

고강도강 기둥(SM570) 보 용접접합부의 탄소성거동에 관한 실험적 연구 -스캘럽상세와 패널강성을 중심으로-

An Experimental Study on the Elasto-Plastic Behavior of High Strength Column to Beam Welded Connection

김 종 락¹⁾ · 김 성 배²⁾
Kim, Jong Rak Kim, Sung Bae

요 약 : 고강도강 기둥-보 접합부는 용접방법에 따라 응력집중 및 균열의 발생진전에 큰 차이가 있다. 그러므로 공장제작형 디테일에 대한 내력과 인성, 용접접합부의 소성변형 능력과 패널의 강성에 의한 변형능력의 차이 등을 비교 검토하여 설계자료로 제시하고자 한다. 실험결과는 다음과 같다. 첫째, 누적소성율과 소성변형배율, 내력상승율 모두 논스캘럽이 스캘럽 시험체 보다, 약패널이 강패널 보다 우수한 것으로 나타났다. 둘째, 시험체의 2차균열 발생은 스캘럽 단부에서 발생하였으나, 논스캘럽 시험체는 보플렌지 용접 본드부에서 발생하여 접합부 상세에 따라 상이한 경향을 나타내었다.

ABSTRACT : This paper intends to propose design information with the result of comparing the deformation capacity with different panel stiffness specimens and estimating the plastic deformation capacity, toughness and strength of welded joint connection according to the different scallop types. The test results of the beam to column unit structure are as follow; the non-scalloped and the low stiffness panel specimen have more desirable result values than the scalloped and the high stiffness one in plastic deformation. Comparing the scallop types shows very unlikely tendency as follows, second cracking occurs at the very edge of scallop in the scalloped specimen otherwise cracking occurs bond area of welded beam flange in the non-scalloped one.

핵 심 용 어 : 고강도강(SM570), 용접접합부, 인성, 스캘럽상세, 패널강성

KEYWORDS : High Strength Steel(SM570), Welded Connection, Toughness, Scallop Type, Panel Stiffness

1) 정회원, 숭실대 건축학부 교수, 공학박사
2) 정회원, 숭실대 건축학부 박사과정

본 논문에 대한 토의를 2001년 4월 30일까지 학회로 보내
주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

현재 고층건축의 주류를 이루는 철골구조의 기둥보 접합부는 강풍·강진 등에 저항하기 위해 우수한 내력과 강성을 보유하고, 인접하는 보나 기둥에 충분한 소성변형능력을 발휘할 수 있도록 하는 것이 중요하다. 따라서 기둥보 접합부는 골조전체의 인성을 결정하는 중요한 구조요소로서 단순한 부재의 접합점이 아니라 라멘구조의 내진 요소로 생각해야 한다.

접합부의 성능은 소재의 특성 및 용접부 성능에 영향을 받고, 구조물의 성능은 접합부의 성능 및 상세에 의해서 크게 영향을 받는다. 또한 고층건축물의 저층부 기둥은 연직하중에 의한 고축력과 지진·바람 등의 수평하중에 의한 복합 응력상태가 되어 단면적이 증가하므로 후판 강재를 용접하여 조립하고 있다. 따라서 강도와 용접성이 뛰어나고 판 두께 방향에도 우수한 성능을 갖는 고성능·고강도강이 필요하다. 고강도 강재를 개발하여 건축구조용 강재로 적용하기 위해서는 각 부재의 거동과 인성에 대한 특성을 명확하게 분석하여야 하며 그 특성이 현재의 설계법에 부합되는지의 여부를 확인하여야 한다.

최근 노스릿지와 고베지진에서 강구조 기둥보 접합부에 취성파괴가 발생하여 보단부 스켈럽의 응력집중을 고려한 개량형 및 논스켈럽 등의 접합부와 보 단부를 보강하거나 소성힌지를 유도하는 방법 등이 제시되고 있다. 또한 접합부는 보가 먼저 항복되는 보항복형으로 설계되나 패널이 보보다 약한 약패널은 변형능력과 에너지 흡수능력이 상대적으로 우수하여 골조전체에 대한 충분한 변형능력을 얻을 수 있다.

이에 본 연구에서는 고강도강재의 기둥-보 접합부의 공장제작형 디테일에 따른 내력과 인성, 용접접합부의 에너지흡수능력 등에 대한 구조성능을 평가하고, 패널의 강성에 의한 변형능력 등을 비교 검토하여 설계자료로 제시하고자 한다.

