

철근콘크리트기둥과 철골보 접합부의 휨성능(1)

A Structural Flexible Behavior T-type Joint for RCS Composite System

김 영 수* 김 영 호** 정 재 훈***
김 진 무**** 원 영 술***** 주 경 재*****

Kim, Young-Soo Kim, Young-Ho Jeong, Jae-Hun
Kim, Jin-Mu Won, Young-Sul Joo, Kyung-Jai

Abstract

RCS system, with Reinforced Concrete columns and Steel beams, is defined as system in which both steel and concrete materials are efficiently combined to maximize the structural and economic advantages of each material. Tested in this study were 4 exterior beam-to-column joint specimens with variables that influence joint rigidity of RCS structure.

The purpose of this study is to compare and analyze the structural behavior of exterior joints through the existing studies and tests, and offer basic data for practical use of RCS structure by studying flexible behavior(semi-rigid effect) of joints according to joint details.

keywords : RCS Composite Structure, Semi-Rigid, Beam-to-Column Joint

1. 서 론

철근콘크리트기둥과 철골보로 구성된 혼합구조는 철근콘크리트 재료와 강재 각각의 장점을 최대한 활용한 구조시스템으로, 콘크리트는 압축력 지지면에서 강재에 비해 효율적이고 높은 강성을 가져 수평하중에 따

른 진동감쇄 효과가 있고, 강재는 시공 속도면에서 조립작업의 단순성으로 인해 두 재료의 독특한 특징을 최대한 이용한 구조이다.¹⁾

RCS구조에서 내부 접합부에 관한 연구는 많이 이루어져 왔으나, 외부 접합부의 경우 힘의 전달 메커니즘이 잘 알려지지 않고 있으며, ASCE에서도 외부 접

* 경북대학 건축설계과 조교수

** 건국대 석사과정

*** (주)한울구조, 공학박사

**** 예우건축구조연구소 대표, 공학박사

***** (주)한울구조 대표, 건국대 겸임교수, 공학박사

***** 건국대 명예교수, 공학박사

• 본 논문에 대한 토의를 2001년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2002년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

합부는 모멘트 접합이 아닌 전단저항 접합부로 설계하거나 내부 접합부에 비해 철근비를 높여 설계 및 시공을 하도록 권고하고 있다.⁽⁶⁾

또한 보-기둥의 접합부는 일반적으로 완전한 강접이나 마찰이 없는 핀으로 가정하여 설계가 이루어져 왔으나, 실제 많은 구조물의 접합부는 반강접적인 거동을 하게 되며, 특히 실제 설계에 이용하기 위해서는 접합부의 거동을 규명할 필요가 있다.

따라서 본 연구의 목적은 RCS구조의 외부 접합부를 대상으로 실험을 통하여, ASCE에서 제시된 접합상세(F계열)와 본 논문에서 제안하는 새로운 접합방식(S계열)에 따른 내력 및 구조적 거동을 비교 분석하고 접합부의 휨성능을 평가하여 실무설계 적용화를 위한 기초 자료를 제공하는데 있다.

2. 혼합구조와 반강접 접합부의 이론적 고찰

RCS구조 접합부에 작용하는 힘성분은 횡력 또는 수직하중과 같은 임의의 하중에 의해 대칭적 또는 비대칭적인 힘의 성분으로 표현될 수 있으며 수직하중에 의한 내·외부 접합부에 작용되는 힘성분은 Fig. 1과 같다.

