



콘크리트 채움 U형 메가 합성보의 내진성능 평가

이철호^{1*} · 안재권² · 김대경³ · 박지훈⁴ · 이승환⁵

¹교수, 서울대학교, 건축학과, ²공학박사, 서울대학교, 건축학과,
³과장, ㈜센구조연구소, ⁴부교수, 인천대학교, 도시건축학부, ⁵대표이사, ㈜센코어테크

Seismic Performance Evaluation of Concrete-filled U-shaped Mega Composite Beams

Lee, Cheol Ho^{1*}, Ahn, Jae Kwon², Kim, Dae Kyung³, Park, Ji-Hun⁴, Lee, Seung Hwan⁵

¹Professor, Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

²Ph.D., Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

³Manager, SEN Structural Engineers Co., Ltd., Seoul, 07226, Korea

⁴Professor, Division of Architecture and Urban Design, Incheon National University, Incheon, 22012, Korea

⁵President, SEN Coretech, Seoul, 07226, Korea

Abstract - In this paper, the applicability of a 1900mm-deep concrete-filled U-shaped composite beam to composite ordinary moment frames (C-OMFs) was investigated based on existing test results from smaller-sized specimens and supplemental numerical studies since full-scale seismic testing of such a huge sized beam is practically impossible. The key issue was the web local buckling of concrete-filled U section under negative bending. Based on 13 existing test results compiled, the relationship between web slenderness and story drift capacity was obtained. From this relationship, a 1900mm-deep mega beam, fabricated with 25mm-thick plate was expected to experience the web local buckling at 2% story drift and eventually reach a story drift over 3%, thus much exceeding the requirements of C-OMFs. The limiting width to thickness ratio according to the 2010 AISC Specification was shown to be conservative for U section webs of this study. The test-validated supplemental nonlinear finite element analysis was also conducted to further investigate the effects of the horizontal stiffeners (used to tie two webs of a U section) on web local buckling and flexural strength. First, it is shown that the nominal plastic moment under negative bending can be developed without using the horizontal stiffeners, although the presence of the stiffeners can delay the occurrence of web local buckling and restrain its propagation. Considering all these, it is concluded that the 1900mm-deep concrete-filled U-shaped composite beam investigated can be conservatively applied to C-OMFs. Finally, some useful recommendations for the arrangement and design of the horizontal stiffeners are also recommended based on the numerical results.

Keywords - U-shaped composite beam, Seismic composite connection, Ordinary moment frames, Web local buckling, Finite element analysis

1. 서론

최근 대표적 건축재료인 강재와 콘크리트라는 이종재료를 더욱 효율적, 경제적으로 활용할 수 있는 합성구조에 대

한 관심이 높아지면서 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 전통적으로 사용되어온 합성보가 단면이 개방형인 H형 강 위에 바닥슬래브를 전단스터드로 연결하여 합성거동을 유도하는 방식이었다면, 최근 국내에서는 이러한 전통적 방식의 합성보를 개선하기 위한 다양한 형식의 합성보가 개발되어 건설현장에 적용되고 있다. 이러한 합성보로는 U형 강판에 콘크리트를 채운 형태의 TSC보^{[1],[2],[3],[4]}, 일반 H형강을 허니콤보 절단법으로 절단, 제작하고 플랜지 사이를 콘크리트로 채운 iTTECH 보^[5], 강도가 다른 하부강판, 측강판, 철근을 조합한 하이브리드 성형보^{[6],[7]}가 대표적이다.

Note.-Discussion open until October 31, 2017. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 22, 2016; revised October 12, 2016; approved on November 3, 2016.

Copyright © 2017 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-880-8735 Fax. +82-2-871-5518

E-mail. ceholee@snu.ac.kr

그중 TSC보와 같은 방식의 콘크리트 채움 U형 합성보는 개방형 단면인 H형강을 대신하여 강관을 절곡한 폐쇄형 단면을 적용한 것(Fig. 1 참조)으로 위의 다른 콘크리트 충전형 합성보에 비해 구조적, 시공적 장점이 많다. iTECH 보의 경우 절단한 H형강을 사용하기 때문에 보 거푸집 역할을 위한 ㄷ형강이 추가로 필요하게 되며, 하이브리드 성형보의 경우 측강판과 하부강판의 분리로 인해 이를 연결할 볼트접합이 추가로 소요되는 단점이 있다. 이에 반해 TSC보의 경우 냉간성형으로 제작되는 얇은 강판이 적용되더라도 콘크리트 충전을 통해 국부좌굴에 대한 내력저하를 억제할 수 있으며, 충전된 콘크리트는 축열효과를 통해 화재 시 내화성능의 증진에도 기여한다는 장점이 있다. 더구나 폐쇄형인 콘크리트 채움 U형 합성보는 지진하중과 같은 반복하중을 받는 경우에 우려되는 횡비틀림좌굴에 있어서도 개방형 단면에 비해 훨씬 유리하다. 또한 U형 강관이 시공시 거푸집 역할을 하면서 공기단축의 효과가 있으며, 충고절감 및 바닥진동의 저감 등과 같은 부수적 효과로 인하여 더욱 주목받고 있다.

이러한 콘크리트 채움 U형 합성보는 주로 중력하중에 의한 정모멘트를 받는 단순보에 가장 효율적으로 적용될 수 있

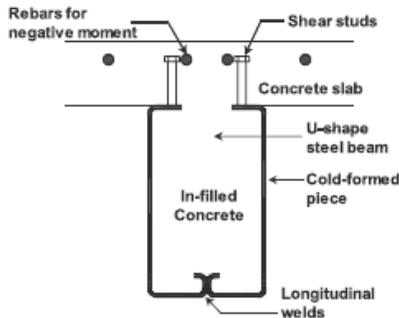


Fig. 1. An example of U-shaped composite beam section

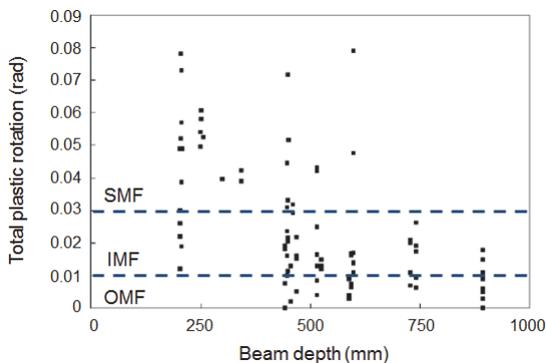


Fig. 2. Variation of total plastic rotation according to beam depth (FEMA, 2000)

으나, 국내에서도 최근의 다양한 실험연구^{[1],[2],[3],[4]}를 통해 내진성능이 요구되는 보-기둥 접합부에 적용하기 위해 노력하고 있다. 국내의 설계기준(KBC 2009^[8], AISC Seismic Provisions^[9])에서는 보-기둥 접합부의 층간변위각으로 중간모멘트골조에는 0.02rad, 특수모멘트골조에는 0.04rad를 발휘하도록 요구하고 있으며, 그 때까지의 휨내력은 합성보 공칭소성모멘트의 80% 이상으로 유지되어야 한다.

콘크리트 채움 U형 합성보의 내진성능이 검증될 경우 반도체 및 디스플레이 등 정밀공정을 위한 건축물에도 폭넓게 적용될 수 있으나, 이러한 건축물의 경우 엄격한 사용성 요건 등의 이유로 합성보를 활용하더라도 춤이 깊은 보를 적용해야 하는 난관이 있다. 또한 현행 내진기준에서는 합성보가 중간모멘트골조에 요구되는 변형능력을 충족하더라도 보춤이 750mm를 초과하는 경우에는 보통모멘트골조로 분류한다. 그 이유는 Fig. 2의 실험결과^[10]에서 보듯이 보 춤이 증가할수록 용접부 조기 취성과 파괴 등에 의해 접합부 소성회전능력이 떨어지는 경향을 보이기 때문이다.

