

2021. 01. 02

건축 구조

VOL. 28 / NO. 01

한국건축구조기술사회지
Journal of
The Korea Structural Engineers Association
제28권 / 제 01호

<http://www.ksea.or.kr>

구조설계기사

- 한강 스카이라인의 새로운 역사, 여의도 파크원



권두언

- 변화가 가져올 새로운 기회

특집

- 초고층건축물의 SHM시스템
- 혁신적인 설계-엔지니어링 기술이 3D 프린팅을 더욱 가치 있게 만든다

기술초대석

- 135° 표준갈고리 대체용 원터치 클립 : RCC내진갈고리공법 소개
- NRC 보-기둥 접합부의 반복 횡하중에 따른 실험적 내진성능 평가



기술 초대석 01

Structural technology

135° 표준갈고리 대체용 원터치 클립 : RCC 내진갈고리(Rebar Confinement Clip -Seismic Hook) 공법 소개)



| 김 용 주 |

편집위원회 이사
㈜씨에이치구조엔지니어링 및
㈜씨에이치건설기술 대표이사



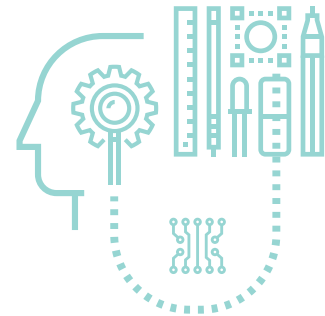
| 박 경 언 |

(주)계룡건설산업 구조담당



| 김 대 진 |

경희대학교 건축공학과 교수



1. 개요

내진갈고리(Seismic hook)는 국·내외 콘크리트구조기준에서, 철근 지름의 6배 이상 또한 최소 길이 75mm이상의 연장 길이(여장)를 가진 135° 갈고리로 된 스테럽, 후프 및 연결철근의 갈고리로 정의된다. 135° 표준갈고리는 스테럽과 띠철근의 표준갈고리 중 D25 이하의 철근에서 구부린

끝에서 철근 지름의 6배 이상 연장하는 것으로 정의된다. 엄밀히 정의하자면, 내진갈고리와 135° 표준갈고리는 여장 길이에서 차이가 있어 다른 용어이지만 용어 서술의 일관성을 위하여 이하부터는 저자가 개발한 RCC내진갈고리와 구분 하기 위하여 135° 표준갈고리로 통일하여 기술하겠다.

시공 현장에서는, 기준에서 제시하는 135° 표준갈고리를 시공하는 데 어려운 점이 매우 많다. 공통적인 문제는 90° 갈고리 상태에서 135°로 구부리는 데에서 오는 시공상의 어려움이다. 이로 인하여, 현장에서는 구조감리나 감독관과 시공자간의 분쟁이 지속적으로 보고 되고 있다. 특히, 철근콘크리트 기둥의 후프철근(Hoops) 양단 135° 표준갈고리 교차시공은 띠철근 사용에 KBC2005 이후 SD 500 사용이 허용되면서, 주철근 배치 후, 상단에서 끼워넣는 방법외엔 다른 방법이 없다. 그러므로, 시공 현장에서 일반적으로 작업하기에 용이한 한쪽 단부 90° 갈고리에 원터치 클립을 결속함으로써, 내진갈고리나 135° 표준갈고리와 대등한 성능을 발휘하면서

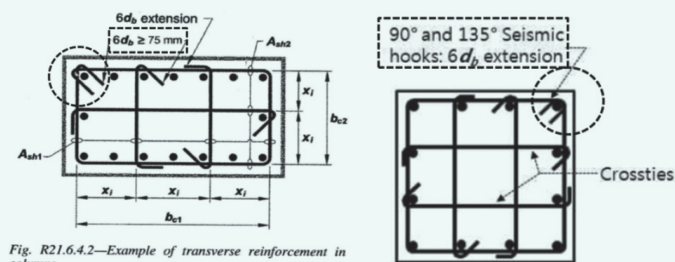
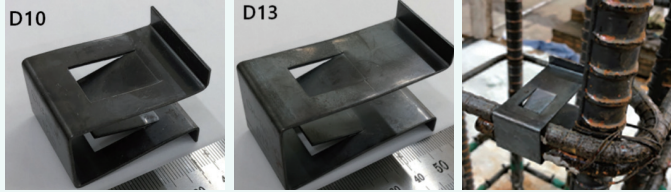


Fig. R21.6.4.2—Example of transverse reinforcement in columns.

[그림 1.1] 국내·외 콘크리트 구조기준의 내진갈고리 상세

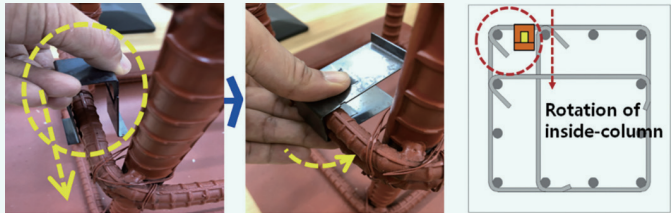
시공성이 개선될 수 있도록 135° 표준갈고리 대체용 원터치 클립 ‘ㄷ’자 형태의 RCC내진갈고리(Rebar Confinement Clip-Seismic Hook)를 그림 1.2 (a)와 같이 개발하였으며, 설치방법은 그림 1.2 (b)와 (c)와 같다.