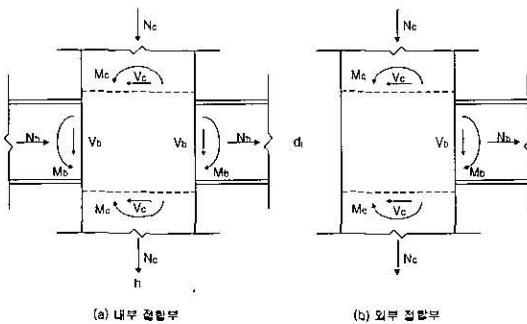


Fig. 1 내·외부 접합부의 힘 성분

Fig. 1에서 힘의 평형방정식으로부터 (1)을 유도할 수 있다.

$$\sum M_c + V_c \cdot d_i = \sum M_b + V_b \cdot h \quad (1)$$

보-기둥 골조의 파괴는 보의 파괴, 기둥의 파괴, 접합부의 파괴형태와 같이 3가지로 구분할 수 있다. (2) RCS구조 접합부에서 예측되는 파괴 형태는 Fig. 2와 같이 패널전단파괴와 지압파괴로 볼 수 있으며, 패널전단강도는 (2), 지압강도내력은 (3)과 같다.

$$\sum M_c - V_b h \leq \phi [V_{sw} d_f + 0.75 V_{cm} d_w + V_{cn} (d + d_0)] \quad (2)$$

여기서,

$\phi = 0.7$ (강도저감계수)

jh : 유효패널길이

V_{sw} : 웨브패널 전단강도

V_{cm} : 내부콘크리트의 압축스트럿에 대한 전단강도

V_{cn} : 외부콘크리트 압축장에 대한 전단강도

d_f : 보 플랜지의 중심간거리,

d_w : 보 웨브의 높이

d : 보의 총

d_0 : 세우기용 철골기둥이 있는 경우, 0.25d와 면장지압판의 높이 중 작은값

$$\sum M_c \leq \phi [0.7h C_{cm} + h_{cr} (T_{cr} + C_{cr})] \quad (3)$$

여기서,

C_{cm} : 콘크리트의 공칭지압강도

h_{cr} : 접합부 수직 철근 사이의 거리

T_{cr} : 접합부 수직 철근의 공칭인장강도

C_{cr} : 접합부 수직 철근의 공칭압축강도

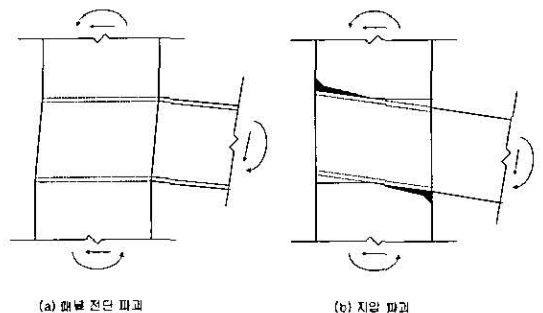


Fig. 2 접합부 파괴양상

보-기둥 접합부 거동을 AISC의 허용응력설계법에서는 Type 1(rigid framing), Type 2(simple framing), Type 3(semi-rigid framing)으로 분류하고 있고, LRFD에서는 Type FR(fully restrained), Type PR(partially restrained) 2가지로 나누고 있으며, 또한 Eurocode No.3에서는 편접합, 상접합, 반강접합으로 분류하고 있고, 접합부의 거동을 분류하기 위한 명확한 경계를 제시하고 있으며 접합부를 가새지지된 것과 그렇지 않은 것으로 나누어 분류하고 있다.

보-기둥 접합부에서 축변형과 전단변형은 회전변형에 비해 아주 적어, 일반적으로 접합부는 회전변형만 고려되고 있으며 모멘트 함수로써 표현된다. Fig. 3은 접합부의 회전변형과 반강접 접합부의 일반적인 거동에 대한 그림을 보여주고 있으며, 여기서 θ_r 은 기둥과 보의 상대적인 회전각을 의미한다.⁽⁴⁾

혼합구조의 반강접 접합부는 콘크리트와 강재의 강성과 접합부 상수에 따라 접합부의 변형형태가 결정되므로 이와 같은 접합부에 대해서 회전변위와 극한 모멘트의 전달능력을 결정함으로써 혼합구조 접합부 형태와 모멘트-회전거동 특성을 예측할 수 있다.

