

축력 및 전단력을 받는 RC 띠장-철골 보 접합부의 접합연결재 개발

Development of Connection Details of RC Wale-Steel Beam Joint
Subjected to Axile and Shear Load

김 승 훈*
Kim, Seung-Hun

Abstract

The RC wale-steel beam stud connection may have smaller moment and shear resistance because the tensile and shear capacity of the studs are limited by the depth of RC beam. Especially, they are subjected to compressive axial load. This paper describes the experimental works to develop the connection details of RC wale-steel beam joints subjected to shear and axial loads. Shear connectors developed in this study are closed C type deformed bar, opened C type deformed bar, and U type deformed bar. From shear test, the shear performance of RC wale-steel beam joint with the developed connectors are compared with the stud connection. Test results indicated that the developed connectors were very effective to increase the shear strength.

요 지

RC 띠장과 철골 보의 스티드 접합부는 RC 띠장의 춤이 제한되므로 스티드의 인장 및 전단성능이 저하되어 접합부의 휨 및 전단 저항성능이 감소될 수 있다. 특히 RC 띠장-철골 보 접합부는 토압 및 수압에 의한 압축력을 받는다. 본 논문은 압축력과 전단력을 받는 RC 띠장-철골 보 접합부를 대상으로 접합연결재를 개발하기 위한 실험적 연구를 나타내고 있다. 본 연구에서 개발된 접합연결재는 개방형 C형 철근, 폐쇄형 C형 철근, U형 철근 등이다. 실험을 통하여 개발된 접합연결재를 사용한 접합부의 전단 성능이 스티드 접합부와 비교된다. 실험결과에서 개발된 접합연결재가 RC 띠장-철골 보 접합부의 전단강도를 증가시키는데 매우 효과적임을 나타내었다.

Keywords : RC wale, Shear Connector, C Type Bar, U Type Bar, Stud

핵심 용어 : RC 띠장, 전단 연결재, C형 철근, U형 철근, 스티드

* 정회원, LG건설(주) 기술본부 과장

E-mail : kimseunghun@empal.com 017-412-7511

• 본 논문에 대한 토의를 2004년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2004년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

철근콘크리트 부재와 철골부재의 핀 접합에는 시공의 편리성과 우수한 전단성능으로 인하여 스테드(stud)가 많이 이용되고 있다. 하지만 핀 접합되는 콘크리트 부재의 크기가 작을 경우 Fig. 1에서와 같이 연단거리(c_1)가 짧아져 콘크리트의 브레이크아웃 전단 파괴(concrete breakout shear failure)가 일어나기 쉽다.

특히, 철골 보와 철근콘크리트 보의 접합일 경우 이러한 콘크리트의 브레이크아웃 파괴가 아닌 스테드의 전단파괴가 먼저 발생되도록 하기 위한 연단거리를 확보하기 힘들다. 이는 전단력이 압축력에 비해 비교적 적게 작용하는 노출형 주각부와는 달리 보와 보의 수평접합부에서는 전단력이 크게 작용하고 배치되어야 하는 스테드의 수도 많아지기 때문이다. 또한 스테드의 수가 많아지게 되면 완전 핀 접합이 아닌 소정의 휨강도를 보유하는 반강접 거동을 하게 된다. 하지만 기존 연구에 의하면 스테드의 경우 전단성능에 비해 인장성능이 약하여 휨 모멘트에 의해 취성파괴되기 쉬운 것으로 보고되고 있다.¹⁾ 따라서 철근콘크리트 부재와 철골 부재의 수평 전단 접합에 있어서 전단력이 크게 작용하여 스테드 접합이 어려울 경우, 보다 효율적으로 전단력을 전달시킬 수 있는 접합 연결재의 개발이 필요하다.

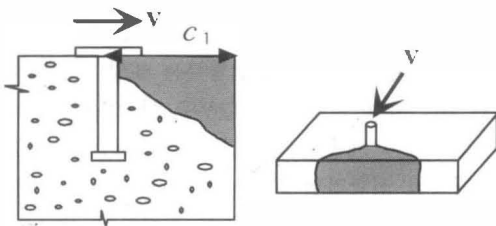


Fig. 1 콘크리트의 브레이크아웃 전단 파괴

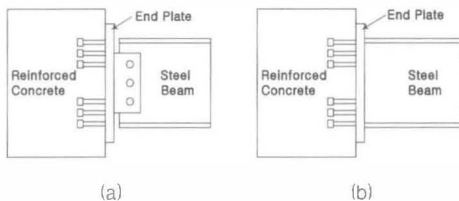


Fig. 2 철근콘크리트 부재와 철골 보의 핀접합

최근 지하함막이 공법으로 개발된 SPS 공법²⁾(지하굴도 공사시 사용되는 버팀대를 본 구조물의 구조재로 사용함)에 의한 지하 골조에서 Fig. 2(b)와 같이 철근콘크리트 띠장과 철골 보의 접합부가 발생한다.

