Journal of Korean Society of Steel Construction
Vol.32, No.5, pp.277-284, October, 2020

ISSN(print) 1226-363X ISSN(online) 2287-4054
DOI http://dx.doi.org/10.7781/kjoss.2020.32.5.277

ㄷ형강 부재로 구성된 모듈 간 접합부의 보강 상세에 대한 해석적 연구

이상섭[1*]
[1]공학박사, 연구위원, 한국건설기술연구원

Analytical Study on Stiffener Details for Inter-Module Connections with C-Shaped Section Members

Lee, Sang Sup[1*]
[1]Ph.D., Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea

Abstract - In modular buildings, the steel module is mainly manufactured as a frame system supported by four corner columns. The different steel sections can be used as a member of module depending on the connection methods. The inter-module connection should be possible regardless of the degree of factory finish, no matter which cross-section set is used. If the cross section of a column is a C-shaped steel, the connection between the modules can be easily accomplished by bolting at the end plate welded to the end of the column. However, the column may fail prior to the beam at beam-to-column connection or inter-module connection when the C-shaped column is subject to bending moment about weak-axis. As a result, the long-edge beam supporting the one-way slabs will not reach the nominal moment. In this study, to ensure the structural safety of framed module systems used a C-shaped column, the behavior of the connections between the modules along the strong and weak axial for C-section of column is evaluated experimentally and the appropriate stiffener details are investigated analytically.
Keywords - Modular building, Inter-module connection, Open section, C-shaped section, Stiffener detail

1. 서 론

철골계 모듈의 형식은 박스 형태를 구성하는 구조 부재에 따라 벽식과 골조식로 구분될 수 있으나 두 방식이 혼합되어 사용되기도 한다. Lawson *et al.*의 저서[1]에서 벽식 모듈은 4면 모듈(4-sided modules)로 불리며 경량 ㄷ형강으로 제작된 벽체와 바닥으로 구성되는 특징이 있다. 한편 골조식 모듈은 코너 지지 모듈(corner supported modules)로 불리며 4개 코너 부분에 설치된 기둥의 상하에 보가 접합된 형태로 기둥은 주로 각형강관이 사용되며 보는 ㄷ형강으로 사용된다.

Note.-Discussion open until April 30, 2021. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 03, 2020; revised August 24, 2020; approved on September 04, 2020.
Copyright © 2020 by Korean Society of Steel Construction
*Corresponding author.
Tel. +82-31-910-0768 Fax. +82-31-910-0392
E-mail. lss0371@kict.re.kr

그러나 골조식 모듈에 사용되는 부재는 모듈과 모듈 사이의 접합 방식에 따라 다양한 단면의 부재가 사용될 수 있다. 모듈 간 접합 방식은 인접하는 기둥 면을 연결하는 수평접합 방식과 기둥의 마구리나 보 플랜지를 연결하는 수직접합 방식으로 구분되며 용접 또는 볼트로 체결되고 있다.

수평접합 방식에 대한 연구로 Fathieh and Mercan[2]은 양쪽 각형강관 기둥의 앞면에 덧판을 걸쳐 대고 볼트를 체결한 모듈러 골조의 내진성능을 평가했으며, Styles *et al.*[3]은 양쪽 각형강관 기둥이 접하는 측면에 기둥 폭보다 넓은 강판을 용접하여 볼트로 체결한 접합부의 회전 강성에 대해 조사하였다. 수직접합 방식의 연구로 Gunawardena[4]는 각형강관 마구리에 용접된 엔드플레이트를 볼트로 체결한 모듈 간 접합부에 대해 해석과 실험을 실시하였고, Deng *et al.*[5]은 각형강관 기둥과 ㄷ형강 보로 구성된 모듈에서 보의 웨브와 플랜지에 삽입된 접합철물을 볼트로 체결한 모듈 간 접합부의 성능을 유한요소해석으로 평가하였으며, Chen *et al.*[6]은 각형강관 기둥과 각형강관 보가 사용된 모듈에서 각형강관 바닥보와 천장보를 관통하여 볼트 체결하는 접합 방식을

제안하였다. 한편, Annan *et al.*[7]의 연구에서는 기둥과 보에 모두 H형강이 사용되었으며 모듈 간 접합은 천장보와 바닥보를 현장에서 용접하는 방식이 적용되었다.

기존 연구에서 기둥 부재는 모듈 사이의 접합방식에 상관없이 정사각형 각형강관이 많이 사용되었으며, 보 부재는 수평접합 방식에서 단면 형상이 특정되지 않았지만, 수직접합 방식에서 ㄷ형강과 각형강관이 주로 사용되었다. 하지만 바닥보는 콘크리트 슬래브가 있는 경우 바닥보와 천장보를 관통하여 볼트 접합하는 것은 시공성이 떨어지기 때문에 개방형 단면을 사용하는 것이 모듈 간 접합에 유리하다. 특히 기둥에 개방형 단면 부재인 ㄷ형강을 적용하면 연속성이 확보된 접합이 쉬워지며 모듈의 외장 마감도를 높일 수 있다. 하지만 ㄷ형강은 축방향에 따라 단면성능이 크게 차이가 발생하여 기둥-보 접합부 및 모듈 간 접합부에서 기둥이 선행하여 파괴될 수 있다.

이 연구에서는 ㄷ형강이 사용된 골조식 모듈의 구조안전성을 확보하기 위해 기둥 단면의 축방향에 따른 모듈 간 접합부의 거동을 실험을 통해 평가하고, 기둥 단면이 약축에 대해 휨을 받을 때 적절한 보강 상세를 유한요소해석을 통해 조사하였다.