(a) RCC내진갈고리 형상(띠철근 D10용, D13용) 및 설치시 모습



(b) 철근 결속 방법



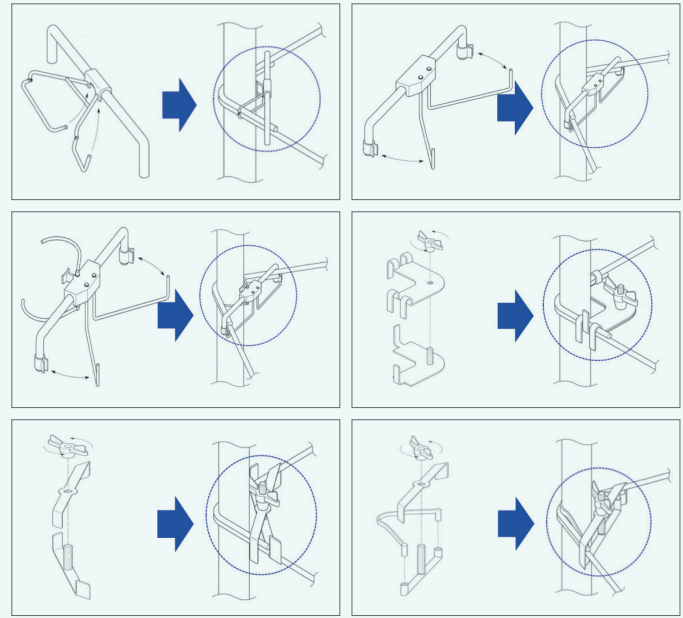
(c) RCC내진갈고리 설치 방법

[그림 1.2] RCC내진갈고리 철근 결속 및 설치 방법

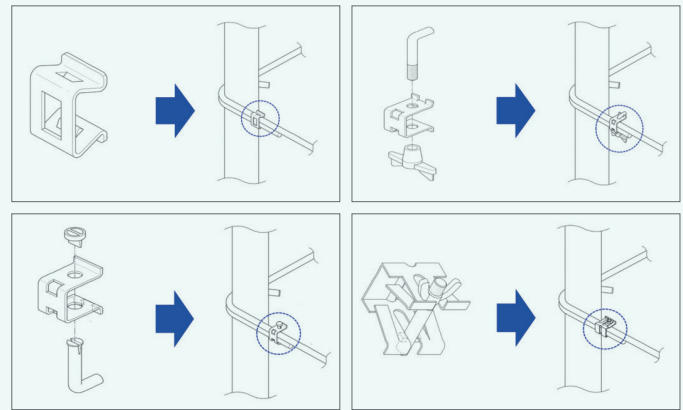
2. RCC내진갈고리 개발과정

2.1 초기 RCC내진갈고리 형상 및 예비성능실험 결과

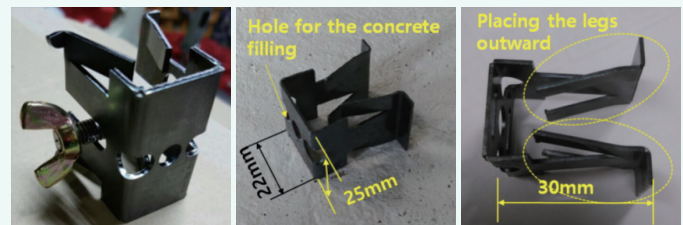
철근콘크리트 기둥 후프철근의 양단 135° 교차시공을 대체하기 위하여, 최초에는 띠철근 작업이 가장 용이한 양단 90° 갈고리를 동시에 결속하는 방식으로 시작하였다. 그러나, 이러한 방식은 연결장치 자체가 비싸져 경제성이 떨어지므로, 현장에서 일반적으로 작업이 용이한 한쪽 단부 90° 갈고리에 결속하는 클립 형태로 고안하였다. 초기에 실물로제작한 클립형 연결장치는 그림 2.1 (c)와 (d) 같이 제작하였다. 나사식 연결장치는 나사선 제작을 위하여, 두께 자체가 2.0mm이상 두꺼워져서 탄성이 떨어지므로, 개발할 상에서 제외하였다. 그림 2.1 (d)는 원터치 방식(가칭 ‘리바 밴드’)으로 시공성이 나사식보다 많이 개선되었으나, 구조 성능이 발휘되는 지역부를 확인 및 형상 적합성 판단을 위하여, 콘크리트 실제 압축강도 27 MPa에서, 중심축하중 실험체 5개, 반복횡하중 실험체 5개, 총 10개의 실험체로 예비성능실험을 실시하였다.



(a) 최초 띠철근 갈고리 동시 연결 개념의 장치 고안



(b) ‘ㄷ’자 형태의 연결 개념의 장치 고안



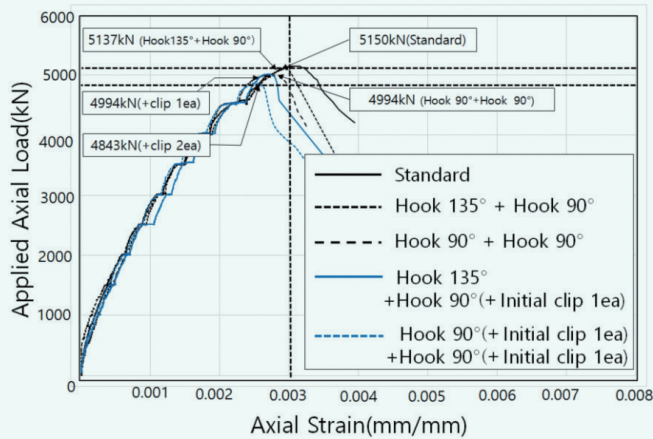
(c) 나사식

(d) 초기 연결장치 (가칭 ‘리바 밴드’)



(e) 예비성능 실험 후, 초기 장치(가칭 ‘리바 밴드’) 파괴 형상

[그림 2.1] 초기 연결장치 실물 제작 및 예비성능실험



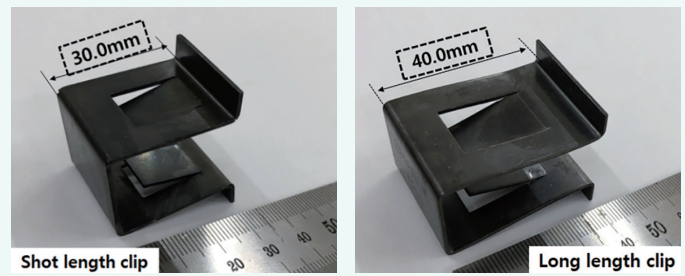
[그림 2.2] 초기 연결장치(가칭 '리바 밴드' 사용) 압축하중 실험결과

예비성능 실험결과, 그림 2.2와 같이, 초기 제작한 연결장치(가칭, '리바 밴드-Rebar band')를 사용하여 단부 90° 갈고리에 결속하는 경우, 135° 표준갈고리를 적용한 기둥 실험체와 비교할 때, -2.6~-6.0%의 낮은 압축 내력값을 보였다. 압축연성비 비교에서도 낮은 연성비를 보여주었다. 반복횡하중 실험결과에서도 표 2.1과 그림 2.3에서 보는 바와 같이, 표준갈고리를 적용한 실험체와 유사한 거동을 보인다고 하더라도, 최대 휨내력값에서 -2.0~-6.4%의 낮은 값을 보였다.