이러한 접합부는 보에서 전달되는 전단력 및 휨모멘트뿐만 아니라 토압 및 수압에 의한 압축력을 받는다. 특히, SPS공법에서 철골보는 굴토시 버팀대로 사용되므로, 철골 보의 플랜지를 엔드 플레이트(end plate)에 강접합하게 설계하고 있다. 따라서 접합부에는 압축력, 전단력, 휨모멘트 모두가 전달되므로 이러한 부재력에 효율적으로 저항할 수 있는 접합 연결재가 필요하다.

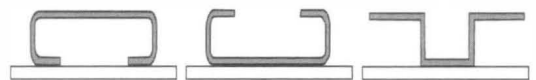
본 연구자들은 철근콘크리트 띠장-철골 보 접합부를 대상으로 폐쇄 C형 철근, 개방 C형 철근, U형 철근 등의 연결재를 개발하였다. 본 연구에서는 전단연결재의 종류를 변수로 한 전단실험을 실시하여 개발된 연결재와 스테드의 전단 내력 및 변형을 비교함으로써 개발된 접합 연결재의 전단성능을 평가하고자 한다.

2. 접합 연결재 및 기준식

2.1 접합 연결재 개발

철근콘크리트 띠장-철골 보 접합 연결재로 개발된 폐쇄 C형 철근, 개방 C형 철근, U형 철근 등의 상세를 Fig. 3에 나타내었다.

폐쇄 C형 철근과 개방 C형 철근은 보의 축방향으로 엔드 플레이트에 접합된다. 그리고 U형 철근은 전단성능 향상과 함께 스테드의 약한 인장 성능을 보완하기 위해 개발된 연결재로서, 기존의 인장 실험결과³⁾ 인장성능을 크게 증가시키는 것으로 나타났다.



(a) 폐쇄 C형 철근 (b) 개방 C형 철근 (c) U형 철근

Fig. 3 접합연결재 상세

2.2 기준식

개발된 접합 연결재를 사용한 접합부는 크게 연결재의 전단파괴와 콘크리트의 브레이크아웃 파괴가 발생할 수 있다. 콘크리트 브레이크아웃 파괴되는 스테드 및 앵커 접합부의 전단내력 산정은 일반적으로 Table 1과 같이 ACI 349-97⁴⁾, ACI 318-02⁵⁾, PCI 5th Ed.⁶⁾ 등의 기준식을 많이 사용하고 있다. 각 식은 강도 감소계수를 제외한 공칭내력산정식이다. ACI 318-02의 기준식은 유럽에서 제안된 CCD (Concrete Capacity Design) 설계방법을 바탕으로 하고 있다. 본 연구에서는 이러한 기준식을 스테드 및 개발된 철근 연결재에 대해 적용하여 내력을 평가한다.

3. 실험

3.1 실험체 계획

철근콘크리트 띠장-철골 보 접합부를 대상으로 Table 2에서와 같이 접합 연결재를 주요 변수로 한 실험체 총 6개를 계획하였다. 실험체의 파괴모드가 전단파괴(Shear Failure)임을 고려하여 SF를 실험체 명 앞에 붙였으며, 스테드를 사용한 SF-A 실험체를 기준으로 하였다. 그리고 폐쇄 C형 철근과 개방 C형 철근을 연결재로 사용한 SF-F1과 SF-F2 실험체를 계획하였으며 이러한 실험체는 압축력을 작용시켰다. 접합부에 작용하는 압축력은 전단마찰력을 크게 증가 시키게 되므로 실험 여건을 고려하여 전단 단면적이 비교적 큰 U형 연결재를 사용한 SF-F3 실험체와 스테드 수가 2배인 SF-E 실험체는 기준실험체와 형상이 동일한 SF-C1 실험체와 같이 축력을 가하지 않는 상태에서 실험을 하여 전단 단면적에 따른 전단성능을 비교하고자 하였다. 각 실험체의 입면 및 평면에 대한 단면 형상 및 배근상황을 Fig. 4에 나타내었다.

