

CFT 기둥-H형강보 엔드플레이트 접합부의 보-패널존 강도비에 따른 내진성능 평가

Evaluation of Seismic Performance in Relation to Beam-Panel Zone Strength Ratio of CFT Column to H-beam Endplate Connections

김 영 주¹⁾ · 김 재 건²⁾ · 오 영 석³⁾ · 문 태 섭⁴⁾
Kim, Young Ju Kim, Jae Keon Oh, Young Suk Moon, Tae-Sup

요 약 : 본 논문은 CFT기둥-H형강보 철골 모멘트 접합부의 보-패널존 강도비에 의한 내진거동을 평가하였다. 보에 대한 패널존의 상대강도를 주요변수로 하였다. 각 실험체는 H-350×175×7×11 보(SS400)와 □-250×250×9, □-250×250×12 기둥(SPSR400)으로 제작되었다. 실험체의 에너지 흡수량은 5.2~12.7(tm)의 분포를 나타냈다. 패널존이 보에 비해 너무 강하거나 약하면, 에너지 흡수능력이 열등했다. 철골 모멘트 저항골조에 있어서 본 실험의 결과는 패널존의 항복을 허용하는 것이 내진거동에 유리함을 나타내고 있다.

ABSTRACT : This paper presents the results of cyclic seismic performance in relation to beam-panel zone strength ratio of CFT Column to H-beam steel moment connections. Each test specimen consisted of H-350×175×7×11 beam(SS400) and □-250×250×9, □-250×250×12 column(SPSR400). Main parameter is a column panel zone strength relative to beam strength. Energy absorption capacity available in the specimens ranged from 5.2 to 12.7(tm). If panel zone strength relative to beam strength is too strong or weak, the energy absorption capacity tended to be inferior. About steel moment-resisting frame, the test results of this experiment seem to support the investigation that permitting panel zone yielding shall be more advantageous to enhancing total seismic performance.

핵심용어 : 엔드플레이트 접합부, 내진 성능, 철골 모멘트골조, 에너지 흡수능력, 보-패널존 강도비

KEYWORDS : endplate connection, seismic performance, steel moment-resisting frame, energy absorption capacity, beam-panel zone strength ratio

- 1) 한양대학교 건축공학과 석사과정
- 2) 한양대학교 건축공학과 공학박사
- 3) 정희원, 대전대학교 건축공학과 부교수
- 4) 정희원, 한양대학교 건축공학과 교수, 포함재철 석좌교수

본 논문에 대한 토의를 2001년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

현재 사용되고 있는 내진 기준들의 대부분은 인명보호를 위한 최소한의 규정이라고 할 수 있다. 물론 구조물의 중요도에 따라 각 기관에서 인명보호(Life Safety)보다는 지진운동에 대한 손상제어를 목표로 내진기준을 만들기도 한다. 하지만, 일반적인 건물 설계를 위한 내진설계 기준에서 사용하는 목표 한계상태(Target Limit State)는 건물이 그 수명동안 발생할 수 있는 최대지진(Maximum Credible Earthquake)에 대하여 구조물과 비구조물의 손상으로 인한 인명피해가 있어서는 안된다는 것이 NEHRP(1994)기준에 나타나 있다.

따라서, 구조물의 에너지 흡수능력을 하중을 제외시킨 변형만으로 측정하는 단편적인 방법만이 아닌 양자의 곱에 의한 에너지로서 평가하여, 지진입력에너지와 비교하는 방법에 의한 내진 설계법이 최근 주목을 받고 있다. 또한 최근의 여러 연구에서 많은 관심거리로 대두되고 있는 패널존이 항복은 에너지 흡수 능력과 복원력 특성에 있어서 좋은 효과가 있다는 사실로서 오랫동안 인식되어 왔다.⁽¹⁾ 철골모멘트 접합부가 내진성을 확보하기 위해서는 보-기둥 접합부의 취성 파괴 없이 보, 패널존 또는 접합부에서 반복적 소성능력을 발휘할 수 있어야 하는데, 이는 접합부 주변 부재 모두가 상호작용하여, 철골 모멘트 접합부의 소성회전능력에 영향을 미친다는 것이다. 특히 패널존 항복이 모멘트 접합부의 내진성능에 미치는 영향에 대해서는 충분히 규명되지 않고 있다.⁽²⁾