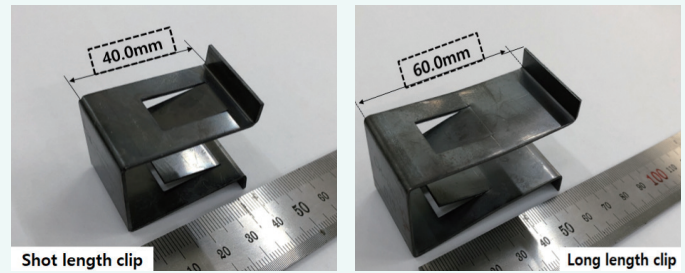
[표 2.1] 반복횡하중 예비성능실험 결과(가칭 '리바밴드' 사용)

실험체	P_{cr-pre}^+ (kN)	P_{cr-pre}^- (kN)	Ave. (kN)	$(M_n)_{test}$ (kN·m)	기준과 비교
1. 표준갈고리	315.0	291	303.0	303.3	100 %
2. 갈고리 135°+90°	311.0	287	299.0	299.0	99.7%
3. 양단부 90°+90°	313.6	297	305.3	305.4	96.9%
4. 한쪽 단부 135°+90°에 클립 체결	315.0	279	297.0	326.7	97.4% (-2.6%)
5. 양단90° 클립 체결	298.0	269	283.5	311.9	94.0% (-6.0%)

또한, 그림 2.1 (e)와 같이, 반복횡하중 실험에서 초기 실물 제작한 연결장치(가칭 '리바 밴드')갈고리 탈락의 저항하지 못하고 날개가 찢겨져 나가는 등 여러 문제점이 발견되었다. 그러므로, 135° 표준갈고리와 대등한 성능을 발휘하기 위해서는 초기 연결장치의 날개 위치를 내부로 형태를 변경하고, 문힘 길이 또한 더 길게하는 등 전반적인 형상 개선이 필요하여 그림 2.3과 같이, 피철근 D10용으로 문힘 길이 각각 30, 40mm 2가지, 피철근 D13용으로 문힘 길이 40, 60mm 2가지 종류로 하여, 총 4가지 종류의 연결장치를 제작하였다. 그 이름도 RCC내진갈고리(Rebar Confinement Clip-Seismic Hook)로 변경하였다.(이하, 'RCC내진갈고리' 또는 'RCC'로 기술함)

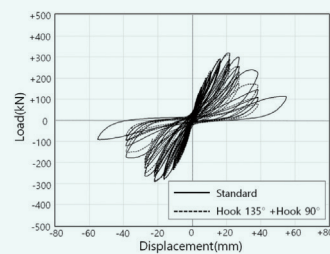


(a) D10용 정착실험을 위한 문힘길이별 형상

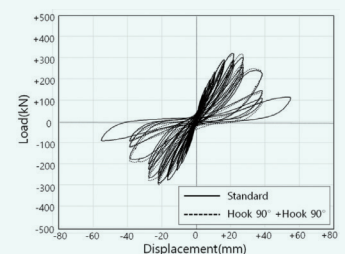


(b) D13용 정착실험을 위한 문힘길이별 형상

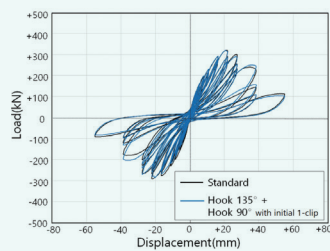
[그림 2.3] 문힘 길이별 RCC내진갈고리 형상 제작



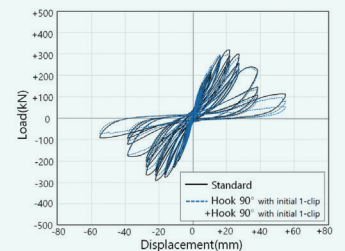
(a) 표준갈고리 상세와 한단 135°+타단 90°갈고리 상세 실험체 비교



(b) 표준갈고리 상세와 양단 90°갈고리 상세 실험체 비교



(c) 표준갈고리 상세와 한단 135°+타단 90°갈고리에 리바밴드 1개 체결



(d) 표준갈고리 상세와 양단 90°에 리바밴드 각 1개씩 총 2개 체결

[그림 2.3] 초기 연결장치(가칭, '리바밴드') 형상 적절성 검토를 위한 반복횡하중 예비성능 실험 결과

3. 부착 및 정착 합성거동 실험

3.1 부착 및 정착의 합성강도

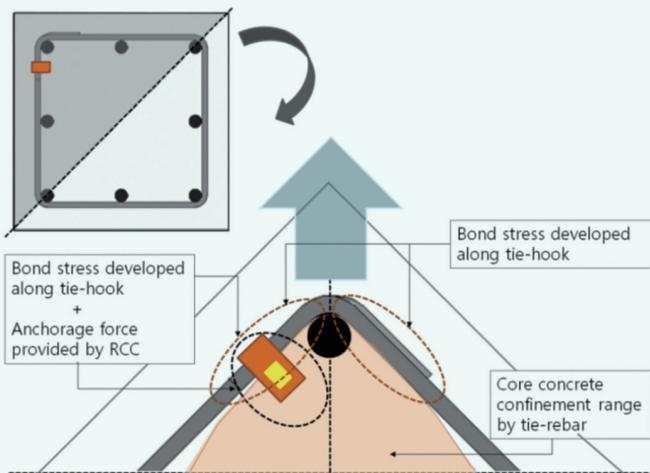
아래 식(1)은 그림 3.1에서, 피철근 단부 90° 갈고리에 RCC를 체결하지 않은 경우로, 한쪽 단부의 90° 갈고리 상태에서 발생하는 부착강도를 나타낸 식이다. 아래 식(2)는, 한쪽 단부 90° 갈고리에 RCC내진갈고리를

체결함에 따라, 띠철근 갈고리가 단부 90° 갈고리 상태에서 발휘되는 부착 강도에 RCC내진갈고리가 콘크리트에 묻혀 있어서 발휘되는 정착 강도가 추가하여 나타나는 합성 강도를 나타낸다.

$$P_1 = 2\tau_b l_{db} (\pi d_b) \cos \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

$$P_2 = [2\tau_b l_{db} (\pi d_b) \cos \frac{\theta}{2} + R_{RCC}] \quad (2)$$

여기서, τ_b 는 띠철근 단부 90° 갈고리에 발생하는 부착응력이고, P_1 은 RCC내진갈고리로 체결되지 않은 상태에서 주철근을 인발할 때의 단부 90° 갈고리에 의하여, 발휘되는 한쪽 단부 갈고리의 부착 강도이다. P_2 는 RCC 내진갈고리로 띠철근 단부 90° 갈고리에 체결함으로써 단부 90° 갈고리에서 발생하는 부착강도에 추가하여, 콘크리트에 묻힌 RCC내진갈고리에 의하여 발휘되는 정착강도가 추가로 더해진 한쪽 단부의 최종 합성 강도이다. d_b 와 l_{db} 는 각각 띠철근의 공칭직경과 부착응력이 발휘되는 묻힘 길이(여장)을 의미한다. 또한, θ 는 갈고리 135° 각일 경우를 0°로 기준으로 하여, 단부 90° 각의 갈고리일 때, 최대 45° 각도를 의미한다. RCC는, 띠철근 단부 90° 갈고리에 체결함에 따라, 부가적으로 발생하는 정착력인 R_{RCC} 를 제공한다. 추가적으로 발휘되는 정착력 R_{RCC} 에 의하여, 더 큰 인발력 P 에 저항할 수 있게 되어, 철근콘크리트 기둥내에서의 심부 콘크리트에 대한 구속효과가 향상된다. 이는 결과적으로, 내진갈고리가 갖고 있는 굽힘 각도 135° 및 띠철근 직경 6배 또한 최소 75mm 이상으로, 콘크리트에 묻혀 발휘되는 강도와 비교하여 동등 이상의 강도와 거동을 보일 경우, 국·내외 콘크리트 기준에서 제시한 내진갈고리의 상세를 대체할 수 있을 것이다.