철골 보는 H-300×150×13×9롤. 엔드 플레이트는 30mm의 강판을 사용하여, 접합부에 비해 큰 휨내력을 가지도록 하였다. 엔드 플레이트에는 접합 연결재가 용접되어있다. 스테드는 직경 13mm, 문힘깊이 80mm이며, 개발된 철근 연결재는 D13을 사용하였다.

Table 1 접합부의 브레이크아웃 파괴전단내력 산정 기준식

기준	기준식
ACI 349-97 (이하 ACI 식이라 함)	$V_{ACI} = \frac{A_p}{A_{po}} V_{cbo}$ 여기서, $V_{cbo} = 4\sqrt{f_{ck}} \frac{\pi}{2} c_1^2$
ACI 318-02 (이하 CCD 식이라 함)	$V_{CCD} = \frac{A_v}{A_{vo}} \cdot \psi_5 \cdot \psi_6 \cdot \psi_7 \cdot V_b$ 여기서, $V_b = 8 \left(\frac{1}{d_0} \right)^{0.2} \cdot \sqrt{d_0} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot c_1^{1.5}$ $A_{vo} = 4.5 c_1^2$ $\psi_5 = \frac{1}{1 + \frac{2e_v}{3c_1}} \leq 1$ $\psi_6 = 0.7 + 0.3 \frac{c_2}{1.5c_1} \leq 1$
PCI 5th Ed. (이하 PCI 식이라 함)	$V_{PCI} = V_c' C_2 C_3 C_4$ 여기서, $V_c' = 12.5c_1^{1.5} \lambda \sqrt{f_{ck}}$ $C_2 = 1 + \left[\frac{s_1}{3.5c_1} \right] \leq n_s$ $C_3 = \frac{h}{1.3c_1} \leq 1.0$ $C_4 = 0.4 + 0.7 \left[\frac{c_2}{c_1} \right] \leq 1.0$
여기서,	A_p : 전단 파괴면 투영면적 A_{po} : 스테드 1개의 전단 파괴면 투영면적 A_v : 전단 파괴면 투영면적 c_1 : 하중 방향에 대한 연단거리 c_2 : 하중 방향과 수직한 연단거리 C_2 : 스테드 중심간 거리(s_1)에 대한 조정 계수 C_3 : 콘크리트 부재 두께(h)에 대한 조정 계수 C_4 : 코너 영향에 대한 조정 계수 d_0 : 스테드의 몸통 직경 e_v' : 스테드 중심에서 작용 전단력까지의 거리 l : 전단에 대해 저항하는 스테드의 문힘깊이 n_s : 후열의 스테드 개수 λ : 콘크리트 비중계수 (일반 콘크리트 : 1) ψ_5 : 편심하중을 고려하는 계수 ψ_6 : 하중 방향과 수직한 연단거리(c_2)를 고려하는 계수 ψ_7 : 콘크리트의 균열유무에 대한 계수 (=1.0, 1.2, 1.4)