따라서, 본 연구에서는 보, 패널존, 기둥 및 접합부의 하중-변위관계를 알아보고, 에너지를 파악하여 (1) 패널존, 보, 접합부 및 기둥이 에너지 흡수능력에 기여하는 정도를 파악하고, (2) 보-패널존 강도비⁽³⁾에 의한 에너지 흡수능력을 비교하여, 패널존 항복이 모멘트 접합부의 내진성능에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

2. 재료 시험

2.1 강재의 인장강도 시험

본 시험에 사용된 강재의 기계적 성질을 파악하기 위하여, KS B 0801의 금속재료 인장 시험편 규준에 따라 인장시험편을 절취하여 강재의 인장강도 시험을 실시하였다. 강재의 재질은 KS D 3503의 규격인 SS400 (SS41)이고, 강관시험편은 SPSR400이며, 인장강도 시험결과는 표 1에 나타내었다.

표 1. 강재 인장강도 시험 결과

시험체	σ_y (t/cm ²)	σ_u (t/cm ²)	σ_y/σ_u	Elo. (%)
HF-11	3.33	4.96	0.67	32
HW-7	3.6	4.98	0.72	19
PL-16	2.92	4.77	0.61	25
PL-22	2.96	4.64	0.64	23
PL-25	2.76	4.55	0.61	25
SC-9	3.75	4.94	0.76	19
SC-12	4.7	5.5	0.85	18
F10T M22	10.13	11.01	0.92	18

□□□

두께(mm)

강종(SC : 각형강관, HW : H형강 웨브

HF : H형강 플랜지, PL : 엔드플레이트)

σ_y : 항복강도, σ_u : 인장강도, σ_y/σ_u : 항복비, Elo. : 연신율

2.2 콘크리트 압축강도 시험

설계강도 210 kg/cm²인 콘크리트를 실린더형 모델드를 사용하여 공시체를 10개 제작하여 28일 압축강도시험을 실시한 결과는 표 2에 나타내었다.

표 2. 콘크리트 압축강도 시험결과

설계기준강도 (kg/cm ²)	f'_c (kg/cm ²)	E_c (kg/cm ²)	slump (cm)
210	247.65	1.70×10 ⁵	15

f'_c : 콘크리트 압축강도, E_c : 콘크리트 탄성계수

3. 접합부 실험

3.1 실험체 계획

실험체는 H형강보에 엔드플레이트를 용접하고, 이를 기둥부재인 각형강관에 8개의 관통형 고력 볼트로 집합하였다. 실험의 변수는 강관의 두께와 엔드플레이트의 두께이다.

이 실험체의 일람은 표3에 나타내었고, 실험체의 형상 및 상세치수는 그림1, 그림2와 같다.

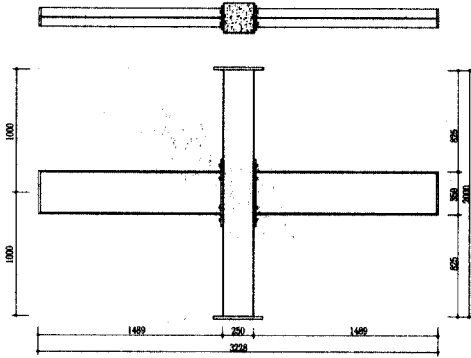


그림 1. 반복가력 실험체의 형상 및 치수

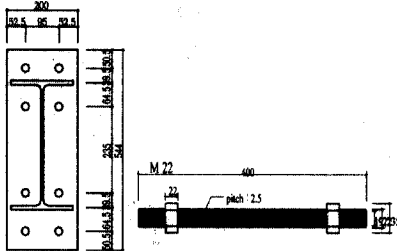


그림 2. 엔드플레이트 및 볼트의 상세치수

표 3. 집합부 실험체 일람

시험체명	강관기둥	H형강보	엔드플레이트 두께
LBE16A-2C-9	□-250× 250×9	H-350 ×175× 7×11	16
LBE22A-2C-9			22
LBE25A-2C-9			25
LBE16A-2C-12	□-250× 250×12		16
LBE22A-2C-12			22
LBE25A-2C-12			25