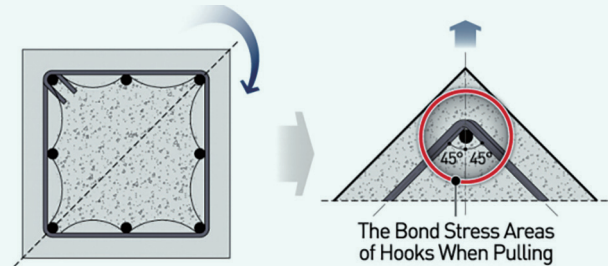


[그림 3.1] 90° 갈고리의 부착 및 RCC결속 상태 정착강도

3.2 RCC내진갈고리로 결속된 띠철근의 1차 정착성능 실험

1차 정착실험은 그림. 3.2와 같이 철근콘크리트 기둥 단면에서 모서리를 중심으로 1/2 이상화하여 600×200×240mm 크기의 콘크리트 블록에 주철근과 띠철근의 배치하여 제작하였다. 실험변수는 양단 내진갈고리

상세, 현장에서 기준을 준수하지 않는 상세, 한쪽 단부 90° 갈고리에 RCC 내진갈고리를 결속한 상세, 양쪽 단부 90° 갈고리에 모두 RCC내진갈고리를 결속한 상세로 하였으며, 띠철근 직경 D10과 D13, 콘크리트 설계기준 압축강도 30 MPa(보통강도), 60 MPa(고강도) 환경에서 총 28개 실험체를 가지고 그림 3.2 (d)와 같이 인발실험(Pull-out)을 실시하였다.

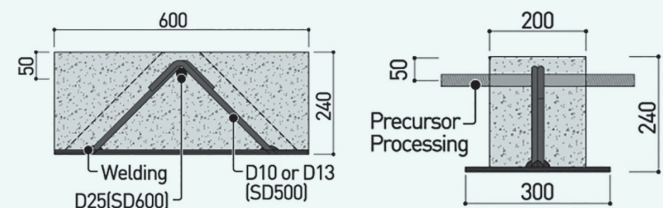


(a) 실험체 이상화

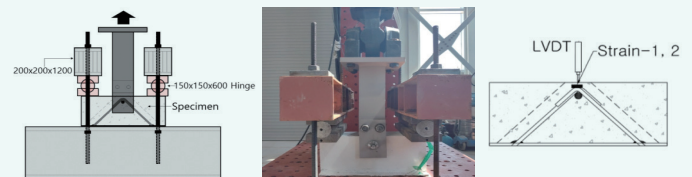
표준갈고리	RCC 미설치	RCC 1개 결속	RCC 2개 결속

띠철근	갈고리 길이(㉠)	RCC 설치위치(㉡)	RCC 묻힘길이(㉢)
D10	75mm	30mm	40mm
D13	78mm	40mm	60mm

(b) RCC내진갈고리 묻힘길이별 설치위치



(c) 정착성능 실험체 형상

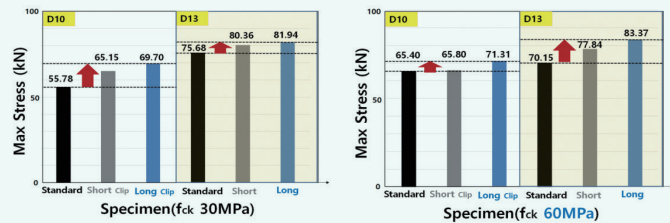


(d) 인발실험 실험체 및 변위를 게이지 설치

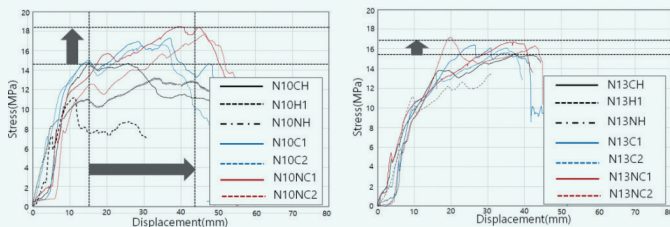
[그림 3.2] 정착성능 실험체 및 인발실험 설치

실험결과, RCC로 결속한 띠철근의 부착 및 정착의 의한 합성강도는 그림. 3.3(a)와 같이 양단 135° 내진갈고리의 띠철근 실험체보다 콘크리트 압축강도와 띠철근 직경에 관계없이, 더 높게 나타났다. 실험체 최종 파괴

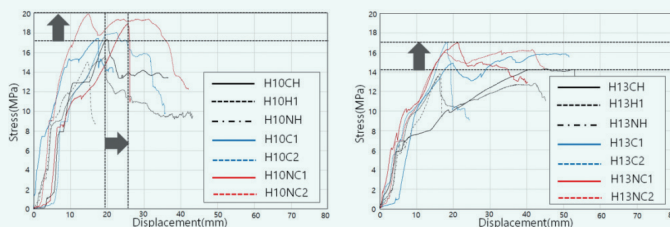
형상에서도 유사한 균열진전 및 콘크리트 파괴범위를 보여주었으며, 실험 종료후 갈고리 형상 비교에서도 RCC로 결속한 갈고리는 벌어지는 현상이 발생하지 않았다. 하중-띠철근 변형률 비교에서도 한쪽 135° 내진갈고리의 띠철근 변형률과 RCC로 결속한 띠철근의 변형률은 유사한 거동을 보여주었다. 반면에, 한쪽 90° 갈고리로 마무리하여 RCC로 결속하지 않은 경우(현장에서 주로 시공되는 상세)는 135° 내진갈고리를 적용한 경우보다 콘크리트 파괴범위도 크게 나타났고, 실험 종료후 갈고리 벌어짐 정도도 컸으며, 띠철근 변형률 비교에서도 135° 내진갈고리의 띠철근 변형률 1/3 에도 미치지 못하는 시점에서 실험이 종료되었다. 그러므로, RCC 결속에 따른 부착 및 정착의 합성강도는, 콘크리트 최종 파괴범위 및 형상, 갈고리 벌어짐 정도, 띠철근 변형률 비교에서 RCC로 결속하는 경우, 135° 내진갈고리를 적용한 띠철근과 대등하거나 더 우수한 부착 및 정착능을 보유하고 있는 것으로 평가할 수 있었다.



