충분한 이력거동을 나타낸다고 할 수 있다.

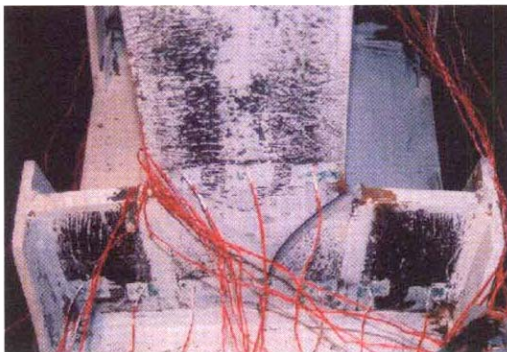
각 실험체별 실험경과 내용은 다음과 같다.

4.1.1 TS100

TS100실험체는 수평요소의 강도비를 100%로 한 실험체다. 6사이클 때에 수평요소 선단부에서부터 가력점 방향으로 약 보춤의 거리의 보플랜지 부분에서 소성화가 진행되는 것이 관찰되었다. 7사이클 [0.03rad.]에는 보플랜지뿐만 아니라 보웹에서도 소성화 현상이 나타나기 시작했다. 8사이클 [0.04rad.]에는 수평요소 끝부터 시작된 보플랜지와 웹의 소성화가 더욱 선명해지기 시작했다. 하지만, 8-2사이클 때 정하중 [하부로 전단력이 작용할 때, 즉 상부플랜지가 인장력을 받을 때] 때에 후면 상부수평요소의 선단에서 미세균열이 관찰되었다. 부하중 때에 보의 소성화 면적이 증대되는 현상이 심화되면서 후면 하부수평요소 선단의 균열로 시작된 취성적인 파단현상이 큰 굉음과 함께 나타났다. 관찰해 본 결과, 수평요소 끝단의 균열로부터 보플랜지 내부로의 취성파면이 기둥 플랜지 직전까지 이어졌음을 확인할 수 있었다(그림 10).



(a) 모멘트-회전각 관계



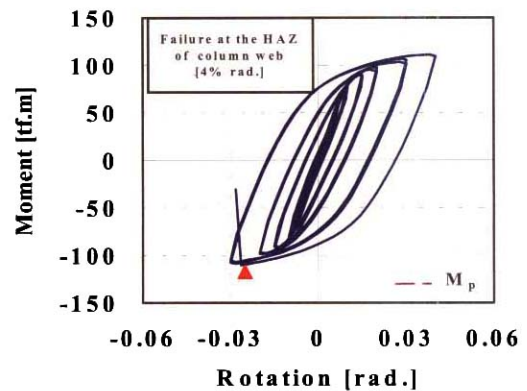
(b) 파괴상황

그림 10. TS100 실험체 결과

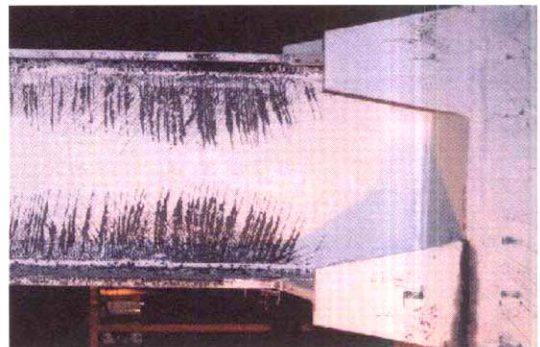
4.1.2 TS120

그림 11은 TS120의 모멘트-회전각 곡선 및 파괴상황을 나타낸 것이다. TS120실험체는 수평요소의 강도비를 120%로 계획한 실험체이다. 5사이클 [0.015rad.], 6사이클 [0.02rad.] 및 7사이클 [0.03rad.]에서는 소성화 현상이 뚜렷하게 관찰되었다. 8사이클에서 정가력시에 후면상부 수평요소의 끝단부에서 미소 균열이 발생하였고, 부가력시에 후면하부의 기둥웹과 수직요소의 용접 열영향부(HAZ)에서 취성적으로 파단하였다.