LBE□□-□□-□ □ 단위 : mm

- └ 각형강관의 두께
- └ C : 반복가력
- └ 볼트의 위치 (EP2 type)
- └ A : 고력볼트 F10T M22
- └ 엔드플레이트 두께

3.2 가력 및 측정방법

본 실험에서 실험체는 가력 프레임(Strong Frame)에 각형강관 기둥 상하단의 지지조건을 핀으로 하였으며, 가력부인 보의 양단부에도 가력용 힌지구좌를 설치하여 오일잭 상하단에서 회전이 가능하도록 한다. 본 실험에서는 그림 3과 같이 실험실 여건상 무중력 상태에서 역대칭 점중재어 반복가력을 실시한다.

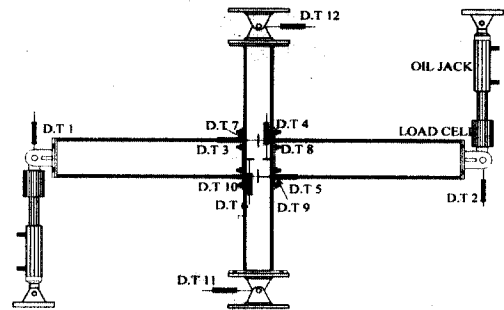


그림 3. 가력방법

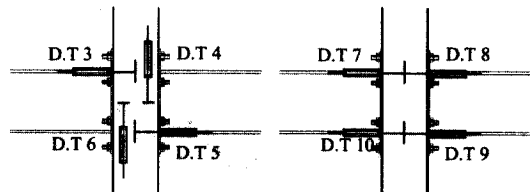


그림 4. 측정방법

하중측정은 인장 압축식 복동 로드셀(Load cell)을 사용하여 가력하중의 크기를 측정하며, 변위 측정은 전체변위는 양쪽에 각각 1,2번의 변위계를 사용하여 측정하고, 그림 4에 나타난 것과 같이 변위계 3, 4, 5, 6번(절대좌표)으로 패널존의 변위를 측정하며, 7, 8, 9, 10번(기둥중심-엔드플레이트간의 상대좌표)으로는 순수한 집합부의 변위를 측정한다. 11,12번 변위계는 하중가력시의 슬립을 측정한다. 또한 변형도 게이지(W.S.G)를 보와 엔드플레이트에 설치하여 응력상황을 관찰한다.

4. 실험결과

4.1 하중-변위관계

양단에 있는 1번과 2번 변위계에 의해 측정된 하중과 전체 변위를 그림 5에 나타내었다.

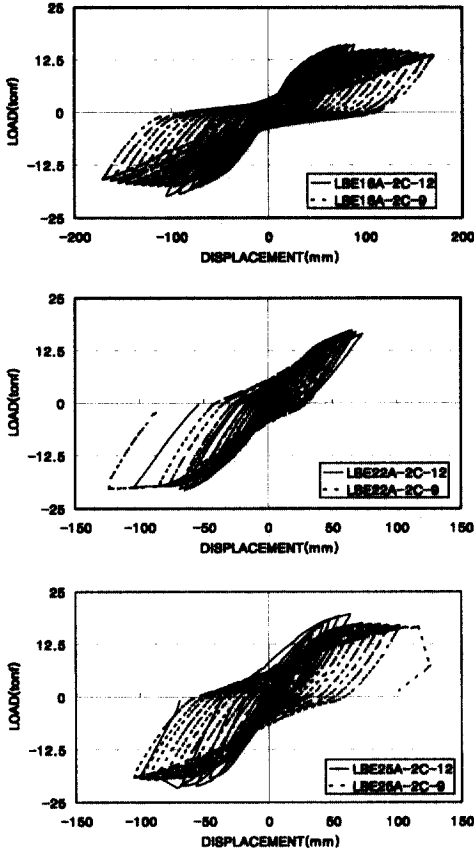


그림 5. 하중-변위 관계 곡선

4.2 접합부의 모멘트-회전각 관계

각 실험체에 대한 접합부의 M- θ 관계를 표4와 그림 6에 나타내었다. 표4의 값은 단조화 했을때의 모멘트-회전각 값을 나타낸 것이다. 그림에서 횡축은 패널존의 회전각이 포함되지 않은 순수 접합부만의 회전각이다. 그리고 그림 7에 보, 패널존 및 접합부의 단조화 곡선을 나타내었다.

