HSA800 강재를 적용한 보-기둥 특수 모멘트 접합부 공법 소개

(Introduction of Beam-to-Column Connection for Special Moment Frame Applying HSA800 Steel)

오 상 훈 교수
부산대학교 건축공학과

박 해 용 연구생
부산대학교 건축공학과

1. 개 요

일반적으로 고강도강은 구조체의 강도확보에 유리한 측면이 있는 반면 구조물 전체의 강성확보가 어렵고 일반 구조용강(mild steel)에 비해 높은 항복비와 낮은 연신율을 가짐에 따라 휨 부재의 소성변형능력과 인성이 저하될 수 있다.

특히 복잡한 응력메커니즘을 가지는 기둥-보 접합부에 고강도강을 적용할 경우 용접부 및 모재의 취성적인 성향에 의해 접합부의 회전능력이 저하될 가능성이 있다. 이에 따라 현재 세계적으로 고강도강 휨재 적용은 엄격히 제한되고 있으며 단스팬의 과하중이 발생하는 일부 부분에서만 적용가능성을 열어두고 있다. 하지만 일반강에 비하여 월등한 강도와 탄성변형량을 보유하는 고강도 강재는 건축실무자 및 관련 연구자들에게 충분히 매력적인 재료임이 분명하며 재료적 발전과 더불어 고강도강의 단점을 극복하기 위한 지속적인 연구는 보다 고성능을 요구하는 현재의 건설시장 추세에 부합하는 일이기도 하다.

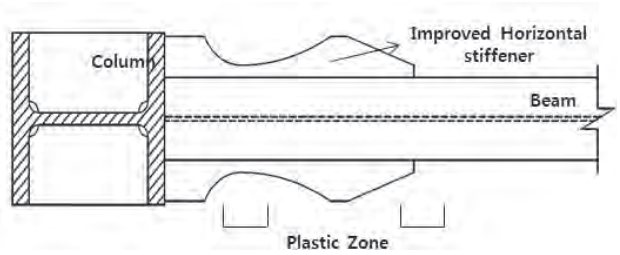
현 상황을 고려할 경우 고강도강 휨재를 활용하기 위해서는 재료적, 구조적 보강조치가 필요하며 휨재에 작용하는 응력을 적절히 분산시킬 수 있는 새로운 형태의 접합상세 개발이 그 대안이 될 수 있다.

본 저자는 국내에서 개발된 고강도강(HSA800, 목표인장강도:800MPa)을 대상으로 접합부의 변형능력을 향상시키기 위해 보 단부에서의 취성파단이 예방가능하며 보 내부에서 효과적인 변형도 분배가 가능한 새로운 형태의 보강 접합공법을 소개하고자 한다.

2. 개량 수평스티프너 공법

2.1 공법의 개념

소개하고자 하는 개량수평스티프너 공법은 보의 상하부 플랜지, 혹은 하부 플랜지의 기둥 외주면으로부터 독특한 형상을 가지는 수평강판을 덧붙이는 방법이다(그림 1). 이 공법



[그림 1] 개량수평스티프너 형상

은 소성힌지의 위치를 보 내부로 유도함에 따라 보 단부의 변형도를 줄일 수 있는 수평스티프너 공법과 RBS공법의 개념과 동일한 개념을 가지는 공법이다. 하지만 스티프너 끝단의 응력집중을 야기할 수 있는 수평스티프너 공법의 단점과 내력저하 및 조기횡좌굴의 위험이 있는 RBS공법의 단점을 보완가능하다는 점에서 내력을 충분히 확보가능하고 접합부의 변형능력을 향상시킬 수 있는 개선된 접합방식이라 사료된다.

개량수평스티프너 내의 잘록한 부분은 응력이 집중되는 스티프너의 끝단과 함께 소성힌지의 위치가 되며 2군데에서 응력이 집중되는 시스템이기 때문에 응력이 한군데에 집중되는 경우에 비하여 동일한 변위에 대해서 변형도 집중률이 줄어들며 결과적으로 모재의 응력집중부담을 덜어 줄 수 있다.