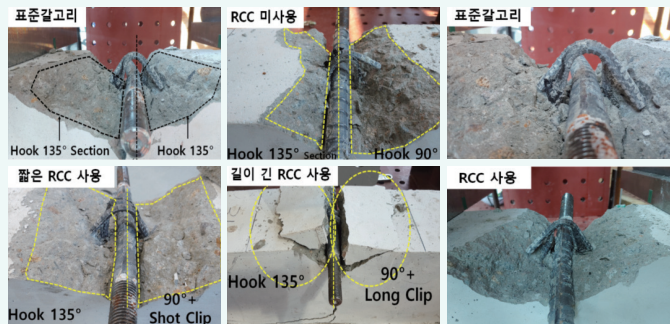
(a) 부착 및 정착강도 비교



(b) 30 MPa 보통강도 콘크리트에서 정착응력 비교

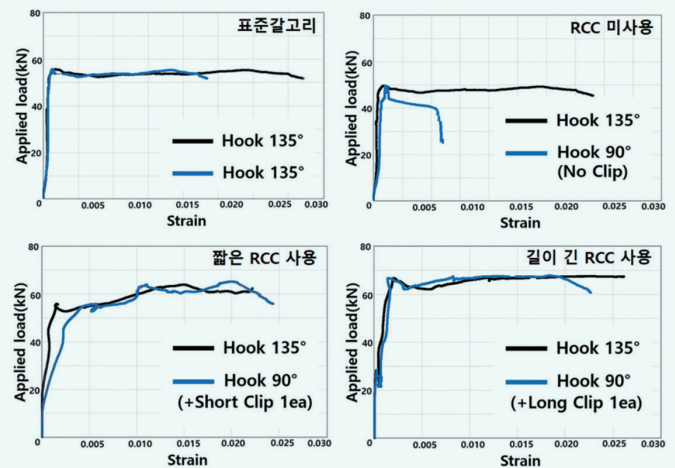


(c) 60 MPa 고강도 콘크리트에서 정착응력 비교



(d) 콘크리트 파괴범위 비교

(e) 갈고리 벌어짐 비교

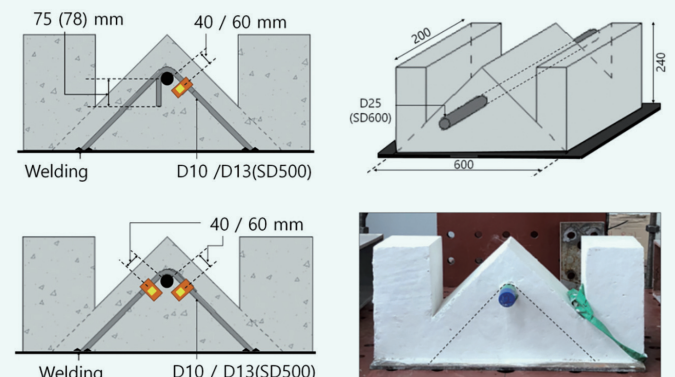


(f) 하중-띠철근 변형률 비교

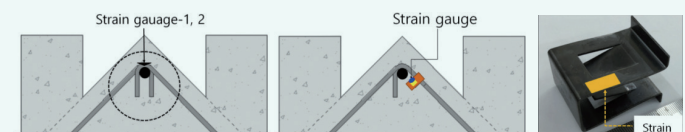
[그림 3.3] 인발실험을 통한 1차 정착실험 결과

3.3 콘크리트 피복두께를 고려한 2차 정착성능 실험

3.2절의 정착성능 실험은 135° 표준갈고리의 기준 상세와 RCC내진갈고리 사용에 따른 상대적 구조성능 평가로 특별한 문제는 되지 않는다. 그러나, 보다 실제 철근콘크리트 기둥 환경과 유사하도록 콘크리트 피복두께를 고려하여 실험체를 그림. 3.4 (a)와 같이 제작하였다. 실험변수는 1차 정착성능 실험과 동일하게 하였으며, 띠철근 종류는 D10과 D13을 사용하고 콘크리트 실제 압축강도 30 MPa에서 135° 표준갈고리의 기준 상세를 적용한 실험체, 한단 135°와 타단 90° 갈고리에 RCC내진갈고리가 1개 결속된 실험체, 양단 90° 갈고리에 각 1개씩 총 2개의 RCC내진갈고리가 결속한 실험체, 총 6개의 실험체로 인발실험(Pull-out)을 실시하였다.

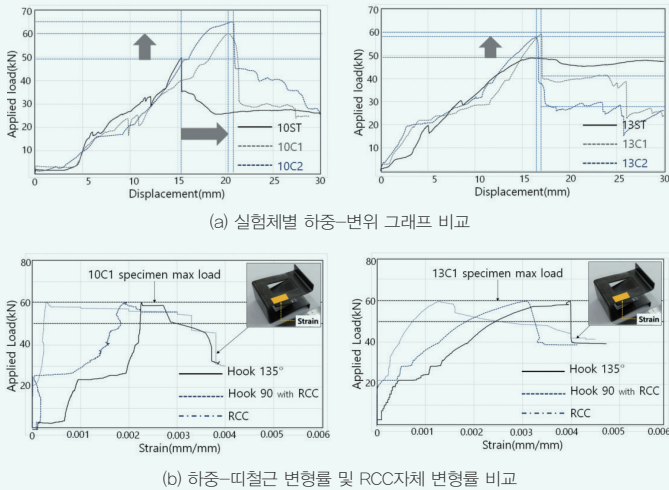


(a) RCC내진갈고리 설치 위치 및 실험체 형상



(b) 변형률 게이지 설치

[그림 3.4] 2차 정착성능 실험체 형상 및 게이지 설치

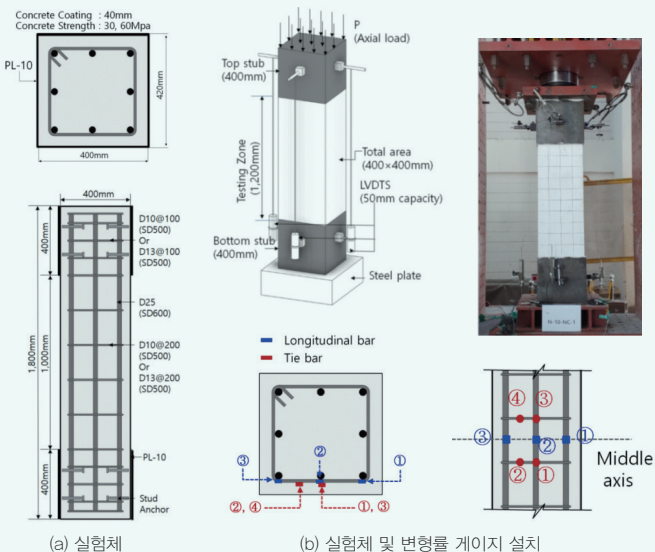


[그림 3.5] 2차 정착성능 실험결과

2차 정착성능 실험결과, 콘크리트 피복두께를 고려한 실험체에서도 RCC내진갈고리로 결속한 경우, 양단 135° 표준갈고리를 적용한 경우 보다 더 높은 강도값을 보여주었다. 하중-미철근 변형률 비교에서도, 135° 표준갈고리의 미철근과 RCC내진갈고리로 결속한 갈고리 미철근의 변형률 거동은 유사한 거동을 보여주었다. 또한, RCC내진갈고리 자체의 변형률도 하중에 따라 미철근 변형률과 같은 거동을 보여주었다. 이와 같은 1, 2차의 정착성능 실험을 통하여 그 결과값을 근거로 철근콘크리트 기둥 뿐만 아니라, 모든 135° 표준갈고리와 비교할 때 대등한 부착 및 정착성능을 보유하고 있는 것으로 평가할 수 있었다.