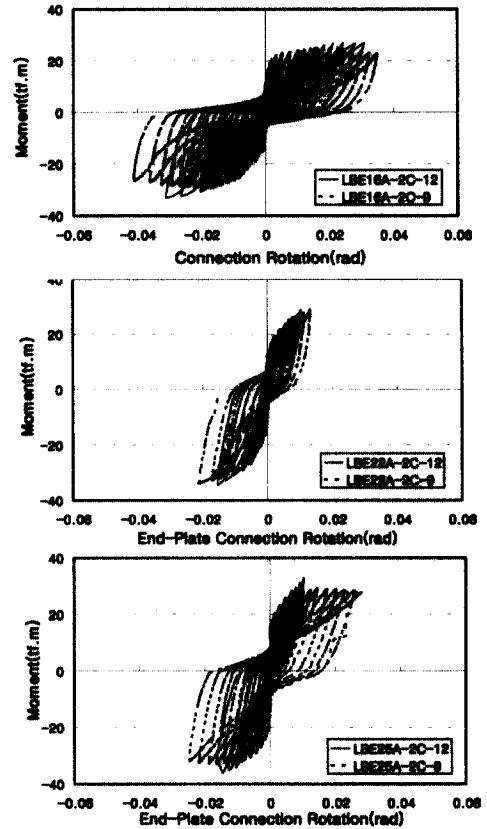


그림 6. 접합부 모멘트-회전각 관계 곡선

표 4. 접합부의 모멘트-회전각 및 파괴상황

실험체	M_y (tf.m)	θ_y (rad.)	M_u (tf.m)	θ_u (rad.)	M_u/M_y	θ_u/θ_y	Plastic Rotation (rad.)	파괴 상황
LBE16A-2C-9	22.70	0.00102	29.08	0.0108	1.28	10.63	0.0329	엔드플레이트 파단
LBE22A-2C-9	27.84	0.00111	33.85	0.0118	1.22	10.45	0.0207	보좌굴
LBE25A-2C-9	30.06	0.00127	32.70	0.0050	1.09	4.28	0.0246	용접부 파단
LBE16A-2C-12	25.74	0.00122	33.19	0.0132	1.29	7.76	0.0295	용접부 파단
LBE22A-2C-12	27.52	0.00134	34.51	0.0127	1.25	9.72	0.0142	보좌굴
LBE25A-2C-12	31.31	0.00143	36.03	0.0089	1.15	6.34	0.0113	보좌굴

M_y : 항복 모멘트, θ_y : 항복 회전각, M_u : 최대 모멘트, θ_u : 최대 회전각, M_u/M_y : 내력상승률, θ_u/θ_y : 변형능력

