



# 강재 클립형 연결장치로 단부를 결속한 횡방향 철근으로 보강된 고강도 콘크리트 기둥의 전단성능

박경언<sup>1)</sup> · 윤현도<sup>2)\*</sup> · 홍성걸<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(주)계룡건설산업 부장 <sup>2)</sup>충남대학교 건축공학과 교수 <sup>3)</sup>서울대학교 건축학과 교수

## Shear Performance of High-Strength Concrete Columns with Transverse Reinforcement Binded by Steel Clip-Type Implements

Kyoung-Yeun Park,<sup>1)</sup> Hyun-Do Yun,<sup>2)\*</sup> and Sung-Gul Hong<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Manager, Kyeryong Construction Industry, Daejeon 35262, Rep. of Korea

<sup>2)</sup>Professor, Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Rep. of Korea

<sup>3)</sup>Professor, Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Rep. of Korea

**ABSTRACT** The detailing of transverse reinforcement leads to significant improvement of ductility with increasing confining core concrete and shear capacity of RC (Reinforced Concrete) columns. Present seismic design codes strictly specify design provisions for quantity, spacing and anchorage of hoops in RC columns. Particularly, 135-degree end hooks for anchorage of hoops can result in difficulty of placing the transverse reinforcements. This paper describes experimental results regarding cyclic behavior of high-strength RC columns with different anchorage details (90-degree, 135-degree, 90-degree and steel clip-type binding implement) of end hooks to improve constructability. Results indicate that the seismic performance of a high-strength RC column confined with hoops with 90-degree end hooks and binding implemented is similar to that of specimen having conventional hoops with 135-degree standard end hooks. Therefore, the use of 90-degree end hooks and steel clip-type binding for anchorage of transverse reinforcement in RC columns is acceptable and can be considered an alternative to 135-degree standard end hooks in rectangular high-strength RC columns.

**Keywords :** cyclic behavior, RC column, confinement, transverse reinforcement, steel clip-type binding implement

### 1. 서 론

철근콘크리트 기둥과 같은 압축 및 휨압축 부재에서 횡철근(hoop)은 심부 콘크리트 구속, 주근좌굴 억제 및 전단 저항 능력 향상에 따른 연성증진에 중요한 역할을 한다. 따라서 국내·외 내진설계기준에서는 횡철근의 정착을 위하여 횡철근의 양 끝단에 135°로 구부리고 구부린 끝에서 횡철근 직경의 6배( $6d_b$ ) 및 최소 75 mm 이상 연장하도록 규정하고 있다(MOLIT 2021).

이러한 띠철근 갈고리 상세는 현장에서 사전에 양단 갈고리를 135°로 교차 시공된 띠철근을 이미 배근된 기둥 주근 상부에서 끼어 넣는 방식과 한쪽 135°에 다른 쪽 90° 갈고리인 띠철근을 배근된 주근에 옆에서 끼워 넣는 다음 90° 갈고리를 135°로 구부리는 방식 중에서 현장조건을 고려하여 작

업자가 시공하기 편리한 방법을 선택하여 현장에서 작업하게 된다. 그런데 위 2가지 방법 모두 작업 과정에서 시공하기가 쉽지 않아 구조감리나 감독이 확인하지 않는 경우 현장에서는 작업하기 쉽게 횡철근의 한쪽 또는 양쪽 끝을 90°로 구부려 마무리함으로써 표준갈고리 상세를 따르지 않은 상태로 시공될 우려가 있다.

이와 같이 현장에서 횡철근이 갖는 복잡한 상세로 인하여 발생하는 시공상의 어려움을 극복하기 위하여 기둥과 같은 압축부재 심부 콘크리트의 횡구속 및 전단성능을 저하시키지 않으면서 시공성을 개선하기 위한 다양한 상세에 관하여 연구가 진행되고 있다.

국내에서는 연속 횡철근을 활용한 보강방법(Eom et al. 2013) 등이 제안되었고 국외에서는 U자형 갈고리 클립(Luk-kunaprasit and Sittipunt 2003) 등이 제안되었으며 이와는 다소 사용 차이는 있으나 단면이 큰 기둥에서 연결철근(cross-tie)을 대체할 수 있는 V형 띠철근이 국내에서 제안되었다(Kim and Yang 2015).

이 연구에서는 철근콘크리트 기둥에서 띠철근의 양단부

\*Corresponding author E-mail : wiseroad@cnu.ac.kr  
Received October 08, 2021, Revised November 01, 2021,  
Accepted December 15, 2021  
©2022 by Korea Concrete Institute

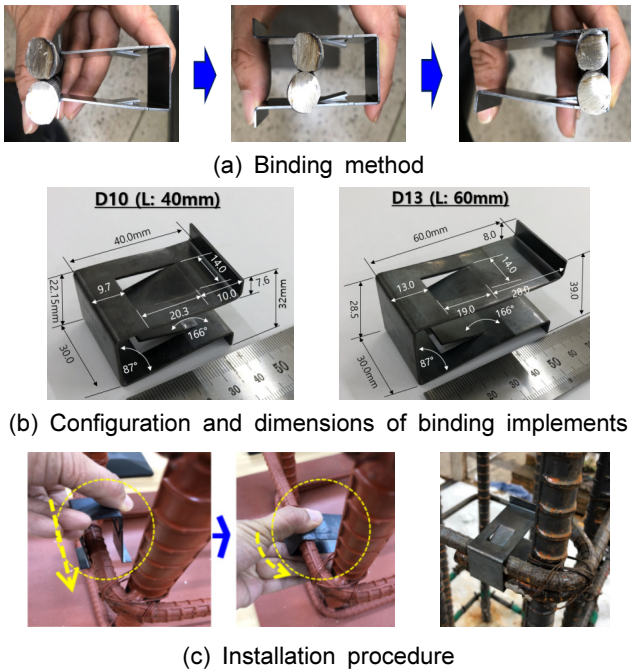


Fig. 1 Steel clip-type binding implement

정착에 기여하며 기준에서 규정하고 있는 횡철근 양단부 135° 갈고리 상세의 시공성 개선을 위하여 한쪽 단부 135° 갈고리 대신 90° 갈고리로 가공 후 Fig. 1과 같은 원터치 방식의 강제 클립형 연결장치로 고정하는 방안을 제안하였다(Park and Kim 2020).

강제 클립형 연결장치는 2개의 띠철근 갈고리를 하나로 묶게 만들기 위하여 ‘ㄷ’자 형태를 하고 있으며 띠철근 갈고리에 삽입할 때 양쪽 끝단에 2개의 다리가 늘어났다가 다시 오므라드는 탄력성을 유지하여야 했으므로 주로 공업용이나 자동차판 스프링용으로 사용되는 SK5M-S강을 이용하여 제작한 다음 최종 열처리하여 완성하였다.

이미 띠철근의 한쪽 90° 갈고리에 제안된 강제 클립형 연결장치로 결속하는 상세에 대한 인발실험을 통하여 제안된 연결장치에 대한 정착성능을 검증하였으며(Park and Yun 2020a), 피복 콘크리트 두께가 고려된 실험체를 이용하여 실제 RC 기둥과 같은 환경에서도 인발실험을 통하여 정착성능을 검증하였다(Kim et al. 2021).

구조성능 검증과는 별도로 실규모 기둥 실험체 및 실 구조

물에서 제안된 연결장치의 적용에 따른 시공성 및 경제성 향상 가능성도 제시하였다(Park and Yun 2020b).

또한, 제안된 장치로 90° 갈고리에 결속한 횡보강근으로 보강된 보통(30 MPa) 및 고강도(60 MPa) 실규모 기둥 실험체로 중심축하중을 받는 상태에서 압축거동의 대한 성능도 검증하였다(Park et al. 2021).

구조적인 신뢰성을 확보하기 위해서 실규모 철근콘크리트 기둥에서 제안된 장치로 결속된 90° 갈고리를 갖는 띠철근의 횡보강 효과에 대한 내진성능 평가가 요구된다. 그러므로, 이 논문에서는 제안된 강제 클립형 연결장치로 결속한 띠철근으로 횡구속된 고강도 철근콘크리트 기둥의 내진성능, 띠철근의 횡구속 및 전단기어 성능을 중점적으로 평가하고자 한다.

## 2. RC 기둥의 휨 및 전단강도

### 2.1 휨강도

철근콘크리트 기둥의 휨강도 분석을 위하여 응력-변형률 모델과 등가사각압축응력 블록이 제안되었다. Fig. 2는 고강도 콘크리트 기둥에서 휨강도 분석을 위한 기둥의 내력, 등가사각압축응력블록 및 변형률을 나타내고 있다.

MOLIT(2016a)에서는  $\alpha$ ,  $\beta$  값을 응력분포의 면적과 도심의 위치로서 응력분포 함수를 적분하여 산정하는 식을 제시하고 있으며 설계의 편의를 위하여 콘크리트 압축강도에 따라 표를 제시하고 있다. 철근콘크리트 기둥의 축력과 모멘트는 식 (1)과 (2)에 의해 산정된다.

