

SRC기둥-H형단면과 U형단면으로 구성된 합성보 접합부의 반복가력실험

김영주^{1*} · 배재훈² · 안태상³ · 김진원⁴ · 유홍식⁴

¹수석연구원, DRB동일, 건설기술연구소 ²선임연구원, DRB동일, 건설기술연구소 ³소장, DRB동일, 건설기술연구소
⁴책임연구원, 포스코, 철강솔루션센터 건축건자재연구그룹

Cyclic Loading Test on Connection of SRC Column-Composite Beam Consisting of H-Section and U-Section Members

Kim, Young Ju^{1*}, Bae, Jae Hoon², Ahn, Tae Sang³, Kim, Jin Won⁴, Ryu, Hong Sik⁴

¹Senior Researcher, Construction Engineering Center, DRB Holding Co., Ltd., Seoul, 150-903, Korea

²Senior Researcher, Construction Engineering Center, DRB Holding Co., Ltd., Seoul, 150-903, Korea

³Director, Construction Engineering Center, DRB Holding Co., Ltd., Seoul, 150-903, Korea

⁴Senior Researcher, Building Structure & Material Research Dept., POSCO Steel Solution Center, Incheon, 406-840, Korea

Abstract - In this study, connection of steel reinforced concrete(SRC) column and composite beam which consists of H-section and U-section members were tested under cyclic loading. An essential point of the composite beam is the structural performance of welded joint between the H-section and the U-section members. To improve the structural performance of joint of two beam members, vertical stiffeners, trapezoidal stiffeners, and top bars were used. Five full-scaled specimens were designed to study the effect of a number of parameters on cyclic performance of connections such as H-section beam size(H-500x200x10x16, H-600x200x11x17), the presence of stiffeners and top bars, and the presence of no weld access hole(WAH) method. Based on the test results, deformation capacity of the specimens with H-500 series beam and H-600 series beam were 4% and 3% rotation angle, which is the requirement for the Special Moment Frame and Intermediate Moment Frame(IMF), respectively. Test result showed that deformation capacity of connection with stiffeners and top bars is greater than that of connection without stiffeners and top bars. Finally, energy dissipation capacity and strain profile of specimens were summarized.

Keywords - Composite beam, H-section, U-section, Beam-Column connection, Cyclic loading test, Deformation capacity

1. 서론

일반적으로 합성보는 철골보와 슬래브의 합성효과를 이용하여 동일한 스패에서 부재의 휨강성이 증가함으로 철골 물량저감에 효과적일 뿐만 아니라 적재하중에 의한 처짐이

적고 진동이나 충격을 받는 보에 특히 유리하다. 이와 같은 장점으로 인해 다양한 형태의 합성보를 개발하고 있다^{[1],[2],[3]}.

본 연구에서는 기존에 개발된 합성보와는 달리 두 개의 단

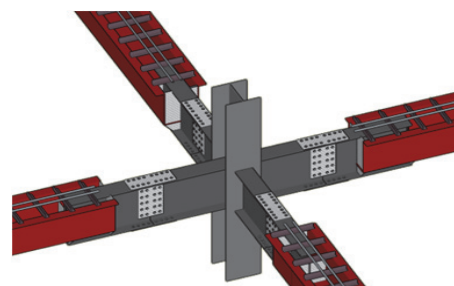


Fig. 1. Connections with beam consisting of H-section and U-section members

Note.-Discussion open until February 28, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on February 19, 2014; revised June 19, 2014; approved on June 23, 2014.

Copyright © 2014 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-2168-9141 Fax. +82-2-2672-6423

E-mail. kim.young.ju@drbworld.com

면, 즉, H형단면과 U형단면이 조합된 합성보를 제안하였다. Fig. 1에는 제안된 합성보와 기둥과의 접합상세를 나타내었다. 특히, 철골과 콘크리트의 합성효과를 위한 전단연결재를 앵글로 사용한 것이 특징이며, 앵글전단연결재의 전단성능은 다양한 문헌에 소개되어 있다^{[4],[5],[6],[7]}.

제안된 기둥-보 접합부 시스템은 기존에 개발된 합성보 접합부와는 달리 두 개의 단면이 조합된 것으로 접합부의 성능을 평가하는 것이 무엇보다도 중요하다. 특히, U자형 비대칭 철골단면에서의 응력을 H형단면으로 원활히 전달하는 문제와 이렇게 전달받은 응력을 H형단면보가 H형단면 기둥부재에 잘 전달하는 문제 등이 주요이슈가 된다.

건축구조기준 및 해설(KBC2009)^[8]에 의하면 철골 보-기둥 접합부에 대한 성능을 변형능력을 바탕으로 하여 특수, 중간 및 보통모멘트 골조로 규정하고 있으며, 접합부의 변형능력에 따라서 반응수정계수를 달리하고 있다. 건축구조기준 및 해설과 AISC Seismic Provision(2010)^[9]에서는 특수 및 중간모멘트 골조에 대해서는 특별한 내진상세와 강재, 용접조건 등 세부적으로 요구하고 있는 반면, 보통모멘트 골조의 경우는 특별한 내진상세를 요구하지 않는다. 강구조의 내진접합부에서 요구되는 변형능력은 특수모멘트 골조에 대하여 4%, 중간모멘트 골조에 대해서는 2%의 층간변형각을 요구하고 있지만, 합성접합부에서는 특수 및 중간모멘트 골조에 대해서 각각 4% 및 3%의 연성능력을 요구하고 있다. 이때, 최대변형에서의 내력이 보의 공칭소성모멘트능력의 80%가 유지되어야 한다.

본 연구에서는 H형단면과 U형단면이 조합된 합성보와 철골철근콘크리트(SRC)기둥 접합부에 대한 반복가력실험을 실시하여, 접합부의 파괴모드 및 에너지소산능력 등을 관찰하여 정리하였다.

2. 실험 프로그램

제안된 합성보와 SRC기둥 접합부의 내진성능을 평가하기 위해서 실험실실험을 실시하였다. 모두 5개의 실험체를 설계하였고 실험체 일람은 Table 1과 같다.

Fig. 2는 실험체의 3D 형상을, Fig. 3~Fig. 5는 실험체 상세를 나타낸 것이고, 실험체는 셋업 및 가력 등의 편의를 위하여 T형으로 계획하였다. 실험체의 총길이는 4,225mm, 기둥중심에서 가력점까지의 거리는 3,525mm, 기둥의 높이는 1,890mm, 그리고 기둥 상하단의 핀지점 사이의 거리는 3,000mm이다.

합성기둥은 H형단면인 H-400x400x13x23 부재와 D25 수직철근 12대 및 D10의 횡보강근으로 구성되어 있으며, 콘크리트를 포함하여 단면은 폭이 600mm의 정사각형 형태이다. 보의 경우는 단부는 H형단면인 H-500x200x10x16 또는 H-600x200x11x17부재와 중앙부는 U-460(춤)x400(폭)x6(강판두께)부재로 계획되었다. 단부가 H형단면일 경우, 시공 시 기존의 철골보이음 방법과 동일하여 시공성이 좋으며, 실험체도 이와 같은 보이음으로 제작되었다. 보이음은 지진 시 극한내력을 견디도록 전강도 설계법을 사용하여 고력볼트의 개수를 산정하였다.