선형 실험연구들^{[1],[2],[3],[4]}에 의하면 이와 같은 춤이 깊은 대형 콘크리트 채움 U형 합성보의 내진성능평가에 있어서 가장 중요한 검토 대상은 보-기둥 접합부에 부(-)모멘트가 작용할 경우 압축을 받는 합성보의 웨브에 면외방향으로 조기 국부좌굴(outward-bulging web local buckling)이 발생하지 않도록 제어하는 것이다. 정(+)모멘트를 받는 경우는 합성보의 웨브 대부분이 인장 상태가 되므로 웨브국부좌굴은 문제가 되지 않는다. 다만 정모멘트에 대해서는 하부플랜지 용접부의 인장파단이 방지되도록, 실험에서 입증된 상태에 대해 양질의 용접시공이 이루어지도록 관리하면 된다.

하지만 반도체공장 등의 일부 구조에서와 같이 보춤이 1900mm에 이르는 콘크리트 채움 U형 메가 합성보의 경우, 액츄에이터 가력용량의 제한 등으로 인해, 실물대 실험에 의한 내진성능평가가 현실적으로 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 가장 현실적이면서도 실증적 근거를 갖는 방안으로서, 기존에 수행된 콘크리트 채움 U형 합성보를 적용한 다양한 접합부의 실물대 반복재하 실험결과를 바탕으로 보의 춤과 웨브의 판폭두께비가 접합부의 강도 및 소성회전능력에 미치는 영향을 분석하였다. 그리고 고급 비선형 유한요소해석을 토대로 접합부의 강도 및 회전능력, 웨브국부좌굴 발생시점 및 강도에 대한 영향, 좌굴방지 스티프너의 배치 및 스티프너 작용응력에 대해 다각도로 분석하여 콘크리트 채움 U형 메가 합성보의 보통모멘트골조 적용성을 평가하고자 하였다.

2. 현행 국내외 설계기준 분석

2.1 합성모멘트골조의 성능요건

현행 내진설계기준에서 콘크리트 채움 U형 합성보에 적용 가능한 합성모멘트골조는 세 가지로 분류되며 서로 다른 수준의 비탄성회전능력을 요구한다. 먼저 특수모멘트골조(반응수정계수 R= 8) 및 중간모멘트골조(반응수정계수 R= 4.5)에 대해서는 각각 0.04rad, 0.02rad의 층간변위각을 수용할 수 있도록 요구한다(Table 1 참조). 통상 탄성층간변위각의 한계로서 0.01rad를 전제하므로, 특수 및 중간모멘트골조에 대해 각각 0.03rad, 0.01rad의 소성층간변위각을 확보할 것을 요구하고 있는 것이다. 반면, 반응수정계수가 3에 불과한 보통모멘트골조는 거의 탄성한계 거동수준을 전제로 설계하며 비탄성변형에 의한 층간변형능력의 확보에 대한 요구는 거의 없는 것으로 취급한다. 즉, 강접으로 설계할 경우 접합부에서 소성강도만 발휘하면 될 뿐, 비탄성 변형능력은 특별히 규정되지 않은 골조로서 거의 시스템초과강도로 지진하중을 지지하는 것으로 상정된 “non-ductile” 골조라 할 수 있다. 따라서 강구조내진기준의 소요전단강도만 검토하면 될 뿐 추가의 연성상세 요구조건이 거의 없는 구조시스템이다.

2.2 국부좌굴 방지를 위한 판폭두께비 제한 요건

본 논문에서 검토하고자 하는 춤이 깊은 콘크리트 채움 U형 합성보의 일반적인 단면상세는 Fig. 3과 같다. 이러한 합

Table 1. Required rotation capacity of steel and composite moment frames

		SMF	IMF	OMF
AISC Seismic Provisions (2010) ^[9]	Steel	0.04	0.02	-
	Composite	0.04	0.02	-
KBC (2009) ^[8]	Steel	0.04	0.02	-
	Composite	0.04	0.03	-

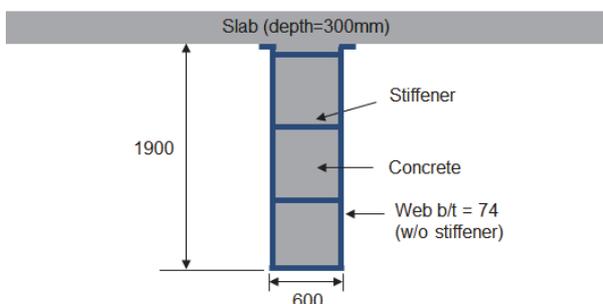


Fig. 3. U-shaped composite deep beam

성보와 기둥의 접합부에 부모멘트가 작용하면 춤이 깊은 웨브의 판폭두께비가 상대적으로 크기 때문에 웨브 하부에 작용하는 압축력에 의해 면외방향 웨브국부좌굴을 야기할 가능성이 높아진다. 이에 따라 콘크리트 채움 U형 합성보에 대한 현행 설계기준의 판폭두께비 제한을 우선 검토/요약하여 실험 및 해석결과의 분석에 활용하고자 하였다. 그러나 엄밀한 의미에서 콘크리트 채움 U형 합성보와 완전히 합치하는 판폭두께비 제한조항은 존재하지 않으므로 층전형 각형강관 휨부재의 판폭두께비 제한조항을 원용할 수 있는 조항으로 판단하여 이를 중심으로 정리하였다.

2.2.1 AISC Specification (2010)과 KBC (2009)

AISC Specification^[11]에서는 축력 또는 휨에 의해 합성부재에 국부좌굴이 발생하여 내력이 저감되는 것을 제한하기 위하여, 강제 요소의 판폭두께비를 Table 2 및 Table 3과 같이 규정하고 있다(KBC 2009^[8]의 관련 조항 역시 동일하다). 즉, 접합부의 비탄성회전능력이 요구되지 않는 보통모멘트골조(반응수정계수 R = 3)의 휨부재의 경우, 강구조 일반기준(Specification)만 준수하면 된다(Table 3 참고).

Table 2. Limiting width-to-thickness ratios for compression steel elements in composite members subjected to axial compression (AISC Specification, 2010)

Description of element	λ_p Compact/ Noncompact	λ_r Noncompact/ Slender	Maximum permitted
Walls of rectangular HSS and boxes of uniform thickness	$2.26 \sqrt{E/F_y}$	$3.00 \sqrt{E/F_y}$	$5.00 \sqrt{E/F_y}$

Table 3. Limiting width-to-thickness ratios for compression steel elements in composite members subjected to flexure (AISC Specification, 2010)

Description of element	λ_p Compact/ Noncompact	λ_r Noncompact/ Slender	Maximum permitted
Flanges of rectangular HSS and boxes of uniform thickness	$2.26 \sqrt{E/F_y}$	$3.00 \sqrt{E/F_y}$	$5.00 \sqrt{E/F_y}$
Webs of rectangular HSS and boxes of uniform thickness	$3.00 \sqrt{E/F_y}$	$5.70 \sqrt{E/F_y}$	$5.70 \sqrt{E/F_y}$

Table 4. Limiting width-to-thickness ratios for compression elements for moderately and highly ductile members (AISC Seismic Provisions, 2010)

Description of element	λ_{hd} Highly ductile members	λ_{md} Moderately ductile members
Walls of rectangular filled composite members	$1.40\sqrt{E/F_y}$	$2.26\sqrt{E/F_y}$

2.2.2 AISC Seismic Provisions (2010)

AISC Seismic Provisions (2010)^[9]에서는 Table 4와 같이 합성부재에 요구되는 연성조건(high/moderate)에 따라 압축요소의 판폭두께비를 단지 2가지 등급으로만 규정하고 있다. 중간(moderate) 연성조건은 1% 소성회전각을 충족시키기 위한 것으로, 이를 만족하는 것은 중간모멘트골조의 요구성능을 충족시키는 것에 대응된다.