압축축에서 최외단 극한압축변형률은 MOLIT(2016a)에서는 콘크리트 압축강도에 따라 0.0028에서 0.0033의 값을 제시하고 있고 기준에 따라 콘크리트 압축강도 60 MPa에서는 0.0031의 값을 적용하였다.

$$\sum P = 0 \Rightarrow P_n - C_c - C_s'' + F_s' + F_s = 0 \quad (1)$$

$$\sum \frac{M_h}{2} = 0 \Rightarrow M_n - F_s \left( d - \frac{h}{2} \right) - C_s'' \left( \frac{h}{2} - d'' \right) - C_c \left( \frac{h}{2} - \frac{1}{2} \beta c \right) = 0 \quad (2)$$

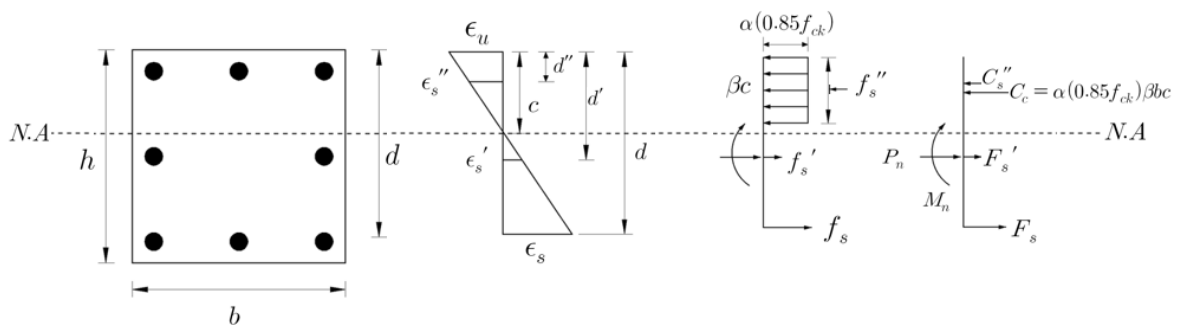


Fig. 2 Strain distribution, equivalent rectangular compressive stress block, internal forces in analysis of flexural strength for a RC column section

## 2.2 전단강도

MOLIT(2016b)에서는 RC 기둥의 전단강도( $V_n$ )를 콘크리트에 의한 전단강도( $V_c$ )와 횡보강근에 의한 전단강도( $V_s$ )의 합으로 나타내고 있다. 여기서 콘크리트에 의한 전단강도는 약산식 (4)와 정밀식 (5)로 나누어 제시하고 있으며 약산식의 경우, 전단강도 식에서 축력에 따른 전단강도 증진효과를 반영하고 있다. 정밀식의 경우는 전단력, 휨모멘트, 압축력을 동시에 받는 부재에 대하여 유도된 것으로 종방향 철근의 장부작용과 전단경간비의 영향 등을 고려하였다. 또한, 전단강도 정밀식에서 계수휨모멘트( $M_u$ )를 수정휨모멘트( $M_m$ )로 대체하여 콘크리트의 전단강도를 산정하고 있다. 횡보강근에 의한 전단강도 산정할 때 균열각도는  $45^\circ$ 를 가정하고 횡보강근이 최대강도에 도달할 때 항복에 도달한다고 보고 있다.

$$V_n = V_c + V_s \quad (3)$$

$$V_c = \frac{1}{6} \left( 1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \sqrt{f_{ck}} b_w d \quad (4)$$

$$V_c = \left( 0.16 \sqrt{f_{ck}} + 17.6 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \quad (5)$$

$$V_s = \frac{A_s f_{yt} d}{s}, M_m = M_u - N_u \frac{(4h - d)}{8} \quad (6)$$

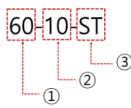
## 3. 실험 계획 및 방법

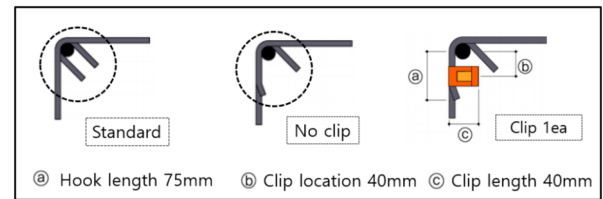
### 3.1 실험 계획

정사각형 단면의 고강도 철근콘크리트 기둥의 반복횡하중에 대한 구조성능을 확인하기 위하여 기둥 단면크기는  $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 로 가정하고 실험체는 실험체의 총 3개를 제작하였다. 실험체 개요 및 형상은 Table 1과 Fig. 3에 제시된 바와 같다. 콘크리트 압축강도는 향후 동일한 실험변수에 따라 보통강도와 고강도 콘크리트일 경우의 비교를 위하여 보통강도 콘크리트 30 MPa 사용을 가정할 때 고강도인 경우는 2배 강도인 60 MPa 강도의 콘크리트를 사용하였으며 실험변수는 띠철근의 직경 10mm, 띠철근의 양단 갈고리 형태를 주요한 변수로 설정하였다.

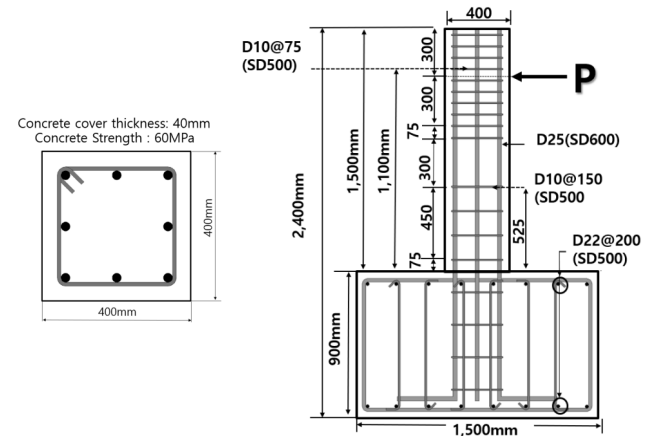
실험에 적용된 강재 클립형 연결장치의 상세 Fig. 2(b)와 같이 띠철근 직경 10mm에 사용된 강재 클립형 연결장치는 앞면 높이가 22.15 mm, 문힘길이 40.0 mm, 문힘길이 끝단 높이는 7.6 mm로 제작하여 정착이 잘 될 수 있도록 하였다. 강재 클립형 연결장치의 설치 위치는 Fig. 3(a)의 세 번째 그림 ©와 같다. 실험체는  $1,500 \text{ mm} \times 1,500 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$  크기의 철근콘크리트 기초 상단 중앙에  $1,500 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$  콘크리트 기둥으로 기둥내 주근과 띠철근을 배치하여 제작하였다. 주근 및 띠철근은 기둥 단면  $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$  크기 내

Table 1 Designations of specimen

Name	Content		
	①	• Concrete strength ( $f_{cu}$ ) 60:60 MPa	
	②	• Hoop bar diameter; 10:10 mm	
	③	Hook shape of hoop	
		ST	• Standard hook : $135^\circ$ hook cross
		C1	• $135^\circ$ end-hook+ $90^\circ$ end-hook with 1 clip
		H1	• One hook $135^\circ$ + another hook $90^\circ$



(a) Clip length according to clip location



(b) Details of specimen

Fig. 3 Details of specimens

에서 주근은 D25 8개와 횡보강근은 직경 10mm로 배근하였으며, MOLIT(2016c)에 따라 산정한 최소 띠철근 간격 200mm보다 50mm 작은 150mm 간격으로 기둥 밑단 소성예상 구간 525mm 내에 배치하였다. 외부띠철근 갈고리에 따른 거동을 주로 파악하여야 했으므로 기둥 단면 내 연결철근(cross-tie)은 설치하지 않았다.

### 3.2 재료 특성

콘크리트는 레미콘을 이용하여 타설하였으며 굵은 골재와 잔골재로서 각각 최대 직경 20mm의 화강석과 5mm의 천연 모래를 사용하였다. 콘크리트 압축강도는  $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 의 원주공시체를 이용하여 측정하였다. 콘크리트 공시체는 기근 양생 후 부재 실험 직전과 실험 종료일 때 압축강도를 측정하였고 각각의 공시체 3개로부터 얻은 평균 압축강도는 60 MPa이다.

**Table 2** Steel and SK5M-S tensile test results

Division	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$\epsilon_y$ (mm/mm)	$E_s$ (MPa)
D10	546	647	0.0034	161,471
D25	649	790	0.0045	144,222
SK5M-S	460	600	0.0045	102,222

Note:  $f_y$ : yeilding stress;  $f_u$ : tensile stress;  $\epsilon_y$ : yeilding strain;  $E_s$ : elastic modulus

사용된 철근과 강재 클립형 연결장치의 인장시험 결과는 Table 2에 나타내었다. 띠철근과 주근으로 사용된 D10(SD 500), D25(SD600)의 항복강도는 각각 546, 649 MPa로 나타났고 이때의 항복변형률은 0.0034, 0.0045로 나타났으며 강재 클립형 연결장치의 시편에 대한 인장시험 결과에서 항복강도는 460 MPa, 항복변형률은 주근 변형률과 동일한 0.0045로 나타났다.