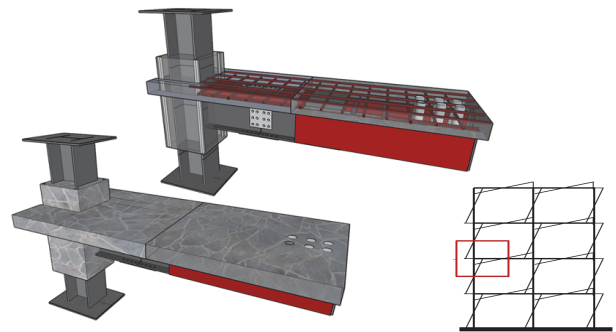


Fig. 2. 3D view of test specimen

Table 1. Specimen matrix

Specimen	SRC Column		H-section Beam	U-section Beam	Pitch of shear connectors	Vertical reinforcement and top bar	WAH
	Steel	Concrete					
GC01	H-400x400x13x21	600x600(12-D16)	H-500x200x10x16	U-460x400x6	300mm	-	Yes
GC02					300mm	-	-
GC03			300mm		-	Yes	
GCR04			300mm		Yes	Yes	
GCR05			200mm		Yes	Yes	

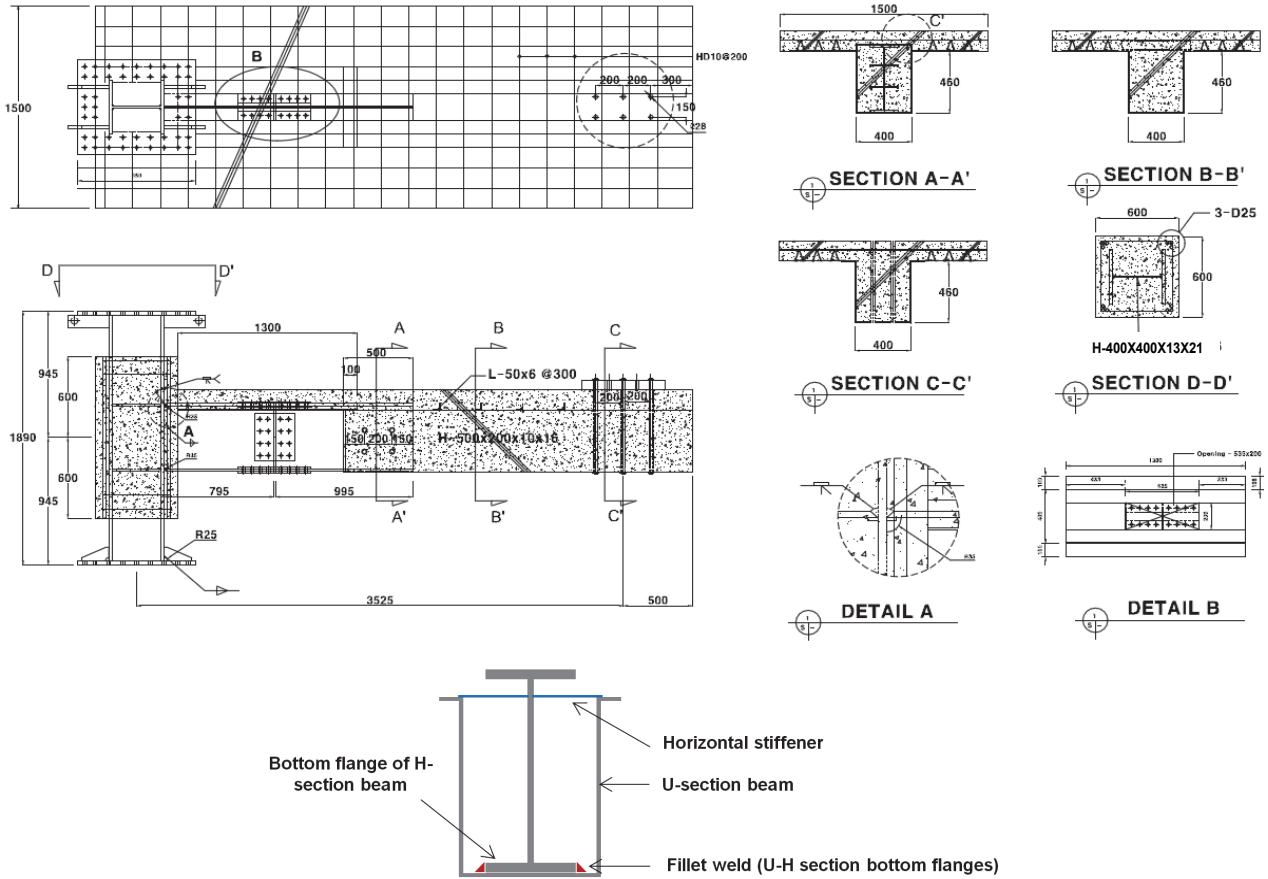


Fig. 3. Details of specimen GC01

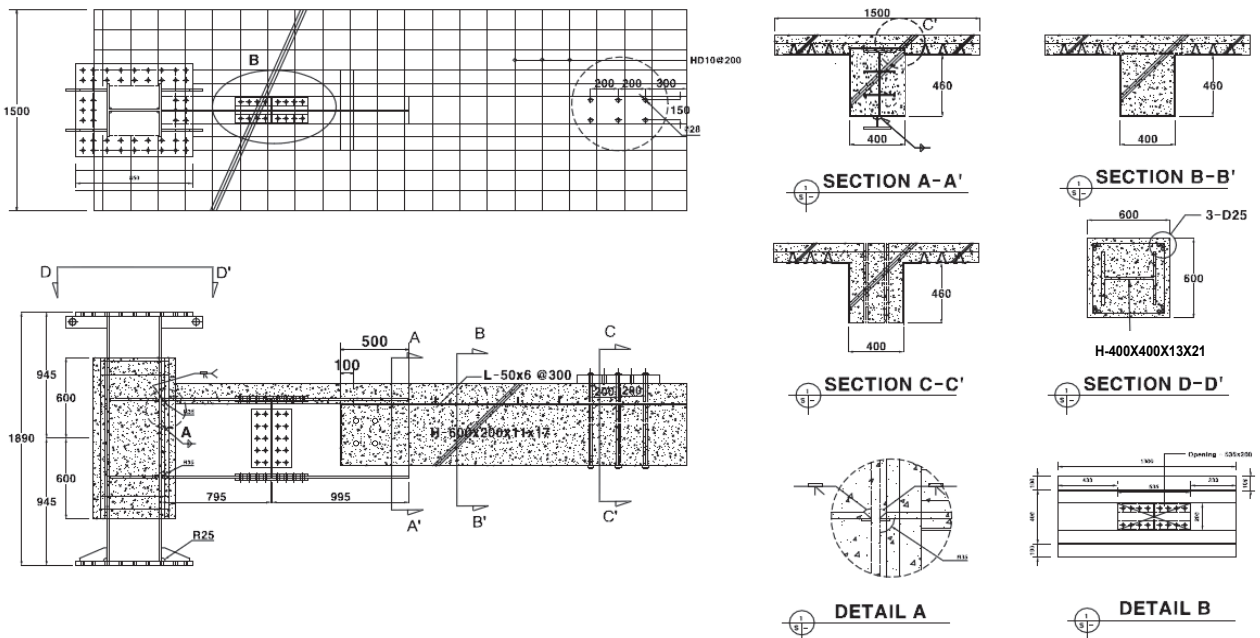


Fig. 4. Details of specimen GC03

실험의 변수는 단부 H형단면 부재의 크기(H-500x200x10x16, H-600x200x11x17), H형단면과 U형단면 접합부의 보강여부, 전단연결재의 간격 및 용접접근공(Weld access hole)의 유무 등이다.

Fig. 3은 GC01실험체의 상세를 나타낸 그림이다. 이 실험체의 경우 단부 H형단면보가 U단면보의 춤에 비해서 차이가 크기 않기 때문에, U단면 하부플랜지의 상부에 H단면 하부플랜지를 얹은 후 모살용접으로 접합하였다. 또한 H형단면과 U형단면의 겹침길이는 U형단면의 춤보다 약간 긴 500mm이다. 제안된 두 단면간 겹침길이는 설계 시 U형단면의 춤 이상이 되도록 설계단계에서 계획하였다. 그리고 U

형단면 상부 플랜지가 H형단면 상부 플랜지와 높이가 일치하지 않기 때문에 U형단면의 모멘트를 H형단면에 전달하기 위해서, U형단면 상부플랜지면과 H형단면 웨브의 상단부를 수평스티프너(Horizontal stiffener, PL-200x60x6) 6개를 사용하여 용접 접합하였다(Fig. 6 참조). 이는 U형단면의 상부플랜지 인장력 이상으로 수평스티프너가 전단저항력이 크게 되도록 설계한 것이다. 본 실험체와 같이 두 단면의 상부플랜지의 높이가 다른 경우에는 콘크리트 타설 시 H형단면 상부에서 발생 가능한 콘크리트 누수를 방지하기 위해서 U형단면의 덮개를 설치하였다. 만약 두 단면의 상부플랜지 높이가 같다면 이 덮개는 필요가 없게 된다. 실험체 GC02는