4.1.3 TS140



(a) 모멘트-회전각 관계



(b) 파괴상황

그림 11. TS120 실험체 결과

TS140실험체는 수평요소의 강도비를 140%로 하여 용접 선단부에서 발생하는 응력집중을 적절히 대처하기 위해 계획되었다. 5사이클 [0.015rad.] 때에는 보의 플랜지와 웹에 소성화가 심화되었으며, 이러한 현상은 6사이클 [0.02rad.] 및 7사이클 [0.03rad.]을 거치면서 보의 소성화 영역이 확장되는 것이 석고균열로 통하여 명확히 관찰되었다. 8사이클 [0.04rad.] 때에는 하부후면 수평요소의 선단부에서 미소한 균열이 발생

표 3. 실험 결과

Specimens	Instance of failure ^a	M_{max}/M_p		Plastic Rotation [% rad.]	Location of crack initiation ^b	Failure Mode
TS100	-4.2	1.36	-1.36	3.1	HOR	Brittle fracture
TS120	-4.1	1.28	-1.26	2.1	VER	Brittle fracture
TS140	6.2 ^c	1.29	-1.36	5.4	-	Local buckling

^a The instance of failure is described, for example, as -4.2, which indicates that failure occurred during the negative excursion (-) of the second cycle (2) at the 4% rad. amplitude.

^b HOR: Tip of Horizontal stiffener/ VER: HAZ of Column web and Vertical stiffener

^c Local buckling of beam without brittle failure

했다. 또한, 보의 플랜지와 웨브가 일부 국부좌굴 현상이 나타났다. 9사이클 [0.05rad.]때는 전사이클에서 발생한 하부수평요소의 균열이 보플랜지 내부로 서서히 연속적으로 진행하였으나 취성적인 파단상황으로의 진전은 발생하지 않았다. 10 사이클 [0.06rad.]때에는 강성과 내력이 감소하여 결국 최대 내력의 80%이하에 이른 것을 확인한 후 실험을 종료하였다. 모멘트-회전각 관계에서 전체적으로 안정적인 방추형의 이력거동을 나타내었다.

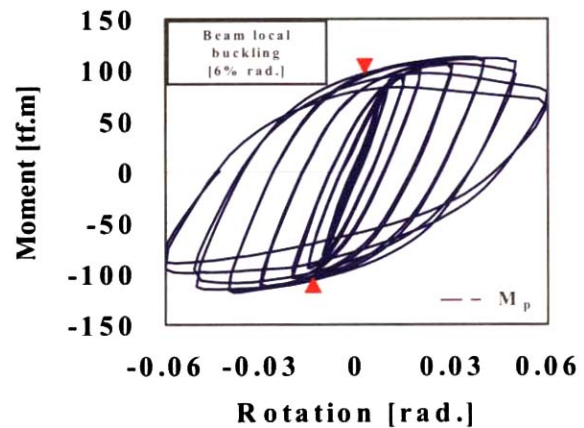
4.2 파괴모드 및 변형능력

TS100 실험체의 경우, -4.2 사이클에서 수평요소 끝단부의 취성적 파단이 관찰되었다. 이러한 결과는 이미 문헌 17) 등에서 제기된 것으로 보의 단면이 수평요소로 인해 급격한 단면변화를 나타낸 것이 주요 원인으로 생각된다. 하지만, 파단하기 전까지 총소성회전각이 3.1% rad.으로 나타났다. 즉, 파단의 유형은 바람직하지 못했지만, 이미 파단 이전에 충분한 소성변형능력을 나타냈다고 할 수 있다.