### 3.3 가력 및 측정 상세

가력 장치도는 Fig. 4(a)와 같다. 액추에이터를 이용하여 사각형태 기초상단면으로부터 1,100 mm 높이에서 횡력을 가하였으며 실험 중  $0.1f_{ck}A_g$  (960 kN)의 일정 축력을 유지하였다. 축하중 가력 후 기초 상부면로부터 1,100 mm 지점에 2,000 kN 용량의 횡하중 가력장치를 연결하여 변위제어로 정(+)과 부(-) 방향으로 2 mm/min의 일정한 속도를 유지하며 반복 가력하였다.

이때 캔틸레버 거동을 이상화하기 위하여 하부 스티브에 관통된 4개의 구멍과 지름 50 mm의 강재 락 볼트를 이용하여

기둥 실험체 하부 스티브를 반력판에 완전히 고정시켰다. 하중 가력계획은 ACI 374.1-05를 참고하여 계획하였으며 층간 변위비(drift ratio,  $\Delta/L$ )를 기준으로 Fig. 4(b)와 같이 변위비  $\pm 0.25\%$  (변위 2.75 mm)로 시작하여, 최종 파괴시점인 변위비  $\pm 3.5\%$  (변위 38.5 mm)까지 점증적으로 증가시켰다.

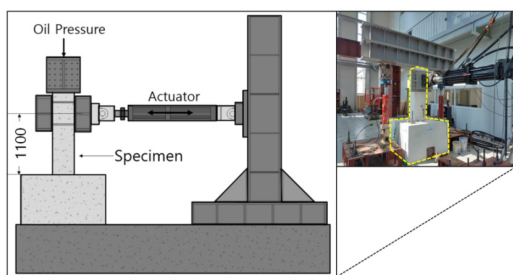
각 변위이력에서는 횡하중 가력은 3주기(cycle)씩 하였다. 가력된 횡력은 액추에이터에 내장된 로드셀로 측정하였다.

로드셀로 측정된 횡력에 대한 변위값과 비교하기 위하여 실험체 기둥 밑단 양면에 X자 형태로 변위계를 설치하여 별도의 횡하중에 대한 횡변위 또한 측정하였다. 철근콘크리트 기둥 실험체 단면에서의 주근 및 횡보강근의 변형률은 철근 콘크리트 기둥 밑단 소성 예상 구역 내 Fig. 4(c)와 (d)의 위치에서 변형률 게이지를 이용하여 측정하였다.

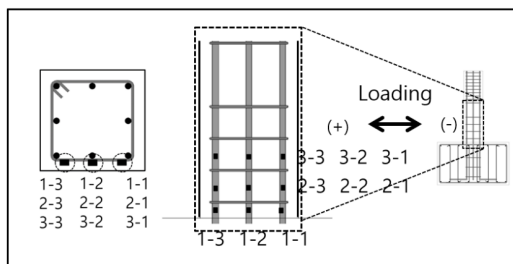
## 4. 실험 결과

### 4.1 횡하중-횡변위 관계

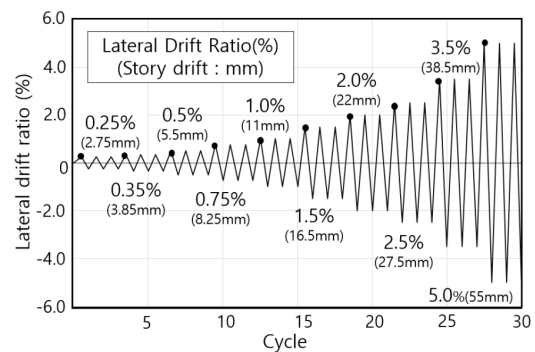
Table 3에서는 총 3개 각각의 실험체와 액추에이터에서 측정된 최대횡하중값( $V_{test}$ )과 이에 따라 산출되는 최대휨강도값( $M_{n'test}$ ), KDS 14 20 20 기준식(MOLIT 2016a)에 따라 산정된 설계휨강도값( $M_{n'KDS}$ ), KDS 14 20 22 기준(MOLIT 2016b)의 약산식에 의하여 산정된 기둥의 전단강도값( $V_{n'KDS}$ )과 기둥의 전단강도값 내 콘크리트가 부담하는 전단강도값( $V_{c'KDS}$ )을 나타내었다. Fig. 5는 3개 실험체의 각 변위비에 따른 균열 진전을 실험 시작부터 종료 변위비까지 나타낸 것이다. Fig. 6의 좌측에 있는 그래프는 실험결과에서 실험체와 액추에이터에서 측정된 횡하중-횡변위 관계를 나타낸 것이며, 우측에 있는 그래프는 실험체별 포락곡선을 정방향(positive, +)과



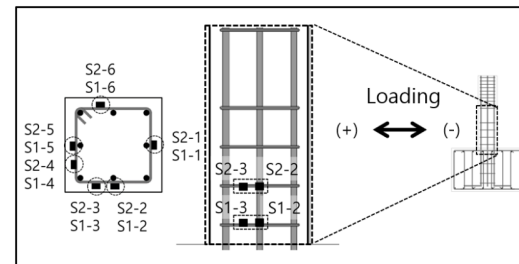
(a) Test setup



(c) Longitudinal rebar strain gauge setup



(b) Lateral loading history



(d) Transversal rebar strain gauge setup

**Fig. 4** Test setup of lateral-loading experiment

부방향(negative, -)의 거동을 같이 나타낸 것이다. Table 3에서 각 실험체의  $V_{test}$  값은 정(+)방향 가력 시 측정된 최대강도값( $+V_{test}$ )과 부(-)방향 가력 시 측정된 최대강도값( $-V_{test}$ )의 절대값에 평균값으로 산출하였다.

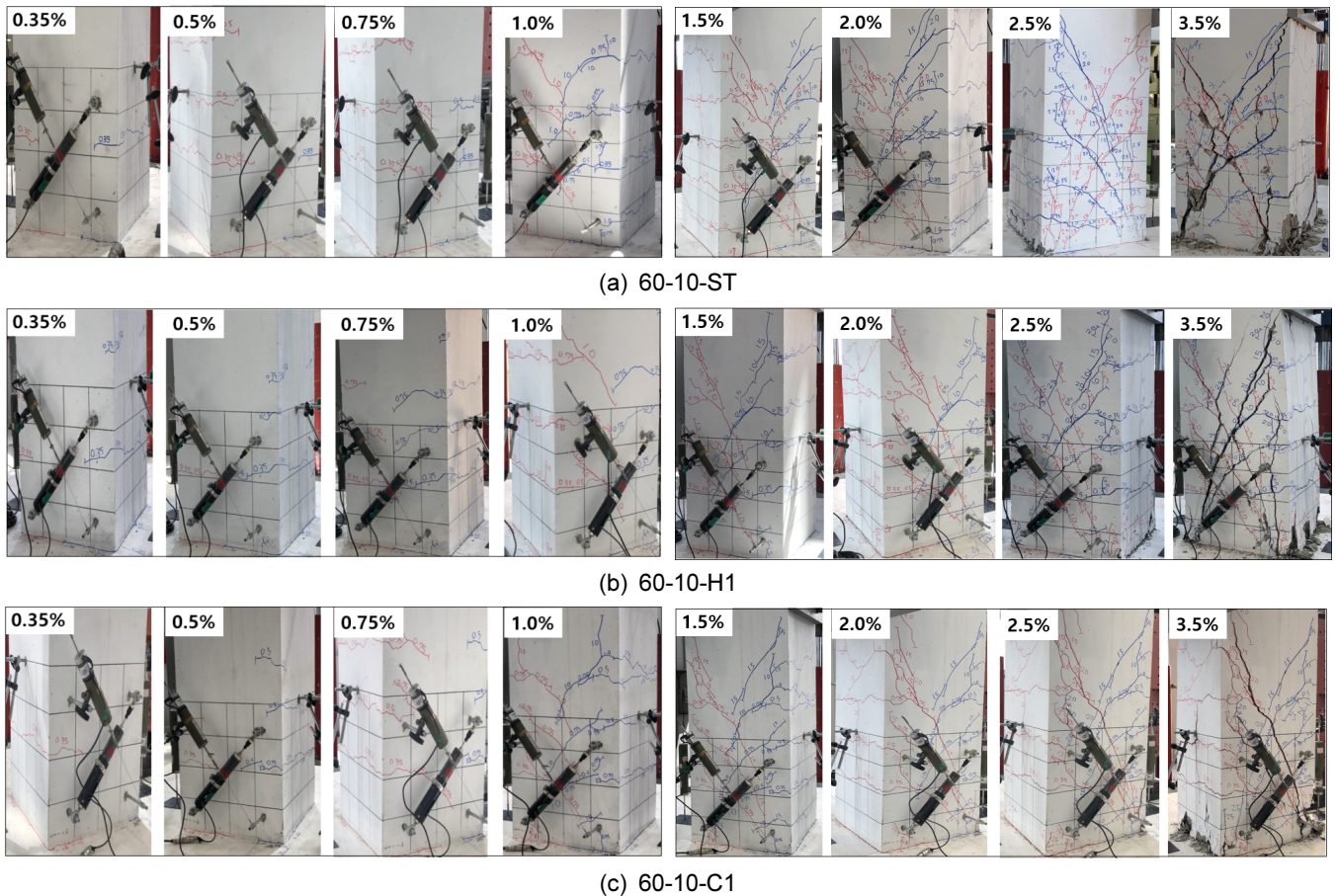
실험결과, 측정된 최대강도값  $V_{test}$  값은 표준실험체 60-10-ST의 443.9 kN을 기준으로 최대값은 강재 클립형 연결장치를 사용한 실험체 60-10-C1에서 가장 높은 값인 446.6 kN이 측정되었고 최소값은 한쪽 135° 다른쪽 90° 갈고리 실험체인 60-10-H1에서 443.2 kN이 나타났다. 횡하중의 최대값은 3개 모든 실험체에서 변위비 2.5 % 1주기에서 나타났으며 60-10-ST와 60-10-H1의 실험체는 정(+)방향 가력에서 최대하중값이 나타났고 60-10-C1의 실험체는 부(-)방향 가력에서 최대강도값이 나타났다.