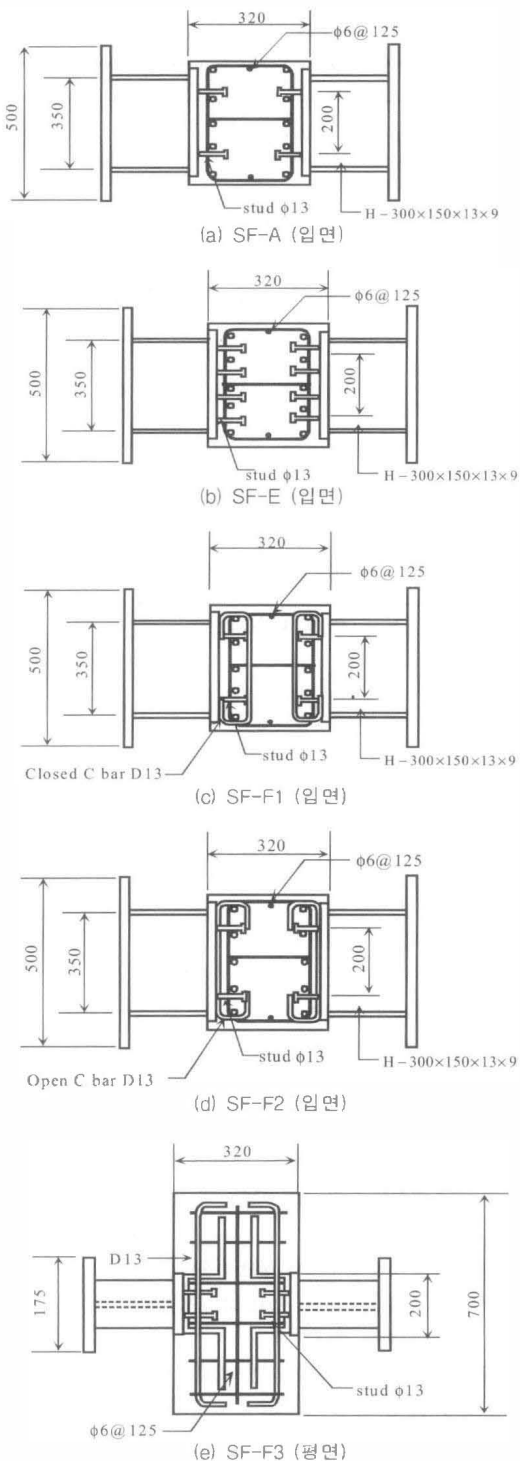


Fig. 4 실험체 형상 및 배근 상황

Table 2 실험체 일람

실험체명	압축력 (kN)	연결재 종류	전단연결재 단면적(mm ²)
SF-A	294	스터드 4개	530.9
SF-C1	0	스터드 4개	530.9
SF-E	0	스터드 8개	1061.8
SF-F1	294	폐쇄 C형 철근 2개	506.8
SF-F2	294	개방 C형 철근 2개	506.8
SF-F3	0	U형 철근 4개 스터드 4개	1544.5

연결재가 묻히는 RC 띠장의 단면은 32cm×40cm, 길이는 70cm이다. 띠장에 배근되는 주근은 D13으로, 수평력인 토압에 의한 휨모멘트에 저항하므로 스테드가 매립되는 면에 80mm 간격으로 5개 배근하였다. 전단보강근은 φ6의 원형 강봉을 125mm 간격으로 배근하였다..

3.2 재료 시험

실험체에 사용된 콘크리트의 압축강도 시험결과 24.7 MPa의 평균압축강도를 나타내었다. 실험체에 사용된 철근과 스테드의 인장시험결과에 의한 항복강도와 인장강도를 정리하여 Table 3에 나타내었다.

Table 3 철근 및 강재의 인장강도 시험결과

구분 종류	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)
전단보강근, φ6	731.8	874.9	2.07×10 ⁹
주근 및 연결재, D13	488.2	620.1	2.02×10 ⁹
스터드, φ13×80	400.1	503.4	2.08×10 ⁹

3.3 가력 및 측정방법

실험체의 설치는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 가력 프레임에 수평으로 500 kN의 액츄에이터(actuator)를 설치하여 철골 보에 일정 압축력을 가하고 프레임 상부에 수직하중을 가력하기 위한 1000 kN의 액츄에이터를 설치하였다.

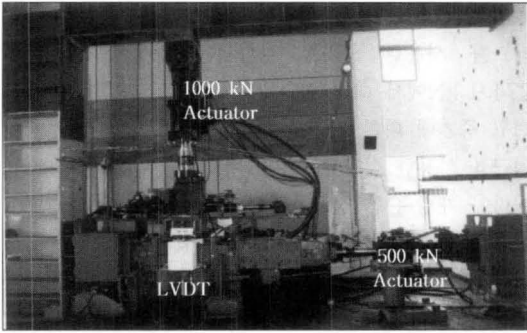


Fig. 5 실험체 설치상황

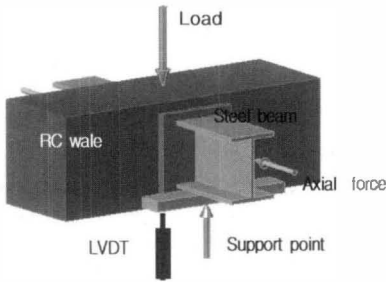


Fig. 6 실험체 가력상황

실험은 Fig. 6과 같이 실험체 엔드 플레이트 쪽의 철골 보 아래에 지점을 두고 일정 압축력을 가한 상태에서 연직방향으로 띠장에 점층 가력하여 접합부에 전단변형을 증대시켜 최종파괴에 이르게 한다. 접합부의 수직변위를 측정하기 위하여 띠장아래 중앙부분에 변위계(LVDT)를 설치하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 실험체 균열 및 파괴상황