2. ㄷ형강 부재의 모듈 간 접합부 실험

2.1 실험체 계획

ㄷ형강으로 구성된 모듈-모듈 접합 상세는 Fig. 1에 나타내었다. 각 모듈은 ㄷ-250×90×9×13인 기둥에 ㄷ-200×80×7.5×11인 보를 기둥의 가장자리에 맞춰 장변방향에서 내부로 열리고 단변방향에서 밖으로 열리도록 제작되었다. 모듈 간 접합은 두께 20 mm의 엔드플레이트와 두께 9 mm의 스티프너로 보강된 기둥 단부 사이에 두께 20 mm의 연결 강판을 삽입하고 F10T M22 볼트로 체결하여 이루어졌다.

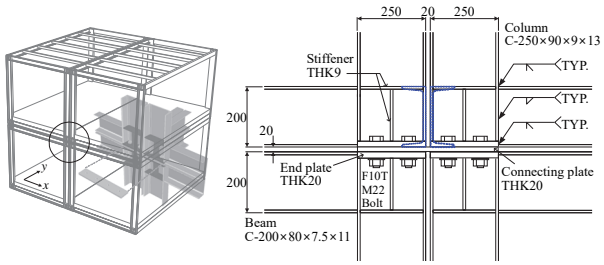
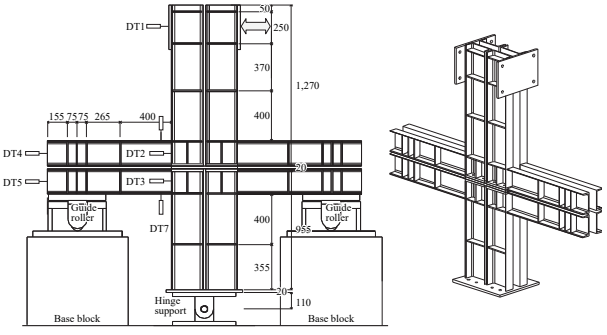
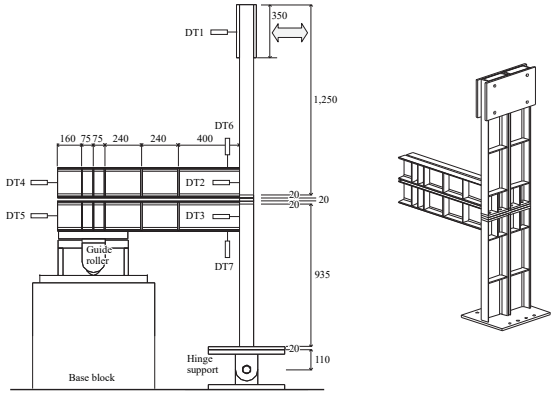


Fig. 1. Inter-module connections with C-shaped section members

이와 같은 모듈 간 접합은 기둥 단부에서 이루어지므로 스티프너로 보강된 부분만 제외한 모듈의 모든 부분을 공장에서 마감할 수 있어 공장 제작률을 높일 수 있다. 또한 모듈 간 접합에 보 플랜지가 이용되지 않기 때문에 장변과 단변에서 ㄷ형강 보의 열림 방향은 자유로워진다. 한편 단변(*x*축) 보의 휨모멘트는 기둥 ㄷ형강 강축에 대해 작용하고, 장변(*y*축) 보의 휨모멘트는 약축에 대해 작용한다. 따라서 모듈 간 접합부는 기둥 단면 회전축, 연결 강판 회전축, 보 접합 위치의 차이에 의해 단변과 장변의 거동이 달라지므로 이를 조사하기 위해 Fig. 2와 같은 실험이 계획되었고, 비틀림의 영향을 배제하기 위해 실험체는 대칭으로 제작되었다.



(a) Short edge connection (*x*-direction)



(b) Long edge connection (*y*-direction)

Fig. 2. Test set-up and configuration of specimens (Unit: mm)

실험체 제작에 사용된 강재는 모두 SS400으로 기둥에 사용된 ㄷ형강 플랜지의 판폭두께비(b/t)는 6.58로 내진설계 규정에 제시된 내진콤팩트 단면의 압축요소에 대한 판폭두께비 제한인 $8.86(=0.30\sqrt{E/F_y})$보다 작았고, 웨브의 판폭두께비(h/t_w)는 23.33으로 내진콤팩트 단면의 제한인 $33.08(=1.12\sqrt{E/F_y})$보다 작아 국부좌굴을 막기에 충분하였다. 또한 보의 ㄷ형강 플랜지와 웨브도 내진콤팩트 단면의 제한값보다 작아 국부좌굴에 대한 안전성은 만족되었다.

2.2 실험 및 재료시험

실험은 하부 기둥의 단부를 힌지로 지지하고 보의 단부를 이동단으로 지지한 상태에서 기둥의 상부를 변위 점증 방식으로 반복가력하는 방법을 따랐고, 재하이력은 KBC 2016 0722. 2.4를 따랐으며 0.04 rad의 변위각(횡변위 88.8 mm)까지 각 사이클에 맞춰 가력한 후 마지막으로 약 120 mm까지 단조 가력하여 실험을 종료하였다.