Table 3에서의 기재된 최대휨강도값( $M_{n\cdot test}$ )은 측정된  $V_{test}$  값에 Fig. 3(b)에 표시된 밑단에서 하중점까지의 전단경간거리 1,100 mm를 곱하여 산출되었다. 산출된 최대휨강도값은 최대강도값과 마찬가지로 표준실험체 60-10-ST의 488.3 kN·m 값을 기준으로 최대값은 강재 클립형 연결장치를 사용한 60-10-C1에서 491.3 kN·m 값으로 산출되었으며 최소값은 한쪽 135°와 다른쪽 90° 갈고리의 실험체 60-10-H1에서 가장 낮은 값 481.5 kN이 산출되었다. 각 실험체는 표준 실험체를 기준으로 모두 유사한 강도값을 나타내고 있으며 0.6 % 이내에서 차이가 없는 강도값을 보여주었다. Fig. 5의 균열진전의 양상은 초기 휨균열 양상을 보이는 가운데 변위비 1.0 %에서 전단균열이 처음 발생하기 시작하여 점차 전단균열 폭과 길이가 커지면서 실험이 종료되었다.

**Table 3** Experimental results

Specimen	$+V_{test}$ (kN)	$-V_{test}$ (kN)	$V_{test}$ ave. (kN)	Flexural strength (kN·m)			$\frac{M_{n\cdot test}}{M_{n\cdot KDS}}$	Shear strength (kN)			$\frac{V_{n\cdot test}}{V_{n\cdot KDS}}$
				$M_{n\cdot test}$	$M_{cr\cdot KDS}$	$M_{n\cdot KDS}$		$V_{n\cdot test}$	$V_{n\cdot KDS}$	$V_{c\cdot KDS}$	
60-10-ST	445.7	442.1	443.9	488.3	52.0	460.3	1.061	443.9	429.0	254.0	1.097
60-10-H1	445.8	440.5	443.2	487.5			1.060	443.2			1.095
60-10-C1	432.9	460.2	446.6	491.3			1.067	446.6			1.104

Note:  $V_{test}$ : an average of test result values in both loading directions;  $M_{n\cdot KDS}$ : predicted flexural capacity by KDS 14 20 20;  $M_{cr\cdot KDS}$ : flexural crack capacity predicted by KDS 14 20 30;  $V_{n\cdot KDS}$ : shear capacity predicted by KDS 14 20 22;  $V_{c\cdot KDS}$ : concrete shear capacity predicted by KDS 14 20 22



**Fig. 5** Crack progress of each specimens

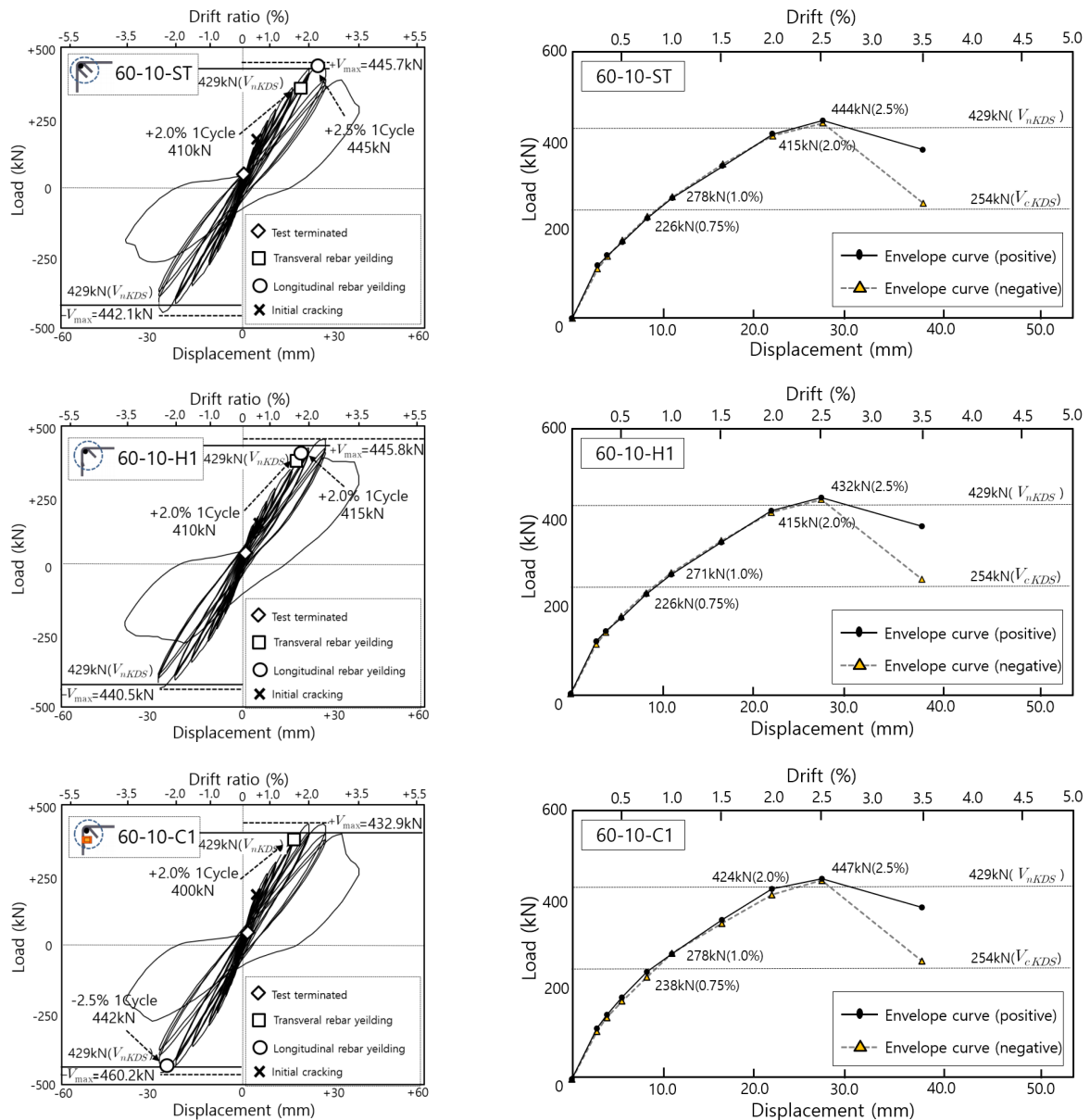


Fig. 6 Lateral load-lateral displacement result and envelop responses of specimens

## 5. 실험 결과 분석 및 고찰

### 5.1 RC 기둥 휨강도 분석

3개 실험체에서 나타난 최대휨강도는 모두 KDS 14 20 (MOLIT 2016a)에 의하여 산정한 설계휨강도( $M_{n,KDS}$ ) 이상의 값을 보였다. 최대휨강도값( $M_{n,test}$ )은 강재 클립형 연결장치를 사용한 실험체 60-10-C1에서 491.3 kN·m으로 KDS 기준에 따라 산정한 값과 비교할 때 6.7 % 오차범위 내에서 일치하였다. 각각의 기둥 휨강도값은 표준실험체인 60-10-ST에서는 KDS 기준에서 산정한 값보다 6.1 % 높은 488.3 kN·m으로 나타났으며 횡보강근의 항복은 변위비 2.0 % 1주기 정(+)방향 가력에서 410 kN일 때 S2-2 위치에서 발생하였고 주근의 항복은 횡보강근 항복 이후 최대강도 도달 시점인 변위비 2.5 % 1주기의 정방향 가력에서 445 kN일 때 나타났다.

한쪽 135°와 다른쪽 90° 각고리 실험체인 60-10-H1는 최대 휨강도는 487.5 kN·m으로 나타나 기준에서 산정한 휨강도 보다 6.0 % 큰 값을 보여주었으며 횡보강근의 항복은 변위비 2.0 % 1주기의 정방향 가력에서 410 kN일 때 S2-2 지점에서 발생하였으며 횡보강근 항복 이후 변위비 2.0 % 1주기의 정방향 가력에서 최대강도 415 kN에 도달할 때 2-1 지점에서 주근의 항복이 발생하였다.