Fig. 7에 실험체 최종파괴상황을 나타내었다. 기준 실험체는 철골 보와 RC 띠장과의 접합면 모서리 부분에 접합면을 따라 초기균열이 발생한 후, 접합면 모서리 부분에 경사 균열이 발생하였다. 이후 경사균열의 폭이 더 크게 진행되었으며, 상부측에서도 상부 스테드의 전단저항에 의한 경사균열이 발생하였다. 최대하중에 도달할 때까지 이러한 경사균열은 띠장 윗면까지 진행되었다. 최대하중에서 실험체 하단의 스테드가 파단되었으며, 이후 실험체 상부의 스테드가 주위 콘크리트의 박리와 함께 전단파괴 되었다.

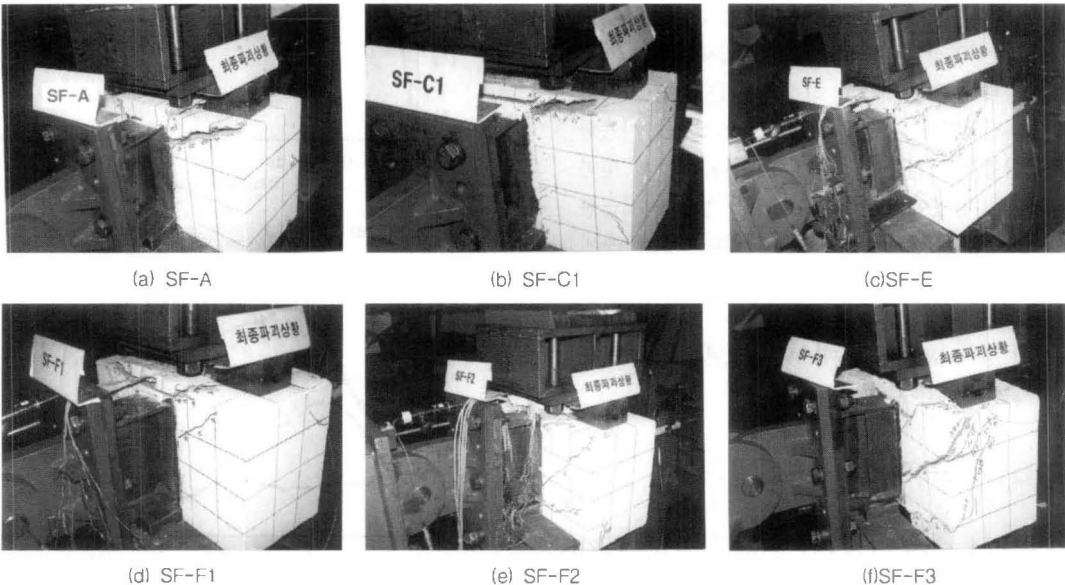


Fig. 7 실험체 파괴상황

압축력이 작용하지 않은 SF-C1 실험체의 경우 상부 스테드 경사균열과 함께 하부 스테드의 전단저항에 의한 경사균열도 발생하였으며 최종파괴시에도 상부 스테드는 파단되지 않았다.

SF-C1 실험체에 비해 스테드를 2배 사용한 SF-E 실험체는 좌측 하부 스테드에서부터 경사균열이 발생하면서 강성이 감소하였으며 하중이 증가할수록 좌우측 대부분의 스테드에서 균열이 발생하였다. 이러한 균열의 경사각은 다른 스테드 접합부 실험체에 비해 비교적 작았으며 균열의 발생량은 많았다. 이후 콘크리트 수직파단과 함께 최대하중에 도달하였으며 최종 파괴된 이후에도 모든 스테드는 파단되지 않았다. 이러한 상황은 스테드 개수가 많아지면서 스테드 전체의 전단내력이 증가하여 콘크리트의 파단으로 접합부 전단내력이 결정되어졌음을 보여준다.