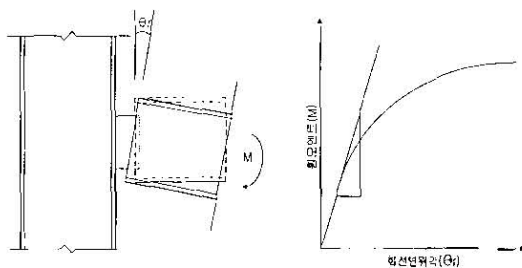


Fig. 3 접합부의 회전 변형과 반강접의 일반적 거동

3 실험

3.1 재료의 역학적 성질

1) 콘크리트의 압축강도 시험

콘크리트는 설계기준강도 210kgf/cm²인 레미콘을 사용하였으며, KS F 2403에 따라 제작한 6개의 콘크리트 공시체의 압축강도 시험결과는 Table 1과 같다

콘크리트의 평균압축강도가 설계기준강도보다 낮게 나온 것은 증기양생시 외부의 찬공기가 유입되어 초기강도에 좋지 않은 영향을 주었으리라 생각된다. 이는 (2), (3)을 이용해 구한 패널전단강도값 및 지압강도값이 다소 낮게 나오지만, 철골보의 파괴를 유도하였기 때문에 실험결과와 비교해 영향을 주지 않았으리라 생각된다. (Table 4 참조)

Table 1 콘크리트 압축시험 결과

설계기준강도 (kgf/cm ²)	재령 (일)	슬럼프 (cm)	평균압축강도 (kgf/cm ²)	탄성계수 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)
210	28	15	185	2.04

2) 강재의 인장강도 시험

실험에 사용된 철근은 SD40 (KS D 3504)을, 강재는 KS D 3503의 일반구조용 압연강재인 SS400을 사용하였고, KS B 0801 규정에 따라 시험편을 만들어 KS B 0802의 금속재료 인장시험방법에 따라 인장강도시험을 실시하여 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2 강재의 인장시험 결과

시험원명	σ_y (tf/cm ²)	σ_{max} (tf/cm ²)	σ_y / σ_{max}	ϵ ($\times 10^6$)	E (tf/cm ²)	E10 (%)	
시험 철편	웹	3.94	4.35	0.91	1923	2049	28.99
	플랜지	3.31	3.98	0.83	1605	2062	29.41
	평균	3.63	4.17	0.87	1764	2056	29.20
시험 철근	D16	4.85	6.82	0.71	2764	1755	17.26

σ_y : 항복강도, σ_{max} : 인장강도, ϵ : 항복변형도,
E : 탄성계수, E10 : 연신율

3.2 실험계획

RCS구조 외부 접합부의 내력 및 구조적 거동을 분석하고, 접합부의 휨성능을 연구하기 위해 Table 3에 나타난 바와 같이 본문에서 제안하는 반강접 효과가 예측되는 접합방식 2가지(S-1, S-2)와 기존의 ASCE 규준의 실험에서 많이 이용되는 접합방식 2가지(F-1,

F-2) 총 4개의 실험체를 제작하였다. 주요실험 변수로 S계열은 스티드볼트 및 플레이트를 이용하였고, F계열은 지압판과 연장지압판을 사용하여 실험체를 제작하였다.

Table 3 실험체의 종류

실험체명		접합부 예상거동	접합형태
S 계열	S-1	Semi-Rigid-Partial	플레이트
	S-2		스티드볼트
F 계열	F-1	Rigid-Partial	지압판
	F-2		지압판 + 연장지압판

실험체의 치수는 Fig. 4와 같고 실제 RCS구조물 설계시 고려되는 보의 파괴를 유도하기 위해 부재 크기를 기둥은 500×500mm로 하고, 철골보는 H-346×174×6×9로 정하였다.