강재 클립형 연결장치를 사용한 실험체 60-10-C1는 최대 휨강도는 491.3 kN·m로 나타나 3개 실험체 중 가장 큰 최대 휨강도값을 보였고 KDS 기준식에서 산정된 값보다 6.7 % 높은 값을 보였다. 60-10-C1 실험체의 횡보강근의 항복은 변위비 2.0 % 1주기의 정방향 가력에서 400 kN일 때 S2-2 지점에서 발생하였으며 횡보강근 항복 이후 최대하중값 도달 시점인 2.5 % 1주기의 부방향 가력에서 442 kN일 때 측정 위치 3-1 지점에서 주근의 항복이 발생하였다. 위의 결과로서 3개 실험체에서 나타난 최대휨강도는 유사한 값을 보였으며 강

**Table 4** Comparison of displacement ductility ratio

Specimens	$\Delta_y$ (mm)	$\Delta_{80}(=\Delta_u)$ (mm)	$\mu_\Delta(\Delta_u/\Delta_y)$
60-10-ST	14.7	34.5	2.35
60-10-H1	15.8	34.4	2.18
60-10-C1	14.3	35.0	2.48

Note:  $\Delta_y$ : yield displacement of column as average of values in both loading directions;  $\Delta_{80}$ : lateral displacement of column at  $0.8 V_{max}$  on descending branch of lateral load-displacement;  $\mu_\Delta$ : displacement ductility ratio

재 클립형 연결장치를 사용한 실험체에서 미소하나마 가장 큰 최대휨강도를 보여주었고, 3개 실험체 모두 공통적으로 횡보강근이 주근보다 먼저 항복되어 이의 결과로 모든 실험체에서 전단파괴가 발생하였다고 판단된다.

기둥의 휨강도에 대한 변위연성능력 비교는 변위연성비( $\mu_\Delta$ )로 하였는데 Waston and Park(1994)가 제안한 모델을 이용하여 평가하였다. 항복변위( $\Delta_y$ )는 최대강도 75 %에서 할선강성 값과 최대강도가 교차하는 지점의 변위값으로 산정하였다. 산정된 항복평균변위( $\Delta_y$ )는 최소 14.3 mm에서 최대 15.8 mm까지 측정되었다. 최대변위( $\Delta_u$ )는 최대휨강도의 80 % 해당하는 지점에서 변위값으로 산정하였으며 변위연성비는 최대변위( $\Delta_u$ )를 항복변위( $\Delta_y$ )로 나눈 값으로 산정하였다. 산정된 변위연성비는 Table 4의  $\mu_\Delta$ 로 나타내었다. 최대 평균변위( $\Delta_u$ )값 가운데 최소값은 한쪽 135°와 다른쪽 90° 갈고리인 실험체에서 34.4 mm로 나타났고 최대값은 강재 클립형 연결장치를 사용한 실험체 60-10-C1에서 35.0 mm까지 측정되었으며 변위연성비는 최소 2.18에서 최대 2.48 값이 산정되었다. 변위연성비 결과에서 전체적으로 유사한 값을 보였으며 최대휨강도 결과비교에서와 마찬가지로 미소하지만 3개의 실험체에서 강재 클립형 연결장치를 사용한 실험체에서 가장 큰 변위연성비를 보였다.

## 5.2 RC 기둥 전단강도 분석

Table 3의  $V_{test}$ 와  $V_{n,KDS}$ 의 비교에서 나타난 바와 같이 KDS 14 20 22의 산정식(MOLIT 2016b)으로 계산된 전단강도값( $V_{n,KDS}$ )보다 실험에 의한 강도값( $V_{test}$ )이 모두 약 10 % 이상 상회한 값을 보였다. RC 기둥의 전단에 대한 저항 요소는 비균열 콘크리트 전단저항, 골재의 맞물림, 주근의 장부 작용, 횡보강근에 의한 전단저항으로 나눌 수 있다. 각 저항 요소들의 분담력을 구분하기 어려우므로 일반적으로 콘크리트에 의한 전단강도( $V_c$ )를 횡보강근에 의한 전단력( $V_s$ )을 제외하고 표현할 수 있다. 그러므로, 횡보강근에 의한 전단력은 최대강도 도달할 때 균열면을 가로지르고 있는 횡보강근의 변형률과 재료시험을 통하여 얻은 철근의 응력-변형률 곡선을 이용하여 산정하였다. 그 다음으로 전체 전단강도에서 횡보강근의 전단강도 기여분을 제외하여 콘크리트가 분담하는 전단강도를 산정하였으며 그 값은 Table 5와 같다.

**Table 5** Shear distributions of element

Specimen	$V_{n.test}$ (kN)	$V_{n.KDS}$ (kN)	$V_{s.KDS}$ (kN)	$V_{c.test}$ (kN)	$V_{c.KDS}$ (kN)	$\frac{V_{c.test}}{V_{c.KDS}}$
60-10-ST	443.9	429.0	175	287.6	254	1.06
60-10-H1	443.2			287.2		1.03
60-10-C1	446.6			290.6		1.07

Note:  $V_{n.test}$ : total shear strength by experiment;  $V_{n.KDS}$ : total shear strength calculated by KDS14 20 22;  $V_{s.KDS}$ : shear distribution of transverse reinforcement by KDS ;  $V_{c.test}$ : shear distribution of concrete by experiment;  $V_{c.KDS}$ : shear strength calculated by KDS 14 20 22

실험결과로 산정된 콘크리트 분담 전단강도( $V_{c.test}$ )와 KDS 기준 산정식에 따라 계산된 콘크리트 분담 전단강도( $V_{c.KDS}$ ) 254 kN로 나눈 비율의 값은 Table 5의 우측  $V_{c.test}$ 와  $V_{c.KDS}$ 의 비교값에서 보는 바와 같이 1.03에서 1.07으로 나타나 기준의 산정식( $V_{c.KDS}$ )에 의하여 계산된 콘크리트가 분담하는 전단강도값 보다도 상회한 값으로 나타났다.

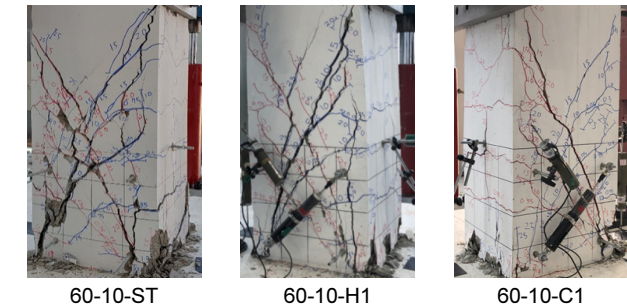
이의 결과에서 보듯 3개 실험체의 실제 콘크리트 분담 전단강도값( $V_{c.test}$ )에서도 큰 차이를 보이지 않았다. 다만 60-10-H1에서 미소한 값의 차이로 가장 낮은 전단강도값의 비율을 보여주었다. 그러므로 이번 실험에서 고려된 실험변수인 갈고리 상세 변화에 따라서 60 MPa 고강도 RC 기둥의 전단강도의 미치는 영향은 미미한 것으로 분석되었다.

## 5.3 균열 양상 및 최종 파괴 후 갈고리 형상 분석

3개의 실험체는 모두 Fig. 5의 균열진전에서 보는 바와 같이 중간변위비 0.35 % 시점에서 기둥 소성예상구역인 하부 위치에 휨균열이 발생하였으며 변위비 1.0 % 시점에서 기둥의 복부쪽으로 대각균열이 발생하기 시작하여 점차 증가하면서 변위비 3.5 %에서 이미 기둥 하부부터 복부 중앙을 가로질러 발생한 대각균열이 보다 균열폭이 커지면서 강도가 감소하였다. 이후 파괴에 도달하여 실험이 종료되는 균열 양상을 보여주었다. 균열 양상을 분석한 결과, 3개의 실험체 모두 파괴는 최종 전단에 의하여 파괴가 발생한 것으로 판단된다.

단지, 강재 클립형 연결장치를 사용하지 않은 실험체 60-10-H1에서 균열이 좀 더 많았고 균열폭 또한 상대적으로 큰 경향을 보였다. Fig. 7 우측에 있는 그래프를 보면 3개 실험체 모두 KDS 기준식에 따라 산정한 콘크리트 분담의 전단강도 254 kN 전까지는 모두 휨균열이 나타난 것을 알 수 있다. 254 kN 이상에서는 전단균열이 발생하기 시작하여 진행되었고 이때 횡보강근 모두 전단저항을 하는 것으로 판단되며 횡보강근의 전단저항 한계점인 각 실험체의 최대강도값 도달 시점에서는 모두 X자형태의 이미 발생한 대각균열폭이 커지면서 실험이 종료되었다.