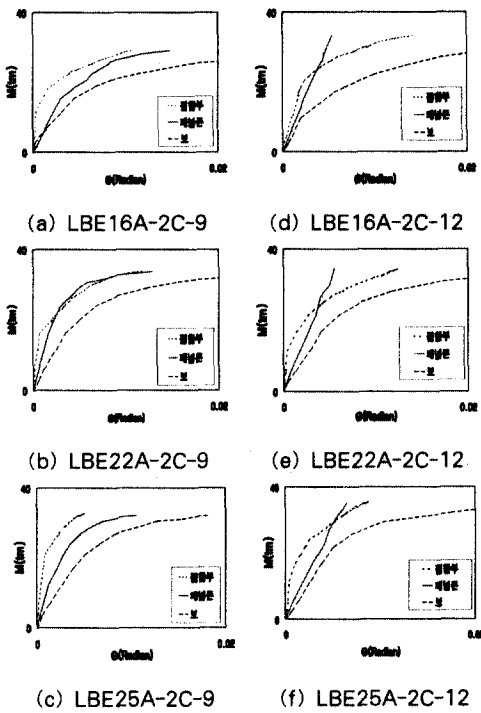


그림 7. 패널존, 보 및 접합부 단조화 곡선

5. 분석 및 고찰

5.1 접합부의 각 부재별 변형

하중-변위관계로부터 보, 기둥, 패널존, 접합부 각 부재의 에너지 흡수능력을 구하기 위하여 각 부재별 성분⁽⁴⁾을 구하며, 이에 대한 전체 변형성

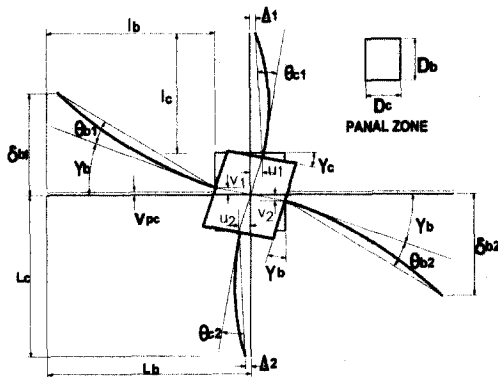


그림 8. 접합부 전체 변형 성분 그림

분은 그림8, 그림9과 같다.

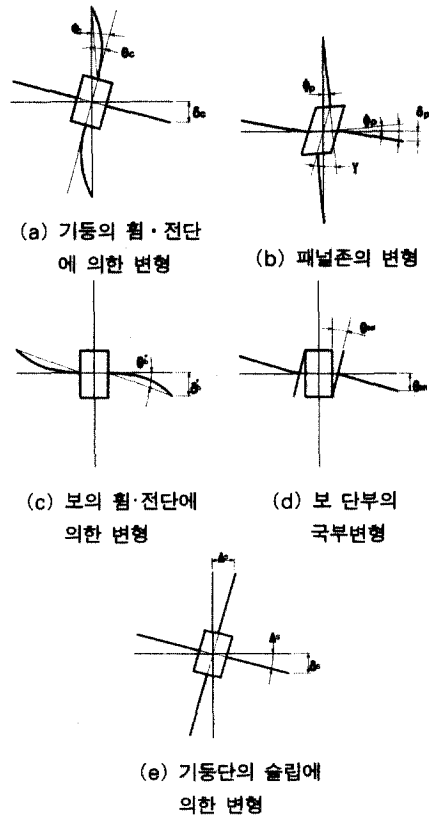


그림 9. 각 부분 변형 그림

(1) 기둥의 휨·전단에 의한 변형
기둥의 변형량 δ_c 는 기둥의 회전각 θ_c 로부터 산출하고, 그것을 보단변형량으로 환산한다.

$$\delta_c = \theta_c \cdot \left(\frac{L_b}{L_c} \right) \quad (1)$$

여기서, L_b 와 L_c 는 각각 기둥중심에서 보와 기둥의 길이이다.

(2)패널존의 변형

패널존의 변형성분 δ_p 는, 패널을 구성하는 중앙변위 u_1, u_2, v_1, v_2 로부터 전단변형각(r)를 구하고 나서, 보단 변형량으로 환산한다.

$$\delta_b = r \cdot D_b \left(\frac{l_b}{D_b} - \frac{L_b}{2L_c} \right) \quad (2)$$

여기서, D_b 는 패널존의 높이이고, l_b 는 엔드플레이트까지의 보의 길이이다.

(3)보의 휨·전단에 의한 변형

보재의 변형성분은, 보단의 전체변형 δ_b 로부터 얻어진 회전각 ($r_b + \theta_b$)에서 패널부분의 회전각 r_b 를 보단 국부변형에 의한 회전각 δ_{cn} 을 뺀것에 의해 보부재만의 변형량을 구한다.

$$\delta_b^* = (\theta_b - \theta_{cn}) \cdot l_b \quad (3)$$

여기서, θ_{cn} 은 접합부의 회전각이고, θ_b 는 보의 회전각이다.