2. 공시강재의 소재특성

2.1 화학성분시험

화학 성분 시험 결과를 표 1에 나타내었다. 화학 성분 시험은 사용된 강재의 기둥과 보플랜지에 대해 실시하였다.

시험결과 탄소(C), 규소(Si), 망간(Mn), 인(P), 황(S) 및 탄소당량(C_{eq})과 용접갈라짐 감수성 조성(P_{cm})의 값은 모두 KS D 3515의 규격값을 만족하는 것이 확인되었다.

표 1. 화학성분시험결과

	C	Si	Mn	P	S	C_{eq}	P_{cm}
B.F	0.16	0.32	1.40	0.016	0.010	0.42	0.22
C.F	0.11	0.27	1.28	0.017	0.008	0.36	0.20

B.F : Beam Flange, SM490 19t

C.F : Column Flange, SM570 19t

$$C_{eq}(\%) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14}$$

$$P_{cm}(\%) = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Si}{30} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

2.2 인장시험

시험결과는 표 2에 나타내었다. 본 실험에 사용된 강재의 기계적 특성을 파악하기 위해 인장시험을 실시하였으며, 항복점, 인장강도와 연신율은 KS규격을 만족하고 있으나, SM570의 항복비가 상당히 높게 나타났으나 본 실험에 적용했다.

표 2. 인장시험결과

구분	시험편	σ_y	σ_u	σ_y/σ_u	Elo
보	SM490 12t	4.19	5.52	75.9	24.9
	SM490 19t	3.25	5.03	64.6	29.5
기둥	SM570 16t	6.27	6.86	91.4	15.5
	SM570 19t	5.85	6.39	91.5	18.9

σ_y : 항복강도(t/cm²),

σ_y/σ_u : 항복비(%),

σ_u : 인장강도(t/cm²),

Elo : 연신율(%)

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험계획

본 실험은 고강도강의 접합부 특성을 파악하기 위해 기둥부재는 SM570으로, 보부재의 소재로 SM490으로 제작하여 정적가력하였다. 시험체는 지점간 거리가 기둥 2m, 보 3m로 실구조체의 약 1/2 사이즈에 해당되고, 그림 1에 시험체의 형상을 나타내었다. 표 3은 각 시험체의 기호이다.

주요 변수는 패널존의 강성과 스캘럽의 형상으로 하였다. 약패널의 강성비(보:기둥:패널)는 1:2.08:0.73이고, 강패널의 강성비는 1:2.08:1.55로 설계되었다. 또한 강패널은 패널존에 SM570 2-9t로 양면에 부분개선 용접하여 보강하였다.

그림 2는 본 실험에서 채택된 스캘럽 형상 및 접합부 상세를 나타내고 있다. (a)는 일반적인 반경 35mm의 1/4원형에 7mm의 반원을 추가한 개량형 스캘럽이며, (b)는 스캘럽과 보플랜지가 만나는 부위에 반경 13mm의 개선을 추가하였다. (c)는 논스캘럽 시험체로 보플랜지와 웨브가 만나는 필렛부의 뒷받침쇠를 필렛반경에 맞추어 절삭한 후 모재와 밀착시켰다. 용접은 실온에서 플릭스코아드 아크용접 하향자세로 하였고, 용접봉은 SF-71을 사용하여 표 4의 용접조건으로 시행하였다.

표 3. 시험체 기호

시험체명	시험체 치수	스캘럽 형상	패널 타입	강비 (보:기둥:패널)
WP-57-A	기둥 :	개량형A	약패널	1:2.08:0.73
WP-57-B	BH-230×230	개량형B		
WP-57-N	×16×19 보 :	논스캘럽		
SP-57-B*	BH-300×150	개량형B	강패널	1:2.08:1.55
SP-57-N*	×12×19	논스캘럽		

* 패널존에 2-PL-9 로 보강

표 4. 용접 조건

전류(A)	전압(V)	용접속도(v)	입열(KJ/cm)
180~350	28~35	15~30	20.2~24.5

3.2 가력 및 측정방법

가력은 반력프레임에 시험체 양단부의 기둥 지점을 핀으로 연결하여 시계방향으로 가력할 경우를 정(+), 시계반대방향으로 가력할 경우를 부(-)로 정하여 가력하였다. 가력은 변위제어 하였고, 계산에 의한 전소성내력시의 변형량(ϵ, δ_p)을 기준으로 1/3, 2/3, 1, 2...7배로 3회씩 증분 재하하여 파괴에 이를 때까지 가력하였다.