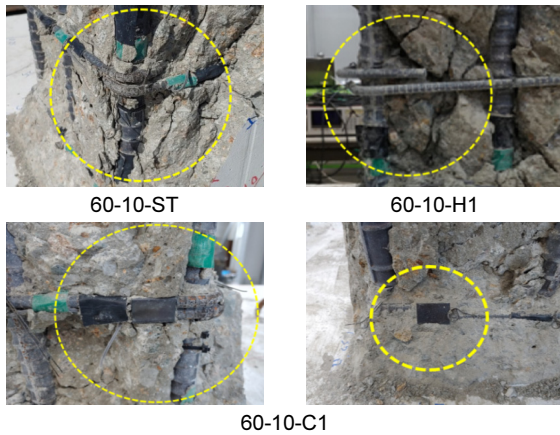
Fig. 7 좌측의 (b)와 (c)는 실험체가 최종 파괴가 일어날 때 코어 상태와 후프철근 갈고리의 최종 상태를 나타낸 것이다. 갈고리 최종 변형 형상은 표준실험체와 강재 클립형 연결장



(a) Final appearance of specimens at the end of the test



(b) Appearance of concrete cores



(c) Hook state at ultimate failure

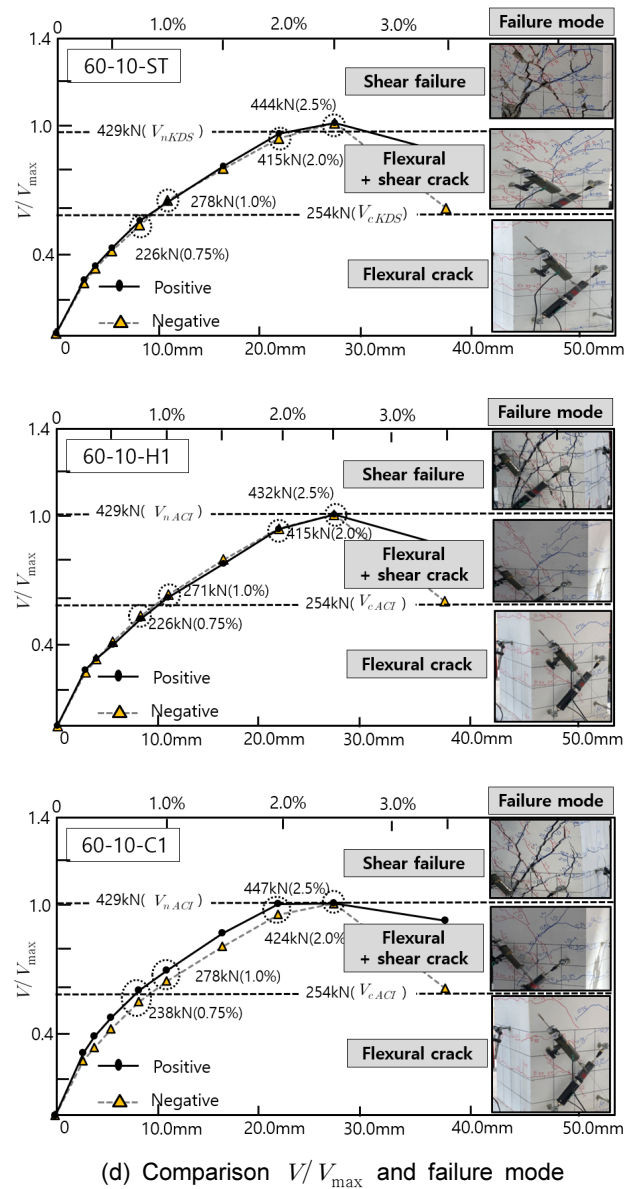


Fig. 7 Comparisons of final appearance and concrete cores and hook state at ultimate failure

치를 사용하는 경우 처음 배근 당시의 135° 갈고리 상태와 처음 배근된 갈고리 상태를 유지하고 있었으며 반면, 한쪽 135°와 다른쪽 90° 갈고리를 갖는 실험체에서는 Fig. 7(c)의 60-10-H1에서 보는 바와 같이 갈고리가 완전히 탈락되어 외부 방향으로 완전히 튀겨져 나와 있는 형상을 보였다. 이와 같은 갈고리 최종 변형형상은 반복횡하중에 대하여 횡보강근의 90° 갈고리는 쉽게 풀리지만 90° 갈고리에 강재 클립형 연결장치를 결속보강한 갈고리는 처음 배근 상태를 그대로 유지함으로써 연결장치의 사용은 반복횡하중에 대하여 갈고리 변형을 억제하는 데 효과가 있음을 보여주는 결과라고 판단된다.

#### 5.4 포락곡선, 주기별 강성변화, 에너지소산능력 분석

##### 5.4.1 포락곡선 분석

Fig. 8은 실험체의 층간변위비(drift ratio, %) 단계별 비교 포락곡선과 변위비별 강성, 에너지소산능력을 비교하였다.

Fig. 8(a)의 포락곡선 비교에서 3개 실험체 모두 전반적으로 유사한 거동을 보인다. 강재 클립형 연결장치를 90° 갈고리에 결속한 실험체 60-10-C1 경우는 표준실험체 60-10-ST와 비교할 때 최대강도값은 정방향 가력에서 항상 변위비 단계별로 상위값을 유지하였고 부방향 가력에서는 유사한 이력거동을 보여주고 있다. 반면, 한쪽 135°와 다른쪽 90° 갈고리 실험체 60-10-H1의 경우 최대강도값까지 보다 작은 강도의 거동을 보여주고 있으며 최대강도값 이후에도 표준실험체보다 작은 강도값의 거동을 보여주고 있다.

##### 5.4.2 주기별 강성변화 분석

Fig. 8(b)는 각 실험체의 층간변위비 단계별 강성(stiffness, K)의 변화를 나타내었다. 여기서 강성 K는 각 하중의 변위비에서 정방향과 부방향 가력에서의 최대강도와 최대변위가 만나점의 기울기로 평균하여 강성을 산정하였다. 3개 실험체 모두 유사한 강성감소 변화율을 보여주고 있다. 표준실험체

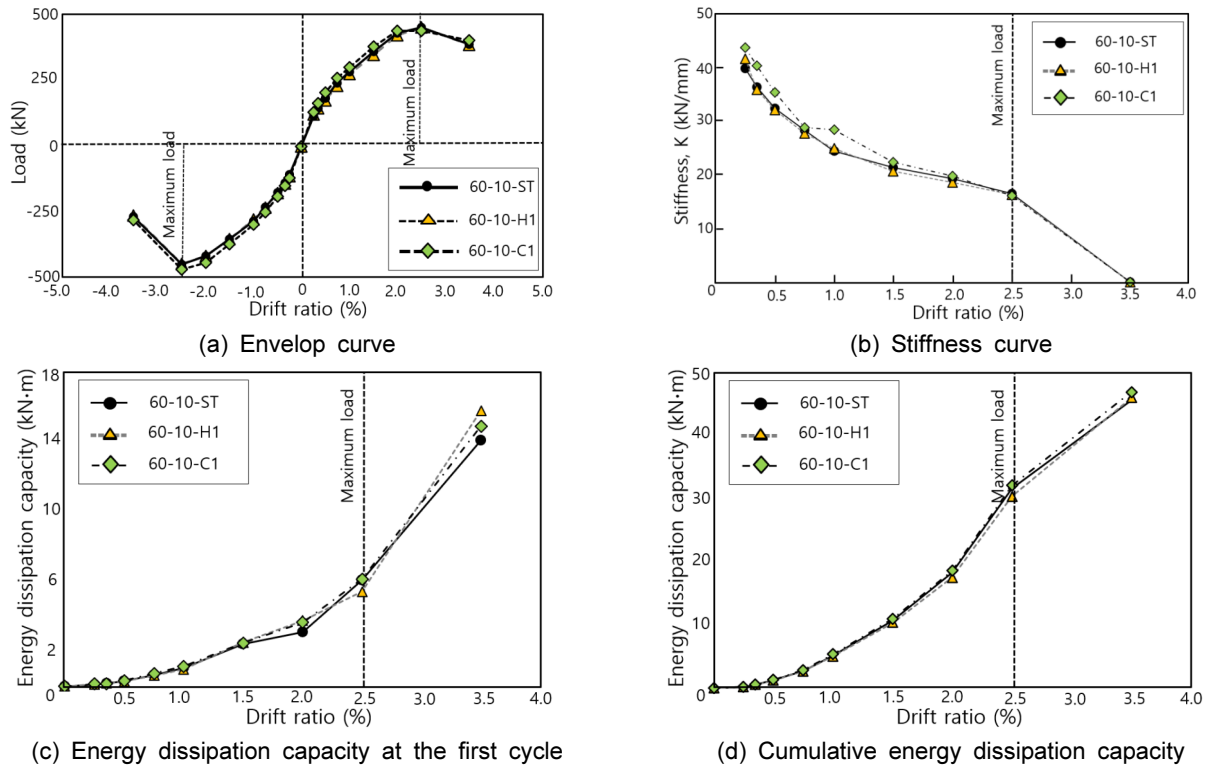


Fig. 8 Comparison of envelop curve, stiffness curve, energy dissipation capacity

60-10-ST를 기준으로 강제 클립형 연결장치를 사용한 실험체 60-10-C1의 초기 강성은 10 % 크게 나타났으며 최대강도 값까지 지속해서 큰 값을 보였으며 최대강도값 이후 최종 파괴까지는 유사한 강성 감소를 보였다. 반면, 한쪽 135°와 다른 쪽 90° 각고리의 실험체 60-10-H1은 표준실험체와 비교할 때 초기 강성은 다소 높은 값을 보였으나 변위비 0.5 %에서부터 최대강도값에 도달 시점인 변위비 2.5 %까지 지속적으로 낮은 강성을 보였다.