2.2 스티프너 설계

개량수평수평스티프너의 설계는 보의 경간에 대하여 기둥 외주면에서 소성힌지가 발생하지 않고 그림2에 나타낸 수평력에 의한 모멘트 구배에 따라 이론적으로 보강끝단과 스티프너 내 임계단면에서 동시에 소성힌지가 발현될 수 있도록 고려하였으며 임계단면 좌우측은 첨점에 의한 응력집중이 발생하지 않도록 곡선으로 절취한다. 개량수평스티프너는 설계개념에 따라 다음의 식으로 설계할 수 있다(관련기호는 그림 2, 그림 3 참조).

$$d \cong (0.5\sim0.8)\frac{L}{2M_{np}}(M_{np}-M_p) \quad (1)$$

$$d_a \cong (0.5\sim0.75)b_f \quad (2)$$

$$d_b \cong (0.5\sim0.7)d \quad (3)$$

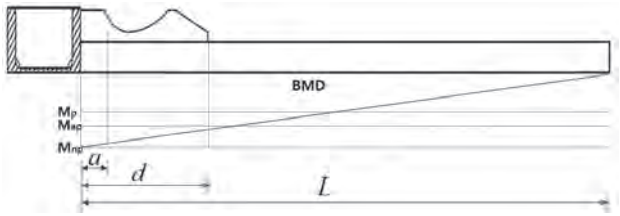
$$a=\frac{L}{2}-\left\{\frac{L}{2}-(1.0\sim1.1)d\right\}\frac{M_{ap}}{M_p} \quad (4)$$

$$d_c \cong 20\sim50mm \quad (5)$$

$$R1=\frac{(a-d_a)^2+(b_n-b_a)^2}{2(b_n-b_a)} \quad (6a)$$

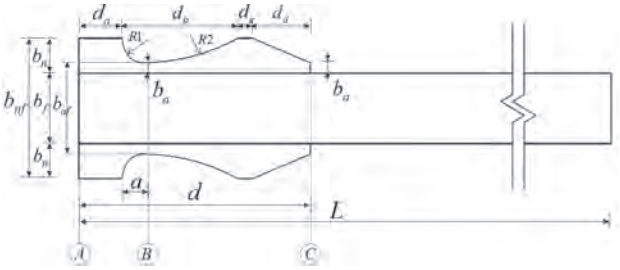
$$R2=\frac{(d_b-a+d_a)^2+(b_n-b_a)^2}{2(b_n-b_a)} \quad (6b)$$

보강스티프너 높이 의 경우 기둥부재 단면에 따라 결정이 가능하며 최소 보 부재 폭의 1/2이상을 만족하여야 한다. 나머지 변수들에 대해서는 시공상의 유연성을 확보할 수 있는 선에서 자유롭게 설계가 가능하다.



[그림 2] 수평력에 대한 모멘트 구배

실험전경을 그림 5에 나타내었다.



[그림 3] 기호 정의

3. 구조성능평가 실험

3.1 실험계획 및 방법

접합부 반복재하실험을 위하여 실험체의 형태는 T자형의 기둥-보 접합부로 제작하였다. 보의 길이(가력중심지점에서 기둥중심까지의 거리)는 3.5 m로 설정하였으며 보와 기둥의 사용재료는 모두 고강도강 HSA800으로 제작하였다. 부재단면치수는 보 부재의 경우 H-600×200×15×25, 기둥 부재의 경우 H-440×440×25×35로 제작하였다. 각 부재는 Built-up 부재로 구성되어 있으며 보 단부의 용접상세는 모두 Non-Scallop접합상세로 제작하였다.

플랜지와 웨브는 한국산 용접봉 PKW-900을 사용하여 완전용입용접하였다. 실험변수는 접합상세의 차이로서 총 3개의 실험체로 구성하였다. 즉 일반적인 형태의 Non-Scallop접합상세(NWC), 그리고 일반 수평스티프너(HS)와 개량수평스티프너(IH)가 적용된 실험체로 구성하였다.