시험체의 변형측정은 그림 1과 같이 보와 기둥 단부, 패널존에 변위계를 설치하여 각 부위와 시험체 전체의 변형을 측정하였고, 측정된 자료를 근거로 시험체의 하중 변위곡선과 분담율을 산출하였다.

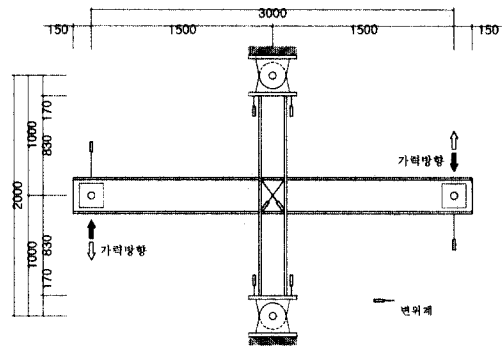


그림 1. 시험체 형상 및 치수

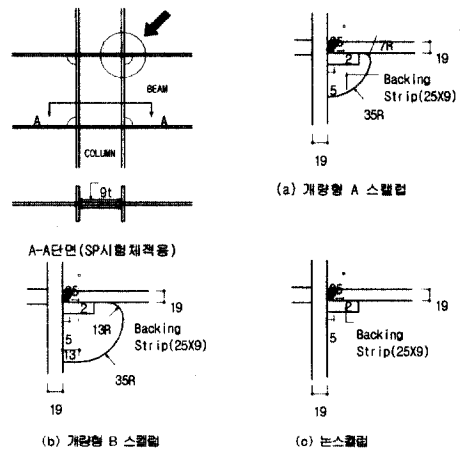


그림 2. 스캘럽(scallop) 상세

4. 실험결과 및 고찰

4.1 실험결과

표 5는 각 시험체에 대한 실험결과이다.

이론식의 산정은 부분골조의 근사적 횡변위 일 반식을 이용하였다. 계산 시 항복강도는 소재시험 값을 이용하였고, 스캘럽에 의한 단면결손은 고려 하지 않았다. 그림 3~7은 각 시험체의 하중변위 곡선이며, 그림 8(a)~(c)는 강패널인 SP-57-B의 패널, 기둥, 보에 대한 변위곡선이다.

각 시험체의 이력곡선은 방추형의 안정된 현상을 나타내고 있다. 시험체의 파괴는 단면이 파단 하여 더 이상의 가력이 불가능하거나 최대하중의 70%이하로 저하될 때까지 가력하였다.

약패널 시험체는 최대하중이후 급격한 파단이 우선되고, 강패널 시험체는 패널에 설치한 보강 플레이트의 용접부 파단으로 최대하중 이후 상당한 변형능력을 보이고 있으나 패널존에 균열이 확산되어 내력이 저하되었다. 이러한 최대하중 이후의 급격한 파단은 기둥의 강성과 강도가 일반 강 보다 상대적으로 크기 때문에 판단되며, 파 면관찰결과 취성파면이 관찰되었다. SP-57-B 시험체의 보 이력곡선에서 '+'측으로 이동한 현상은 가력이 반복됨에 따라 보의 '+'측 가력면에서 크랙이 발생하였기 때문이다. 각 이력곡선에 시험체의 균열개시점과 패널존의 균열발생점을 나타내었다.

4.2 파괴양상

시험체의 파괴양상은 그림 9와 같다.

각 시험체의 균열진전 양상은 초기균열의 경우 보플렌지 용접부의 본드부에서 발생하였고, 특히 5개의 시험체중 4개의 시험체가 보플렌지측 본드 부에서 발생하여 접합부상세와는 무관한 양상을 보였다. 2차균열의 발생과 파단은 스캘럽 타입은 스캘럽단부를 기점으로 발생하였고, 논스캘럽은

보플렌지 용접 본드부에서 발생하여 접합부상세에 따라 상이한 경향을 나타내었다.

초기균열의 발생은 계산에 의한 전소성내력시 항복변위의 2~4배에서 발생하였고 단위골조의 인성과는 무관한 것으로 판단되며, 파단이 인성과 밀접한 관계를 보이고 있다.