#### 5.4.3 에너지소산능력 분석

3개 실험체별 각 변위비에 따라 3주기 중 1주기에서의 에너지소산을 나타낸 것은 Fig. 8(c)이며 전주기 누적된 에너지소산능력을 나타낸 것은 Fig. 8(d)에 나타내었다. Table 6은 그래프로 표현하기 전 산출된 변위비별 에너지소산값을 표현하였다. 비교결과, 3개 실험체 모두 에너지소산능력은 유사한 것으로 나타났다. 한쪽 135°와 다른 쪽 90° 각고리 실험체인 60-10-H1은 1주기 에너지소산만 나타낸 Fig. 8(c)에서 보는 바와 같이 초기 0.35 % 변위비에서부터 최대강도값 도달시점인 변위비 2.5 %까지 지속적으로 낮은 에너지소산능력을 보였으며 Fig. 8(d)에서 보는 바와 같이 누적 에너지소산능력에서도 초기 0.75 % 변위비에서부터 최대강도 도달시점인 변위비 2.5 %까지 지속적으로 낮은 에너지소산능력을 보여주었다. 단지, 1주기 에너지소산능력에서 60-10-H1 실험체에서의 최종값에서 가장 높은 값을 보여주었으나 전주기를 분석한 결과가 표준실험체와 강제 클립형 연결장치를 사용한 실험체에서 전단력이나 균열이 다수 발생한 상황에서 효과적인 횡구속 능력을 나타내었다.

Table 6 Energy dissipation capacity by drift ratio (unit: kN·m)

Drift (%)	First cycle			Cumulative		
	60-10-ST	60-10-H1	60-10-C1	60-10-ST	60-10-H1	60-10-C1
0	0	0	0	0	0	0
0.25	0.99	0.107	0.125	0.209	0.223	0.233
0.35	0.149	0.156	0.15	0.553	0.591	0.603
0.50	0.303	0.284	0.31	1.273	1.258	1.328
0.75	0.63	0/608	0.725	2.778	2.698	2.903
1.00	1.025	0.960	1.13	5.228	5.078	5.423
1.50	2.4	2.5	2.45	10.753	10.423	11.023
2.00	3.075	3.725	3.625	18.303	17.548	18.673
2.50	6.05	5.375	6.1	31.703	30.423	32.173
3.50	14.000	15.688	14.800	45.703	46.111	46.973

#### 5.5 횡보강근 변형률

횡보강근의 변형률은 가력방향과 평행한 위치의 측정지점인 S1-1과 S2-1, S1-4와 S2-4, S1-5와 S2-5의 위치에서는 상대적으로 작은 변형률 거동을 보였고, 반면에 가력 방향과 직각 방향에 위치한 측정지점인 S1-2와 S2-2, S1-3와 S2-3, S1-6과 S2-6에서 변동폭이 큰 변형률을 나타내어 실험체별 변동폭이 큰 S1-2와 S2-2, S1-3와 S2-3, S1-6과 S2-6에서 측정된 변형률만 Fig. 9에 나타내었다. 여기에서 최하단에 위치한 S1-2, S1-3, S1-6보다 변동폭이 큰 S2-2, S2-3, S2-6의 위치를 보다 식별하기 용이하게 굵은 선으로 나타내었다. Fig. 10(b)

는 가장 변형률이 크게 나타난 각 실험체의 S2-2의 변형률을 횡보강근 항복변형률의 0.0034까지를 실험체별로 나타낸 것으로 항복변형률 이후 비교는 생략하였다.

비교결과, 3개 모두 유사한 변형률 거동을 보이고 있으며, 큰 차이는 없으나 가장 먼저 항복에 도달한 실험체는 표준실험체인 60-10-ST와 강재 클립형 연결장치 실험체 60-10-C1가 유사한 시점인 변위비 2.0 % 첫 번째 주기의 정방향 가력에서 나타났고 마지막으로 한쪽 135°와 다른쪽 90° 갈고리 실험체 60-10-H1에서 나타났다.

마찬가지로 실험변수로서 갈고리 상세가 상이하게 배근된 지점에서 가장 가까운 지점에 위치한 S2-6에서 측정된 횡보강근 변형률 비교에서도 Fig. 10(a)에서 보는 바와 같이 횡

보강근 항복변형률 기준으로 가장 빨리 항복에 도달한 실험체 순서 또한 Fig. 10(b) S2-2에서 보인 거동과 동일하였다. 실험체별 주근의 항복변형률 거동은 가력방향과 가장 근접한 지점에 있는 1-1~3-1 철근에서 크게 나타났고 그중에서도 3-1이 가장 큰 변형률 거동을 보였다. 이에 3-1에서 측정된 변위비별 주근 변형률을 나타내면 Fig. 10(c)와 같다. 여기에서 보는 바와 같이 각 실험체 중 가장 빨리 항복한 실험체는 한쪽 135°와 다른 한쪽 90° 갈고리 실험체 60-10-H1에서 변위비 2.0 % 첫 번째 주기 정방향 가력 415 kN에서 나타났으며, 표준실험체와 강재 클립형 연결장치를 사용한 실험체는 유사한 시점인 변위비 2.5 % 첫 번째 1주기에서 나타났다.