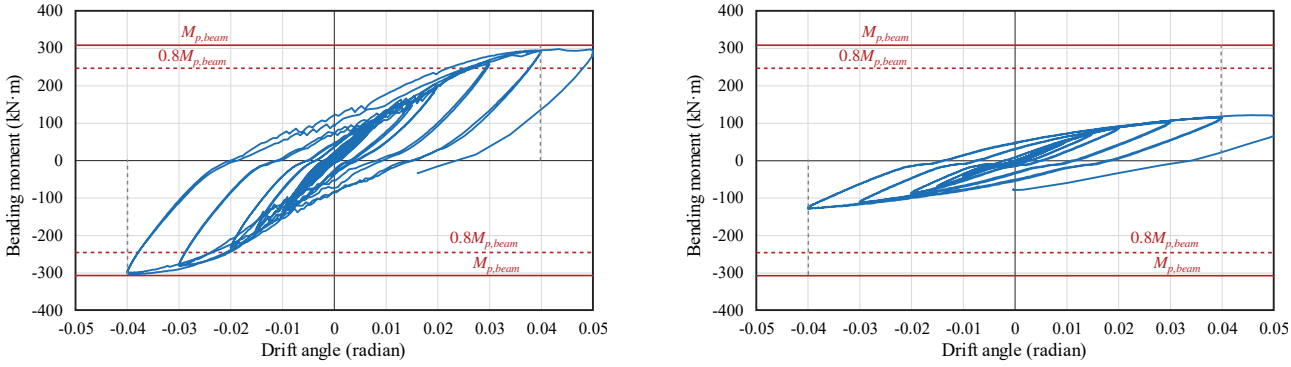
KS B 0802을 따라 실험체 제작에 사용된 기둥, 보, 연결 강판의 인장강도시험을 실시하였다. 기둥에 사용된 ㄷ형강의 항복강도와 인장강도는 각각 259 MPa와 421 MPa이었고, 보에 사용된 ㄷ형강은 각각 344 MPa와 461 MPa이었으며, 연결 강판은 각각 299 MPa와 455 MPa으로 나타났다.

2.3 실험결과 및 고찰

가력 지점에서 측정된 하중-횡변위를 보 단부에 작용하는 휨모멘트와 횡변위각의 관계로 변환하여 Fig. 3에 나타내었고, 횡변위각 0.04 rad에서 실험 상황을 Fig. 4에 나타내었다.

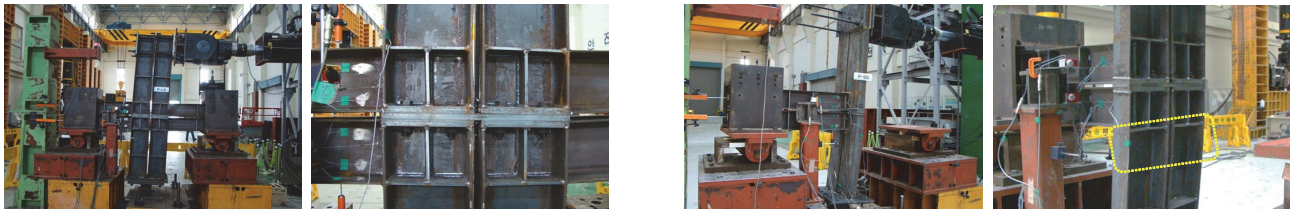
*x*방향 실험체의 최대하중은 +362.3 kN과 -371.3 kN이었으며, *y*방향 실험체의 최대하중은 +57.6 kN과 -60.9 kN이었다. *x*방향 실험은 횡변위각이 0.04 rad에 도달하였을 때도 하중이 떨어지지 않는 이력거동을 보이고 있으며, *y*방향 실험도 0.04 rad의 횡변위각까지 하중이 계속해서 상승하는 이력거동을 보이고 있다.

반면에 보의 내력을 기준으로 *x*, *y*방향 실험결과를 비교해 보면 큰 차이가 나타나고 있다. 재료시험에서 얻은 항복강도를 이용해 계산한 보 부재 ㄷ형강의 항복모멘트(M_y)는 67.1 kN·m이고, 소성모멘트(M_p)는 77.1 kN·m이다. 각 접합부에는 4개의 보가 비합성 상태로 연결되어 있으므로 보가 항복모멘트와 소성모멘트에 도달하기 위해 모듈 간 접합부는 약 268 kN·m과 308 kN·m의 성능을 보여야 한다. *x*방향 모듈 간 접합부는 문제없이 보 단면의 소성모멘트에 이르는 하중까지 저항하는 것으로 확인되지만, *y*방향 모듈 간 접합부는 보의 항복모멘트까지의 하중에 저항하지 못하고 있다. 이런 현상은 보 플랜지에 나란하게 9 mm 스티프너로 기둥 내부를 보강하였지만, 기둥 단면의 약축에 대한 휨 강성이 작기 때문이다. 이로 인해 스티프너를 벗어난 기둥 부분에서 소성힌지가 발생하거나 국부적인 좌굴이 발생할 수 있을 것이다. 비록 이런 현상이 실험에서 눈에 띄게 나타나지 않았지만 Fig. 4(b)에 점선으로 강조된 부분과 같이 기둥 단면의 플랜지가 변형되는 모습이 관찰되었다. 따라서 ㄷ형강으로 제작된 모듈에서 기둥 단면이 약축에 대해 휨을 받는 경우 보의 저항 성능을 확보하기 위해 기둥에 보강이 필요함을 알 수 있다.



(a) Short edge connection (*x*-direction) (b) Long edge connection (*y*-direction)

Fig. 3. Relationships between bending moment and drift angle



(a) Short edge connection (*x*-direction) (b) Long edge connection (*y*-direction)

Fig. 4. Behavior of specimens at 0.04 rad drift angle

3. 모듈 간 접합부 해석모델

3.1 유한요소 모델링

ㄷ형강의 기둥과 보로 구성된 모듈에서 기둥의 선행 파괴를 방지하기 위한 보강 상세에 대한 해석에 앞서 적절한 해석모델을 찾기 위해 장변(y) 방향 실험체를 대상을 Abaqus 6.14[8]를 이용한 유한요소해석을 계획하였다. 실험체가 대칭으로 제작된 것을 감안하여 절반의 기하학적 조건을 갖도록 Fig. 5와 같이 모델링이 사용되었다.