(4) 보 단부의 국부 변형(접합부)

보단의 국부변형은 기둥재의 중심선과 보의 상·하 플랜지단과의 상대변형량으로서 측정된 값을 사용해 보단 회전각 (δ_{cn})을 구하고, 그것으로부터 보단 변형량으로 환산한다.

$$\delta_{cn} = \theta_{cn} \cdot l_b \quad (4)$$

(5) 기둥단의 슬립에 의한 변형 성분

$$\delta_s = \Delta_s \cdot \left(\frac{L_b}{L_c} \right) \quad (5)$$

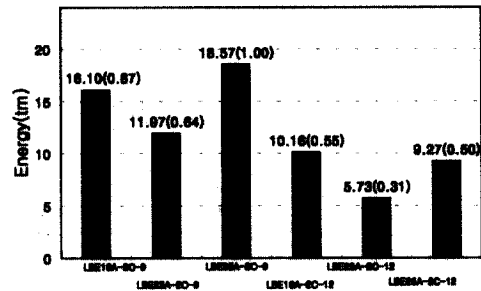
5.2 에너지 흡수 능력

구조부재의 변형능력은 외력에 대한 에너지 흡수능력을 의미한다고 볼 수 있다. 부재의 하중-변위곡선에서 면적변형능력이 에너지 흡수능력에 해당한다. 따라서, 5.1절을 참고로 하여, 기둥,

패널존, 보 및 접합부 각각의 변형성분에 의한 하중-변형관계의 면적으로부터 에너지 흡수량을 구하였다.

5.2.1 총 에너지 흡수량

총에너지 흡수량은 하중-변위 곡선에서 최대내력 사이클까지의 면적을 구하였고, 그 관계를 그림10에 나타내었다.



() : 상대적인 에너지 흡수능력

그림 10. 실험체의 총 에너지 흡수 그래프

LBE25A-2C-9 실험체를 기준으로 할 때, 각 실험체의 에너지 흡수능력은 0.31~1.00의 분포를 나타내고 있으며, 기둥의 두께가 12mm인것에 비해 9mm인 실험체가 흡수능력이 더 큰 것으로 나타났다

5.2.2 각 부재별 에너지 흡수능력 비교

실험체의 각 부재별 에너지 흡수능력을 표 5에 나타내었다.

표 5. 각 부재별 상대에너지 흡수량

실험체	에너지 흡수량 비교				에너지 흡수능력
	보	기둥	패널존	접합부	
LBE16A-2C-9	0.07	0.15	0.39	0.39	0.87
LBE22A-2C-9	0.14	0.13	0.40	0.33	0.64
LBE25A-2C-9	0.08	0.16	0.48	0.28	1.00
LBE16A-2C-12	0.18	0.07	0.19	0.56	0.55
LBE22A-2C-12	0.32	0.14	0.20	0.34	0.31
LBE25A-2C-12	0.53	0.10	0.19	0.18	0.50

표 5에서 진하게 표시된 부분은, 각 실험체중 에너지 흡수능력이 가장 큰 것을 나타낸다. 에너

지 흡수능력은, 기둥의 두께가 9mm인 실험체는 패널존의 분포가 0.39~0.48로 가장 높고, 접합부는 0.28~0.39이며, 그 다음은 기둥,보의 순이다. 기둥의 두께가 12mm인 실험체는 접합부의 에너지 흡수능력은 0.18~0.56, 보는 0.18~0.53의 분포를 나타내고 있으며, 기둥의 두께가 9mm인 실험체에 비하여 패널존의 에너지 흡수능력은 매우 적은 것으로 나타났다.