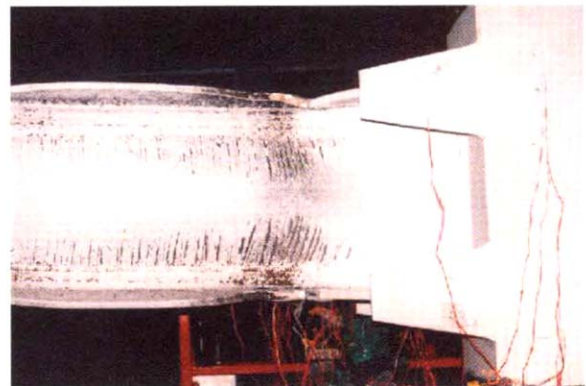
하지만, TS120의 경우에는 수직요소와 기둥웨브의 용접열영향부(HAZ)에서 -4.1 사이클 때 취성파단하는 결과를 나타내었다. Engelhardt (1998)의 연구에서는 접합부 취성파단의 원인을 용접봉의 인성(toughness), 용접 입열량, 및 용접 기술자의 숙련도등으로 분석했다. 본 연구에서 실험된 3개의 실험체는 수평요소의 형상외에는 다른 부분이 없음에도 불구하고 TS120에만 HAZ부의 취성파단이 나타난 사실에는 주목할 필요가 있다. 이에 대한 실험적이고 해석적인 연구가 요구된다. 이러한 결과에도 불구하고 총소성회전각은 2.1% rad.으로, AISC (1997)에서 중간모멘트골조의 내진성능요구치인 2% rad.의 소성변형능력을 확보하였다

TS140의 경우, 매우 우수한 변형능력을 나타내었다. 접합부의 취성적인 파단없이 최대하중 이후에도 안정된 이력거동을 나타냈다. 총소성회전각이 5.4% rad.으로 AISC(1997)

에서 특별모멘트 골조의 내진성능요구치인 소성회전 능력 3% rad.을 훨씬 상회하는 결과를 보였다. 이러한 결과는 유한요소해석을 통해 수평스티프너 단부의 소성변형집중을 방지하는데 효과적이라는 것을 확인시켜 주었다.



(a) 모멘트-회전각 관계



(b) 파괴상황

그림 12. TS140 실험체 결과

3개의 실험체 중 2개는 취성파단 하였고, 1개는 취성파단 없는 큰 소성변형능력을 나타내었다. 특히, TS100과 TS120

은 취성적인 파단을 하였음에도 불구하고, 파단이전에 어느 정도의 소성변형능력을 발휘 한 사실은 T-스티프너 보강의 영향을 잘 나타내 주는 것으로 판단된다.

5. 결 론

실험적 연구와 해석적 연구를 기초로 하여, 3개의 T-스티프너로 보강 기둥-보 접합부에 다음과 같은 사실을 확인하였다.

수평요소의 내측 길이를 증가시켜서 급격한 단면변화를 완화시키면, 수평요소 선단의 응력집중을 줄이고, 취성파단을 방지하는데 효과적이다. 또한, 유한요소해석을 통해서 이러한 방법이 소성변형집중을 방지한다는 사실을 명확하게 나타냈다. TS100와 TS120는 취성파단하였음에도 불구하고, AISC (1997)에서 중간모멘트골조의 내진성능요구치인 2% rad.의 소성변형능력을 확보하였다. T-스티프너를 접합부에 보강할 경우, 보의 전소성모멘트 이후에도 어느 정도의 소성변형능력을 확보할 수 있다는 것을 보여 주었다. T-스티프너를 사용할 경우, 기둥에서 어느 정도 떨어진 보에서 소성구역의 확장을 유도해서 큰 소성변형능력을 나타낸다는 것을 실험을 통해 알 수 있었다.