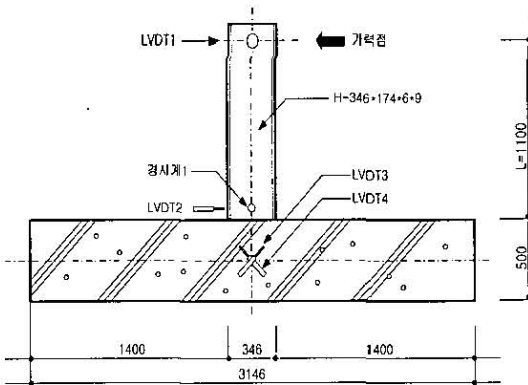


Fig. 4 접합부 실험체

철근콘크리트기둥의 모서리에 각각 3개씩 총 12개의 D25철근을 배근하였고, 대근은 기둥의 전구간에 D10철근을 100mm 간격으로 배근하였으며, 전단파괴를 방지하기 위하여 철골 접합부 상하부 100mm 이내에 D10철근을 50mm 간격으로 보강하였다.

접합부 내부에는 철골보 웨브에 구멍을 뚫어 D10철근을 70mm 간격으로 보강하였다. 콘크리트 타설은 현장에서 시공되는 바와 같이 철골보 하부 플랜지 하부까지 1차로 타설하고, 양생 후 철골보를 설치한 후 2

차 콘크리트를 타설하였다. 반강접 거동이 예상되는 S계열 보는 350mm가 기둥에 묻히도록 하였고, F계열 보는 500mm 모두 기둥에 묻혀 콘크리트 외부면에 지압판 및 연장지압판이 노출되도록 하였다. (Fig. 5 참조)

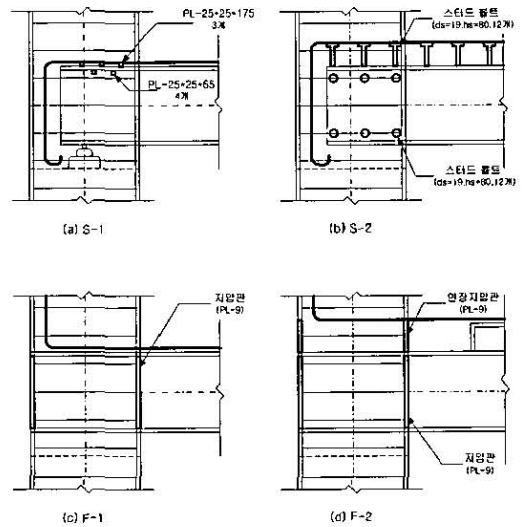


Fig. 5 접합부 상세도

3.3 가력 및 측정 방법

외부접합부의 연직하중에 의한 접합부 거동 및 내력을 평가하기 위해 Photo 1과 같이 기둥 양단부의 지지조건을 힌지로 하였고, 회전변위 및 전단변형각을 구하기 위하여 보의 양단부와 기둥의 패널존부분에 변위계를 설치하였다.

철골보와 기둥의 변형각을 측정하기 위해 철골보 내단부에 1개, 기둥의 패널존 중앙에 1개, 총 2개의 변형각 게이지를 설치하였고, 변형도를 측정하기 위해 철골보의 지압판, 연장지압판, 플랜지에 변형게이지를 설치하였으며 웨브부분에는 3축 게이지를 설치하였다. 또한 접합부 부위에 주근, 대근, 정착 철근에도 변형게이지를 설치하였고, 콘크리트의 응력을 측정하기 위하여 내부 요소에 콘크리트 묻힘 게이지를 45°로 설치하였다.

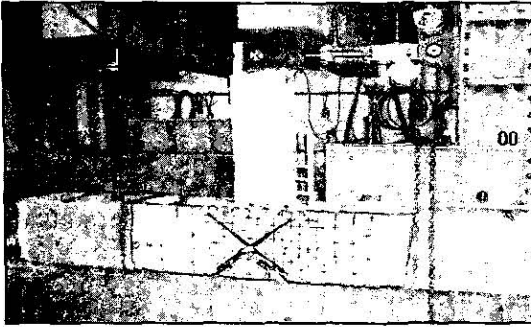


Photo 1 실험체 전경

실험체는 Photo 1과 같이 Strong Frame에 설치하고, 유압 실린더를 보 플랜지에 수직으로 정착하여 35t 용량의 복동식 유압잭으로 실험체의 보 단부를 단조 가력하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1. 파괴 양상

모든 실험체의 접합부에서 전단과 지압 두가지 균열 양상이 혼용되어 나타났으며, 최대하중을 지난 후 철골보의 플랜지와 웨브부분에서 좌굴이 발생하여 하중의 증가없이 변형량이 지속적으로 증가하거나 하중감소가 발생하는 시점에서 실험을 종료하였다.