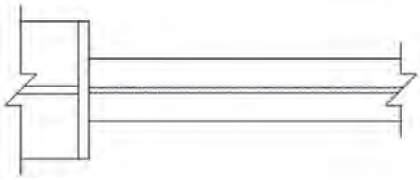
실험변수에 따른 실험체일람을 표1에 나타내었으며 실험체상세 및 용접상세를 그림 4에 나타내었다. 실험체 경계조건은 기둥의 상하부를 회전지그와 볼트체결하여 핀접합을 구현하였으며 보 부재의 자유단에 3,000kN용량의 Actuator를 설치하여 반복이력가력을 계획하였다. 가력패턴은 FEMA 350에 제시되어 있는 접합부 반복재하절차를 사용하였다. 또한 보 부재의 횡좌굴을 방지하기 위하여 가력지점에서 700 mm 떨어진 지점에 구속지그를 설치하였다.

3.2 재료 인장실험 결과

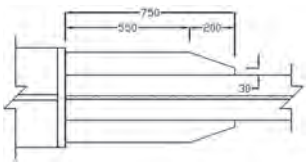
본 연구에서 사용된 강재의 재료특성을 그림6 및 표2에 나타내었다.

[표 1] 실험체 일람

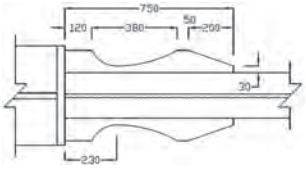
실험체명	내용	부재 내력비		
		보	기둥	패널존
NWC	무보강	1	1.76	1.84
HS	일반 수평스티프너 보강		1.46	1.48
IH	개량수평스티프너 보강		1.46	1.48



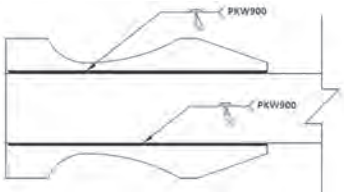
(a) NWC

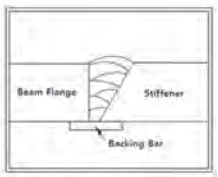


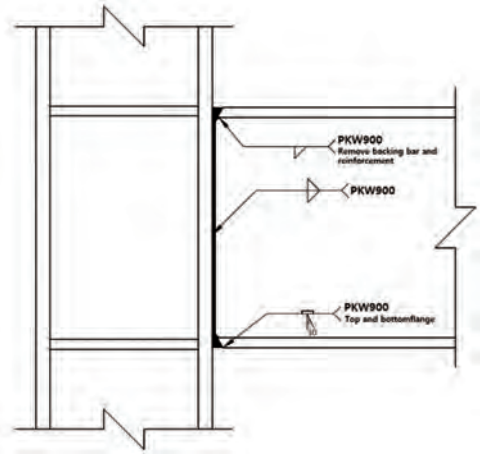
(b) HS



(c) IH

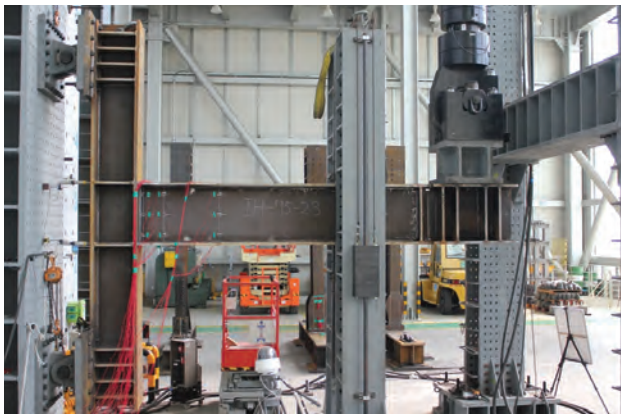




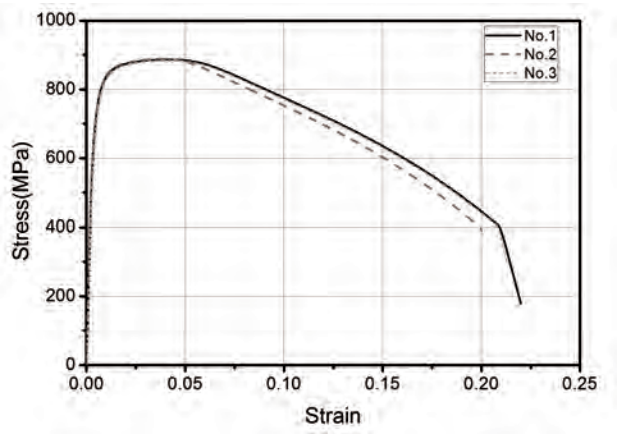


(d) Welding Detail

[그림 4] 실험체 상세



[그림 5] 실험전경



[그림 6] 응력-변형율 관계(HSA800)