2.2.3 웹의 판폭두께비 검토

앞서 언급한 바와 같이 반응수정계수(R)가 3인 보통모멘트골조의 경우, 강구조 일반기준(Specification)만 준수하면 된다. 본 연구의 고려대상인 춤이 깊은 콘크리트 채움 U형 합성보에 사용되는 강종은 SM490으로 공칭항복강도(F_y)는 325MPa에 해당하며 콤팩트/비콤팩트 판폭두께비 기준은 Table 3에 의하면 아래 식 (1)과 같다.

$$\lambda_p = 3.00\sqrt{E/F_y} = 3.00\sqrt{205000/325} = 75.35 \quad (1)$$

춤이 1900mm(상하부 플랜지 포함)인 콘크리트 채움 U형 합성보의 웹(두께 25mm)의 판폭두께비는 74로서 좌굴방지를 위한 스틱프너를 보강하지 않더라도 콤팩트(compact) 웹조건을 만족한다. 이는 좌굴방지 스틱프너 없이도 웹의 국부좌굴 없이 소성모멘트 발현이 가능함을 시사한다.

그리고 보통모멘트골조의 경우 Table 4의 내진 판폭두께비 규정을 따를 필요는 없지만, 보수적 관점에서 콘크리트 채움 U형 합성보의 웹 판폭두께비를 Table 4의 중간연성조건을 기준으로 검토하면 식 (2)와 같다.

$$\lambda_{md} = 2.26\sqrt{E/F_y} = 2.26\sqrt{205000/325} = 56.76 \quad (2)$$

좌굴방지 스틱프너를 설치하지 않을 경우($b/t = 74$), 웹의 판폭두께비는 중간연성조건에 상한을 약 30% 초과함을 알 수 있다. 그러나 실제 시공 현장에서는 콘크리트 채움 U형 합성보 내부에 스틱프너를 설치하여 좌굴방지에 기여하도록 하는 것이 일반적이다(Fig. 3 참고). 다만 좌굴방지 스틱프너의 경우 하부플랜지처럼 웹을 연속적으로 구속하고 있지는 않기 때문에 웹이 자체적으로 중간연성조건을 만족할 때와 같은 성능을 발휘하는지는 다시 한번 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 이러한 웹 내의 스틱프너 설치를 통한 웹국부좌굴 방지효과를 4장에서의 유한요소해석을 바탕으로 검증하고자 한다.

3. 선행 콘크리트 채움 U형 합성보-기둥 실험결과 분석

본 장에서는 실험적 검증범위를 벗어난 춤이 깊은 대형 콘크리트 채움 U형 합성보 접합부에 대해 축소실험에 준하는 선행 실험대 실험결과^{[1],[2],[3],[4]}를 요약/분석하여, 현 기준에서 다루지 못하는 대형 부재의 현장적용 근거를 논하고자 한다. Table 5와 같이 콘크리트 채움 U형 합성보 접합부의 내진성능검증 실험(총 13개 실험체)이 이미 수행된 바 있다. 합성보 실험체의 춤은 450mm 또는 550mm로 본 연구에서 검토하고자 하는 대형 합성보 춤(1900mm)의 1/4~1/3 수준이다.

3.1 콘크리트 채움 U형 합성보-H형강 기둥 T형/십자형 접합부 실험체(S1/S2/S3/S4/S5)

콘크리트 채움 U형 합성보와 철골기둥 접합부에 관한 실험은 T자형 편측 접합부(S1, S2, S3)와 십자형 접합부(S4, S5)로 나뉘어 수행된 바 있다. S1과 S3 실험체는 정모멘트와 부모멘트에 100% 합성효과를 발휘하도록 스틱드를 배치하였고, S2 실험체는 완전합성 요구강도의 63% 수준의 부분합성이 되도록 스틱드를 배치하였다. S3는 소성힌지를 보강단부의 외측으로 유도하기 위해 콘크리트 채움 U형 합성보 내부 콘크리트에 스틱로폼을 삽입하여 채움 콘크리트 단면적을 감소시키는 약화전략을 포함시켰다.

S1 실험체의 경우 층간변위각 3%에서 웹 국부좌굴이 발생한 이후에 층간변위각 4.3%에서 최대변위각에 도달하였다. S2 실험체는 층간변위각 2%에서 웹 국부좌굴이 발생하였으며, 층간변위각 4.7%에서 최대변위각에 도달하였

Table 5. Summary of test specimen information

Source and specimen	Column type	Some notes on beam-column connection	Member sizes		Beam plastic moment based on measured strength		
			U-shaped beam (mm)	Floor slab (mm)	Positive (kN·m)	Negative (kN·m)	
Lee <i>et al.</i> ^[1]	S1	H-shaped steel column (one-sided connection)	Strengthening the connection & Fully composite	450×270×6	1500×150	1285	-1007
	S2	H-shaped steel column (one-sided connection)	Strengthening the connection & Partially composite	450×270×6	1500×150	911	-1011
	S3	H-shaped steel column (one-sided connection)	Strengthening the connection & Weakening the beam	450×270×6	1500×150	1294	-967
	S4	H-shaped steel column (two-sided connection)	Connecting beam to column flange	450×270×6	1690×165	1379	-1024
	S5	H-shaped steel column (two-sided connection)	Connecting beam to column flange	550×270×8	1690×165	2079	-1521
Park <i>et al.</i> ^[2]	C1	RC column (rectangular)	Fully penetration of beam	450×270×6	1690×160	1489	-1161
	C2	RC column (rectangular)	Fully penetration of beam	550×270×8	1690×160	2152	-1668
	C3	RC column (circular)	Exterior diaphragm	450×270×6	1690×160	1489	-1161
Hwang <i>et al.</i> ^[3]	P1	PSRC column (two-sided connection)	Web penetration	450×300×6	1200×150	852	-743
	P2	PSRC column (two-sided connection)	Web penetration	550×300×6	1200×150	1151	-1012
	P3	PSRC column (one-sided connection)	Web penetration	550×300×6	1200×150	1144	-1006
Kim <i>et al.</i> ^[4]	P4	PRC column	Connecting beam to panel zone	450×270×6	1500×150	660	-764
	P5	PSRC column	Connecting beam to panel zone	550×270×8	1500×150	952	-1179

Note. Member sizes: U-shaped beam (depth×width×plate thickness, mm), Floor slab (width×thickness, mm)

다. S3 실험체는 층간변위각 3%에서 웨브 국부좌굴이 발생하였다. 이후 층간변위각 4.6%에서 최대변위각에 도달하였다.