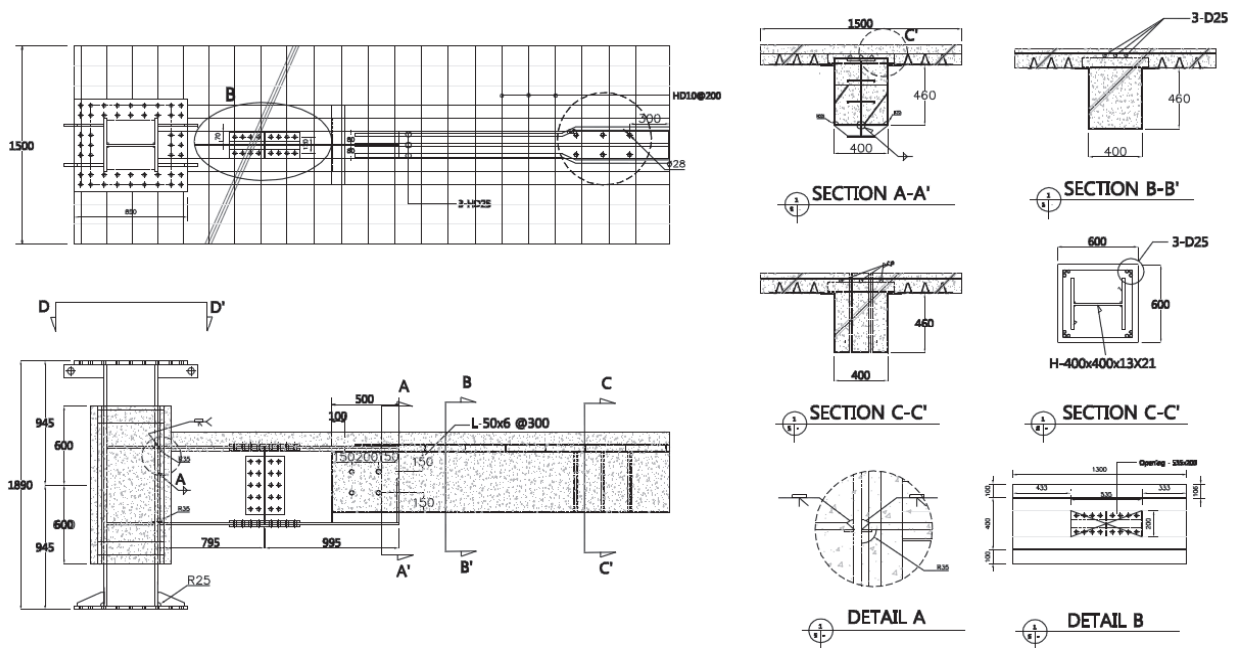
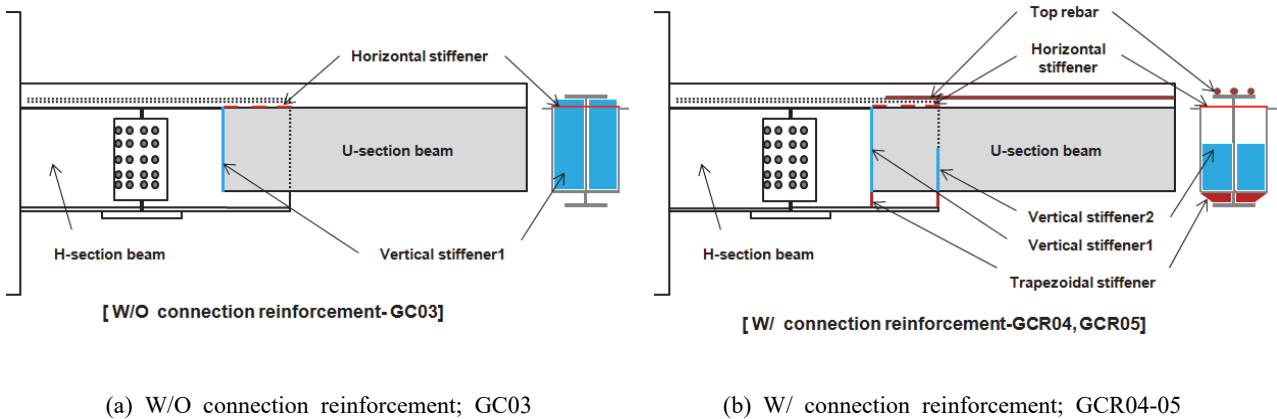


Fig. 5. Details of specimen GCR04



(a) W/O connection reinforcement; GC03

(b) W/ connection reinforcement; GCR04-05

Fig. 6. Concept of U-section and H-section joint reinforcing detail

H형단면 상하플랜지 부근에 용접접근공(Weld Access Hole, WAH)을 두지 않은 상태에서 기둥플랜지면에 용접한 상세를 가지고 있으며, 이러한 공법을 No WAH공법 또는 논스칼립(Non-scallop)공법이라고 칭하기도 한다^[10]. 이를 제외하면 GC01실험체와 동일하다.

Fig. 6는 H형단면과 U형단면 춤의 차이가 클 경우에 두 단면의 접합부의 보강유무의 개념을 도시한 것이며, 실험체 중에서 GC03 실험체는 보강이 되지 않은 반면, GCR04 및 GCR05 실험체는 보강이 실시되었다(Fig. 3-4 참조). 이들 실험체의 경우, H형단면과 U형단면의 접합하는데 있어서 콘크리트 누수를 방지하면서 전단력을 전달하는 수직스티프너1은 모두 기본적으로 용접되어 있고, H형단면과 U형단면이 겹쳐지는 500mm 구간에는 보웨이 양측에 스티드볼트 4개씩 총 8개를 설치하여 강재-콘크리트 간 합성효과를 발휘하도록 하였다. 또한, 전술한 바와 같이 이들 3개의 실험체는 H형단면과 U형단면 춤의 차이가 크므로, U형단면의 하부플랜지에 축방향으로 500mm 길이의 홈을 두어 H형강 웨브를 삽입한 후 용접으로 접합하게 된다. 더욱이 이 상세를 따를 경우에는 Fig. 6(a)와 같이 H형단면 웨브와 U형단면 하부플랜지가 십자가 형태로 만나서 모살용접으로 접합되기 때문에 응력전달이 원활하지 않을 가능성이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 Fig. 6(b)와 같이, 수직스티프너2를

추가로 보강함과 동시에 U형단면 하단에 사다리꼴 스티프너(Trapezoidal stiffener)를 용접으로 보강하여 응력이 더욱 명확히 전달되도록 하였다. 추가적으로 상부에 철근(Top bar)을 배치하여 부모멘트 작용 시, 즉, 상부플랜지 및 슬래브가 인장을 받을 경우 부모멘트를 저항하도록 하였다. Table 2는 사용된 강재 및 철근(시험방법: KS B 0802)과 콘크리트(시험방법: KS F 2405)의 재료시험결과를 표로 정리하여 나타내었다.

Fig. 7은 접합부를 설계하는데 있어서 예상되는 소성힌지 발생지점을 도시하여 나타낸 것이며, 합성보로 설계했을 때의 요구되는 모멘트성능과 실제의 합성단면의 정방향 및 부방향의 모멘트성능을 함께 나타낸 것이다. 그림은 단부 H형단면보가 H-500이나 H-600에 상관없이 정방향(슬래브가 압축력을 받는 경우) 및 부방향(슬래브가 인장력을 받는 경우) 모두 단부 H형단면에서 소성힌지의 발생이 예상되는 것을 알 수 있다. 그러나 단부보가 H-600이면서 U형단면의 상부에 상부근(Top rebar)이 없는 경우에는 부모멘트 작용 시 U형단면에서도 소성힌지가 발생할 가능성이 예측되었다. 이러한 예측이 실제로도 잘 발현되기 위해서는 U형단면에서 H형단면으로 모멘트와 전단력이 잘 전달되어야 할 것이다.