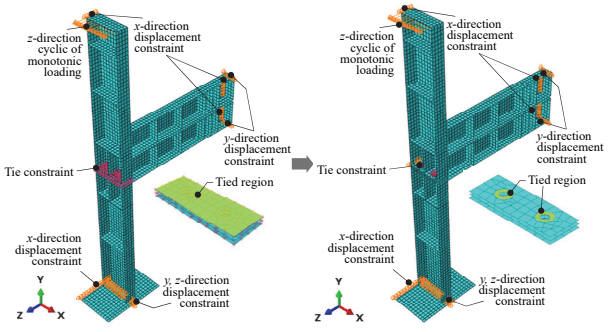


Fig. 5. Finite element models of long edge connection

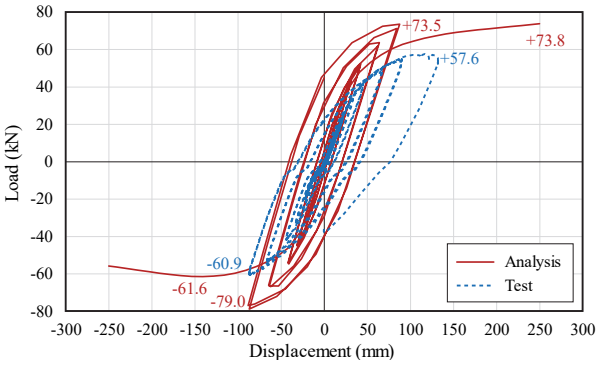
실험체의 기둥과 보는 플랜지가 부등두께인 ㄷ형강이 사용되었지만, 해석에서 플랜지의 평균 두께가 적용된 ㄷ형강으로 모사되었다. 해석모델에 사용된 요소는 3차원 4절점 쉘요소인 S4R이 대부분 사용되었고, 기둥 단부에 용접된 엔드 플레이트의 볼트 구멍 주변에는 S3 쉘요소가 일부 사용되었다. 요소의 크기는 전체적으로 약 25 mm × 25 mm 이하가 되도록 요소망이 나뉘었고, 주요 부재들의 물성은 재료시험에서 얻은 데이터로 입력되었고, 두께 9 mm인 스티프너만 설계기준에 따른 강도가 사용되었으며, 탄성계수는 2.05×10^5 MPa, 프아송비는 0.3으로 공통적으로 적용되었다.

실험체와 동일하게 보의 단부가 이동단이고, 힌지로 지지된 기둥 상부에 가력되도록 Fig. 5와 같은 경계조건이 부여되었다. 실험체에서 상부 모듈과 하부 모듈은 기둥 단부에서 볼트로 접합되었으며, 육안으로 관찰된 특별한 변형은 없었기 때문에 이를 감안하여 기둥의 엔드플레이트와 연결강판이 일체화되도록 타이(tie) 조건이 표면 전체에 부여된 경우와 볼트 구멍 직경의 2배 범위에만 부여된 경우를 모델링하였다. KBC 2016 0722.2.4에 따라 0.04 rad의 횡변위각까지 반복변위가 가해지는 반복가력 해석과 정방향과 부방향으로 250 mm까지 변위가 가해지는 단조가력 해석이 실시되었다.

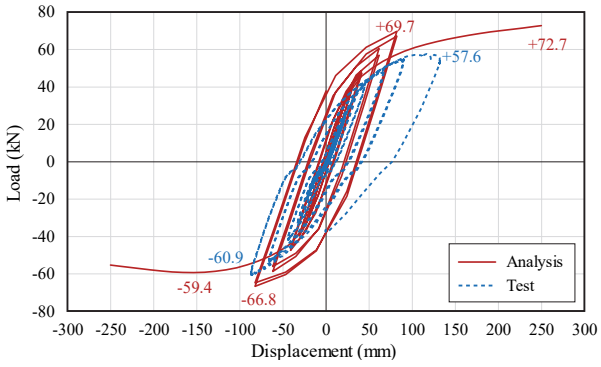
반복가력에 따른 거동이 정밀하게 해석되기 위해 경화법칙에 따른 모델이 적용되어야 한다. 경화모델은 바우싱거 효과를 표현하기 위해서 더 정교한 운동학적 경화모델이 사용되어야 하지만 여기서는 각 방향으로 단조가력해석도 실시되었기 때문에 해석 시간 단축을 위해 등방성 경화모델이 적용되었다. ㄷ형강 및 연결 강판 등의 재료는 바이리니어 모델이 적용되었으며, 재료시험을 참고하여 인장강도에 해당하는 변형도는 약 0.1로 가정되었다.

3.2 해석결과 비교

타이 구속 면적에 따른 반복 및 단조가력의 해석결과와 실험결과를 Fig. 6에 비교하였다. 연결 강판 전체 표면이 일체화된 반복가력 해석은 실험의 정·부 최대하중과 각각 27.6 %와 29.8 %의 차이를 보였지만, 볼트 구멍 주변이 일체화된 반복가력 해석은 21.0 %와 9.8 %의 차이를 보였다. 비록 단조가력 해석결과에서 두 경우 모두 최대하중은 유사한 것으로 나타났지만, 정가력 88.8 mm 변위까지 결과는 볼트 주변만을 일체화한 경우가 실험결과에 가까운 거동을 보이고 있다.