4. 중심축하중 실험 검증

RCC내진갈고리 사용에 효과가 있음을 평가하기 위하여 축하중을 받는 철근콘크리트 기둥을 모사한 후 실험체 총 10개를 제작하였다.



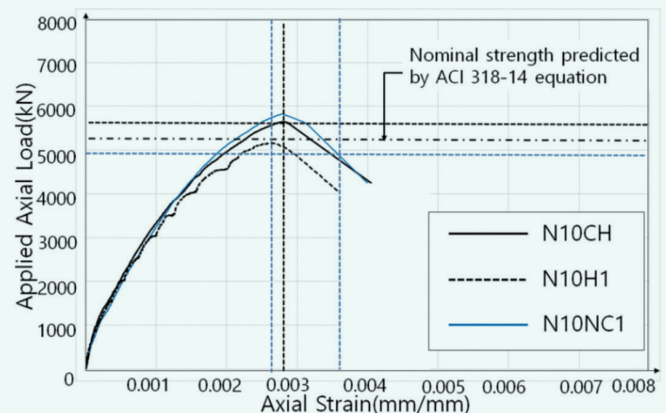
[그림 4.1] 중심축하중 실험체 형상 및 설치

축하중 작용에 따라 양단 135° 표준갈고리를 적용한 실험체와 한쪽 단부 90° 갈고리에 RCC내진갈고리를 결속하였을 경우의 성능을 비교하였다. 실험변수는 양단 135° 표준갈고리 상세, 한단 135°와 타단 90° 갈고리, 한단 135°와 타단 90° 갈고리에 RCC를 결속한 실험체로 미철근 D10과 D13, 콘크리트 설계기준 압축강도 30 MPa(보통강도), 60 MPa(고강도)로 하였다.

[표 4.1] 실험체 분류

실험체명	내 용
①	콘크리트 압축강도 ; N: 보통강도(Normal) $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$, H : 고강도(High) $f_{ck} = 60 \text{ MPa}$
②	미철근 직경 ; 10: 10mm, 13: 13mm
③	NC1 RCC 1개 결속(New clip 1ea)
	CH 기준 상세(Criterion of Hoop detail) (양단 135° 표준갈고리)
	H1 한쪽 단부 135°, 다른 한쪽 단부 90°갈고리

중심축하중 실험결과는 표 4.2와 같으며, 주요 비교 평가로는 최대 압축내력값 및 압축연성비, 강도증가계수, 균열 진전 및 파괴 양상, 주철근 좌굴길이, 실험 종료후 갈고리 형상, 변형률 관계로 비교 평가하였다. 평가 결과, 미철근 D13에서 RCC내진갈고리를 사용한 H13NC1의 실험체를 제외하고(실험 완료후 확인결과 편심하중 발생), 최대 압축내력은 4% 이상, 강도증가계수는 4~5% 이상의 높은 값을 보였다. 갈고리 형상 비교에서, RCC내진갈고리는 실험 종료후에도 그림. 4.4와 같이 심부(Core) 콘크리트에 묻혀 처음 갈고리가 배근된 상태를 유지하고 있었다. 또한, 주철근 및 미철근 변형률 비교에서도 양단 135° 표준갈고리로 배근된 실험체와 비교할 때 RCC내진갈고리를 사용한 실험체는 유사한 거동을 보여주었다. 이와 같은 결과로부터, 축하중 환경에서 철근콘크리트 기둥에서 RCC내진갈고리를 사용할 경우, 135° 표준갈고리를 적용한 경우와 대등하거나 보다 우수한 구속효과 성능을 발휘하는 것으로 평가할 수 있었다.



[그림 4.2] 중심축하중-축변위 관계

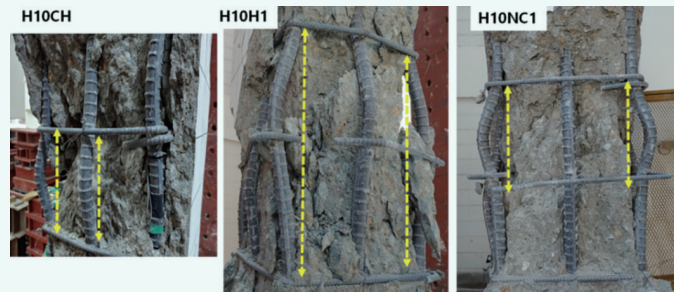
[표 4.2] 중심축하중 실험결과

실험체	f_{ck} (MPa)	d_b (mm)	ρ_v (%)	최대압축내력		P_{conc} (kN)	$P_n = 0.8 \times$ ($P_{\Delta ACI}$) (kN)	f_{cc} (Mpa)	$0.85f_{ck}$ (Mpa)	강도증가계수 (K_s)		$\frac{P_{test}}{P_n}$
				P_{test} (kN)	기준과 비교					K_s	기준과 비교	
1. N10CH	30	10	0.276	5,642	100 %	3,700	5,128	29.66	25.50	1.16	100%	1.100
2. N10H1				5,153	91 %	3,206		25.70		1.00	87 %	1.005
3. N10NC1				5,817	103 %	3,870		31.02		1.22	105%	1.134
4. N13CH		13	0.497	6,751	120%(100)	4,804		38.51		1.51	130%(100)	1.316
5. N13NC1				6,976	124%(103)	5,029		40.31		1.58	136%(105)	1.360
6. H10CH	60	10	0.276	8,726	100 %	6,779	8,309	54.34	51.00	1.07	100%	1.050
7. H10H1				8,645	99 %	6,698		53.69		1.05	99 %	1.040
8. H10NC1				9,004	103 %	7,057		56.57		1.11	104%	1.084
9. H13CH		13	0.497	8,995	103%(100)	7,048		56.49		1.11	104%(100)	1.083
10. H13NC1				8,556	98%(95)	6,609		53.00		1.04	98%(94)	1.030