Fig. 8은 실험체 셋업을 나타낸 것이다. 기둥의 상하부는

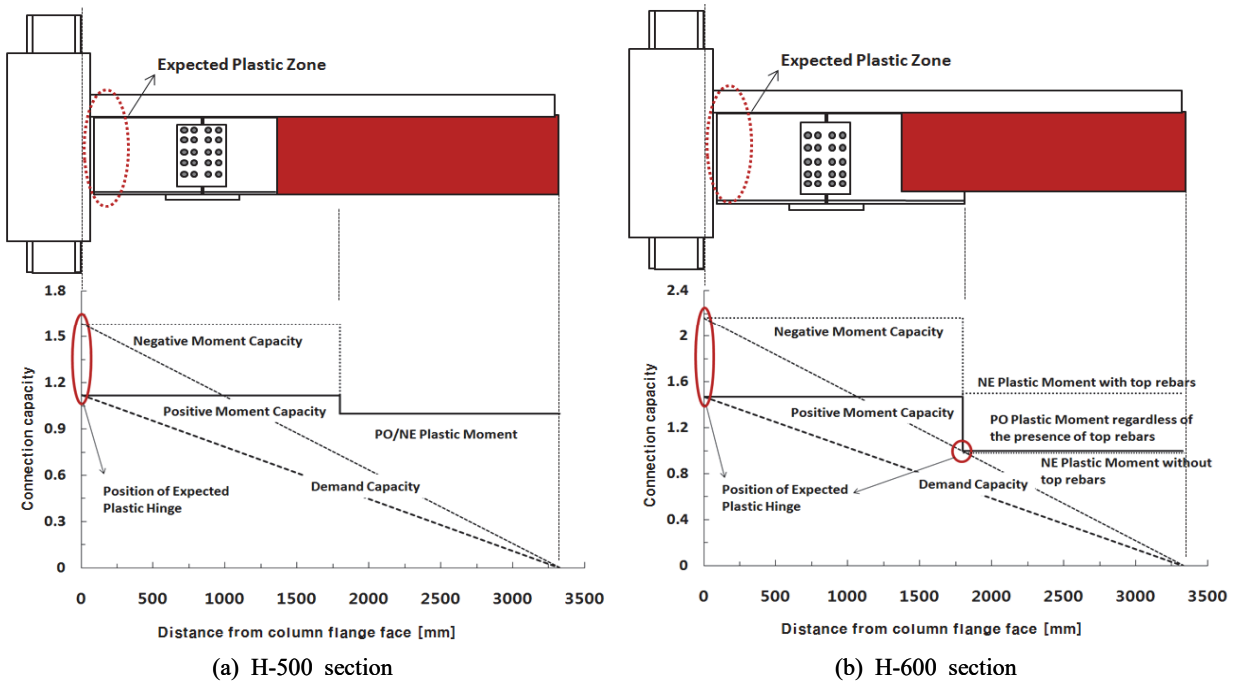


Fig. 7. Expected hinges of specimens



Fig. 8. Test setup

핀으로 연결되어 있고 보의 가력점에 2000kN 용량의 가력기(Actuator)를 설치하여 정/부방향으로 반복가력이 가능하도록 하였다. 또한 보의 2/3 길이 지점에 보의 면외좌굴을 방지하는 지그를 설치하였다. 실험체의 반복가력 시,

KBC2009 기준^[8] 및 AISC Seismic Provision^[9]을 참조하여 층간변위각 $\pm 0.375\%$, $\pm 0.5\%$ 및 $\pm 0.75\%$ 는 각 6사이클, $\pm 1\%$ 는 4사이클, $\pm 1.5\%$, $\pm 2\%$, $\pm 3\%$ 이상은 $\pm 1\%$ 씩 변위를 증가하면서 각 2사이클 씩 가력하도록 계획하였다.

접합부의 변형을 측정하기 위하여 변위계를 설치하여 총 회전각, 패널존 회전각 및 보의 회전각 등을 평가하도록 하였다. 또한 응력집중이 예상되는 위치에 변형도 게이지를 설치하여 변형도를 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 모멘트-회전각 관계 및 파괴모드

Fig. 9는 실험체의 모멘트와 회전각 관계를 나타낸 것이다. 그래프에서 수직축은 기둥중심에서의 모멘트를 나타내고, 수평축은 가력점에서의 처짐을 바탕으로 하여 계산된 회

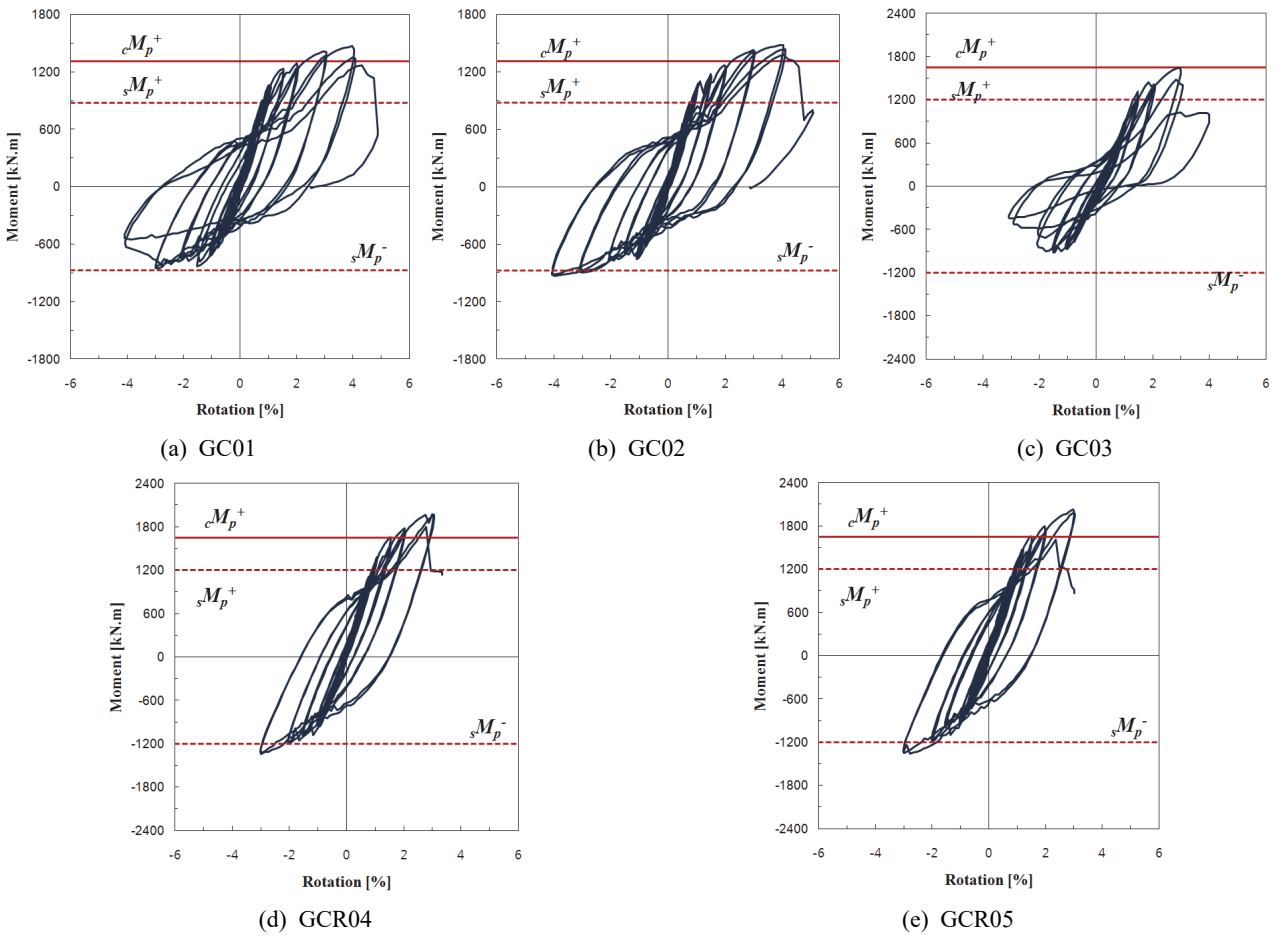


Fig. 9. Moment-rotation relationships of specimens

전각을 나타낸다. 모멘트가 양인 것은 가력점에서의 변위가 상부로 발생하여 콘크리트 슬래브가 압축을 받는 경우(정모멘트)이고, 모멘트가 음인 것은 변위가 하부로 발생하여 콘크리트 슬래브가 인장을 받는 경우(부모멘트)를 나타낸다. 그래프에 표현된 실선 및 점선은 각각 정모멘트와 부모멘트 상태에서의 보의 전소성모멘트를 나타내며, 강재의 항복강도 및 콘크리트의 압축강도를 나타낸 Table 2를 참조하여 실제의 내력을 예측하고자 하였다. Fig. 10~11은 실험체의 파

괴상황을 나타낸 것이다.