S4와 S5 실험체는 공장용접된 U형 브라켓을 현장볼트이음으로 시공하는 접합시스템이다(Fig. 4와 Fig. 5 참조). 볼트 이음부는 소성힌지에 근접하여 반복응력을 받으므로 조기술립에 의한 성능저하가 발생치 않도록 소성힌지 변형경화모멘트를 기준으로 마찰저항볼트이음부로 설계하였다. 두 실험체 모두 Fig. 6과 같이 부모멘트에 의해 웨브하부에서 면외방향으로 국부좌굴이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 S4와 S5 실험체의 모멘트-층간변위각 이력곡선으로 웨브국부좌굴의 발생시점과 최대층간변위각에 해당하는 시점을 함께 나타내었다. S4 실험체는 층간변위각 5.0%에서 웨브하부에 국부좌굴이 발생하였고, 층간변위각 5.1%

에서 최대변위각에 도달하였다. S5 실험체는 층간변위각 5%에서 웨브에서 국부좌굴이 발생하였으며, 그 이후 층간변위각 6.4%에서 최대변위각에 도달하였다.

3.2 콘크리트 채움 U형 합성보-RC기둥 접합부 실험체 (C1/C2/C3)

C1과 C2 실험체는 콘크리트 채움 U형 합성보가 RC 사각기둥을 완전관통하는 상세이다. C3 실험체는 원형기둥에 외다이어프램을 설치하여 U형 합성보를 용접접합하는 상세로, 웨브의 힘 전달을 위해 강관 내부에 강판을 용접하여 연속판을 형성하도록 하였다.

C1 실험체는 층간변위각 3.2%에서 기둥접합면 부근 하부플랜지에서 국부좌굴이 발생한 이후 최대강도에 도달하였

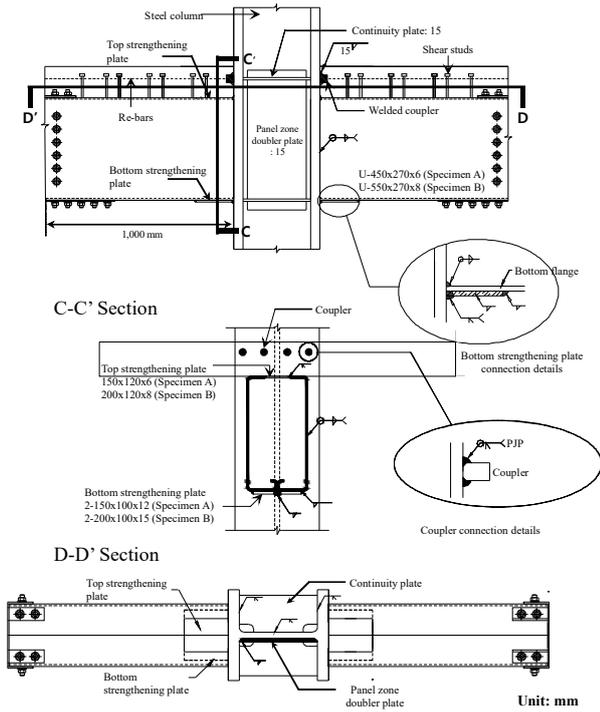


Fig. 4. Connection details of specimens S4 and S5

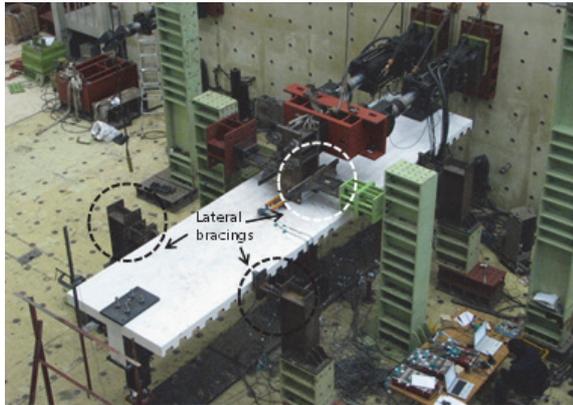
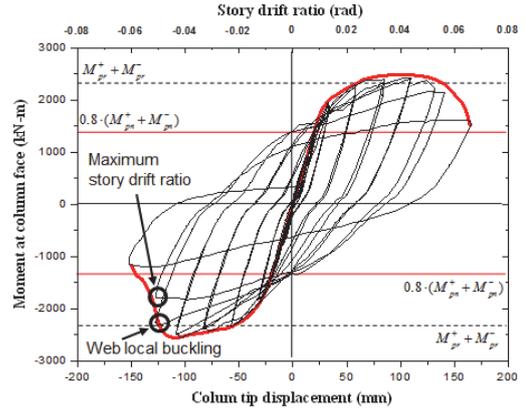


Fig. 5. Overall view of test setup for concrete-filled U-shaped steel beam to H-shaped column connections (specimens S4 and S5)

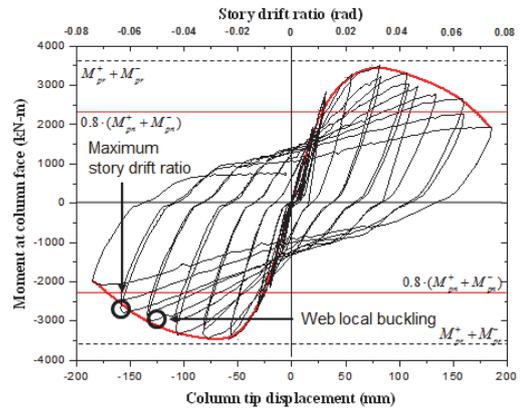


(a) Specimen S4 (b) Specimen S5

Fig. 6. Examples of web local buckling observed in the existing tests



(a) Specimen S4



(b) Specimen S5

Fig. 7. Connection moment versus story drift ratio relationship (specimens S4 and S5)

다. 층간변위각 4.6%에서 최대변위각에 도달함과 동시에 웨브 하부에서 국부좌굴이 발생하였다. C2 실험체의 경우 층간변위각 4.9%에서 최대변위각에 도달하였고, 저사이클 피로에 의해 하부플랜지가 파단할 때까지 웨브에 국부좌굴이 발생하지 않았다. C3 실험체는 층간변위각 4.0%에서 최대변위각에 도달하였으며 웨브 상부면에서 국부좌굴이 크게 발생하였다.

3.3 콘크리트 채움 U형 합성보-PSRC기둥 접합부 실험체(P1/P2/P3)

P1, P2, P3 실험체는 콘크리트 채움 U형 합성보가 선조립 철골 철근콘크리트(Prefabricated Steel Reinforced Concrete, 이하 PSRC) 사각기둥을 완전관통하는 상세이다. P1과 P2 실험체는 십자형으로 내부접합부를 구성한 것이며, P3 실험체는 외부접합부를 설계한 것이다.

P1 실험체는 층간변위각 2.7%에서 웨브에 국부좌굴이 발

생한 이후에 층간변위각 4.1%에서 최대변위각에 도달하였다. P2 실험체는 층간변위각 3.5%에서 웹에 국부좌굴이 발생한 이후 층간변위각 4.0%에서 최대변위각에 도달하였다. P3 실험체는 층간변위각 3.0%에서 웹에서 국부좌굴이 발생한 이후에 층간변위각 3.8%에서 최대변위각에 도달하였다.

3.4 콘크리트 채움 U형 합성보-PRC기둥 접합부 실험체 (P4/P5)

P4는 선조립 철근콘크리트(Prefabricated Reinforced Concrete, 이하 PRC) 기둥 실험체이며, P5는 선조립 철골 철근콘크리트(PSRC) 기둥 실험체이다. 각 실험체의 콘크리트 채움 U형 합성보는 기둥 내 패널존판에 용접접합되었으며, 웹의 힘을 전달하기 위해 사선강판 스티프너를 패널존판 내에 설치하였다.