표5, 그림10으로부터, 에너지 흡수능력은 보의 흡수능력이 큰 실험체보다 패널존의 흡수능력이 큰 실험체가 총에너지 흡수능력이 큰 것으로 파악되었다. 이는 그림 7에서 12mm인 실험체는 패널존이 탄성구간에 머물러 있으나, 기둥이 9mm인 실험체는 패널존이 항복한 것으로 보아, 소성 후 패널존의 에너지 흡수가 매우 컸음을 알 수 있다. 따라서, 비록 제한된 실험자료이긴 하나 보만의 항복을 유발하는 것 보다는 패널존의 항복도 허용하는 것이 접합부의 전체적 에너지 흡수능력을 높여서, 결론적으로 더욱더 우수한 내진성능을 나타냄을 알 수 있다.⁽³⁾ 하지만, 보에 비하여 패널존이 너무 약하면, 큰 지진에 있어서는 지나친 변형과, 더 나아가서는 기둥의 붕괴와 더불어 건물 전체에 손상을 입힐 수 있다. 이런 이유로 인해 보에 대한 패널존의 상대적인 강도를 알 필요가 있다. 이에 다음절에 강도를 비교하고 분석하였다.

5.2.3 보-패널존강도비에 따른 에너지 흡수량

본 논문에서 사용한 보-패널존 강도비는 보가 전소성모멘트에 달할때까지의 패널존 항복유무를 판단하는 기준으로 사용되었다. 보에 대한 상대적인 패널존의 강도를 알기 위해서, 기존실험⁽⁵⁾에 의한 전단내력값 중 실험값과 이론값이 잘 대응하는 Le-WuLu의 연구⁽⁶⁾를 바탕으로 패널존의 강도를 나타내었다. 먼저 Von Mises 항복조건에 의해 패널존 항복 모멘트 $mI M_y$ 를 계산하면 다음과 같다.

$$mI M_y = \frac{V_s h (2H - h)}{4H} \quad (6)$$

여기서, H: 기둥끝단 힌지에서 보의 중심까지 길이
h: 패널존의 높이

항복 전단내력 V_s 는 다음과 같이 강재부분(V_s)과 콘크리트부분(V_c)의 단순누가에 의해 구한다.

$$[\text{강재 부분}] \quad V_s = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_y A_s \quad (7)$$

여기서, A_s : 패널 단면적 ($A_s = 2 \times (D-t) \times t$)
 σ_y : 강재의 항복강도

$$[\text{콘크리트 부분}] \quad V_c = SB \cos^2 \alpha f'_c \quad (8)$$

여기서, S: 유효 지압 폭 B: 기둥의 공칭 치수
 f'_c : 콘크리트 압축강도 α : strut 각도

보의 전소성 모멘트는 다음과 같다.

$$M_{bp} = Z_p \sigma_{fy} \quad (9)$$

여기서, Z_p : 보의 소성단면계수 σ_{fy} : 보플랜지 항복강도

보-패널존 강도비⁽²⁾를 다음과 같이 나타내었다.

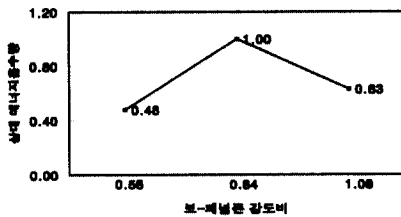
$$\text{보-패널존 강도비} = \frac{mI M_y}{M_{bp}} \quad (10)$$

위의 값으로 통해서 보에 대한 상대적인 패널존의 강도를 알 수 있으며, 기존실험⁽⁵⁾과 비교해서 표6에 나타내었다.

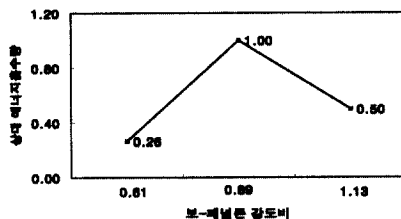
표 6. 보-패널존 강도비에 따른 상대에너지 흡수량

실험체	보-패널존 강도비	에너지흡수량 비교
LBE16A-2C-6	0.58	0.48
LBE16A-2C-9	0.84	1.00
LBE16A-2C-12	1.08	0.63
LBE25A-2C-6	0.61	0.26
LBE25A-2C-9	0.89	1.00
LBE25A-2C-12	1.13	0.50

표 6에 나타낸 것 같이, 기둥의 두께가 6mm인 실험체는 보-패널존 강도비가 0.58~0.61의 분포를 보이고 있고, 기둥의 두께가 9mm와 12mm인 실험체는 각각 0.84~0.89, 1.08~1.13의 분포를 보이고 있다.