[표 2] 재료특성(HSA800)

강종	시편 번호	탄성계수 E (MPa)	항복강도 σ_y (MPa)	인장강도 σ_u (MPa)	연신율 (%)	항복비 σ_y/σ_u
HSA800	No.1	220308	740.6	887.1	22	0.835
	No.2	213831	739.0	888.9	20	0.831
	No.3	199959	739.1	884.5	21	0.836

3.3 접합부 실험 결과

실험결과에 따른 모멘트-회전각 관계를 그림7에 나타내었다. 그래프상의 수평파선은 보의 전소성모멘트와 전소성모멘트의 80%지점을 표시한 것이다. 또한 실험체별 종국상황을 그림8에 나타내었다. 모든 실험체들에 대하여 전소성모멘트 이상의 내력을 만족하였으나 변형능력 및 종국거동의 경우 접합상세에 따라 차이를 나타내었다. 주요 실험결과는 다음과 같다.

(1) NWC

정부방향 최대내력은 각각 4088 kN.m, −3831 kN.m으로 나타났으며 최대변형각은 0.04rad으로 나타났다. 이후 0.05rad 첫 사이클 가력시 보 단부 하부플랜지에서 취성파단이 발생하였다.

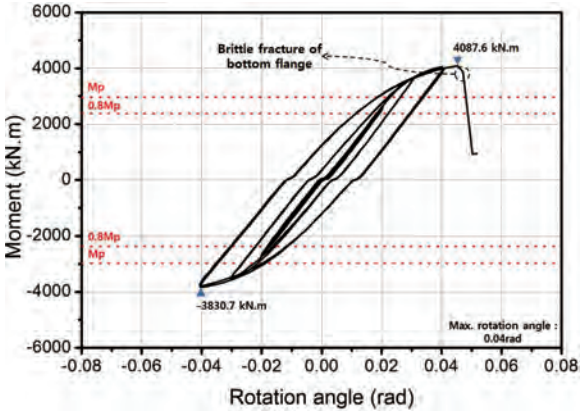
(2) HS

일반수평스티프너 공법을 적용한 HS실험체의 경우 단부 보강효과로 인해 수평스티프너가 적용되지 않은 실험체(NWC)에 비하여 정부방향 최대내력이 대략 1.2배 상승되었으며 최대변형각은 0.06rad까지 도달함에 따라 우수한 변형능력을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 최대응력지점이 보 내부로 이동됨에 따라 전부분이 열영향부에 속하는 기둥외주면에서의 변형도 집중현상이 완화되었기 때문인 것으로 사료된다. 하지만 상대적으로 수티프너 끝단에서 응력이 집중됨에 따라 종국거동시 스티프너 끝단의 보 상부 플랜지의 취성파단으로 실험이 종료되었다.

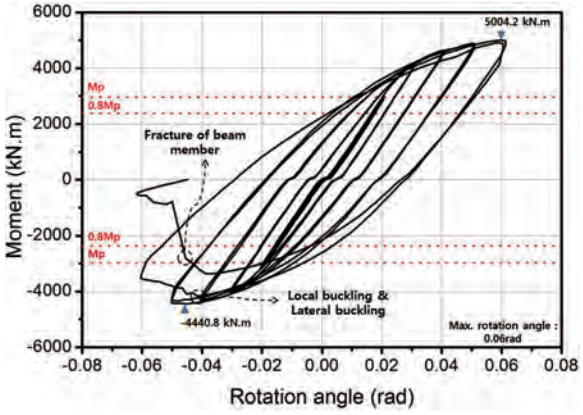
(3) IH

IH 실험체의 경우 최대변형각 0.06rad거동시까지 안정적인 이력거동을 보였다. 또한 종국거동시 스티프너 끝단 보 플랜지부에서의 국부좌굴 및 용접부분의 미세한 크랙에 의하여 내력저하가 발생하였으며 취성파단은 발생하지 않았다.