P4 실험체와 P5 실험체는 둘 다 층간변위각 3.9%에서 최대변위각에 도달하였다. 두 실험체의 경우 기둥내부에 사선형 수직스티프너를 설치하여 수평다이아프램 대신 접합부내 응력전달요소로 활용될 수 있도록 하였는데, 실험결과 접합부 내에서 어떠한 문제도 발생하지 않았다.

3.5 실험결과 분석

Fig. 8는 각 실험체 웹의 판폭두께비와 국부좌굴 발생 시의 층간변위각을 나타낸 것이고, Fig. 9는 웹 판폭두께비와 실험체의 최대층간변위각을 나타낸 것이다. Table 6에 서는 각 실험체의 웹 판폭두께비를 AISC Specification (2010)의 힘을 받는 합성부재에 대한 판폭두께비 기준(Table 3)에 따라 분류하였고, 부모멘트에 의한 국부좌굴 발생 시점의 층간변위각과 최대층간변위각을 함께 정리하였다.

실험결과 콤팩트 혹은 비콤팩트의 웹 판폭두께비를 가진 모든 실험체들이 소성모멘트 이상의 휨성능을 발휘하였음은 물론 중간모멘트골조(IMF) 이상의 내진성능을 발휘했음을 확인할 수 있다. 실험체마다 2~4% 층간회전각 발생 시 단부의 웹나 하부플랜지에서 국부좌굴이 발생하였다. 이 국부좌굴은 최대휨모멘트 도달 이후 강도저하 영역에서 발생하였고, 실험체들은 국부좌굴의 결과로 휨강도저하의 가속화 징후가 관측되지 않는 낙관적 거동을 보였다. 비콤팩트 웹를 가진 실험체들에서도 콤팩트 웹 실험체에서 기대되는 소성강도가 발현되었고, 모든 실험체가 중간연성(moderate

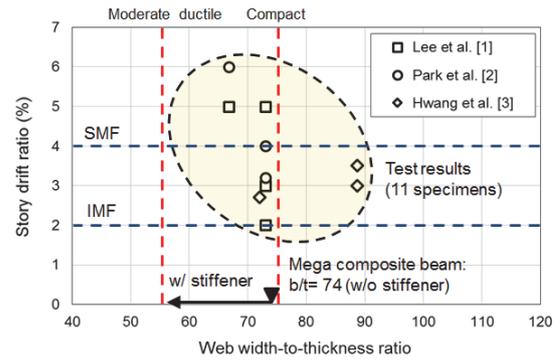


Fig. 8. Story drift ratio corresponding to web local buckling occurrence

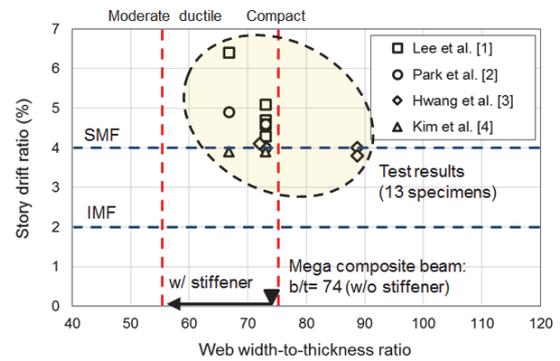


Fig. 9. Effect of web slenderness on maximum story drift achieved

Table 6. Summary of test results

Source and specimen	Width-to-thickness ratio of web	Story drift ratio (%)		Seismic system class
		Web local buckling	Maximum	
Lee et al. ^[1]	S1 Noncompact	3.0	4.3	C-SMF
	S2 Noncompact	2.0	4.7	C-IMF
	S3 Noncompact	3.0	4.6	C-SMF
	S4 Noncompact	5.0	5.1	C-SMF
Park et al. ^[2]	S5 Compact	5.0	6.4	C-SMF
	C1 Noncompact	3.2	4.6	C-SMF
	C2 Compact	6.0	4.9	C-SMF
Hwang et al. ^[3]	C3 Noncompact	4.0	4.0	C-IMF
	P1 Noncompact	2.7	4.1	C-SMF
	P2 Noncompact	3.5	4.0	C-SMF
Kim et al. ^[4]	P3 Noncompact	3.0	3.8	C-IMF
	P4 Noncompact	-	3.9	C-IMF
	P5 Compact	-	3.9	C-IMF

Note. C-SMF: composite special moment frame, C-IMF: composite intermediate moment frame

ductile) 판폭두께비한계값(λ_{md})을 초과하는 66.8~88.7 범위의 판폭두께비를 가지고 있음에도 불구하고 3.0%이상의 층간변위각을 보여주어 최소 합성중간모멘트골조 이상의 낙관적 성능을 갖는 것으로 확인되었다(Fig. 9 참조. 이는 AISC^{[9],[11]}의 합성부재 관련 판폭두께비 기준이 보수적임을 시사하는 것이기도 하다).

Fig. 9에서 보듯이 웨브의 판폭두께비와 층간변위능력은 대체로 반비례하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 그러나 본 연구에서 주목하고 있는 보 춤이 1900mm에 달하는 콘크리트 채움 U형 합성보의 경우 스티프너를 설치하지 않더라도 웨브의 판폭두께비는 74로서 선행 실험체들의 판폭두께비 범위(66.8~88.7)와 실험에서 확인된 층간변형능력을 고려할 때 3% 수준의 층간변형능력을 기대할 수 있다. 더구나 웨브를 좌굴방지 스티프너로 보강할 경우 웨브의 판폭두께비가 그보다 낮아지는 효과를 기대할 수 있으므로 (Fig. 8와 Fig. 9 참고) 춤이 깊어지더라도 3% 수준의 층간변형능력을 안정적으로 확보하여 보통모멘트골조는 물론 중간모멘트 요건도 충분히 만족시킬 수 있을 것으로 사료된다.

4. 유한요소해석을 이용한 메가합성보의 힘성능 평가

일반적으로 보 부재의 내진성능을 검증하고자 하는 경우 실물대 실험을 통하여 성능을 확인하는 것이 바람직하다. 하지만 춤이 거의 2m에 달하는 대형 콘크리트 채움 U형 합성보의 경우 부재가 크고 단면휨성능이 높기 때문에 이를 실물대 실험체로 제작하여 실험을 수행하기 힘든 문제가 있음을 앞서 언급하였다. 본 장에서는 이와 같은 대형 콘크리트 채움 U형 합성보의 실물대 내진성능실험을 대체할 수 있는 유한요소해석기법을 제시하고 이를 바탕으로 대형 콘크리트 채움 U형 합성보의 내진성능을 검토한다.

4.1 TSC 합성보의 유한요소해석 모델링 및 검증

본 연구에서는 대표적인 유한요소해석프로그램 중 하나인 ABAQUS^[12]를 활용하였다. 콘크리트는 solid(C3D8R), U형 강판은 shell(S4R)로 모델링하였다. 철근의 경우 truss(T3D2)로 모델링한 다음, 콘크리트 슬래브에 매립되도록 하였다(embedded option을 이용). 콘크리트에 적용한 손상 소성(concrete damaged plasticity) 모델에는 인장강성증

가(tension stiffening) 효과를 반영하였다. 상/하부 강판은 스티드에 의해 내부 콘크리트 및 상부 슬래브와의 계면에서 슬립이 없는 것으로 가정하여 표면간 완전구속(tied surfaces) 조건을 적용하였다. 이에 반해 웨브와 내부 콘크리트 경계면에서의 화학적 부착력은 보수적 관점에서 무시하고, 국부좌굴에 의해 분리될 수 있도록 하였다.