(a) 엔드플레이트두께 16mm



(b) 엔드플레이트두께 25mm

그림 11. 보-패널존 강도비에 따른 에너지 흡수량 비교 그래프

위의 그림 11에서 횡축은 보-패널존 강도비이고, 종축은 에너지 흡수능력을 나타낸 것인데, 흡수능력이 가장 큰 실험체를 기준으로, 같은 두께의 엔드플레이트(각각 16mm, 25mm)의 보-패널존 강도비에 따른 에너지 흡수능력을 비교했다. 에너지 흡수능력은, 기둥의 두께가 9mm(보-패널존 강도비 : 0.84~0.89)인 실험체를 기준으로 했을 때, 기둥의 두께가 6mm(보-패널존 강도비 : 0.58~0.61)인 실험체는 0.26~0.48의 분

포를 보이고 있고, 기둥의 두께가 12mm(보-패널존 강도비 : 1.08~1.13)인 실험체는 0.50~0.63의 분포를 나타내고 있다. 기둥의 두께가 6mm인 실험체와 12mm인 실험체가 기둥의 두께가 9mm인 실험체에 비해서 에너지 흡수능력이 매우 열등한데, 그 이유는 두께가 6mm인 실험체는 보에 비해 패널존이 조기에 항복했기 때문이고, 기둥의 두께가 12mm인 실험체는 패널존이 항복하기 전에 보가 먼저 항복해서, 주로 보만의 에너지가 흡수되었기 때문이라고 판단된다.

6. 결론

CFT 기둥-H형강보의 보-패널존 강도비에 따라 에너지 흡수능력을 지표로 내진성능을 평가한 결과는 다음과 같다.

- 1) 에너지 흡수능력은 상대적으로 보의 흡수능력이 큰 실험체보다 패널존의 흡수능력이 큰 실험체가 총에너지 흡수능력이 큰 것으로 나타났다. 따라서, 건물의 안정성에 있어서 보항복형으로 설계가 되어져야 하지만, 지진에 대해 보만의 항복을 유발하는 것보다는 패널존의 항복도 허용하는 것이 접합부의 전체적 에너지 흡수능력을 높여서, 우수한 내진성능을 나타낸다고 판단된다.
- 2) 보-패널존강도비 : 상대 에너지 흡수량
 0.58~0.61 : 0.26~0.48(패널존 조기항복)
 0.84~0.89 : 1.00
 1.08~1.13 : 0.50~0.63(패널존 항복이 없는 경우)

위의 결과를 통하여, 보-패널존 강도비에 따라서 보에 대해 패널존이 너무 강하거나 약하면 에너지 흡수능력이 떨어짐을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 포항제철(주)의 석좌교수기금과 한양

대학교 초대형 구조시스템 연구센터(STRESS)의 지원으로 수행한 연구이며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Krawinkler. A, "Shear in beam-column joints in seismic design of steel frames", Engineering Journal, AISC, 3, 1978, p.82-91
2. K. C. Tsai, Shun Wu, Egor P. Popov, "Experimental Performance of Seismic Steel Beam-Column Moment Joints", Journal of structural engineering, Vol. 121, No.6, June, 1995
3. 이철호, 박종원, "반복재하 실물대 실험에 의한 컬럼-트리(Column-Tree) 형식 철골 모멘트 접합부의 내진거동 연구", 한국강구조학회 논문집, 1998.12, p.629~639
4. 志村 保美 外, "角形鋼管柱-H形鋼はり部の性能に関する研究-その3柱はり接合部性能", 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1994.9, p.1519~1520
5. 김창욱, "反復荷重을 받는 콘크리트 充填 角形鋼管 기둥-H形鋼 보 接合부의 剪斷性能", 한양대학교 석사학위 논문, 1999
6. James M. Ricles, Le-Wu Lu, Took K. Sooi, and Vermass, "Seismic Performance of Column-to-WF Beam Moment Connections, Connections in Steel Structure III, Behavior, Strength & and Design, Pergamon, p.99-114, 1996

(접수일자 : 2000년 8월 8일)