Fig. 9(a)~(b)는 단부 H형단면이 H-500시리즈인 실험체로 모멘트-회전각 곡선을 살펴보면 안정된 이력특성을 나타낸다고 할 수 있다. 두 실험체의 그래프에서 정모멘트와 부모멘트에서 관찰되는 내력의 차이는 바로 슬래브합성효과에 의한 것이다. 즉, 정모멘트를 받는 경우는 콘크리트슬래브가 압축을 받기 때문에 합성효과에 의하여 중립축이 상승하여 내력이 상승하지만, 부모멘트를 받는 경우에는 슬래브

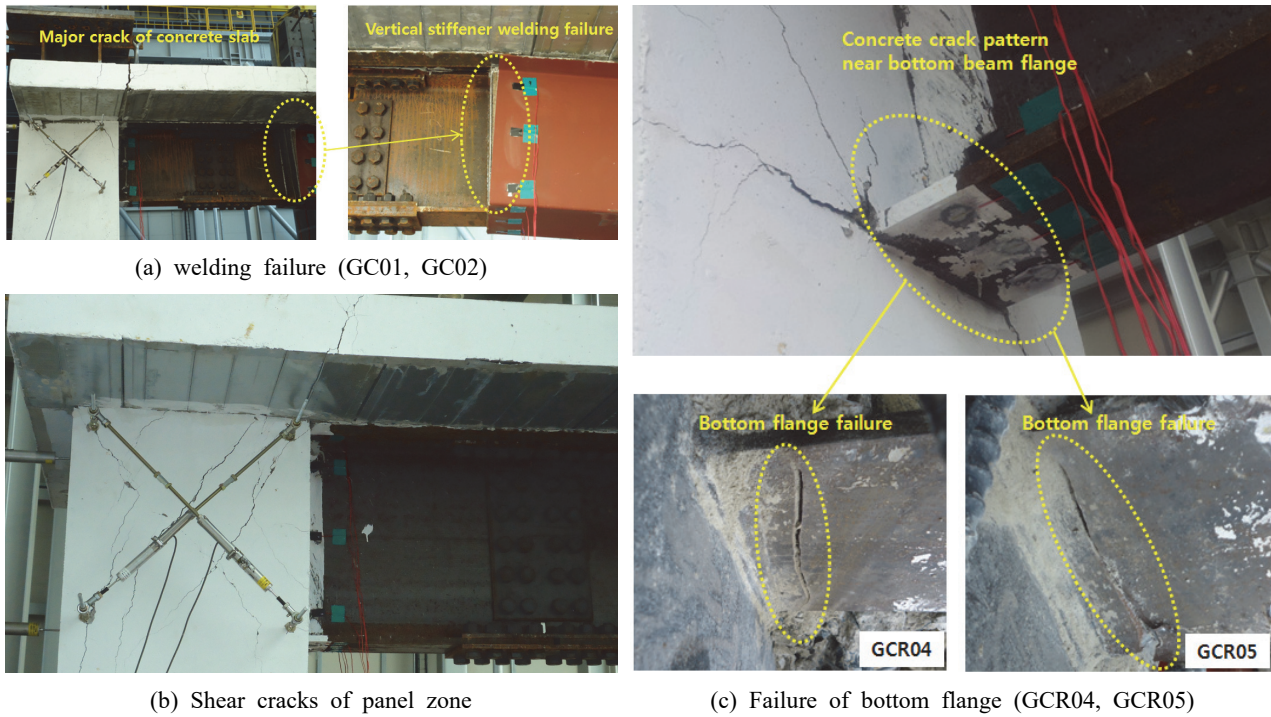


Fig. 10. Failure modes

Table 2. Material test results

Specimen		Material	Yield stress [MPa]	Tensile stress [MPa]	Yield ratio	Elongation [%]
H-400x400x13x21 (H-Column)	PL-21(Flange)	SM490	386	569	0.68	21
	PL-13(Web)		420	583	0.72	17
H-500x200x10x16 (H-Beam)	PL-16(Flange)	SM490	404	527	0.77	25
	PL-10(Web)		442	545	0.81	23
H-600x200x11x17 (H-Beam)	PL-17(Flange)	SM490	405	556	0.73	24
	PL-11(Web)		409	542	0.75	17
U-beam	PL-6	SM490	488	552	0.88	22
L-50x6	PL-6	SS400	400	454	0.88	39
Rebar	D10	SD400	501	636	0.79	18
	D25	SD500	464	614	0.75	20
Concrete	24MPa		Compressive stress = 28.5 MPa			

가 인장을 받기 때문에 슬래브 내에 배근된 인장철근과 순철골보만 모멘트를 저항하므로 정모멘트에 비해서 상대적으로 작은 내력을 발휘한 것으로 추정된다. 이는 기존 합성보 접합부의 실험결과에서도 비슷한 결과를 관찰할 수 있다^[11]. 가력이 진행되는 동안, 부모멘트 시에는 슬래브에 인장균열이 관찰되었고(Fig. 10(a)), 패널존 부근의 콘크리트는 전단균열이 관찰되었다(Fig. 10(b)). GC01 및 GC02 실험체는 모두 4%의 총회전각을 발휘하였고, 5% 회전각을 목표로 정모멘트 방향으로 가력하는 도중에 Fig. 10(a)와 같이 수직스티프너1과 U단면보와의 용접접합부가 파단되어 하중이 급격히 저하하였다. 이는 U형단면에서 H형단면으로 응력을 전달하는 과정에서 접합부의 용접부분의 상부가 벌어진 후 변위가 증가하면서 전 용접부가 파괴되는 결과를 초래하였다. 용접부의 파단부분을 살펴본 결과 충분한 모살용접의 크기를 확보하지 못한 것으로 조사되었고, 향후 설계 시에는 용접에 관한 명확한 품질확보가 필요하다고 판단된다.

Fig. 9(c)~(e)는 단부 H형단면이 H-600시리즈인 실험체의 모멘트-회전각 곡선을 나타낸 것이다. 그래프를 참조하면 GC03 실험체의 내력 및 변형능력이 GCR04 및 GCR05 실험체에 비해서 매우 열등한 결과를 나타내었다. 이는 H형단면과 U형단면이 만나는 접합부가 모멘트나 전단력을 전달 되도록 하는 보강상세로는 충분하지 않았기 때문으로 판단되며, 결과적으로 Fig. 11(a)와 같이 접합부가 부모멘트를



(a) W/O connection reinforcement; GC03



(b) W/ connection reinforcement; GCR04

Fig. 11. Effect of connection reinforcement

Table 3. Test results

Specimen	Analysis		Experiment		Comparison	
	aM_p^+ [kN.m]	aM_p^- [kN.m]	eM_{max}^+ [kN.m]	eM_{max}^- [kN.m]	eM_{max}^+ / aM_p^+	eM_{max}^- / aM_p^-
GC01	1310	876	1467	872	1.12	1.00
GC02	1310	876	1479	929	1.13	1.06
GC03	1652	1201	1648	918	1.00	0.76
GCR04	1652	1201	1972	1342	1.19	1.12
GCR05	1652	1201	2026	1360	1.23	1.13

받을 때 보부재가 심하게 꺾이는 현상이 관찰되었다. 따라서 Fig. 9(c)를 통해 GC03 실험체는 예측된 보의 전소성모멘트에 도달하지 못하고 실험이 종료되었다. 반면에 접합부가 보강된 GCR04~05 실험체의 경우에는 Fig. 11(b)와 같이 GC03 실험체와 같은 보부재의 꺾임현상은 관찰되지 않았다. 또한 GCR04와 GCR05 두 실험체에서 앵글시어커넥터의 간격에 의한 영향은 미미하였다. 뿐만 아니라 정/부모멘트 모두 예측한 전소성모멘트를 초과하였고, 회전각이 3% 될 때까지 안정된 이력루프를 관찰할 수 있었다. 다만 4%의 회전각을 목표로 정모멘트 방향으로 가력을 진행하는 과정에서 기동부근의 H형단면 하부플랜지가 팽음과 함께 Fig. 10(c)와 같이 파단된 것을 관찰할 수 있었다. 파단상세로 판단해보면 균열은 양단부가 아닌 하부플랜지의 중앙부에서 시작한 것으로 보아 용접접근공(WAH)의 노치에서 시작된 것으로 판단된다. 이는 강구조학회의 건축강구조 표준접합상세 지침을^[12] 참조하여 1/4원형태의 용접접근공을 사용하여 설계하였지만, 용접접근공을 제작할 때 노치가 발생하지 않도록 주의를 기울여야 할 것으로 보인다.