사진 1은 시험체의 파괴양상이다.

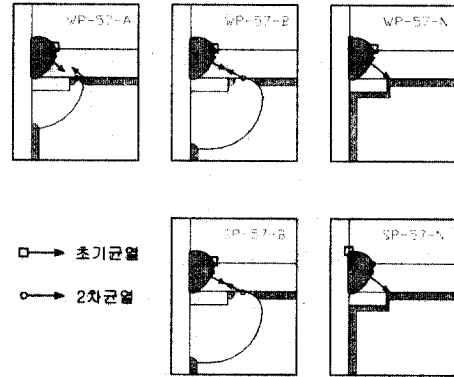


그림 9. 균열진전양상

사진 1. 시험체 파괴양상

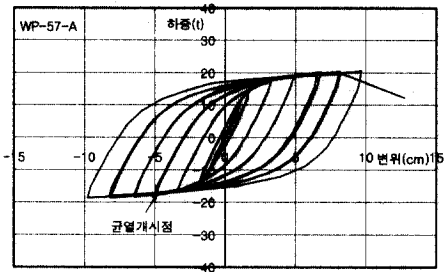


그림 3. WP-57-A 시험체의 하중 변위곡선

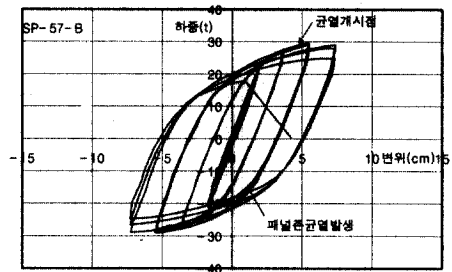


그림 7. SP-57-B 시험체의 하중 변위곡선

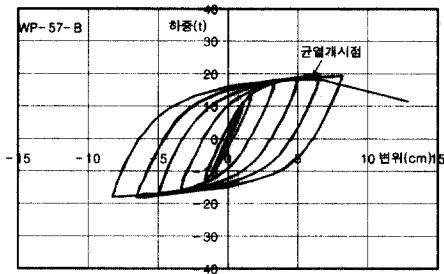


그림 4. WP-57-B 시험체의 하중 변위곡선

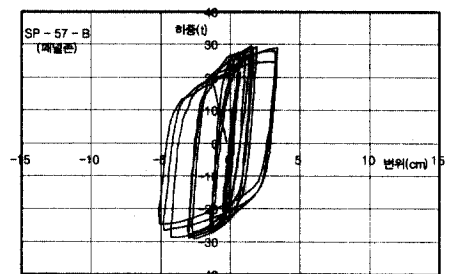


그림 8 (a). SP-57-B 패널존의 하중 변위곡선

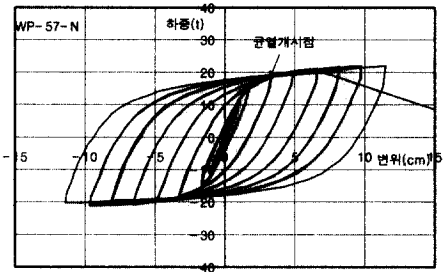


그림 5. WP-57-N 시험체의 하중 변위곡선

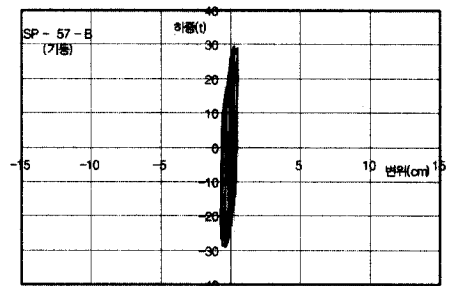


그림 8 (b). SP-57-B 기둥의 하중 변위곡선

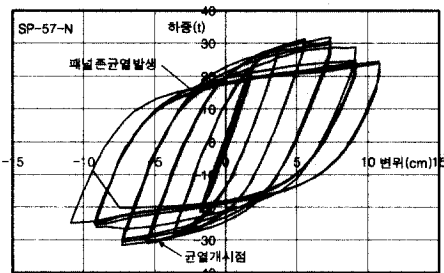


그림 6. SP-57-N 시험체의 하중 변위곡선

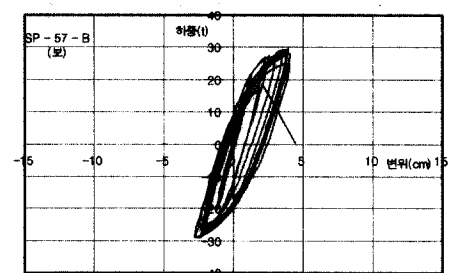


그림 8 (c). SP-57-B 보의 하중 변위곡선

4.3 접합부의 소성변형능력

그림 10은 시험체의 하중 변위곡선을 단조곡선으로 치환한 것이다. 하중과 함께 변위가 증가하는 부분에 대해 이력곡선의 '+사이클 1회'를 기준으로 누적시켰다. 접합부 패널의 강성이 클수록 강도는 커지나 변형능력은 저하됨을 보이고 있다.

표 5는 실험결과의 하중 변위곡선을 단조치환한 값으로부터 얻은 내력상승율과 누적소성율, 소성변형배율을 나타낸 것이다.

내력상승율은 강재의 강도 편차에 의해 강종과 부위에 따라 적용되는 값이 상이하고⁽²⁾⁽³⁾, 최대하중에 대한 계산시의 소성하중 비로 나타낸다. 실험결과 내력상승율은 1.1~1.3의 범위이고, 논스캘럽이 개량형 스킵보다, 강패널이 약패널보다 각각 약 110% 우수하게 나타났다.

누적소성율은 계산에 의한 전소성하중시의 변위에 대한 최대하중시의 변위 비로 부재의 변형능력을 평가하는 기준이 된다. 소성변형배율은 단위골조가 반복가력을 받을 때 갖는 변형능력을 에너지 개념으로 환산한 것으로, 계산에 의한 전소성 하중과 변위를 단위골조의 흡수에너지비로 정량화한 값이다.