[Notes] d_b = 띠철근 직경, ρ_v = 띠철근 체적비, P_{test} = 최대압축내력 실험결과값, P_{ST} = 주철근이 기여하는 내력, $P_{conc} = P_{test} - P_{ST}$, $(P_{cl})_{ACI}$ = ACI 318-14기준에 따른 공칭내력, f_{cc} = 각각의(P_{conc})/($A_g - A_{ST}$), K_s = 횡보강근에 따른 강도증가계수



(a) 30 MPa 보통강도 콘크리트

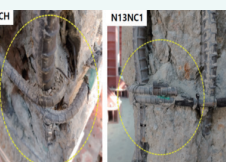


(b) 60 MPa 고강도 콘크리트

[그림 4.3] 주철근 좌굴 길이 비교



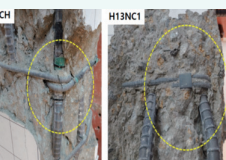
(a) 30 MPa 콘크리트, 띠철근 D10



(b) 30 MPa 콘크리트, D13

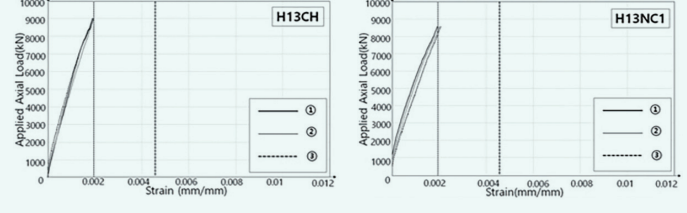
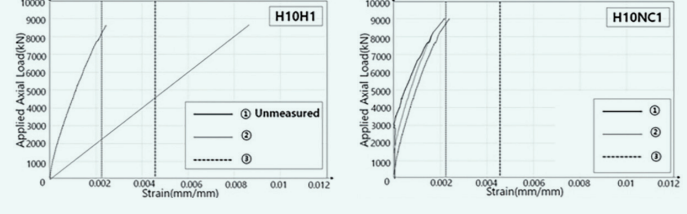
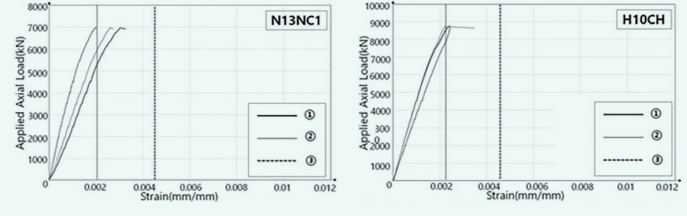
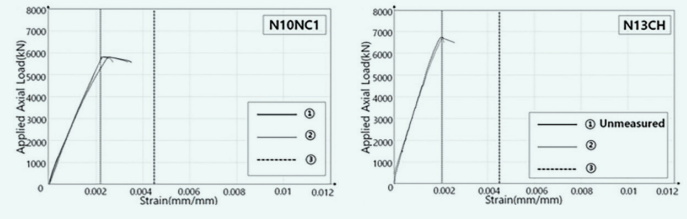
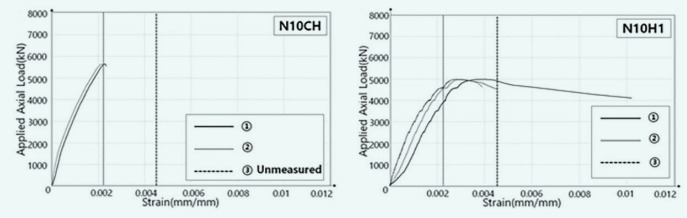


(c) 60 MPa 콘크리트, 띠철근 D10

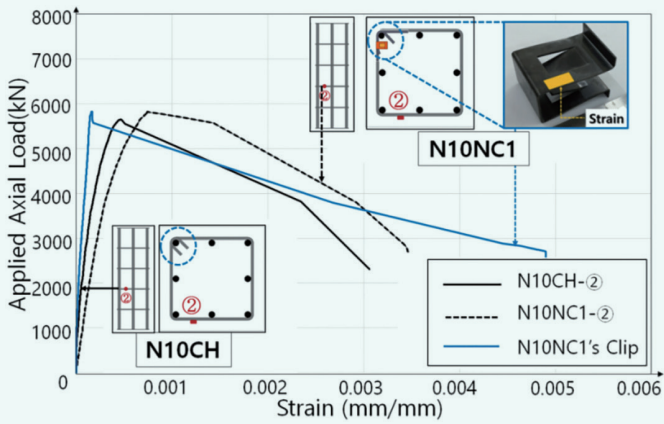


(d) 60 MPa 콘크리트, D13

[그림 4.4] 실험종료후 갈고리 변형 형상 비교



[그림 4.5] 중심축하중 실험에서 하중-주철근 변형을 비교



[그림 4.6] 하중-RCC 변형률 비교

반면, 기준을 준수하지 않은 상세로 한쪽 단부 90° 갈고리를 적용한 실험체에서는 그림. 4.3.과 그림. 4.4.의 N10H1과 H10H1의 주철근 좌굴 및 갈고리 탈락 현상도 초기에 발생하였고, 주철근의 좌굴 길이도 양단 135° 표준갈고리 기준 상세를 적용한 경우와 비교할 때 매우 큰 변형을 보여주었다. 변형률 관계에서도 주철근 변형률은 기준 상세에 비하여 매우 컸으며, 띠철근 변형률은 기준 상세의 띠철근 변형률에 크게 미치지 못한 결과가 나타났다. 이는 현장에서 기준을 준수하지 않는 경우, 철근콘크리트 기둥의 내력 저하를 초래할 수 있음을 보여주는 결과이다.