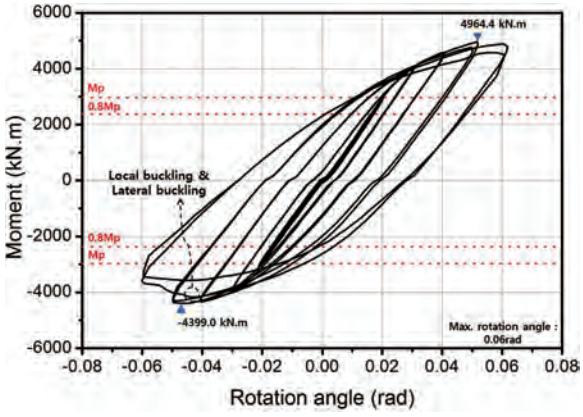
실험체별 주요 구조성능을 표3에 나타내었다. 표에 나난 바와 같이 수평스티프너를 보강한 HS, IH 실험체의 경우 최대층간변형각 0.06rad, 소성변형각은 0.04rad 정도로 나타나고 있으며 이는 국내기준(KBC) 특수모멘트골조의 요구성능 및 Eurocode의 고연성골조의 요구조건을 상회하고 있음을 나타낸다. 하지만 비보강 실험체 NWC의 경우 최대층간변형각은 0.04rad으로 나타났으나 소성변형각이 0.03 이하로 나타나며 일반 연강접합부을 대상으로 실험 검증된 현재기준의 특수모멘트골조용 접합상세는 HSA800강을 사용한 접합부의 내진상세로 그대로 적용할 수 없음을 보여준다. 항



(a) NWC



(b) HS



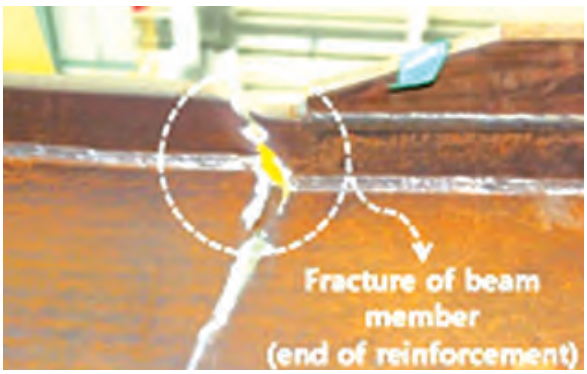
(c) IH

[그림 7] 모멘트 회전각 관계

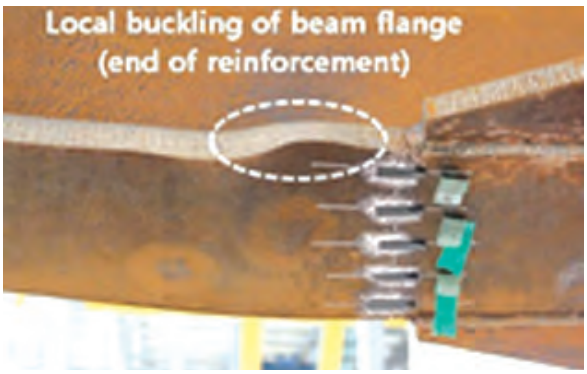
[표 2] 실험체별 주요 구조성능

실험체명	가력방향	초기강성 (kN/mm)	항복변형각 (rad)	항복내력 (kN · m)	최대내력시 변형각 (rad)	최대내력 (kN · m)	최대변형각 (rad)	소성변형각 (rad)	파괴모드
NWC	정방향(+)	10.84	0.0262	3476	0.0430	4088	0.0448	0.0186	보단부 취성파단
	부방향(−)	11.52	0.0225	3176	0.0415	3831	0.0415	0.0190	
HS	정방향(+)	12.82	0.0246	3859	0.0563	5004	0.0577	0.0331	보강끝단 모재파단
	부방향(−)	13.36	0.0214	3507	0.0468	4441	0.0622	0.0408	
IH	정방향(+)	12.62	0.0231	3570	0.0500	4964	0.0604	0.0373	보강끝단 국부좌굴
	부방향(−)	11.93	0.0226	3308	0.0482	4399	0.0622	0.0396	