그림 11과 12는 내력상승율과 누적소성율, 소성변형배율의 관계이다. 누적소성율과 소성변형배율 모두 논스캘럽이 스킵 시험체 보다, 약패널이 강패널 보다 우수한 것으로 나타났고, 누적소성율은 2.0~5.0, 소성변형배율은 5.7~13.0으

로 접합부 상세와 패널 강성에 따라 큰 차이가 나타났다.

누적소성율의 경우 논스캘럽이 스킵 시험체 보다 약 120% 우수하고, 약패널이 강패널 보다 170%이상 우수하다.

소성변형배율은 논스캘럽 시험체가 스킵 시험체 보다 약 130% 우수하고, 약패널이 강패널 보다 150%이상 높다⁽³⁾. 그러나 시험체 설계시 우수한 변형능력을 기대했던 개량형 B시험체는 상대적으로 낮은 인성을 보이고 있다. 기 발표된 논문들과는⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ 상반된 결과인 반면, 본 연구진들이 기 발표한 결과⁽¹⁾와는 동일한 현상으로 스킵의 과다절단으로 인한 휨 변형능력의 감소와 스킵의 과대한 표면거칠기가 노치역할을 하여 응력집중이 된 것으로 판단된다.

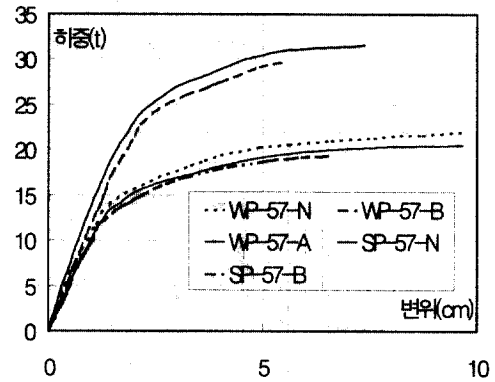


그림 10. 단조곡선으로 치환된 하중-변위 관계

표 5. 실험결과

시험체명	계산치		실험치		cW_p	W_s	α	μ	η	초기균열 사이클	파단시 사이클
	cP_p	$c\delta_p$	eP_u	$e\delta_u$							
WP-57-A	17.2	1.61	20.50	9.67	13.49	164.76	1.19	5.01	12.21	3δ-3	6δ+2
WP-57-B	17.2	1.61	19.38	6.52	13.49	98.18	1.13	3.05	7.28	4δ+1	5δ+3
WP-57-N	17.2	1.61	22.07	9.73	13.49	175.77	1.28	5.04	13.03	2δ+1	7δ+2
SP-57-B	23.6	1.80	29.63	5.44	20.25	114.98	1.26	2.02	5.68	3δ+1	4δ-3
SP-57-N	23.6	1.80	31.53	7.37	20.25	183.09	1.34	3.09	9.04	3δ-1	6δ-2

cP_p : 전소성내력 계산치(ton),
 $e\delta_u$: eP_u 시의 변형량(cm),
 α : 내력상승율 eP_u/cP_p .