폐쇄형 C형 철근을 사용한 SF-F1 실험체는 최대하중 시까지 균열상황은 기준 실험체와 유사하였으나 실험체 하부면에서도 직선상의 균열이 발생한 것이 특징이다. 철골 보와 띠장과의 접합면 상부 콘크리트가 박리된 이후 최대하중에 도달하였다. 최대하중 이후 실험체 하부면의 균열폭은 크게 증가하였으며 최종파괴 시까지 C형 철근이 파단되지 않았다.

개방형 C형 철근을 사용한 SF-F2 실험체는 최대하중 시까지 균열양상이 폐쇄형 C형 실험체와 유사하였다. 최종파괴시 C형 철근의 하부측이 큰 변형을 보이며 인장파단되었다. U형 철근과 스테드를 사용한 SF-F3 실험체는 하중이 증가됨에 따라 실험체 밑면에 직선상의 균열이 발생하였고 U형 철근이 배근된 부근에서 발생한 경사균열이 확대되었다. 철골 보와 띠장과의 접합면 상부 콘크리트가 박리된 이후 최대하중에 도달하였다. 최대하중 이후 실험체 밑면의 균열폭이 크게 증가하면서 최종파괴에 이르렀고 U형 철근 및 스테드는 파단되지 않았다.

4.2 전단력-수직변위 곡선 비교

압축력 294 kN을 작용시킨 상태에서 전단력을 가한 SF-A, SF-F1, SF-F2 실험체의 접합면에서의 전단력과 수직변위의 관계곡선을 Fig. 8에 나타내었다.

약 200 kN까지는 동일한 강성을 나타내었지만, 스테드를 사용한 SF-A 실험체는 강성이 감소되어 274.9 kN에서 최대 전단내력에 도달했다. 이후 수직변위 증가에 따른 완만한 하중 감소가 나타났다. C형 철근을 사용한 실험체는 285 kN까지 같은 강성을 보이다가 개방 C형 철근을 사용한 SF-F2 실험체가 폐쇄 C형 철근을 사용한 SF-F1 실험체보다 크게 강성이 저하되었다. 최대내력시 변위는 SF-F1 실험체가 SF-F2 실험체보다 적게 나타났다. 최대내력 이후, C형 철근을 사용한 실험체는 하중이 약 100 kN 이상 급격하게 감소하다가 기준 실험체보다 높은 하중을 가지면서 완만한 기울기로 하중이 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 C형 철근의 상부면의 콘크리트 파괴에 의하여 하중이 급격히 감소되었지만 압축력에 의한 마찰전단력의 영향과 C형 철근의 지속적인 내부 콘크리트 구속효과로 인하여 더 이상의 급격한 하중감소가 나타나지 않은 것으로 사료된다. Fig. 9는 압축력을 작용시키지 않은 SF-C1, SF-E, SF-F3 실험체들의

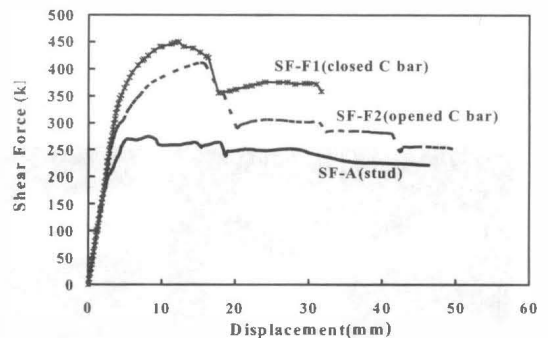


Fig. 8 전단력-수직변위 관계곡선 (압축력 : 294kN)

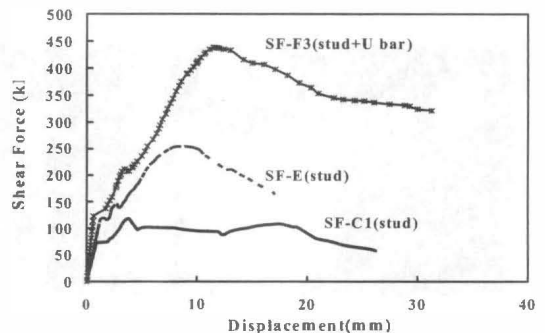


Fig. 9 전단력-수직변위 관계곡선 (압축력 : 0kN)

전단력과 수직변위의 관계곡선을 나타내고 있다. 이들 실험체는 압축력을 가한 실험체와는 달리 비교적 적은 강도에서 강성저하가 나타났다. 이는 압축력에 의한 전단마찰력이 없고 단지 접합 표면의 마찰력에 의해서만 하중 초기에 지지되었기 때문인 것으로 사료된다. 이러한 접합면의 마찰력에 저항하지 못하게 되면 접합 연결체로만 전단력을 받게 된다. 실험체는 전단연결체의 단면적이 큰 SF-F3, SF-E, SF-C1 순으로 전단내력이 크게 나타났다. 최대내력시의 수직변위 또한 최대내력이 클수록 증가하였다. 최대내력이후의 하중 감소 기울기는 압축력이 작용하는 실험체보다 크게 나타났다.