TSC 합성보의 경우 선행실험에서 관측된 바와 같이 정모멘트를 받을 경우에는 하부웨브 및 하부플랜지가 인장력을 받게 되어 국부좌굴이 발생할 염려가 없으므로 보통모멘트 골조의 내진성능 검토에서 있어서 부모멘트 방향으로의 소성휨강도 발현여부가 가장 중요하다. 따라서 해석연구에서는 합성보에 부모멘트가 작용하도록 단조가력하여 국부좌굴이 발생하는 거동을 살펴보고 이에 의한 소성휨강도 발현 여부 및 보 회전각-휨모멘트 관계에 초점을 두었다(Fig. 10).

본 연구에서는 우선 콘크리트 채움 U형 합성보의 휨거동에 대한 유한요소해석 모델링 기법을 검증하고자 하였으며, Table 5의 선행실험체 가운데 절골기둥에 TSC 합성보가 접합된 T자형 편축 접합부 실험체(S1)^[11]를 검증 대상으로 하였다. 해석에서의 재료별 강도는 실험에서 계측된 강도(U형 강판의 항복강도는 446Mpa, 철근의 항복강도는 515MPa,

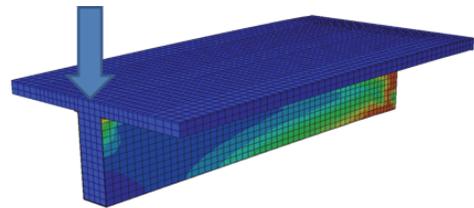


Fig. 10. Finite element model of deep U-shaped composite beams

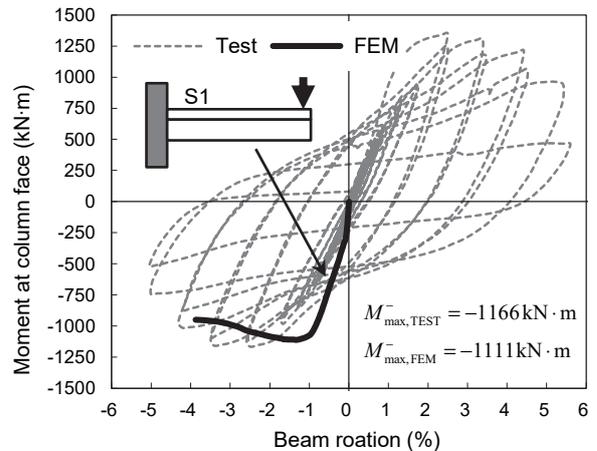


Fig. 11. Comparison between test and analysis results

콘크리트의 압축강도는 24MPa)에 근거하였으며, 강재와 콘크리트의 응력-변형을 관계는 Eurocode 4^[13]의 제안식을 참고하였다.

Fig. 11은 S1 실험체의 실제 반복가력 실험결과와 부모멘트방향에 대한 유한요소해석한 결과를 보-회전각과 보-기둥 접합면에서 휨모멘트와의 관계를 통해 비교한 것이다. 해석의 경우 접합부를 완전고정된 캔틸레버 보 단부로 모델링하였고 실제 실험에서 발생할 수 있는 강재-콘크리트 계면에서의 슬립 등이 반영되지 않았기 때문에 초기 강성이 다소 크게 나타나긴 하지만, 부모멘트방향의 최대휨강도 크기(실험결과 -1166kN·m, 해석결과 -1111kN·m) 및 그 이후의 거동은 거의 정확히 모사하고 있음을 확인할 수 있다.

4.2 해석대상

해석연구에서는 우선 선행 실험연구들에서 관측된 콘크리트 채움 U형 합성보의 웹 및 하부플랜지에서의 국부좌굴이 춤이 깊은 대형 콘크리트 채움 U형 합성보에서 어떤 양상으로 발현되는지 확인하고 소성모멘트의 발휘 여부 및 보회전각-휨모멘트 관계를 검토하여 합성보의 내진성능을 확인하였다. 추가적으로 강판 내 콘크리트 타설시 측압을 제어하고 강판의 국부좌굴 방지에 기여할 것으로 예측되는 강재앵글의 역할을 확인하고 최적 설치 방안을 함께 검토하였다. 이를 위해 Fig. 12와 같이 웹에 강재 스티프너가 없는 단면($b/t = 74$, 콤팩트/비콤팩트 단면의 경계), 3개($b/t = 24$) 및 4개($b/t = 20$)의 스티프너를 보강한 단면을 선정하여 결과를 비교하였다. 이때, 스티프너를 보강한 단면의 보 길이 방향 스티프너 간격은 시공성을 감안하여 600mm 간격으로 동일하게 설치되는 것으로 가정하였다. 춤이 깊은 콘크리트 채움 U형 합성보를 구성하는 강재의 항복강도는 325MPa, 콘크리트 압축강도는 30MPa, 철근의 항복강도는 500MPa를 적용하였다.

4.3 해석결과

유한요소해석 결과 춤이 깊은 콘크리트 채움 U형 합성보는 스티프너 보강 유/무에 관계없이 부모멘트 방향으로 공칭 소성모멘트 이상의 휨성능을 발휘하였다(Fig. 13). 또한 스티프너 유/무에 관계없이 보회전각이 1~1.5%일 때 최대휨모멘트에 도달하였으며 보회전각이 2%에 도달할 때까지도 최대휨내력의 80% 이상을 유지하였다. 즉, 휨강도 및 단부

회전능력의 측면에서 춤이 깊은 대형 콘크리트 채움 U형 합성보는 최소 보통모멘트골조 이상의 내진성능을 충분히 발휘할 수 있을 것으로 판단된다. 최대모멘트 도달 이후에는

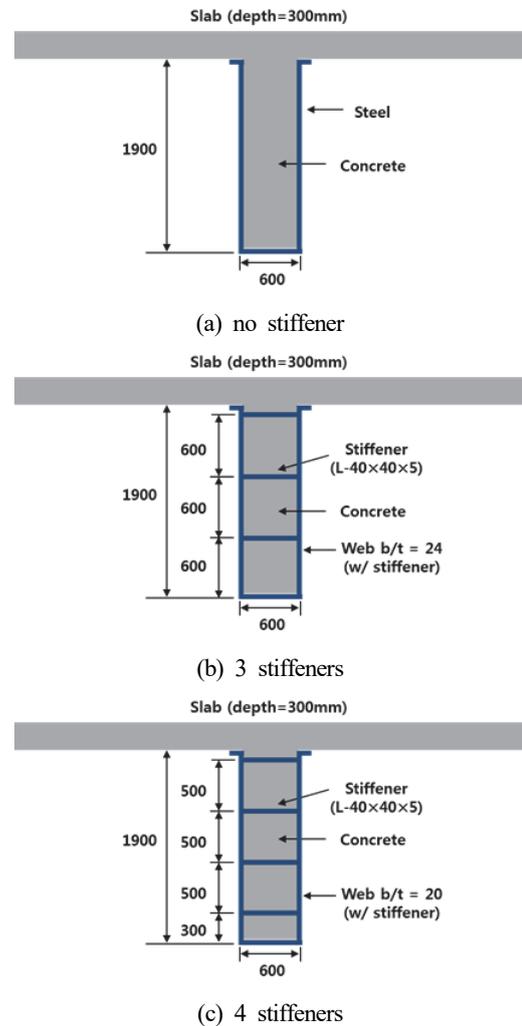


Fig. 12. 1900mm-deep U-shaped composite sections analyzed

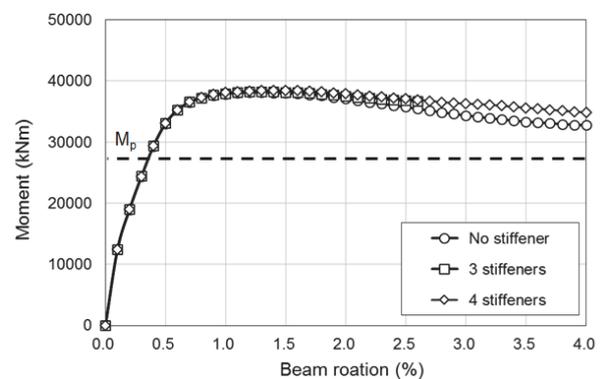


Fig. 13. Beam rotation versus connection moment relationship

스티프너를 보강한 단면의 휨성능 저하가 상대적으로 적었지만, 보강한 스티프너 수에 따른 휨성능 저하의 차이는 미미하였다.