$c\delta_p$: cP_p 시의 변형량(cm),
 cW_p : 단성한계변형에너지($t \cdot cm$) = $(cP_p \times c\delta_p)/2$,
 μ : 누적소성율 $(e\delta_u - c\delta_p)/c\delta_p$.

eP_u : 최대내력 실험치(ton),
 W_s : 소성변형에너지
 η : 소성변형배율 W_s/cW_p

4.4 변형분담율

각 시험체의 보 단부에서 측정된 전체 변형량을 접합부 구성요소인 기둥, 보, 패널론으로 구분하여 그림 13, 14와 같이 산출하였다.

전 시험체 모두 탄성구간에서는 보의 변형이 지배적으로 나타났으나, 종국상태에서는 약패널의 경우 패널의 변형분담이 70~85%이고, 강패널은 30~50%가 되었다. 강패널은 패널의 분담율이 $3\delta_p$ 이후 증가하는 현상을 보이는데 이것은 패널에 용접된 보강판의 용접부에 균열이 발생하여 패널의 변형분담이 증가하였기 때문이다. 기둥의 변형은 전체변형의 10%내외로 나타났고, 그림 8(c)의 SP-57-B 시험체의 기둥 이력곡선을 보면 탄성거동을 한 것으로 판단된다.

논스캘럽의 경우 스캘럽 시험체에 비해 보의 변형분담율은 감소하나 패널의 분담율은 증가하여, 패널의 강성과는 무관하였다. 이러한 경향은 스캘럽의 유무가 보단부에 작용하는 응력과 밀접한 관계가 있기 때문이다.

4.5 변형도 분포

그림 15는 기둥 보 접합부의 보단부 플랜지에 부착된 스트레인 게이지로부터 측정된 변형도 분포이다. 스트레인 게이지의 부착은 기둥 보 접합부에 최대한 밀착시켜 보단부의 변형을 측정토록 하였다. 변형도는 각각 탄성역에서 소성역을 지나 최대하중에 이르는 $2/3, 1, 2, 3\delta_p$ 에서의 최대하중 시 변형도이다.

스캘럽 형상에 따른 변형도 분포는 스캘럽 시험체의 경우 중앙부의 변형도가 다소 높게 나타나고 있으나 큰 차이가 없고, 스캘럽의 유무나 패널에 의한 보플랜지의 변형도 분포 차는 크지 않은 것으로 판단된다.

최대변형도도 다소 차이가 있으나 스캘럽이나 패널의 영향과는 상관없이 2~4%의 범위를 보이고 있다⁽⁷⁾.

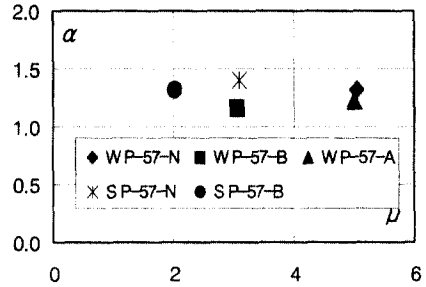


그림 11. 내력상승률(α)과 누적소성률(μ)

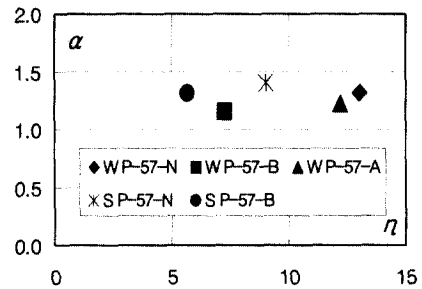


그림 12. 내력상승률(α)과 소성변형배율(η)