1) S-1 실험체 : PL -25×25×175를 철골보 상부 플랜지 위에, PL -25×25×65를 상부 플랜지 아래에 부착한 S-1실험체는 13.4tf, 14.3tf에서 사인장 균열과 지압 균열이 발생하였고, 철골보와 만나는 기둥면은 초기균열 발생 후 가력 크기와 균열의 정도는 비례하였다. 하중이 증가하여 22.4tf에서 철골보 플랜지와 웨브의 좌굴이 발생하였고 변위만 증가하여 23.4tf에서 가력 종료하였다.

2) S-2 실험체 : 스티드 볼트를 철골보 상부 플랜지와 웨브에 부착한 S-2실험체는 15.0tf에서 지압 균열이 발생하였고, 18.8tf에서 전단 균열이 발생하여 초기 균열은 지압 균열에 영향을 받을 수 있었고, 균열정도는 S-1실험체에 비해 많았다. 하중이 증가하여 22tf에서 스티드볼트와 철근이 용접부면에서

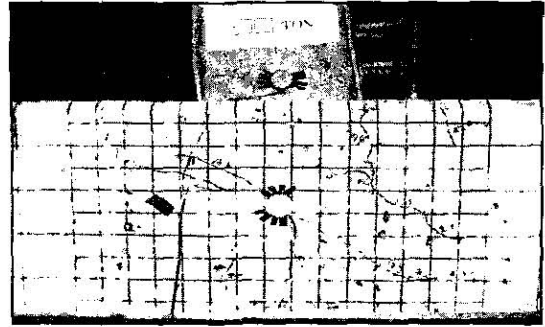


Photo 2 접합부의 균열 양상

박리되어 휨음이 발생되었고, 22.8tf에서 철골보 플랜지와 웨브의 좌굴이 발생하여 25.0tf에서 하중을 제거하였다.

3) F-1 실험체 : 지압판(FBP: Face Bearing Plate)만을 부착한 F-1실험체는 11.5tf과 12.6tf에서 전단 및 지압 균열이 나타나 S계열보다 적은 하중에서 균열이 나타났으나, 균열의 양은 비교적 적게 나타났다. 또한, 항복하중인 20.5tf까지 철골보의 플랜지와 웨브에 좌굴이 발생하였고, 23.4tf에서 철골보 상부플랜지의 철근 박리 현상이 발생하였다.

4) F-2 실험체 : 지압판(FBP)과 연장 지압판(E-FBP: Extended FBP)을 설치한 F-2 실험체는 12.6tf, 14.6tf에서 전단 및 지압 균열이 나타나 초기 균열은 전단 균열이 지배적임을 알 수 있었고, F-1 실험체와 마찬가지로 전반적인 균열량이 비교적 작게 나타났다. 22.8tf에서 철골보의 플랜지 및 웨브에 좌굴이 발생하였으며, 23.8tf에서 상부 플랜지 철근의 박리현상이 일어났다.

4.2 모멘트-회전각 곡선

각 실험체의 모멘트-회전각 관계는 짐중하중에 대한 접합부의 모멘트와 철골보 수직변위에 의한 회전각 관계로부터 유도하였으며 Fig. 6에 나타내었다.

모멘트-회전각 곡선에서 S계열은 12tfm 내외까지의 실험체 거동은 철골과 같이 경사가 급한 형태를 나타내었고, 그 이후는 콘크리트와 같이 완만한 곡선을 이루었다.