Table 3는 내력에 대한 실험값과 이론값을 정리하여 요약한 것이다. 전술한 바와 같이 이론값은 실제의 재료값을 사용하여 보에서 소성힌지 예상위치의 전소성모멘트를 정방향 및 부방향 모두 산정하였다. GC03을 제외한 모든 실험체가 이론값에 대한 실험값의 비가 1.00~1.19의 분포를 나타내었다. 이러한 결과를 통해, GCR04 또는 GCR05와 같이 H형단면과 U형단면의 춤에 대한 차이가 클 경우에는 명확한 응력전달을 가능하게 하는 보강재를 배치하여 GC03과 같은 열등한 접합부의 발생을 방지하여야 할 것으로 판단된다.

3.2 에너지 소산능력

접합부의 내진성능을 평가할 때 에너지소산능력은 매우

중요한 지표라고 할 수 있다. 지진발생 시 접합부에서의 충분한 에너지소산능력은 건물 전체의 안전성에 큰 영향을 미치기 때문이다. Fig. 12(a)는 접합부의 누적회전각에 따른 각 실험체의 에너지소산량을 나타낸 것이다. 에너지소산량은 각 이력루프 내의 면적을 나타내며, 이를 누적하면 총에너지소산량이 된다. 그림은 탄성구간에서는 에너지소산량이 완만한 구배를 보이다가 큰 소성변형을 경험하면서 소산량이 매우 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 단부보가 상대적으로 큰 실험체(GCR04 & GCR05)는 접합부의 내력이 크므로 같은 누적회전각에서 상대적으로 큰 에너지소산능력을 보였지만, Fig. 12(b)를 참조하면 최종적으로는 소성변형능력이 큰 GC01과 GC02실험체가 더욱 큰 에너지를 소산했다고 할 수 있다. GC03실험체의 경우에는 내력뿐만 아니라 변형능력도 부족하였기 때문에 제일 빈약한 에너지를

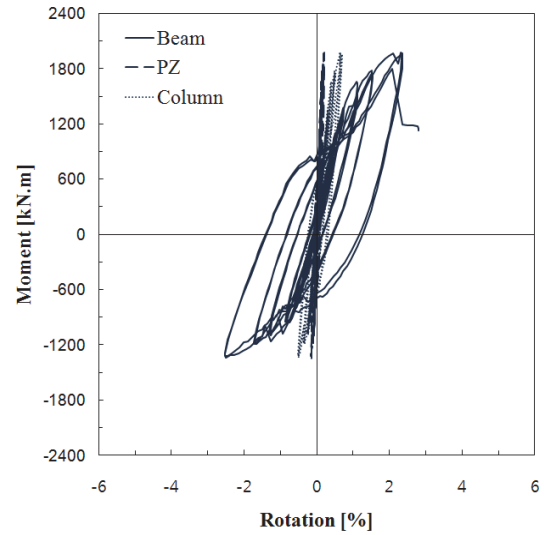
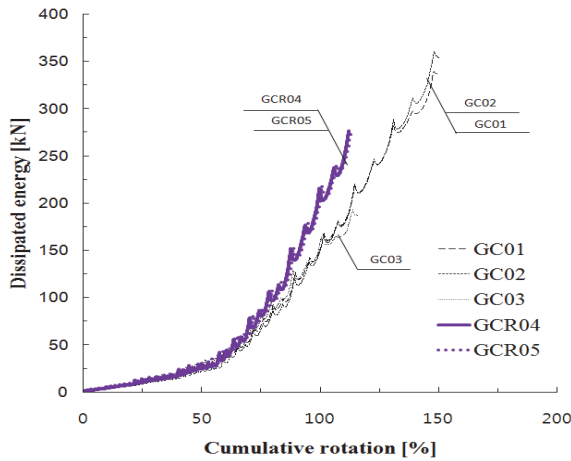
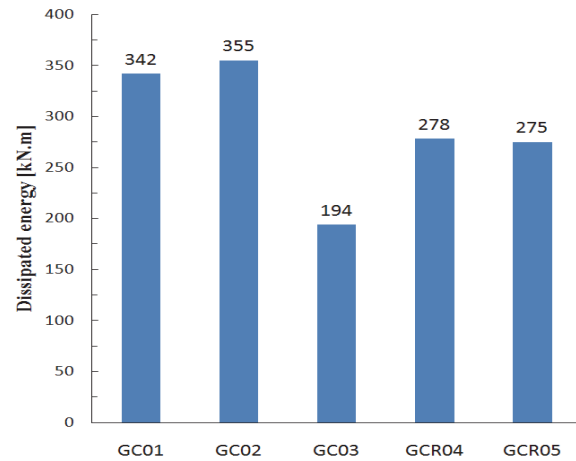


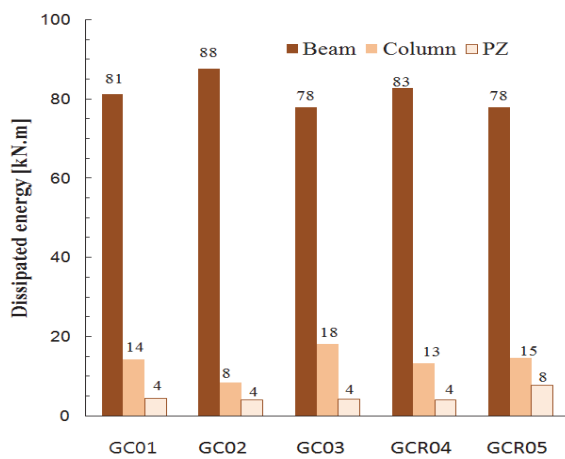
Fig. 13. Cyclic response of each element of connection(GCR04)



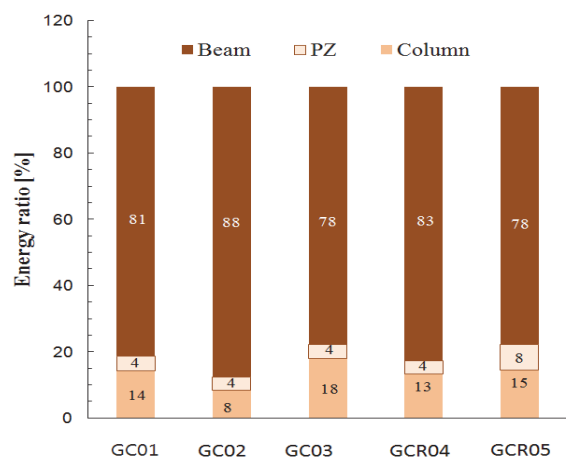
(a) Dissipated energy-cumulative rotation relationship



(b) Total dissipated energy of each specimen



(c) Dissipated energy of each element



(d) Dissipated energy ratio of each element

Fig. 12. Energy dissipation capacity

소산하였다.

Fig. 12(c)는 기둥, 보 및 패널존(PZ)의 에너지소산량을 나타낸 것이며, 에너지소산량을 평가하기 위해서 Fig. 13과 같이 각 요소별로 모멘트-회전각 관계를 먼저 작성하였다. 그림은 보에서 가장 큰 에너지를 소산하고 있으며, 기둥, 패널존 순으로 크기가 감소하는 것을 보여준다. Fig. 12(d)는 실험체별 각 요소의 에너지소산비율을 나타낸 것이다. 이 그래프를 통해서도 대부분의 에너지가 보에서 소산된 것을 관찰된 것으로 보아 대부분의 소성변형이 보에서 이루어졌고 기둥과 패널존은 탄성역역에 머무르고 있다고 판단되었다.

3.3 변형도 분포

Fig. 14(a)는 H형단면과 U형단면보의 하부플랜지에 변형도 게이지를 부착한 위치를 나타낸다. 모멘트분포 측면에서 각 단면에서의 최대변형도가 발생하는 위치이며, 특히 H형단면보의 기둥면 근처는 소성힌지가 발생할 것으로 예상되

므로 큰 소성변형이 기대되는 곳이기도 하다.