4.3 실험내력 및 이론내력 비교

Table 4에 실험 최대 전단내력과 2장의 기준식을 적용한 이론 전단내력을 비교하여 나타내었다. 압축력을 가한 실험체의 경우 전단마찰계수(μ)로는 기존의 주각부에 일반적으로 사용되고 있는 0.4와 SF-A 실험체와 SF-C1 실험체에서 비교로 평가된 0.53을 각각 적용하여 나타내었다.

Fig. 10에서 압축력을 가한 실험체에 대해서 실험 전단내력과 압축력에 의한 전단마찰력을 제외한 전단내력을 기준 실험체인 SF-A 실험체와 비교하였다. Fig. 10에서 이들 실험체가 거의 동일한 전단 단면적을 가진 연결체를 사용했음에도 불구하고, 스티드를 사용한 실험체(SF-A)보다 폐쇄형(SF-F1) 및 개방형(SF-F2)의 C형 철근을 사용한 이 각각 64 %, 50 % 정도 더 큰 전단 내력을 보였다. 실험에서 평가된 전단마찰력을 제외한 전단내력을 비교할 때, 스티드를 사용한 실험체 보다 148%, 82% 상승한 것으로 나타나

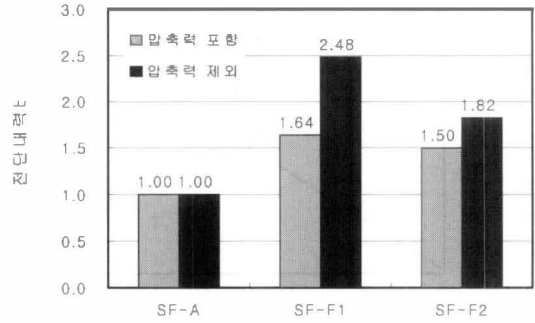


Fig. 10 전단내력 비

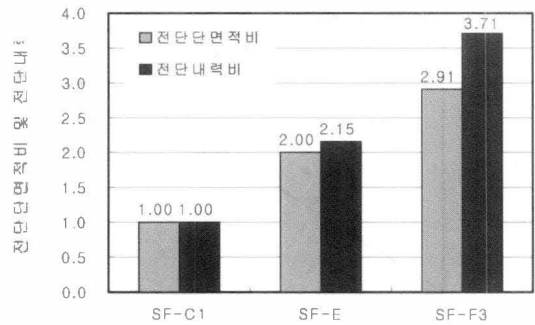


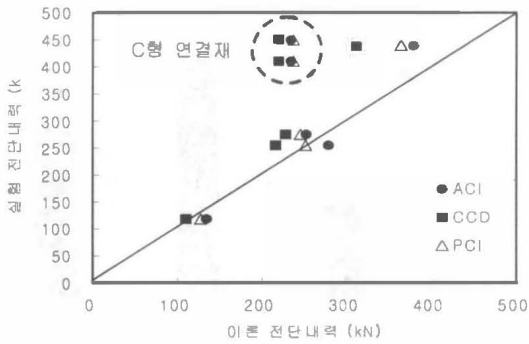
Fig. 11 전단단면적비 및 전단내력 비

C형 연결체의 전단내력 성능이 매우 우수한 것으로 평가되었다. 이는 연결재 철근의 다우웰(dowel) 효과와 내부 콘크리트 구속 효과에 인한 것으로 보인다.