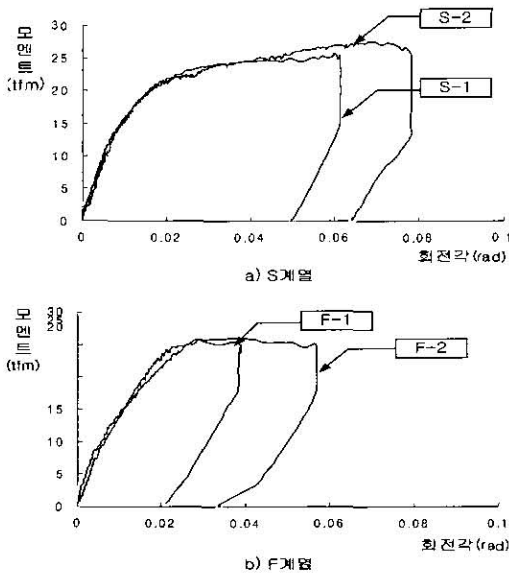


Fig. 6 모멘트-회전각

F계열은 10tfm 내외까지 철골과 동일하게 초기 강성구배를 보이고 있으며 그 이후의 회전각 변화는 S계열에 비해 적게 나타났다.

4.3 변형도

집합부 내·외부의 변형과 역학적 거동을 관찰하기 위해 실험체에 부착한 변형게이지를 통해 변형도를 분석하였다.

1) 콘크리트 변형도

Fig. 7의 b)는 집합부 콘크리트 내부에 45° 방향으로 문혀진 변형게이지를 통해 콘크리트 내부 변형도를 측정된 것이다

콘크리트의 변형도는 최대강도의 50% 정도까지는 모든 실험체의 변형량이 동일하고, S-2를 제외한 실험체들은 변형도가 비슷함을 관찰할 수 있다.

2) 기둥 주근 변형도

Fig. 7의 c), d)는 집합부 패널존 중앙에 부착된 변형게이지를 통해 주근의 변형량을 측정된 값이다. 중앙에 부착한 게이지는 인장측에 부착한 게이지의 변형량이 압축측 변형량보다 작게 나타났다.

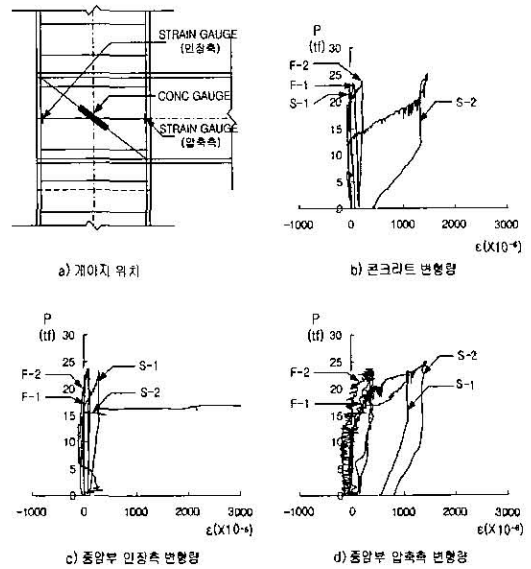


Fig. 7 게이지 위치 및 변형도

4.4 접합부 최대강도 평가

철근콘크리트기둥과 철골보 집합부의 최대 내력을 구하기 위해, 철골보 단부에 가해질 수 있는 최대 집중하중의 이론값(대한건축학회규준, ASCE규준)을 실험체 부재별로 정리하면 Table 4와 같다.

Table 4에 나타난 바와 같이 21.5tf가 철골보 단부에 집중하중으로 작용할 때 휨 파괴에 도달한다는 것을 알 수 있으며, 철골보의 항복하중과 최대하중에 대한 이론값과 실험에 의한 값을 비교하여 Table 5에 나타내었다.

Table 5에서 철골보의 항복하중은 이론값에 대한 실험값의 비율(eP_y/P_y)이 0.87~1.01의 분포를 나타내고 있으며, 최대하중은 이론내력에 대한 실험내력의 비율(eP_{max}/P_{max})이 1.07~1.16의 분포를 보이고 있다.