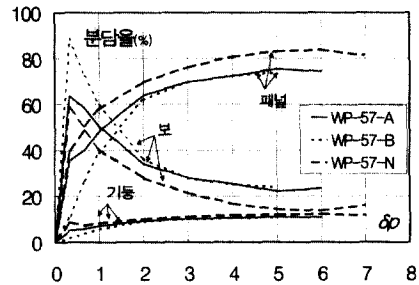


그림 13. 약패널 시험체의 변형분담율

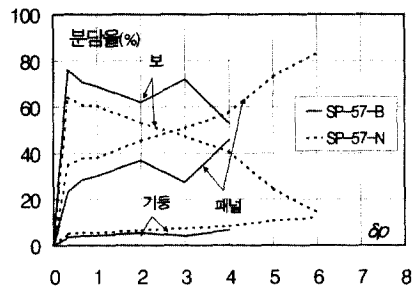


그림 14. 강패널 시험체의 변형분담율

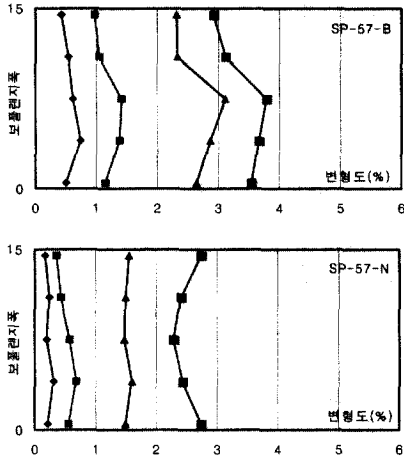


그림 15. 보단부의 변형도분포

5. 결론

패널존의 강성과 스켈립형상을 변수로 고강도 강 기둥과 보 용접접합부의 단위골조 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 스켈립의 형상에 따른 영향을 비교하면, 논스켈립 시험체가 스켈립이 있는 시험체 보다 내력상승율은 110%, 누적소성율은 120%, 소성변형배율은 130% 우수하다.
- 2) 패널의 강성에 따른 영향은, 약패널 시험체가 강패널 시험체 보다 내력상승율은 110%, 누적소성율은 170%, 소성변형배율은 150% 이상 우수하다.
- 3) 시험체의 균열진전 양상은 초기균열의 경우 보플렌지 용접부의 본드부에서 발생하여 접합부 상세와는 무관한 양상을 보였다. 2차균열의 경우 스켈립 시험체는 스켈립단부를 기점으로 발생하였고, 논스켈립은 보플렌지 용접 본드부에서 발생하여 접합부상세에 따라 상이한 경향을 나타내었다.
- 4) 변형분담율은 논스켈립의 경우 스켈립 시험체에 비해 보의 변형분담율은 감소하나 패널의 분담률은 증가하고 패널의 강성과는 무관하

여, 스켈립의 유무가 보단부에 작용하는 용력과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

- 5) 후판 부재와 좀 더 많은 실험결과가 필요하겠으나, 고강도강 SM570을 기둥부재로 사용한 실험결과, 접합부의 소성변형능력과 파괴양상, 변형분담을 등을 비교해 볼 때 논스켈립 시험체가 스켈립 시험체 보다 반복되는 수평 하중에서 구조체의 내력과 연성 등을 크게 향상시킬 수 있다고 판단된다.

참고 문헌

1. 김종락, 김성배 '고강도강 기둥(SM520, 570)과 보 용접접합부의 탄소성거동에 관한 연구', 대한건축학회 논문집, 1999, 11 pp27~35
2. 日本建築學會, 鋼構造限界狀態構造設計規準・同解説, 1998.
3. 高性能鋼利用技術指針, 鋼材俱樂部, 1994.
4. 山本昇, 石井匠, 森田耕次 'はり端溶接接合部の力學的舉動におよぼすスカラップの影響', 構造工學論文集, Vol. 39B 1993年 3月 pp 493 ~ 506
5. 矢部喜堂, 坂本眞一 '高性能鋼HT590を用いた柱梁溶接接合部におけるH形鋼梁端部の力學的性能', 構造工學論文集, Vol. 39B 1993年 3月 pp 465 ~ 472
6. 中込忠男, 山田文富, 市川祐一, 坂本眞一, 李建, 中野秀二, '590N/mm²級高性能鋼を用いた柱梁溶接接合部の力學的性能に關する實驗的研究', 日本建築學會構造系論文報告集 第499号, 1997年 9月 pp 101 ~ 107
7. 藤本盛久, 松下眞治, '鋼構造柱はり接合部における柱フランジの板厚方向歪度とその分布に關する實驗', 日本建築學會論文報告集 第309号, 1981年 11月 pp 41 ~ 51

(접수일자 : 2000년 8월 7일)