Fig. 14(b)~(f)는 각 실험체별 H형단면과 U형단면 하부플랜지의 변형도 이력을 나타낸 것이다. 그래프에서 수직축은 모멘트를, 수평축은 백분율로 나타낸 변형도 값이다. 변형도의 이력곡선을 살펴보면, 모든 실험체의 H형단면보의 하부플랜지가 큰 소성변형을 경험했음을 알 수 있는데 반해 U형단면보 하부플랜지의 변형도 분포는 GC03을 제외하면 대부분 탄성에 머무르는 것을 관찰할 수 있다. 이는 이론적으로 예측한 소성힌지의 위치가 타당함을 알려 준다.

GC01실험체의 경우에는 Fig. 10(a)에서 보여주는 파괴모드로 인해 U형단면보의 하부플랜지가 국부좌굴이 발생하여 일부 소성변형이 진행한 것을 변형도 곡선을 통해 추측할 수 있다. 또한 GC03실험체의 경우에는 보강량이 충분하지 못하여 H형단면과 U형단면의 경계가 심하게 꺾이는 현상이 진행되어 U형단면의 하부플랜지가 일부 소성변형을 경험하였고, 이로 인해 H형단면보에서도 소성화정도가 다른 실험체에 미치지 못하였다. 이 결과를 통해서도 단부 H형단면보가

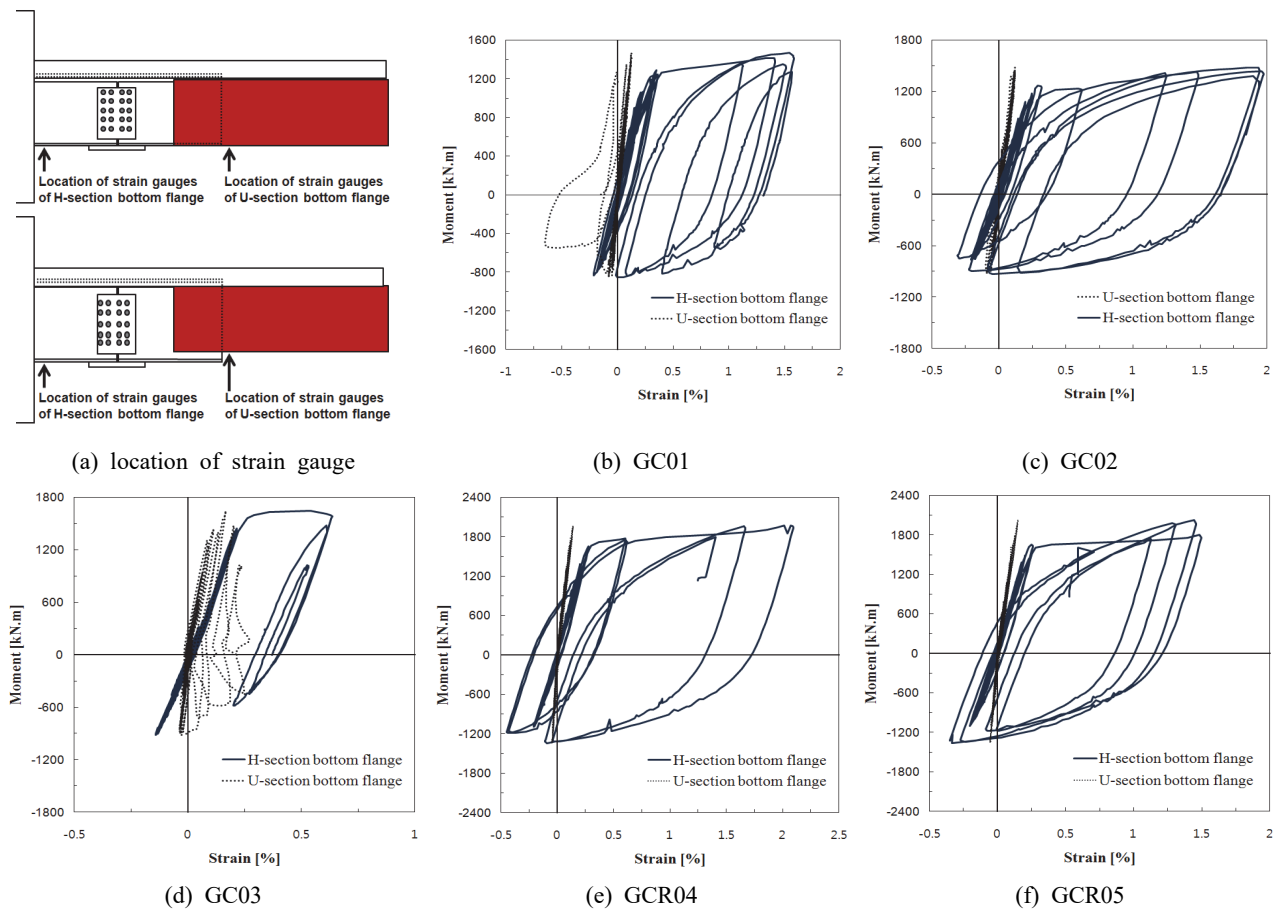


Fig. 14. Strain curve of beam bottom flange

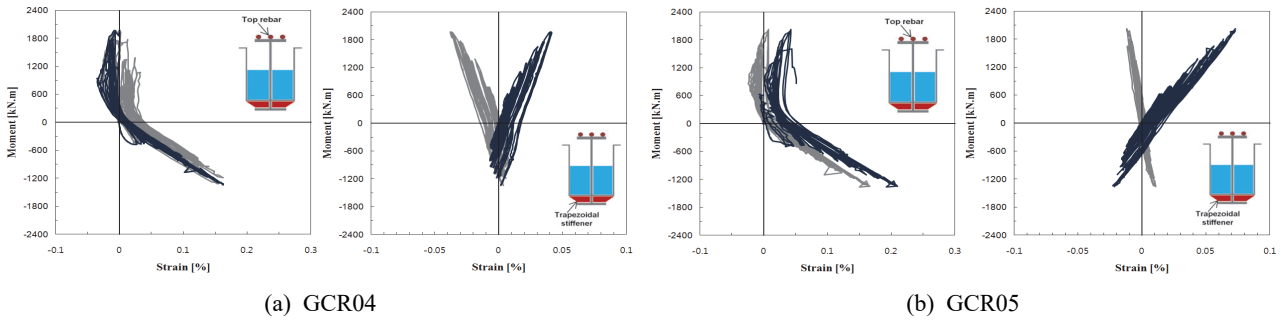


Fig. 15. Strain curve at top bar and trapezoidal stiffener

U형단면보에 비해서 춤이 상대적으로 클 경우에는 Fig. 6(b)와 같이 스티프너를 적절히 보강할 필요가 있음을 알 수 있다.

Fig. 15는 U형단면보의 상부근과 하부 사다리꼴 스티프너에서의 변형도 값을 보여주고 있다. 그림의 좌측에는 상부근의 변형도 이력곡선을 나타낸 것인데, 철근이 압축을 받을 때보다(정모멘트를 받을 때) 인장을 받을 때(부모멘트를 받을 때)의 변형도가 더 큰 것을 알 수 있다. 이는 철근이 압축을 받을 때는 콘크리트 슬래브가 압축력을 많이 부담하기 때문에 상대적으로 철근의 분담력이 감소하기 때문이며, 인장력을 받을 때는 상대적으로 철근이 인장력을 다소 부담하기 때문이라고 판단된다.