Table 4 접합부 파괴하중(이론값) (단위: tf)

실험체명	보파괴		기둥파괴		접합부파괴	
	휨	전단	축력	휨	지압	전단
S-1					-	-
S-2					-	-
F-1	21.5	31.6	147.9	34.2	32.6	39.1
F-2					32.6	41.1

Table 5 철골보의 항복하중 및 최대하중 (단위 : tf)

실험체명	이론값		실험값		실험값/이론값	
	P_y	P_{max}	eP_y	eP_{max}	eP_y/P_y	eP_{max}/P_{max}
S-1	19.3	21.5	17.3	23.4	0.90	1.09
S-2			16.8	25.0	0.87	1.16
F-1			18.9	23.4	0.98	1.09
F-2			19.5	23.0	1.01	1.07

P_y, P_{max} : 이론식에 의한 항복하중, 최대하중
 eP_y, eP_{max} : 실험값에 의한 항복하중, 최대하중

4.5 초기 강성 및 접합부 휨성능 분석

1) 초기 강성

모멘트-회전각 곡선에서 항복모멘트는 초기 강성 구배의 직선과 초기 강성 구배의 1/3되는 직선을 평행 이동시켜 접선이 교차하는 점으로 구하고, 이 때의 부재 회전각을 항복회전각으로 하였다. 각 실험체에 대한 항복 내력 및 초기 강성비율을 Table 6에 나타내었고, 휨접합부의 초기강성분석 결과 F-1 실험체가 가장 큼을 알 수 있는데, 이는 보의 파괴를 유도한 결과 때문인 것으로 생각되어진다.

Table 6 접합부의 강성평가

실험체명	M_y	θ_y	M_{max}	M_{max}/M_y	K_y	$s-1K_y$
S-1	19.0	0.009	25.7	1.35	2111	1
S-2	18.5	0.010	27.5	1.49	1850	0.88
F-1	20.8	0.009	25.7	1.24	2311	1.09
F-2	21.5	0.012	25.3	1.22	1792	0.85

M_y (tf·m) : 항복모멘트, θ_y (rad) : 항복회전각
 M_{max} (tf·m) : 최대모멘트, M_{max}/M_y : 모멘트비
 $K_y = M_y/\theta_y$ (tf·m/rad) : 초기강성비
 $s-1K_y$: S-1 실험체에 대한 초기강성비

2) 접합부 휨성능 분석

EC3(8)에서 보-기둥 접합부의 휨성능은 M/M_p 가 1.0 이상인 경우에 강접합영역으로 취급되며, M/M_p 가 0.25 이하인 경우 편접합영역으로 취급하고 있다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 S계열, F계열 실험체 모두 반강접 영역임이 확인되었고, 접합부의 항복 및 소성모멘트의 관계를 나타내면 Table 7과 같다.

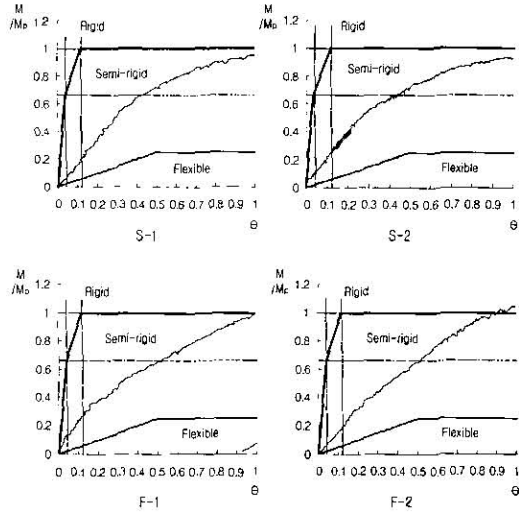


Fig. 8 EC 3에 따른 모멘트-회전각 곡선

Table 7 접합부의 항복모멘트 및 소성모멘트 성능

실험체명	M_p	θ_p	M_y	Q_y	$s-1Q_y$
S-1	23.69	0.0228	19.00	0.802	1.0
S-2			18.50	0.781	0.974
F-1			20.80	0.878	1.095
F-2			21.50	0.908	1.132