(a) Tied overall surface of connecting plate



(b) Tied surface of connecting plate around bolt-hole

Fig. 6. Comparison of analytical and experimental results

기둥 하부의 힌지 지점의 중심이 ㄷ형강의 도심과 일치하지 않아 정방향과 부방향의 비대칭 거동이 나타나고 있으며 정가력 범위에서는 +250 mm의 변위에서도 강성이 증가하는 현상을 보이고 있으나, 부가력 범위에서는 -150 mm 부근에서 최대내력을 보이고 있다. 한편, 동일 모듈에서 장변(*y*축) 보의 한쪽 단부가 정가력을 받으면 다른 쪽 단부는 부가력을 받으므로 정가력과 부가력의 최대내력 평균값으로 보의 항복모멘트와 소성모멘트까지의 저항 여부를 판별하는 것이 타당할 것이다. Fig. 7은 볼트 구멍 주변만이 타이 구속으로 모델링된 해석으로부터 얻은 변형 및 응력분포를 실험 사진과 비교한 것이다. 연결 강판 전체 표면에 타이 조건을 부여한 경우도 변형과 응력분포는 유사하였지만, 정가력에서 내력이 과대평가될 가능성이 있는 것으로 나타났다. 따라서 이와 같이 해석결과를 비교하였을 때 볼트 구멍 주변만을 타이로 구속하는 조건으로 반복가력 해석과 단조가력 해석을 비교하고, 정·부 단조가력의 내력을 평균하여 검토하는 것이 바람직한 해석적 평가 방법이 될 것으로 판단된다.

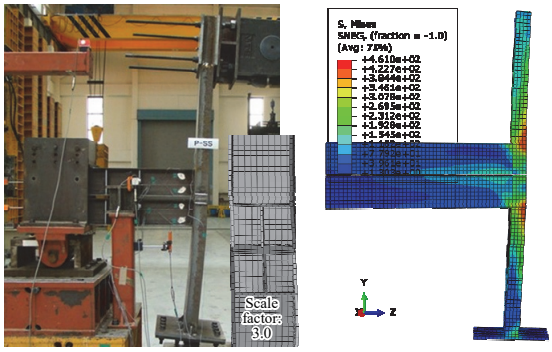
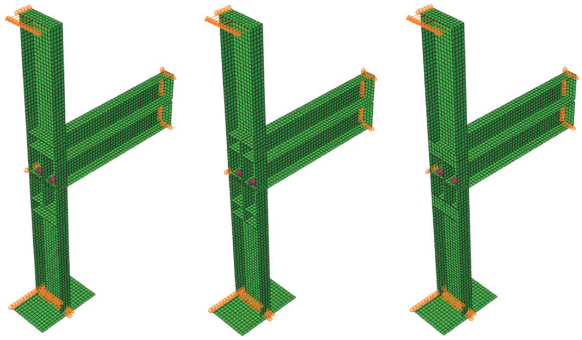


Fig. 7. Comparison of deformed shape

4. 모듈 간 접합부 보강 상세 해석

4.1 ㄷ형강 기둥의 보강 상세

일반적으로 보의 공칭휨강도(M_n)는 판-폭두께비와 횡지지길이에 따라 결정되어 소성모멘트(M_p)를 초과하지 못한다. 그러나 모듈을 구성하는 장변 방향 ㄷ형강 보는 상부 플랜지가 콘크리트 슬래브와 합성되거나 단변 방향의 장선에 의해 지지되어 횡좌굴이 방지되어 공칭휨강도는 소성휨모멘트로 결정될 가능성이 높다. 따라서 장변 방향 ㄷ형강 보의 공칭휨강도를 확보하기 위해서 접합되는 ㄷ형강 기둥의 보강이 필요하므로 Fig. 8에 제시된 세 가지 보강 방안의 효과를 유한요소해석을 통해 평가하고자 한다.



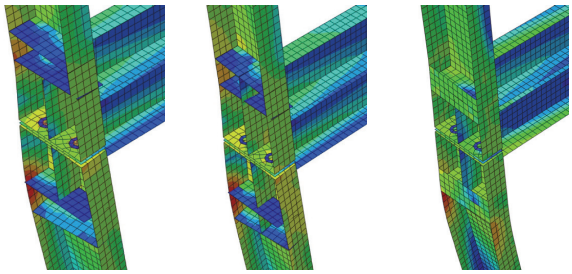
(a) H-stiffener (b) HV-stiffener (c) C-stiffener

Fig. 8. Stiffener details of column with C-channel section

첫 번째 보강 방법은 기존 수평 스티프너에서 100mm 떨어진 부분에 수평 스티프너를 추가하는 것이고, 두 번째 방법은 기존 수평 및 수직 스티프너에 ㅜ·ㅗ 형태의 스티프너를 추가 보강하는 것이며, 세 번째 방법은 기존 수평 스티프너를 중심으로 폭 100 mm의 스티프너를 커버(cover)와 같이 측면에 세워 용접하는 것이다. 추가되는 스티프너의 두께는 공통적으로 9 mm이며 강종은 SS400을 적용하였다.

이에 대한 기하학적 해석모델은 보강 방법에 따른 내력 증가 효과를 직접적으로 비교하기 위해 실험체의 보와 기둥에서 볼 수 있었던 접합부와 단부의 스티프너를 제외한 나머지를 모두 생략하였다. 또한 보와 기둥의 재료강도 차이가 해석결과에 미치는 영향이 없도록 하고, 해석결과를 계산된 공칭휨강도와 비교할 수 있도록 재료 특성은 설계기준강도로 입력되었다. 그러나 경계조건은 Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 실험에서 취하였던 조건과 동일하게 적용되었다.

단조 및 반복가력에 대한 해석은 3.1절에 서술된 방법과 같이 실시되었다. 해석결과는 보강 상세별 비교를 위해 접합부 주변의 변형과 응력분포를 Fig. 9에 나타내었고, 정·부 방향의 단조가력의 하중-변위 관계를 Fig. 10에 비교하였다.