Fig. 15의 우측에는 Fig. 6(b)에 나타낸 사다리꼴 스티프너의 변형도 값을 나타낸 것이다. Fig. 16은 실험체가 부모멘트를 받는 경우에 사다리꼴 스티프너의 변형모드를 도시화 한 것인데, 정모멘트 시 좌측 스티프너는 인장을 받고 우

측 스티프너는 압축을 받는 것을 알 수 있으며, 정모멘트를 받는 경우에는 이와 반대방향의 응력을 받게 된다. Fig. 15의 우측그림은 이러한 사다리꼴 스티프너가 탄성구간이지만 인장 및 압축응력을 다소 부담하는 것을 알 수 있다. 이를 통해 사다리꼴 스티프너는 두 보단면 사이의 응력전달을 원활하게 하는 역할을 잘 부담한다고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 H형단면과 U형단면이 조합된 합성보와 SRC 기둥 접합부에 대한 내진성능을 실험적으로 검증하였다. 모두 5개의 실험체를 제작하였으며, AISC 및 KBC2009 기준에서 제시한 모멘트접합부의 가력프로토콜을 사용하여 반복가력실험을 실시하였고 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 실험결과 본 연구에서 제시하고 있는 기둥-보 접합부는 안정된 이력거동을 하였으며, 최소한 3% rad이상의 회전성능을 발휘함으로써 중간모멘트접합부의 성능을 가지고 있음을 알 수 있었다. 특히 단부보가 H-500과 같이 보춤이 상대적으로 작을 경우에는 4%rad의 회전성능을 발휘하는 특수모멘트접합부의 가능성도 또한 보여주었다. 이때 최대내력은 이론적으로 계산된 전소성모멘트를 상회하는 성능을 발휘하였다.
- (2) 단부 H형단면보의 춤이 U형단면보와 크게 차이가 발생하지 않는 경우에는 U형단면보 하부플랜지의 상부에 H형단면보의 하부플랜지를 얹어서 모살용접으로 보강함으로써 두 단면부재 간의 응력전달이 원활해짐을 알 수 있었으나, GC03실험체와 같이 두 단면보 춤의 차이가 클 경우에는 원활한 응력전달을 위해서 수직스티프너

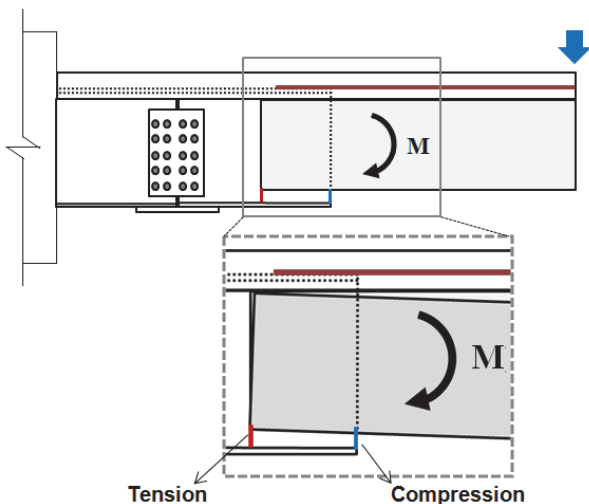


Fig. 16. Connection deformation of H-section and U-section member under negative bending

및 사다리꼴 스틱프너가 추가적으로 보강되어야 할 필요성이 있음을 실험결과를 통해 확인하였다.

- (3) GC01과 GC02실험체의 파괴모드를 살펴보면 수직스티프너1과 U형단면보 웹부분의 용접부에서 균열이 발생한 것이 관찰되었는데, 이는 실험체 제작 시에 보다 확실한 모살용접의 실시가 요구되었다. 또한 실험체 개수가 제한되어 용접접근공의 유무에 따른 두드러진 실험결과의 차이는 발견되지 않았다.
- (4) GCR04 및 GCR05는 4%의 회전각을 목표로 가력하는 동안 단부 H형단면 하부플랜지의 용접접근공에서 균열이 시작되었다. 이는 KBC2009에서 제시하는 모멘트접합부의 용접접근공의 형태인 1/4원을 사용한 것이 주요 원인의 하나로 판단되며, 추가적으로 합성보의 경우 슬래브 효과에 의해 중립축이 상승되어 하부플랜지에 응력이 집중되는 것도 또한 플랜지파단의 원인이라고 판단할 수 있다. 따라서 기존의 결과에서 보여준 3% 회전각을 초과하는 특수모멘트접합부의 변형능력을 발휘하기 위해서는 하부플랜지에 추가적인 연성보강이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌(References)

- [1] 김성배, 김상섭, 유덕수(2013) 신형상 U형 하이브리드 합성보와 기동 접합부의 내진성능에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제1호, pp.47-59.
Kim, S.B., Kim, S.S., and Ryu, D.S. (2013) Study on the Cyclic Seismic Testing of U-Shape Hybrid Composite Beam-to-Composite Column Connections, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No. 1, pp.47-59 (in Korean).
- [2] 황현중, 엄태성, 박홍근, 이창남, 김형섭(2013) TSC 합성보-PSRC 합성기동 접합부에 대한 주기하중 실험, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제6호, pp.601-612.
Hwang, H.J., Eom, T.S., Park, H.K., Lee, C.N., and Kim, H.S. (2013) Cyclic Loading Test for TSC Beam - PSRC Column Connections, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.6, pp.601-612 (in Korean).
- [3] 양일승, 오영호, 이만재(2012) 드라이빙핀전용 전단연결재를 이용한 합성보의 탄소성 거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제1호, pp.73-80.
- [4] Yang, I.S., Oh, Y.H., and Lee, M.J. (2012) Elasto-Plastic Behaviors of Composite Beam Using Shear Connectors Installed in Driving Pins, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.1, pp.73-80 (in Korean).
- [5] Ciutina, A.L., and Stratan, A. (2008) Cyclic Performances of Shear Connectors, *Proceedings of International Conference on Composite Construction in Steel and Concrete IV*, Engineering Conferences International/Structural Engineering Institute (American Society of Civil Engineers), USA, pp.52-64.
- [6] European Committee for Standardization (2004) *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Building* (prEN 1994-1-1: 2004), Final Draft, Belgium.
- [7] Johnson, R.P. (1994) *Composite Structures of Steel and Concrete, Volume I: Beams, Slabs, Columns, and Frames for Buildings*, Blackwell Scientific Publications, UK.
- [8] 김영주, 배재훈, 안태상, 장동운(2014) 합성보에 적용된 앵글 전단연결재의 Push-out 실험, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제3호, pp.155-167.
Kim, Y.J., Bae, J.H., Ahn, T.S., and Jang, D.W. (2014) Push-out Test on Welded Angle Shear Connectors Used in Composite Beams, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.3, pp.155-167 (in Korean).
- [9] 대한건축학회(2009) 건축구조기준 (KBC 2009) 및 해설, 기문당.
Architectural Institute of Korea (2009) *Korea Building Code (KBC 2009) and Commentary*, Kimoonang, Korea (in Korean).
- [10] American Institute of Steel Construction (2010) *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 341-10), USA.
- [11] Federal Emergency Management Agency (2000) *State of the Art Report on Connection Performance*, FEMA-355D, FEMA, USA.
- [12] Kim, Y.-J., Oh, S.-H., and Moon, T.-S. (2004) Seismic Behavior and Retrofit of Steel Moment Connections Considering Slab Effects, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.26, No.13, pp.1993-2005.
- [13] 한국강구조학회(2009) 건축강구조 표준접합상세지침, 구미서관.
KSSC (2012) *Detailed Guidelines of Standard Connection in Steel Structures*, Goomiseogwan, Korea (in Korean).

요 약 : 본 연구에서는 SRC 기둥-H형단면과 U형단면으로 구성된 합성보 접합부에 관해서 반복가력실험을 실시하였다. 합성보에 관한 핵심요소는 H형단면과 U형단면 간 용접접합부의 구조적 성능이다. 이 두 부재 접합부의 성능을 향상시키기 위해서는 수직스티프너와 사다리꼴 스티프너가 필요하다. 접합부의 반복적인 성능을 평가하기 위해서 5개의 실험체를 계획하였으며, 실험변수는 H형단면의 크기 (H-500x200x10x16, H-600x200x11x17), 스티프너와 상부근의 유무 및 용접접근공(WAH)의 유무 등이다. 실험결과, H-500 시리즈 및 H-600 시리즈 보가 있는 실험체의 회전각은 각각 4%와 3%로 나타났으며, 이는 특수모멘트골조와 중간모멘트골조에 요구되는 값이다. 실험 결과는 스티프너와 상부근이 있는 실험체의 변형능력이 그렇지 않은 실험체에 비해서 우수한 결과를 보였다. 끝으로, 실험체의 에너지소산능력과 변형도 분포를 요약하였다.

핵심용어 : 합성보, H형단면, U형단면, 기둥-보 접합부, 반복가력실험, 변형능력