$M_p = Z_p \times \sigma_y$ (tf·m) : 전소성모멘트

$\theta_p = M_p / (EI/L_b)$ (rad), $L_b = 2 \times L$

$Q_y = M_y / M_p$, $s-1Q_y$: S-1 실험체에 대한 Q_y 의 비

M_y/M_p 값에 대해 S-1 실험체를 기준으로 각 실험체를 비교한 결과, S-2 실험체는 0.974로 S-1 실험체와 유사한 양상을 보였다. 그러나 F-1 실험체는 1.095, F-2 실험체는 1.132로 S-1 실험체에 비해 9.5~13.2% 접합부의 휨성능이 개선된 것을 알 수 있었다. 특히 F-2 실험체에서 M/M_p 가 일부 1.0을 상회하였으나, 이점은 이미 항복모멘트 M_y 이후에 나타난 양상으로 일부 강접영역으로 평가되기엔 다소 어려울 것으로 판단된다.

5. 결론

철근 콘크리트 기둥과 철골보로 구성된 혼합구조 접합부에 대해 단조하중을 가하여 접합부의 성능을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) RCS구조 접합부의 파괴양상은 S계열에서 초기균열 발생후 하중의 증가와 비례하여 균열이 진전되었으나, F계열에서는 초기균열 발생후 균열양이 비교적 적게 나타났으며 S,F계열 모두 항복하중 이후 철골보에 좌굴이 발생하였으며, 이후 파괴에 이르렀다.
- (2) 항복하중에서 이온값에 대한 실험값(eP_y/P_y)은 S계열에서 0.87~0.9 범위에 있었고, F계열은 0.98~1.01 범위로 1.0에 근접하게 나타났으며, 최대하중(eP_{max}/P_{max})은 S계열과 F계열 모두 1.0을 초과하였다.
- (3) 보-기둥 접합부의 초기강성비는 F-1 실험체가 S-1 실험체에 비해 1.09로 가장 크게 나타나는 것으로 평가되었고 항복모멘트는 F-2 실험체가 21.5tf·m로 가장 크게 나타났다.
- (4) 접합부의 휨성능은 Eurocode No.3의 모멘트-회전각 곡선에서 S계열과 F계열 모두 반강직 영역에 있음을 알 수 있었고, M_y/M_p 값에서 F-1 실험체와 F-2 실험체가 S-1 실험체에 비해 각각 9.5%, 13.2%의 휨성능 개선 효과가 있었다.

참 고 문 헌

1. 조필규, 김상준, 허준, 최완철(1998), "철근 콘크리트 기둥/철골보 합성구조의 접합부 성능," 대한건축학회, 학술발표논문집, 18권, 1호, pp 753-760.
2. 신동대, 이원규, 김종락, 최완철(2000), "철근 콘크리트 기둥과 철골보의 합성구조 접합부 개발," 대한건축학회, 학술발표논문집, 20권, 1호, pp 145-148
3. 삼성물산(주) 건설부문, "LC Frame을 이용한 복합화 공법의 개발 및 성능평가," 2000
4. 김영수(1992), "반강직 보-기둥 접합부의 탄소성 거동에 관한 연구," 인하대, 박사학위논문
5. Darwin, D. et. al.,(1994), "Guidelines for Design of Joints Between Steel Beams and Reinforced Concrete Column," Journal of Struct Div., ASCE, 120(8), pp. 2230-2357.
6. Deierlein, G.G. (1988), "Design of Moment Connections for Composite Framed Structures," Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, The Univ. of Texas at Austin.
7. Kanno, R. (1993), "Strength, Dcformation, and Seismic Resistance of Joints Between Steel Beams and Reinforced Concrete Columns," Ph.D. Cornell Univ.
8. The Commission of the European Communities "Eurocode No.3", 1990

(접수일자 : 2001년 3월 27일)