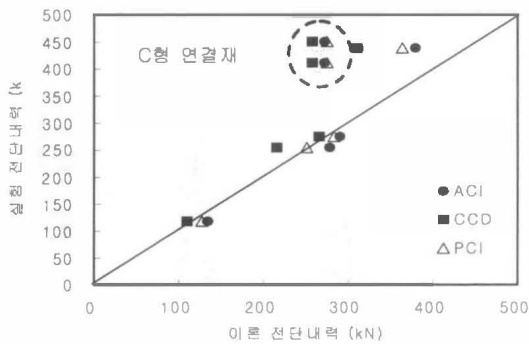
Fig. 11에 압축력을 적용하지 않은 실험체의 전단 단면적과 전단 내력을 SF-C1 실험체와 비교하여 비로써 나타내었다. Fig. 11에서 SF-F3 실험체가 전단 단면적이 SF-C1 실험체에 비해 2.91배 크지만 전단 내력은 3.71배 증가하여 전단성능이 우수한 것으로 평가되었다.

Table 4 실험 전단내력과 이론 전단내력

Specimen	V_{TEST} (kN)	V_{ACI} (kN)		V_{CCD} (kN)		V_{PCI} (kN)	
		$\mu=0.4$	$\mu=0.53$	$\mu=0.4$	$\mu=0.53$	$\mu=0.4$	$\mu=0.53$
SF-A	274.8	252.0	290.3	227.6	265.9	245.2	283.5
SF-C1	118.2	134.3	134.3	109.9	109.9	127.5	127.5
SF-E	254.7	278.3	278.3	215.7	215.7	251.2	251.2
SF-F1	450.3	234.0	272.3	219.5	257.8	236.9	275.1
SF-F2	411.2	234.0	272.3	219.5	257.8	236.9	275.1
SF-F3	438.6	379.5	379.5	311.1	311.1	364.1	364.1



(a) $\mu=0.4$



(b) $\mu=0.53$

Fig. 12 실험내력과 이론내력의 비교

이는 U형 철근이 전단응력을 효과적으로 콘크리트에 전달함으로써 내력을 증가시킨 것으로 사료된다.

Fig. 12에 실험내력을 이론내력으로 나눈 비를 각 기준식에 대하여 비교하여 나타내었다. Fig. 12에서 압축력에 의한 전단마찰력계수를 실험에서 평가된 0.53으로 하여 이론내력을 산정하는 것이 보다 실험내력에 근접한 것으로 나타났다.

모든 실험체에 대해서, CCD에 의해 산정한 이론내력이 실험내력을 안전측으로 평가하고 있는 것으로 나타났다. 스테드 접합부에 대해서는 기준식이 비교적 실험내력을 근접하게 평가하고 있지만, C형 연결재에 대해서는 실험내력을 과소평가하고 있었다. 따라서 엔드플레이트에 구부러져서 용접되는 C형 연결재 접합형상, 철근의 다우웰 거동, 엔드 플레이트에 용접된 철근 표면의 전단 마찰력, 구속되는 내부 콘크리트의

저항 성능 등을 고려하여 C형 연결재에 적합한 내력 평가식을 산정하는 것이 바람직할 것이다.

5. 결론

이상과 같이 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 개발된 폐쇄 C형 철근, 개방 C형 철근, U형 철근 등은 스테드에 비해 전단저항 성능이 우수한 것으로 평가되었다. 특히, 폐쇄 C형 철근은 스테드에 비해 접합부의 전단내력을 64% 증가시킴으로써, 개발된 접합연결재 중 가장 우수한 전단 내력성능을 보유하고 있는 것으로 나타났다.
- 2) 기준식에 의한 평가내력과 실험내력을 비교한 결과, CCD 식이 모든 실험체에 대해 안전측으로 평가하고 있었으며, 기준에 사용되는 압축력에 대한 마찰계수 0.4보다 실험에서 평가된 0.53을 적용하는 것이 실험내력에 보다 근접하게 평가할 수 있었다.

참고문헌

1. A. R. Tamboli, "Handbook of Structural Steel Connection Design and Details", McGraw-Hill, 1999, pp. 451-473.
2. 초대형구조시스템연구센터, 삼성중공업(주), "SPS 공법의 개발 및 성능평가에 관한 연구", 2001.3.
3. 김승훈, 이태석, 서수연, 이리형, 홍원기, "스테드 볼트 접합부의 인장거동에 관한 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제 13권, 제 4호, 2001. 8, pp. 321-328.
4. ACI Committee 349, "Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures", ACI, 1997.
5. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary", ACI, 2002.
6. PCI Design Handbook, "Precast and Prestressed Concrete", 5th Edition, PCI, 2000.

(접수일자 : 2004년 4월 20일)