(a) H-stiffener (b) HV-stiffener (c) C-stiffener

Fig. 9. Stress distribution and deformation for stiffener details

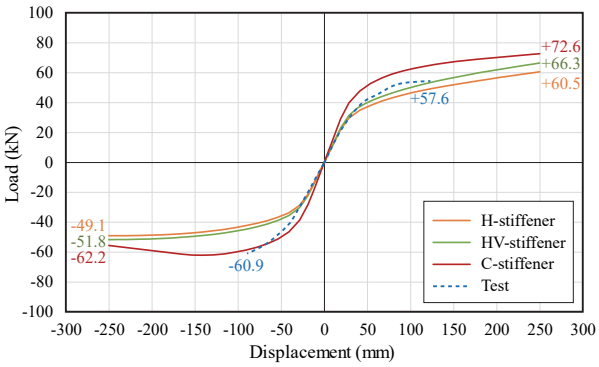


Fig. 10. Comparison of relationships of load and displacement

수평 및 수평-수직 스티프너 보강 방법은 기존 수평 스티프너가 기둥에서 떨어져 나오는 결과를 보이고 있다. 즉 변형이 커지면 기존 스티프너의 용접부가 파단될 가능성이 있다는 의미이다. 또한 색상으로 표현된 응력 분포를 살펴보면 수평 및 수평-수직 스티프너는 응력이 낮아 보강 효과가 크지 않다는 것을 알 수 있다. 반면 측면에 세워 설치한 커버형 스티프너는 기존 스티프너와 함께 기둥에 용접된 상태가 유지되며, 기둥에 나타나는 응력과 동일 수준의 응력이 분포되어 상대적으로 보강 효과가 크다고 보인다.

내력에서도 수평 및 수평-수직 스티프너는 거의 같은 내력을 보였으나, 커버형 스티프너의 경우 수평 스티프너에 비해 최소 20 % 이상의 내력 증가를 보이고 있어 보강 효율이 높은 것을 알 수 있다. 하지만 ㄷ형강 보가 공칭휨강도인 소성모멘트에 도달하기 위해 가해져야 하는 하중인 96.8 kN에 비해 64 % - 75 % 수준에 그쳐 이를 만족할 수 있는 보강 범위를 찾는 것이 필요한 것으로 나타났다.

4.2 커버형 스티프너 보강 범위

개방형 단면인 ㄷ형강 기둥과 ㄷ형강 보로 구성된 모듈에서 보의 내력이 설계 강도인 공칭휨강도까지 발휘되기 위해서는 모듈 간 접합부에서 기둥이 먼저 좌굴되거나 파괴되지 않도록 적절한 보강이 있어야 하지만 설계 프로그램 등에서 이에 대해 자동으로 검토되지는 않는다. 물론 모든 개방형 단면의 기둥과 보 조합에서 이런 문제가 있다고 할 수 없지만, 4~5층이고, 3 m × 6 m의 바닥면적을 갖는 주거용 모듈을 설계하여 실험체 제작에 사용된 ㄷ형강에서는 검토가 필요한 사항이 되었다. 제시된 보강 방식 외에 다양한 보강 방법이 있겠지만 커버형 스티프너가 보강 효율이 높은 것으로 나타나 적정 범위를 평가하기 위해 해석을 계획하였다.

2.2절에 서술한 실험 재료의 시험결과를 살펴보면 기둥과 보에 동일한 강종이 적용되었지만 보의 항복강도가 높다. 비록 구조설계는 설계기준강도가 적용되어 검토되는 것이 원칙이지만 실제 안정적인 거동을 위해 기둥의 항복강도를 높이는 것이 ㄷ형강 기둥에 대한 보강 방안으로 우선 고려되어야 할 것이다. 이에 따라 커버형 스티프너의 보강 범위 해석에서는 기둥의 강종은 SM490으로 변경되었다.

Fig. 11에 나타낸 것과 같이 해석의 변수인 커버형 스티프너의 보강 범위는 4.1절에서 제시된 경우와 같은 +100 mm를 기준으로 50 mm씩 늘려 +150 mm, +200 mm, +250 mm로 설정하였다. 커버형 스티프너의 최대 보강 범위를 +250 mm로 설정한 이유는 ㄷ형강인 기둥 안쪽에서 용접 시공성 때문이다. 모듈 제작 시 용접봉을 사용하는 피복아크 용접기 또는 솔리드와이어를 사용하는 불활성가스금속아크 용접기(MIG 용접 또는 CO_2용접)로 커버형 스티프너와 ㄷ형강 기둥으로 형성되는 폐쇄 단면 구간에서 용접 가능한 깊이는 보 높이의 2배 정도로 확인되었다.

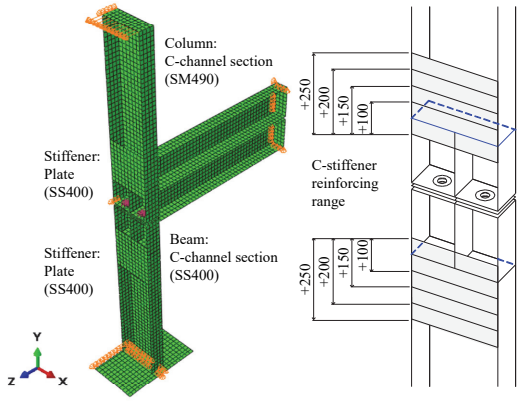


Fig. 11. Analysis parameters of S-stiffener reinforcing range

기하학적 모델은 중간 스티프너는 모두 생략되었고, 경계조건은 실험체 지지 조건과 같도록 모델링되었다. 기둥을 제외한 보와 스티프너의 강종은 SS400으로 가정되었고, 커버형 스티프너의 두께는 9 mm로 유지되었다. 요소망 크기, 사용 요소 및 상하 모듈의 타이 조건 등도 동일하게 적용되었다. 요소망 크기가 일정하게 나뉘었기 때문에 기둥을 지지하는 힌지의 중심이 기둥 단면의 도심과 일치되지 못하고 엔드 플레이트의 중심에 있도록 경계조건이 설정되었다.