국부좌굴은 최대모멘트 달성 이후 단부에 근접한 웨브 하부에서 발생하였으며, 강관 내부에 스티프너를 보강하지 않은 단면의 경우 보 회전각이 1.7% 수준일 때, 스티프너를 보강한 경우에는 보 회전각이 2.5% 수준일 때 국부좌굴이 시작되었다(Fig. 14). 이를 통해 스티프너를 보강할 경우 웨브

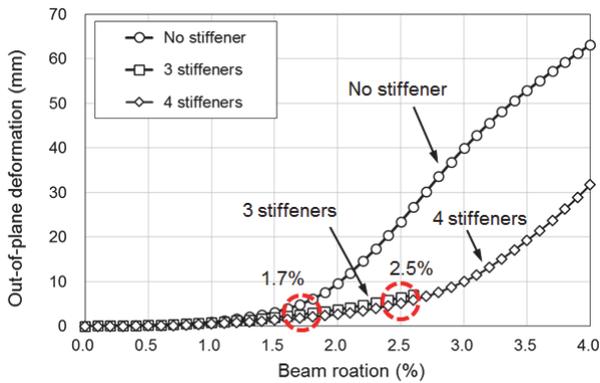


Fig. 14. Beam rotation versus out-of-plane deformation relationship

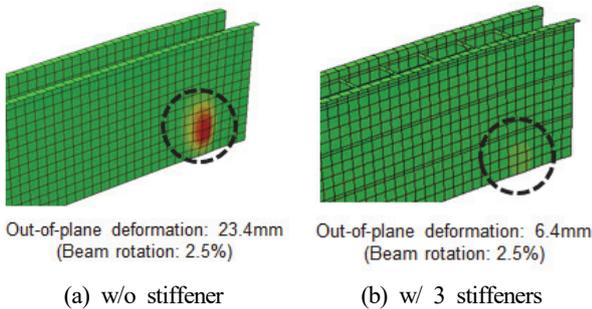


Fig. 15. Out-of-plane deformation of web

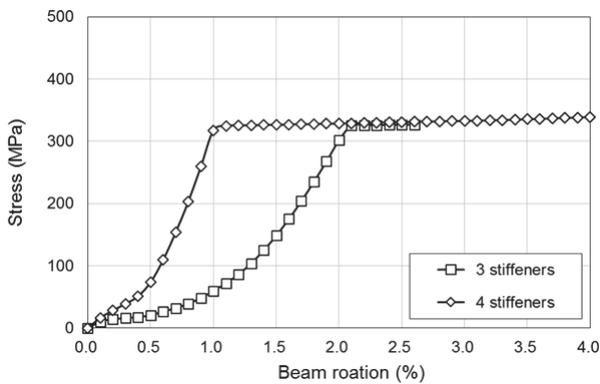


Fig. 16. Tensile stress of stiffener induced by out-of-plane deformation of web steel plates

의 면외변형(out-of-plane deformation)과 국부좌굴을 억제 및 지연하는 효과가 있음을 확인하였다(Fig. 15). 단, 웨브의 국부좌굴 이후에도 콘크리트 채움 U형 합성보는 추가적인 보 회전각을 발현하였다.

앞서 선행 실험 및 해석결과에 나타났듯이 콘크리트 채움 U형 합성보가 부모멘트를 받을 경우 국부좌굴은 보 단부에 근접한 하부웨브에 발생하였다. 본 연구에서는 콘크리트 타설 시의 측압제어 및 하부웨브의 국부좌굴을 억제하기 위해 보강한 스티프너의 보 회전각 증가에 따른 응력을 확인하였다. Fig. 16와 같이 국부좌굴 발생 위치 부근의 스티프너는 보 회전각이 1%(스티프너 4개 설치시)에 도달할 무렵 항복강도에 도달하였다(스티프너 3개 설치시에는 2% 이후). 국부좌굴이 발생한 위치(보 단부로부터 1m 이내) 주변의 스티프너를 제외한 다른 스티프너들(보 단부로부터 1m 이상)에 유발되는 응력은 항복강도보다 현저히 낮았다. 선행 실험 및 해석결과에서 모든 콘크리트 채움 U형 합성보의 웨브 국부좌굴은 보 단부로부터 보 깊이에 해당하는 길이 내에서 발생하였음을 감안한다면, 이러한 범위 내에 설치된 스티프너의 경우 강관과 용접접합시 전장도를 발휘할 수 있도록 설계 및 시공에 유의할 필요가 있다.

5. 결론

춤이 깊은 콘크리트 채움 U형 메가 합성보를 기둥부재에 접합하여 합성보통모멘트골조를 구성하고자 하는 경우, 실험장치의 가력용량 제한 등으로 인해 실험대 실험에 의한 구조성능 및 내진성능평가가 현실적으로 불가능하다. 본 연구에서는 가장 현실적이면서도 실증적 근거를 갖는 방안으로, 콘크리트 채움 U형 합성보를 적용한 유사 축소 단면 접합부의 실험대 실험 결과분석 그리고 춤이 깊은(1900mm급) 콘크리트 채움 U형 메가 합성보의 거동을 시뮬레이션하는 고급 비선형 유한요소해석을 토대로 합성보통모멘트골조 적용의 적합성을 평가하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다:

- (1) 춤이 깊은 콘크리트 채움 U형 합성보를 보통모멘트골조에 적용하고자 할 경우 강점으로 설계되는 접합부에서 소성강도만 발휘하면 되지만 접합부에 부(-)모멘트가 작용할 경우 압축을 받는 U형 합성보의 웨브가 초기에 면외방향으로 국부좌굴되지 않도록 제어해야 한다.