참고 문헌

- SAC(1995), Interim Guidelines evaluation, repair, modification and design and design of welded steel moment frame structures, FEMA 267/SAC 95-02, SAC Joint Venture, Sacramento, Calif.
- FEMA-355D(2000). State of the art report on connection performance, prepared by the SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA
- T. Kim, A.S. Whittaker, A.S.J. Gilani, V.V. Berto, and S.M. Takhirov(2002), Cover-plate and Flange-plate steel moment-resisting connections, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 128, No.4, pp.474-482
- J.L. Gross, M.D. Engelhardt, C-M. Uang, K. Kasai, N.R. Iwankiw(1999), Modification of existing frame connections for seismic resistance, Steel Design Guide Series, AISC
- Lee, C-H and Uang, C-M(1997), Analutical modeling of dual panel zone in haunch repared steel MRFs, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 123, No.1, pp.20-29
- AIJ Standard for Structural Calculation of Steel Reinforced Concrete Structures(2001): Allowable Stress Design, and Horizontal Load-Carrying Capacity. Revised 2001, AIJ.
- Elremaily A. and Azizinamini A(2001), Experimental behavior of steel beam to CFT column connections, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.57, No.10, 1099-1119
- J. Beutel, D. Thambiratnam, N. Perera(2002), Cyclic behavior of concrete filled steel tubular column to steel beam connections, *Engineering Structure*, Vol.24, pp.29-38
- Masuda, H., Tanaka, A., Ishimura, R., Hirai, K., and Sasaji, S.(2000), Experimental study on the statical characteristics of perimeter beam-to-SHS column connections using vertical stiffener plates, *Journal of structural and Construction Engineering*, AIJ, Vol.534, No.8, 167-174.
- Kimura, J., and Matsui, C.(2000), Structural performance of H-shaped steel beam to square tube steel column connection using vertical stiffeners, Summaries of technical papers of Annual Meeting, AIJ, 631-32.
- Shin, K. J., Oh Y. S., and Moon, T. S.(1998), Test of concrete-filled box column to H-beam connections, *Proceedings of Pacific Structural Steel Conference (PSSC)*, Seoul, Korea, Korean Society of Steel Construction (KSSC), 881-6.13.
- Oh, Y. S.(1999), CFT column to H-beam connections with T-stiffeners, Report. No. STRESS-98-07, Seoul (South Korea): Advanced Structure Research Station (STRESS), Hanyang University.
- Moon, T. S., Oh, Y. S., Shin, K. J., and Kang, C. H.(2001), Hysteresis behavior of CFT column to H-beam connections with external T-stiffeners and penetrated elements, *Engineering Structure*, 23(9): 1194-201.
- Chang-Hoon Kang, Young-Suk Chae, Kyung-Jae Shin, Young-Suk Oh, and Tae-Sup Moon(2002), CFT column to beam flange connections with external stiffeners, *Second International Symposium on Steel Structures* 21-22 November, Seoul, Korea :123-30
- Kim, Y-J, Kang, C-H, Shin, K-J, OH, Y-S, and Moon, T-S(2001), Behavior of CFT column to H-beam full-scale connections with external T-stiffener, KSSC, Vol. 13, No. 6, pp715-723.

- ABAQUS/Standard user's manual. Version 5.8, Habbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R.I., 1988
- Y. MATSUMOTO, H. AKIYAMA, and S. YAMADA (1999), Relation between deformation capacity of beam at steel beam-to-column connection and joint efficient, *Journal of structural and Construction Engineering*, AIJ. Vol. 523, No.9, 117-124.
- Chen, W. F. & Han, D. J(1988). Plasticity for Structural Engineers Springer-Verlag.
- SAC(1997), SAC Protocol for Fabrication, Inspection, Testing, and Documentation of Beam-Column Connection Tests and Other Experimental Specimens, Report No. SAC/BD-97/02
- M.D. Engelhardt, T.A. Sabol(1998), Reinforcing of steel moment connections with cover plates: benefits and limitations, *Engineering Structure*, Vol. 20, No.4-6, pp.510-520
- Seismic provisions for structural steel buildings, AISC(1997)
- (접수일자 : 2003. 8. 13 / 심사일 2003. 9. 5 / 심사완료일 2003. 10. 13)