(a) NWC



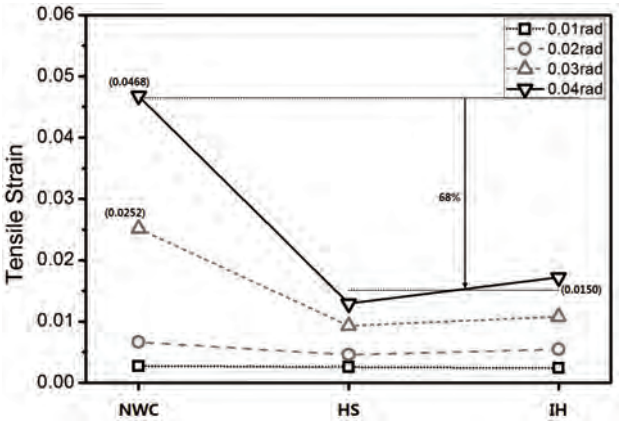
(b) HS



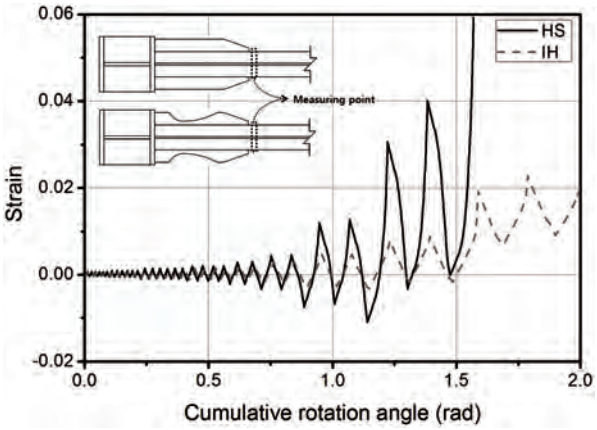
(c) IH

[그림 8] 종국상황

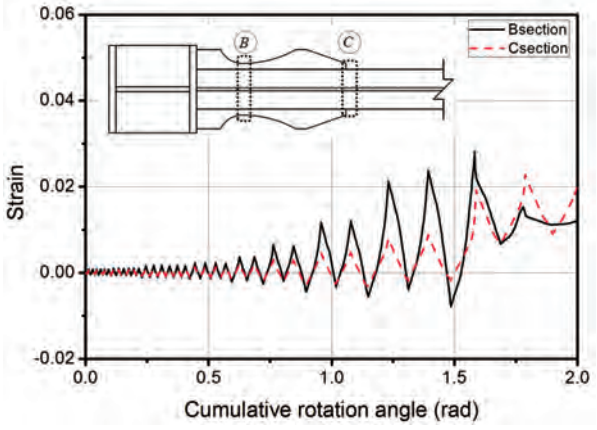
복이후의 내력상승율을 경우 모든 실험체들에 대하여 1.2이상을 만족하고 있음을 알 수 있다. 보 단부에서의 최대인장변형도를 비교하여 그림9에 나타내었다. 수평스티프너를 보강한 실험체는 비보강 실험체에 비하여 보 단부의 변형도를 68%가량 줄일 수 있음에 따라 단부 취성파단 예방에 유효한 것으로 나타났다.