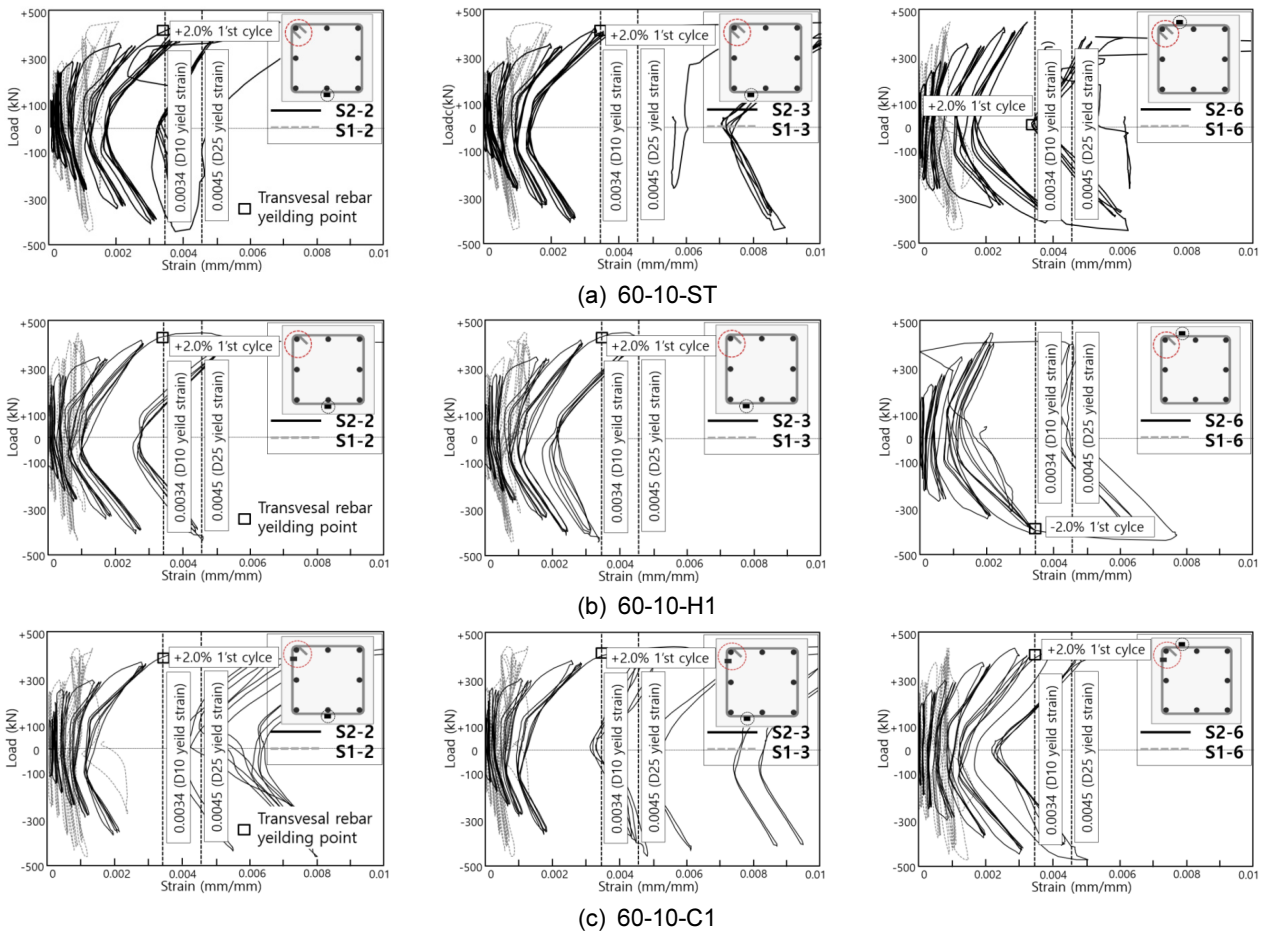


Fig. 9 Transversal rebar strain of each specimen

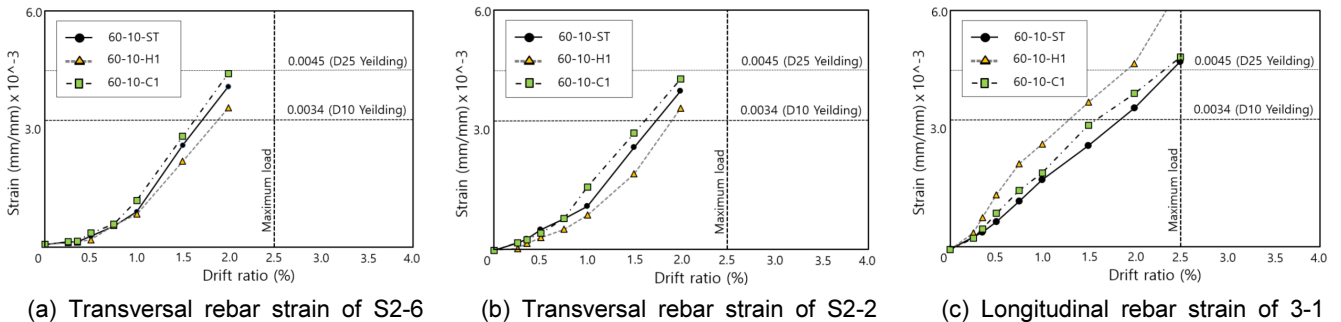


Fig. 10 Comparison of transversal and longitudinal bar strain

철근콘크리트 기둥에서 횡보강근의 135° 표준갈고리 양단 교차시공의 작업성을 개선하기 위하여 한쪽 135°와 다른 쪽 90° 갈고리에서 강재 클립형 연결장치로 90° 갈고리에 결속보강하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법으로 기둥을 구성하고 실험모 60 MPa 고강도 콘크리트 기둥에서 반복횡하중을 가력하여 기둥 단면에서 띠철근 갈고리 상세변화에 따른 실험체별 거동 상태를 확인한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 측정된 최대휨강도와 최대전단강도는 국내·외 기준에서 제시한 산정식으로 계산한 값보다 상회한 값에서 측정되었으며 3개 실험체 모두 유사한 강도값을 보였고 강재 클립형 연결장치를 사용한 실험체는 표준실험체와 비교할 때 0.6 % 높은 최대휨강도값을 보였다.
- 2) 3개 실험체에서 모두 횡보강근의 항복이 주근의 항복보다 선행되었으며 이를 통하여 모든 실험체는 콘크리트 분담 전단강도 이하의 하중에서는 휨균열이 주로 발생하였고 콘크리트 분담 전단강도 이상의 하중에서는 휨과 전단균열이 혼재하여 나타나다가 최종 전단균열이 주로 발생한 것으로 판단할 수 있다.
- 3) 최종 실험 종료 후 갈고리 형상비교에서 한쪽 135°와 다른 쪽 90° 갈고리 실험체를 제외한 다른 2개의 실험체에서는 처음 배근된 갈고리 상태를 유지하고 있어 강재 클립형 연결장치는 반복횡하중 가력에 의하여 갈고리 형상 변형을 억제하는 데 효과가 있음을 알 수 있었다.
- 4) 포락곡선 비교에서 3개 실험체 모두 유사한 거동을 보였으며 강성비교에서는 강재 클립형 연결장치를 사용한 실험체가 표준실험체와 비교할 때 초기 10 % 높은 강성값을 보였고 이후 실험종료 때까지 지속해서 우위의 높은 값을 유지하였다. 에너지소산능력 비교에서도 3개 실험체 모두 유사한 능력을 보였으며 강재 클립형 연결장치를 사용한 실험체가 표준실험체와 비교할 때 실험 시작부터 종료 때까지 지속해서 높은 값을 보였다.
- 5) 횡보강근 변형률은 모두 주근이 항복하기 이전에 선행되었으며 3개 실험체에서 모두 유사한 변형률 거동을 보였으나 한쪽 135°와 다른 쪽 90° 갈고리 실험체에서 횡보강근이 항복하고 같은 변위비 2.0 % 내에서 주근이 바로 항복하였으며, 다른 2개의 실험체에서 변위비 2.0 %에서 횡보강근이 항복하고 최대강도값 도달한 시점인 변위비 2.5 %에서 주근이 항복하는 것과는 다른 차이를 보였다.

이상과 같은 실험결과로부터 정사각형 단면의 60 MPa 고강도 철근콘크리트 기둥에서 횡보강근 직경 10 mm인 경우 90° 갈고리를 강재 클립형 연결장치로 결속한 띠철근 상세는 반복횡하중 가력실험에서 기존 135° 표준갈고리를 갖는 띠철근 상세와 대등한 주근 및 심부 콘크리트의 구속성능을 보유한 것으로 평가할 수 있다.

이 성과는 CH건설기술의 재원으로 지원을 받아, 실험은 (주)페트라텍에서 수행된 연구로 이에 감사드립니다.

## References

- Eom, T. S., Choi, T. W., Park, H. G., Kang, S. M., and Jin, J. M. (2013) Seismic Tests on Reinforced Concrete Columns Confined with Continuous Hoops. *Journal of Korea Institute of Building Construction* 29(2), 99-107. (In Korean)
- Kim, E. Y., Kim, Y. J., Choi, S. M., Kim, D. J., and Park, K. Y. (2021) Bond and Anchorage Composite Behavior of RCC Device for Substitution Seismic Hook thorough Pull-Out Experiment. *Journal of the Korea Society for Advanced Composite Structures* 12(2), 469-480. (In Korean)
- Kim, W. W., and Yang, K. H. (2015) Effect of Bending Angle and Embedment Length on the Bond Characteristics of V-Shaped Tie Reinforcement. *Journal of the Korea Institute of Building Construction* 15(5) 465-471. (In Korean)
- Lukkunaprasit, P., and Sittipunt, C. (2003) Ductility Enhancement of Moderately Confined Concrete Tied Columns with Hook-Clips. *Structural Journal* 100(4), 422-429.
- MOLIT (2016a) *Flexure and Compression Design for Concrete Structures (KDS 14 20 20)*. Sejong, Korea: Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (In Korean)
- MOLIT (2016b) *Shear and Torsion Design for Concrete Structures (KDS 14 20 22)*. Sejong, Korea: Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (In Korean)
- MOLIT (2016c) *Earthquake Resistant Design for Concrete Structures (KDS 14 20 80)*. Sejong, Korea: Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (In Korean)
- MOLIT (2021) *Details of Reinforcement Design for Concrete Structure (KDS 14 20 50)*. Sejong, Korea: Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (In Korean)
- Park, K. Y., and Kim, Y. J. (2020) *Band Steel Locking Device (Patent Public Number 10-2148235)*. Korean Intellectual Property Office (KIPO).
- Park, K. Y., and Yun, H. D. (2020a) Clip-Type Binding Implement Effect on Anchorage Behavior of 90-Degree End-Hooked Transverse Reinforcement in Reinforced Concrete Columns. *Journal of the Korea for Structural Maintenance and Inspection* 24(4) 72-80. (In Korean)
- Park, K. Y., and Yun, H. D. (2020b) Constructability and Cost Analysis of the Clip-Type Binding Implement Substituting 135° End-Hooked Transverse Reinforcement in Reinforced Concrete Columns. *Journal of the Korea Institute of Building Construction* 20(5), 459-469. (In Korean)
- Park, K. Y., Yun, H. D., and Hong, S. G. (2021) Effect of a Steel Clip-Type Binding Implement on the Axial Compressive Behavior of Reinforced Concrete (RC) Columns Confined

**요 약** 철근콘크리트 기둥에서 횡보강근은 심부 콘크리트 구속과 전단저항능력을 향상시킴으로서 연성을 증진시키는 데 중요한 역할을 한다. 현 내진설계기준은 RC 기둥에서 횡보강근의 배근량, 간격, 후프철근의 정착에 대하여 엄격한 기준을 제시하고 있다. 특히 후프철근의 정착을 위한 양단 135° 표준갈고리 교차상세를 갖는 횡보강근은 배근 작업하는 데 어렵다. 이 연구에서는 이러한 시공성을 개선하기 위하여 고강도 철근콘크리트 기둥에서 서로 다른 갈고리 정착상세(90°, 135°, 90° 갈고리에 강재 클립형 연결장치 결속)로 반복횡하중 가력실험을 나타내고 있다. 실험결과, RC 기둥에서 90° 갈고리 단부에 강재 클립형 연결장치로 결속한 실험체는 135° 표준갈고리 실험체와 대등한 성능을 보였다. 그러므로, 정사각형 고강도 철근콘크리트 기둥에서 띠철근 90° 갈고리 단부의 정착력을 향상시키기 위하여 강재 클립형 연결장치로 결속하는 방법은 135° 표준갈고리를 대체할 수 있을 것으로 평가할 수 있다.

**핵심용어** : 이력거동, 고강도 철근콘크리트 기둥, 구속, 횡보강근, 강재 클립형 연결장치