- (2) 본 연구에서 분석한 다양한 접합상세를 갖는 모든 실험체들은 소성모멘트 이상의 휨성능을 발휘하였다. 특히 현 설계기준에 의할 때 비콤팩트 웹을 가진 실험체에서도 콤팩트 웹에서 기대되는 소성강도가 발휘되었다. 모든 실험체는 웹이 중간연성 판폭두께비한계값(λ_{md})를 초과했지만 국부좌굴 이후 급격한 강도저하는 관측되지 않았으며 3.0% 이상의 층간변위각을 보여주어 합성중간모멘트골조 이상의 성능을 발휘한 것으로 확인되었다. 이러한 실험결과는 AISC에서 제시하고 있는 현행 합성부재의 판폭두께비 분류기준이 보수적임을 시사한다.
- (3) 층이 깊은 콘크리트 채움 U형 합성보에 스티프너를 설치하지 않을 경우 웹의 판폭두께비는 콤팩트/비콤팩트 조건의 경계에 있지만, 선행 실험체들의 판폭두께비 범위(66.8~88.7)와 유사하다는 점을 고려하면 선행 실험결과에 준하는 3% 수준의 층간변형능력을 기대할 수 있다. 또한 콘크리트 채움 U형 합성보 내에 좌굴방지 스티프너를 설치하여 웹의 판폭두께비를 낮추는 효과를 고려하면 보통모멘트골조는 물론 중간모멘트 요건도 충분히 만족시킬 수 있을 것으로 사료된다.
- (4) 층이 깊은 콘크리트 채움 U형 합성보의 내진성능평가를 위한 유한요소해석에 의하면 웹의 판폭두께비가 콤팩트 조건을 만족할 경우 스티프너 유/무에 관계없이 부모멘트 방향으로 공칭소성휨강도 이상의 성능을 발휘하였다. 또한 스티프너 유/무에 관계없이 보회전각이 1~1.5% 일 때 최대휨강도에 도달하였으며 보 회전각이 2%에 도달할 때까지도 최대휨내력의 80% 이상을 유지하였으므로 보통모멘트골조 이상의 내진성능을 충분히 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.
- (5) 해석결과 국부좌굴은 선행실험과 마찬가지로 소성휨강도를 충분히 상회하는 최대휨강도에 도달한 이후 웹하부에서 발생하였다. 스티프너로 보강한 실험체와 보강하지 않은 실험체의 국부좌굴 발생시점은 각각 보회전각 2.5% 및 1.7%로서, 스티프너에 의해 국부좌굴이 상당히 지연되는 효과가 있음을 확인하였다. 스티프너의 보 회전각 증가에 따른 응력 변화를 확인한 결과, 국부좌굴이 발생하는 보 단부 부근의 스티프너는 보 회전각이 1~2%에 도달할 무렵 항복강도에 도달하였다. 따라서 국부좌굴이 발생할 가능성이 높은 영역(콘크리트 채움 U형 합성보의 단부로부터 보 깊이에 해당하는 길

이 이내)에 설치하는 스티프너의 경우 웹강판과 용접 접합시 전강도를 발휘할 수 있도록 주의하여 설계/시공할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구를 위한 ㈜ 센 엔지니어링 그룹의 지원에 감사드립니다.

참고문헌(References)

- [1] Lee, C.-H., Park, H.-G., Park, C.-H., Hwang, H.-J., Lee, C.-N., Kim, H.-S., and Kim, S.-B. (2013) Cyclic Seismic Testing of Composite Concrete-Filled U-Shape Steel Beam to H-Shaped Column Connections, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.139, No.3, pp.360-378.
- [2] Park, H.G., Hwang, H.J., Lee, C.H., Park, C.H., and Lee, C.N. (2012) Cyclic Loading Test of Concrete-Filled U-Shaped Steel Beam-RC Column Connections, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.36, pp.325-336.
- [3] 황현중, 엄태성, 박홍근, 이창남, 김형섭(2013) TSC 합성보-PSRC 합성기둥 접합부에 대한 주기하중 실험, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제6호, pp.601-612. Hwang, H.J., Eom, T.S., Park, H.G., 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).
- [4] 김형섭, 이창남, 이승환, 김법렬(2012) 콘크리트 채움 U형 합성보와 선조립기둥의 내진접합부 성능실험, 대한건축학회논문집 - 구조계, 대한건축학회, 제28권, 제4호, pp.55-64. Kim, H.-S., Lee, C.-N., Lee, S.-H., and Kim, B.-R. (2012) Seismic Performance Test of Concrete-Filled U-Shaped Steel Beam-to-Prefabricated Column Connections, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.28, No.4, pp.55-64 (in Korean).
- [5] 이승재, 강성덕, 최승관, 김명환, 김상대(2006) iTech 합성보의 내화성능에 대한 실험연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제18권, 제5호, pp.643-653. Lee, S.J., Kang, S.D., Choi, S.K., Kim, M.H., and Kim, S.D. (2006) Experimental Study on the Fire Resistance of the iTech Composite Beam, *Journal of Korean Society*

- of Steel Construction*, KSSC, Vol.18, No.5, pp.643-653 (in Korean).
- [6] 김성배, 김상섭, 유덕수, 최승관(2013) 신형상 U형 하이브리드 합성보의 내화성능에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제4호, pp.379-388.
Kim, S.B., Kim, S.S., Ryu, D.S., and Choi, S.K. (2013) Fire Resistance of U-Shape Hybrid Composite Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.4, pp.379-388 (in Korean).
- [7] 김성배, 조성현, 오광수, 전용한, 최영한, 김상섭(2016) 춤이 작은 신형상 고성능 하이브리드 합성보의 휨성능 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제28권, 제3호, pp.151-162.
Kim, S.B., Cho, S.H., Oh, K.S., Jeon, Y.H., Choi, Y.H., and Kim, S.S. (2016) Bending Performance Evaluation of Hybrid Composite Beam with Low Depth and New Shape, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.3, pp.151-162 (in Korean).
- [8] 대한건축학회(2009) 건축구조기준, 대한건축학회. Architectural Institute of Korea (2009) *Korean Building Code - Structural*, AIK, Korea (in Korean).
- [9] American Institute of Steel Construction (2010) *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 341-10), USA.
- [10] Federal Emergency Management Agency (2000) *State of the Art Report on Connection Performance*, FEMA-355D, FEMA, USA.
- [11] American Institute of Steel Construction (2010) *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-10), USA.
- [12] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2010) *Abaqus Analysis User's Manual*, DSS, USA.
- [13] European Committee for Standardization (2005) *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures*, (EN 1994) Belgium.

요 약 : 본 연구에서는 1900mm급의 춤이 깊은 콘크리트 채움 U형 메가 합성보의 합성보통모멘트골조에 대한 적용성을 검토하였다. 대형 합성보의 실험대 내진성능실험에 대한 현실적 제약으로 인하여 작은 규모의 실험체에 대해 수행된 기존 실험결과와 분석과 수치해석연구의 보완을 통해 연구를 수행하였다. 이러한 형태의 합성보는 부모멘트 작용시의 웹국부좌굴이 가장 중요하므로 선행 실험대 실험결과로부터 웹의 판폭두께비와 층간변형능력 사이의 관계를 분석하였다. 그 결과, 25mm 두께의 U형 강재단면을 지닌 1900mm급의 대형 합성보라 하더라도 층간변위각 2% 이후 웹국부좌굴을 경험하고 3% 이후 최대변형에 도달하는 것으로 확인되었다. 이는 합성보통모멘트골조의 요구조건을 상회하는 것으로 AISC 기준에 따른 웹 판폭두께비 제한이 본 연구의 U형 단면에는 보수적임을 시사하기도 한다. 유한요소해석을 통해서 합성보의 휨성능 및 웹국부좌굴에 대한 수평스티프너의 영향을 분석하였다. 대형 합성보는 스티프너 보강과 관련없이 부모멘트 방향으로 공칭소성모멘트 이상의 휨성능을 발휘하였으며, 스티프너를 보강할 경우에는 웹국부좌굴이 상당히 지연되는 긍정적인 효과가 있었다. 이상의 실험결과 분석 및 해석연구에 의하면 1900mm급의 춤이 깊은 콘크리트 채움 U형 메가 합성보는 합성보통모멘트골조에 보수적으로 적용가능한 것으로 판단된다.

핵심용어 : U형 합성보, 내진합성접합부, 보통모멘트골조, 웹국부좌굴, 유한요소해석