[그림 9] 보 단부 최대 변형도 비교



[그림 10] 스티프너 보강끝단에서의 변형도 비교(HS vs IH)



[그림 11] 개량수평스티프너 주요 지점에서의 변형도 비교

앞서 일반 수평스티프너를 보강한 실험체와 개량수평스티프너를 보강한 실험체의 경우 전체적인 이력거동에서는 유사한거동을 나타내었으나 종국상황에서 일반 수평스티프너 공법을 사용한 실험체가 더욱 취성적인 종국거동을 보였음을 확인하였다. 이는 그림10에 나타낸 바와 같이 일반 수평스티프너를 사용할 경우 개량수평스티프너를 사용할 때에 비하여 스티프너 보강끝단의 변형도가 더욱 집중되기 때문이며 이를 토대로 개량수평스티프너 공법의 경우 보 단부의 변형도를 완화시킬 수 있을 뿐만 아니라 스티프너 끝단의 변형도 완화에도 효과적이며 접합부 전체의 연성거동 확보를 위하여 유리한 구조공법임을 확인 할 수 있다. 또한 그림11은 개량수평스티프너 내 임계단면과 보강끝단에서의 변형도를 비교하여 나타낸 것으로 실험종국상황시까지 유사한 소성거동을 하고 있으며 설계의도가 효과적으로 반영되었음을 확인할 수 있다.

5. 결론

국내개발 고성능강 HSA800강재를 적용한 특수모멘트골조 접합공법에 대하여 소개하였으며 실대형 실험을 통하여 소개한 공법에 대한 구조성능을 검증하였다.

(1) 기존의 수평스티프너 보강법과 같이 보 단부의 변형도를 줄일 수 있으며 동시 스티프너 내에 절취부를 두어 스티프너 내부와 스티프너 보강끝단에서 동시에 소성힌지가 발현될 수 있는 개량형 수평스티프너 공법을 제시하였다.

(2) 실험결과에 따른 고강도강 접합부의 탄성변형량은 일반강 접합부에 비해 대략 2배(≒0.02rad) 정도를 확보하는 것으로 나타났다. 일반 수평스티프너 보강상세 및 개량수평스티프너 보강상세는 비보강 상세에 비하여 접합부의 변형능력, 강도, 인성이 증가하는 것으로 나타났으며 특히 기존의 수평스티프너 보강상세 및 개량수평리브 보강상세의 경우 국내기준의 특수모멘트골조(SMF)의 요구성능을 만족하는 것으로 나타났다.

(3) 개량수평스티프너 공법의 경우 기존의 수평스티프너 공법과 비교하여 접합부의 변형능력 측면에서는 대등한 성능을 나타내었으나 응력집중부인 스티프너 끝단에서 효과적으로 변형도 집중이 완화되어 종국거동시 까지 취성

적 파단이 발생하지 않았으며 상대적으로 더욱 우수한 보강공법인 것으로 나타났다.

상기의 연구결과는 고강도강의 기둥-보 접합부 적용을 위한 설계기준 마련에 기초적인 데이터를 제공할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

참고문헌

1. SAC Joint Venture (2000) Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings, FEMA-350.
2. Eurocode 8 (2003) Final Draft of Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 1: European Committee for Standardization
3. AISC (2010) Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, USA
4. 日本建築學會 (2001) 鋼構造接合設計指針
5. 대한건축학회(2009) 건축구조설계기준 및 해석(KBC 2009)", 기문당
6. Green, P.G. (2000) The Inelastic Behavior of Flexural Members Fabricated from High Performance Steel, Ph.D. Dissertation, Lehigh University, Bethlehem, PA.
7. Galambos, T.V., Hajjar, J.F. and Earls, C.J. (1997) Required Properties of High-Performance Steels", Report No. NISTIR 6004, NIST.
8. S.J. Chen (2001) Design of Ductile Seismic Moment Connections, Increased Beam Section Method and Reduced Beam Section Method, Steel Structure, pp.44-52
9. Engelhardt, M.D., Fry, G.T., Jones, S., Venti, M., and Holiday, S. (2000) Behavior and design of radius-cut, reduced beam section connections, SAC Background Document SAC/BD-00/17, SAC Joint Venture, Richmod, CA.
10. 오상훈, 김영주 (2008) 철골모멘트접합부의 내진보강에 관한 해석적 연구, 한국강구조학회 논문집 제20권 3호, pp.445-454.

담당자 연락처
부산대학교 건축공학과
박해용 051-510-7608, 010-2576-2610
haeyong2610@hanmail.net