해석결과는 커버형 스티프너의 보강 범위에 따른 내력 상승효과를 비교할 수 있도록 Fig. 12에 정리하였으며, 보강 범위별 응력분포는 Fig. 13에 비교하였다.

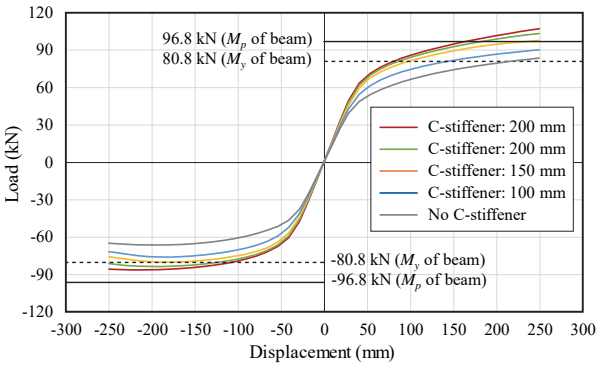


Fig. 12. Strength enhancement according to C-stiffener ranges

Fig. 12에 나타낸 보강 범위에 따른 정·부 방향 해석결과를 살펴보면 정가력 범위에서는 계속해서 내력이 증가하고 부가력 범위에서는 최대내력 이후 하중이 완만하게 떨어지거나 유지되는 거동을 볼 수 있다. 커버형 스티프너가 없이 기존 스티프너만 있는 경우 정가력 최대내력은 +83.5 kN이고 부가력 최대내력은 -66.8 kN으로 평균 75.2 kN으로 나타났다. 100 mm 보강은 +90.1 kN과 -76.5 kN으로 평균 83.3 kN이었고, 150 mm 보강은 +97.6 kN과 -80.6 kN으로 평균 89.1 kN이었으며, 200 mm 보강은 +103.1 kN과 -84.1 kN으로 평균 93.6 kN으로 나타났다. 끝으로 250 mm까지 보강된 경우 +107.0 kN과 -86.8 kN으로 평균 96.9 kN이었다. 이에 따라 SS400 ㄷ-200×80×7.5×11 보의 공칭휨강도인 소성모멘트에 도달하기 위한 하중인 96.8 kN보다 큰 내력을 얻기 위해서 최소 250 mm 보강이 이루어져야 함을 알 수 있다. 그러나 이것보다 보강 범위를 확장하더라도 내력 증가 비율은 높지 않아 보강 효율은 떨어질 것으로 추정된다.

기둥의 항복강도인 315 MPa를 한계값으로 설정한 응력등고선을 비교한 Fig. 13에서 회색으로 표시된 부분이 항복된 부분이다. 정방향 가력에서는 커버형 스티프너의 보강 범위가 확장될수록 하층 기둥에서 항복 범위도 확대되는 것으로 나타나고, 부방향 가력에서는 상층 기둥에서 항복 범위가 확대되는 것을 볼 수 있다. 커버형 스티프너가 없는 경우 기둥 플랜지에서 항복이 일어나는 구간은 보 높이의 약 2배에 해당하지만 250 mm 커버형 스티프너로 보강된 경우 기둥 플랜지의 항복 구간은 보 높이의 약 3배까지 확대되고 있다. 항복 범위가 커버형 스티프너 보강 범위의 증가와 함께 확대되는 현상은 부방향 가력에서 명확히 확인할 수 있으며 커버형 스티프너 보강 구간에서는 기둥 플랜지 폭 전체가 항복하지 않고 저항할 수 있는 일부분이 남아 있고, 보에서 응력은 더욱 상승하는 것으로 나타나고 있다.

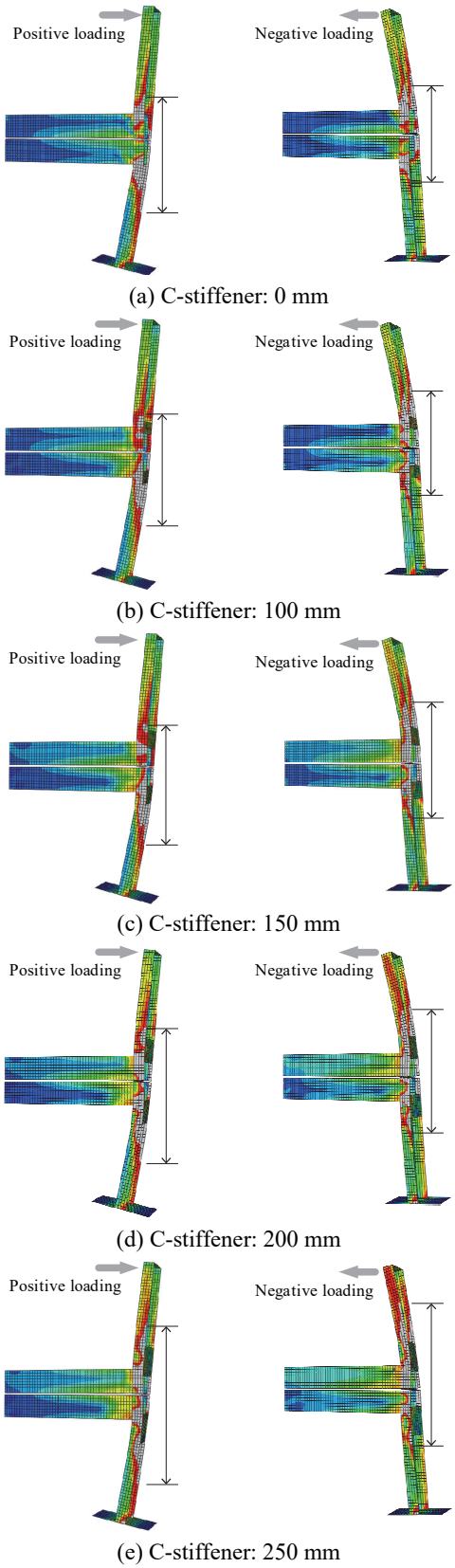


Fig. 13. Plastic zone at column according to C-stiffener ranges

5. 결 론

개방형 단면인 ㄷ형강을 기둥과 보에 사용한 모듈이 조립된 모듈러 골조의 거동을 알아보기 위해 모듈 간 실험과 적절한 보강 방법을 찾기 위한 해석적 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 모듈의 기둥과 보에 ㄷ형강이 사용되었을 때 기둥 단면이 약축에 대해 휨을 받는 모듈 간 접합부 실험을 통해 기둥의 조기 파괴로 장변 방향 보의 공칭휨강도가 발휘되지 않을 가능성이 높은 것으로 나타났다.

(2) 일반적으로 조립 모듈에서 바닥 보와 천장 보를 일체화하지 않는 경우 각 가력방향에 따라 저항하는 보가 바뀌기 때문에 바닥 보의 공칭휨강도를 확보하기 위해 천장 보에도 동일한 부재를 사용하는 것이 바람직하다.

(3) ㄷ형강이 기둥 보로 사용된 모듈 간 접합부에 대한 해석에서 등방성경화모델이 사용된 반복가력 해석은 정가력 범위에서 과대평가할 우려가 있으므로 단조가력 해석을 통해 이를 보완하는 것이 필요하다.

(4) ㄷ형강 기둥이 약축에 대해 휨을 받을 때 ㄷ형강 보의 공칭휨강도를 보장하기 위해 기둥의 보강이 필요하며 제시한 보강 방법 가운데 스티프너를 측면에 세워 용접하는 커버형이 가장 효율이 좋은 것으로 나타났다.

(5) 실험에 사용된 단면 조건에서 보의 공칭휨강도인 소성모멘트를 보장하기 위해 커버형 스티프너의 적정 보강 길이는 250 mm로 나타났으며 이것보다 길어지면 내력은 상승하지만 용접이 어려워질 수 있다.

감사의 글

이 연구는 국토교통과학기술진흥원의 모듈러 건축 중고층화 및 생산성 향상 기술개발(20RERP-B082884-07) 및 수요자 맞춤형 조립식 주택 기술 개발 및 실증단지 구축(17AUDP-C068788-05)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

[1] Lawson, R.M., Ogden, R., and Goodier, C.I. (2014) *Design in Modular Construction*, CRC Press, USA.

[2] Fathieh, A., and Mercan, O. (2016) Seismic Evaluation of Modular Steel Buildings, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.122, pp.83-92.

[3] Styles, A.J., Luo, F.J., Bai, Y., and Murray-Parkes, J.B. (2016) Effects of Joint Rotational Stiffness on Structural Responses of Multi-Story Modular Buildings, *Proceedings of the International Conference on Smart Infrastructure and Construction*, ICE Publishing, UK, pp.457-462.

[4] Gunawardena, T. (2016) *Behaviour of Prefabricated Modular Buildings Subjected to Lateral Loads*, Ph.D Dissertation, The University of Melbourne, Australia.

[5] Deng, E.-F., Zong, L., Ding, Y., Dai, X.-M., Lou, N., and Chen, Y. (2018) Monotonic and Cyclic Response of Bolted Connections with Welded Cover Plate for Modular Steel Construction, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.167, pp.407-419.

[6] Chen, Z., Liu, J., Yu, Y., Zhou, C., and Yan, R. (2017) Experimental Study of an Innovative Modular Steel Building Connection, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.139, pp.69-82.

[7] Annan, C.D., Youssef, M.A., and El Naggar, N.H. (2008) Seismic Overstrength in Braced Frames of Modular Steel Buildings, *Journal of Earthquake Engineering*, Taylor & Francis, Vol.13, No.1, pp.1-21.

[8] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2014) *Abaqus Analysis User's Guide, Ver. 6.14*, DSS, USA.

요 약: 모듈러 건축물을 구성하는 철골계 모듈은 4개 코너에 기둥이 설치된 골조식 방식으로 주로 구성되고 있다. 골조식 방식에 사용되는 부재는 모듈과 모듈 사이의 접합 방식에 따라 여러 단면이 사용될 수 있다. 어떤 단면이 사용되었더라도 모듈 간 접합은 공장 마감도에 따라 조립이 가능해야 한다. 일반적으로 기둥이 ㄷ형강 단면이라면 엔드 플레이트가 용접된 기둥 단부를 볼트로 접합하여 모듈 간 접합이 쉽고 비마감 부위가 최소화될 수 있다. 그러나 ㄷ형강 기둥이 약축에 대해 휨을 받는 경우 기둥-보 접합부 및 모듈 간 접합부에서 기둥의 파괴가 선행될 수 있다. 이에 따라 1방향 슬래브 구조로 하중을 전달받는 장변 보는 공칭휨모멘트의 성능을 발휘하지 못하게 된다. 이 연구에서는 ㄷ형강이 기둥으로 사용된 골조식 모듈의 구조안전성을 확보하기 위해 기둥 단면의 축방향에 따른 모듈 간 접합부의 거동을 실험을 통해 평가하고 적절한 보강 상세를 유한요소해석을 통해 조사하였다.

핵심용어 : 모듈러 건축, 모듈 간 접합, 개방형 단면, ㄷ형강, 보강 상세