5. 지진과 같은 반복횡하중 저항성능에 관한 실험 검증

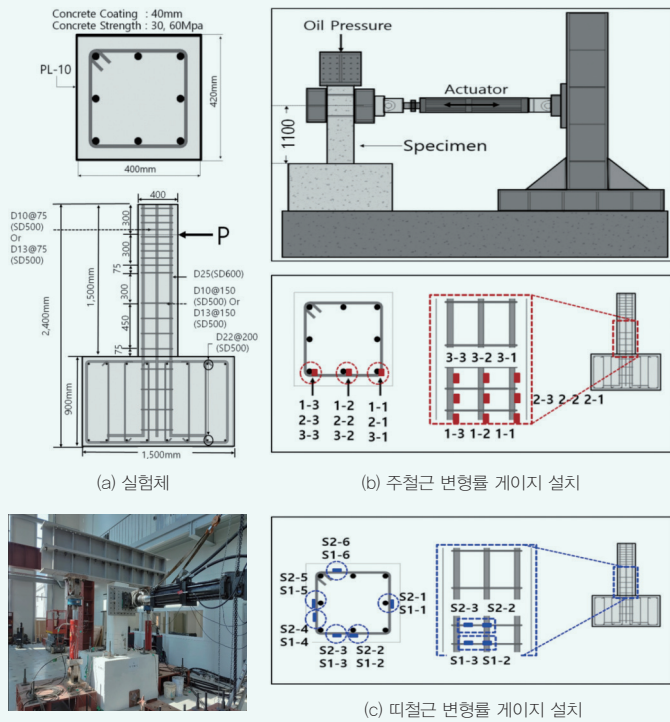
지진과 같은 환경에서도 RCC내진갈고리 사용의 효과가 있음을 검증하

기 위하여 반복횡하중을 받는 철근콘크리트 구조물을 모사한 후 기둥 실험체 총 10개를 제작하였다. 반복횡하중 작용에 따라 중심축하중 실험 검증과 동일하게 135° 표준갈고리를 적용한 실험체와 한쪽 단부 90° 갈고리에 RCC내진갈고리로 결속하였을 경우의 성능을 비교하였다. 실험변수 또한 중심축하중 실험과 동일하게 적용하였다. 실험결과는 표 5.1과 같으며, 주요 비교 평가는 반복횡하중-횡변위 관계, 최대 휨내력 및 변위연성비, 에너지 소산능력 및 포락곡선, 균열 진전 및 파괴 양상, 실험 종료후 갈고리 형상, 변형률 관계를 평가하였다. 실험결과, 최대 휨내력에서 기준 상세와 비교할 때 RCC내진갈고리 사용할 때 대등하거나 4% 이상, 변위연성비는 2~15% 이상 증가하였으며, 에너지 소산능력은 10~23% 이상의 높은 값을 보였다. 포락곡선과 균열 진전 및 파괴 양상에서는 유사한 거동 및 형상을 보여주었으며, 변형률 관계에서도 양단 135° 표준갈고리를 적용한 경우와 한쪽 단부 90° 갈고리에 RCC내진갈고리로 결속한 경우, 모두 유사한 변형률을 보여주었다. 중심축하중 실험 검증에서와 동일하게 갈고리 형상 비교에서도 RCC내진갈고리는 실험 종료후에 그림. 5.4에서 보는 보와 같이 심부(Core) 콘크리트에 묻혀 처음 갈고리가 배근될 상태를 유지하고 있었다. 또한, 포락곡선 비교와 주철근 및 띠철근 변형률 비교에서도 양단 135° 표준갈고리로 배근된 실험체와 비교하여 RCC내진갈고리를 사용한 실험체는 그림. 5.5와 같이 모두 유사한 거동을 보여주었다. 이와 같은 결과를 근거로 철근콘크리트 기둥에서 RCC내진갈고리를 사용할 경우, 지진과 같은 반복횡하중에 대하여 양단 135° 표준갈고리를 적용한 경우와 대등하거나 보다 우수한 횡구속 효과성능을 발휘하는 것으로 평가할 수 있었다.

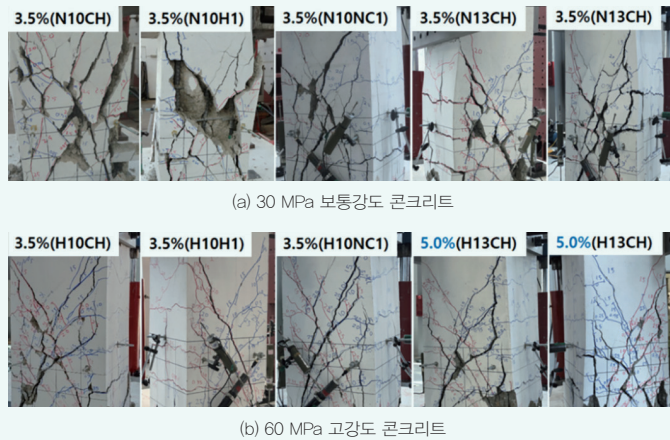
[표 5.1] 반복횡하중 실험결과

실험체	ρ_{sh} (%)	실험 결과										
		P_{test} (kN)			$(M_n)_{test}$ (kN·m)		$(M_n)_{pre}$ (kN·m)	$\frac{(M_n)_{test}}{(M_n)_{pre}}$	Δ_y mm	Δ_{80} ($=\Delta_u$) mm	$\mu_\Delta (\Delta_u/\Delta_y)$	
		P_{cr}^+	P_{cr}^-	Ave.	$(M_n)_{test}$	기준과 비교	ACI 318-14				μ_Δ	기준과 비교
1 N10CH	0.276	310.4	278.8	294.6	323.4	100 %	328.8	0.984	16.9	33.6	1.99	100 %
2 N10H1		303.3	269.7	284.9	313.4	97 %	328.8	0.953	16.6	30.5	1.84	92 %
3 N10NC1		319.5	291.0	305.3	335.8	104 %	328.8	1.021	16.4	34.0	2.07	104 %
4 N13CH	0.497	384.9	377.2	381.1	419.3	100 %	328.8	1.275	22.5	38.9	1.73	100 %
5 N13NC1		382.3	383.7	383.0	421.3	100 %	328.8	1.281	19.8	39.2	1.98	114 %
6 H10CH	0.276	436.1	463.2	449.6	494.6	100 %	478.9	1.033	20.5	33.0	1.61	100 %
7 H10H1		445.0	432.0	438.5	482.3	98 %	478.9	1.007	21.5	33.8	1.57	98 %
8 H10NC1		451.8	444.6	448.2	493.0	100 %	478.9	1.030	22.0	36.0	1.64	102 %
9 H13CH	0.497	420.6	453.9	437.2	481.0	100 %	478.9	1.004	19.7	43.8	2.22	100 %
10 H13NC1		436.7	443.4	440.1	484.1	100 %	478.9	1.011	21.5	55.0	2.56	115 %

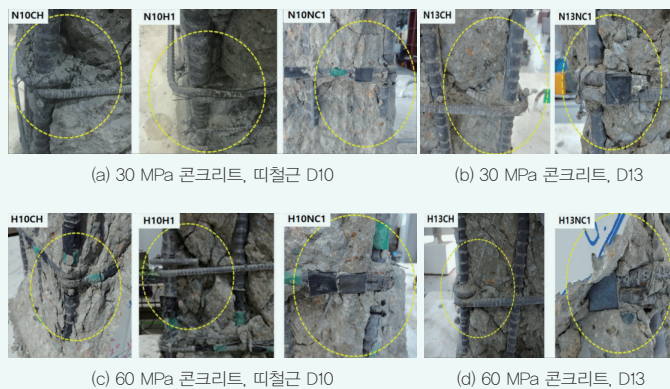
[Notes] ρ_{sh} = 띠철근 체적비, P_{test} = 정·부방향에서 측정된 최대하중의 평균값, Δ_y = 정·부방향에서 측정된 항복변위의 평균값, Δ_{80} = 정·부 방향의 $P-\Delta$ 그래프에서 $0.8P_{test}$ 일 때의 변위값, μ_Δ = 변위연성비, $(M_n)_{pre}$ = 예상한 최대 휨내력값



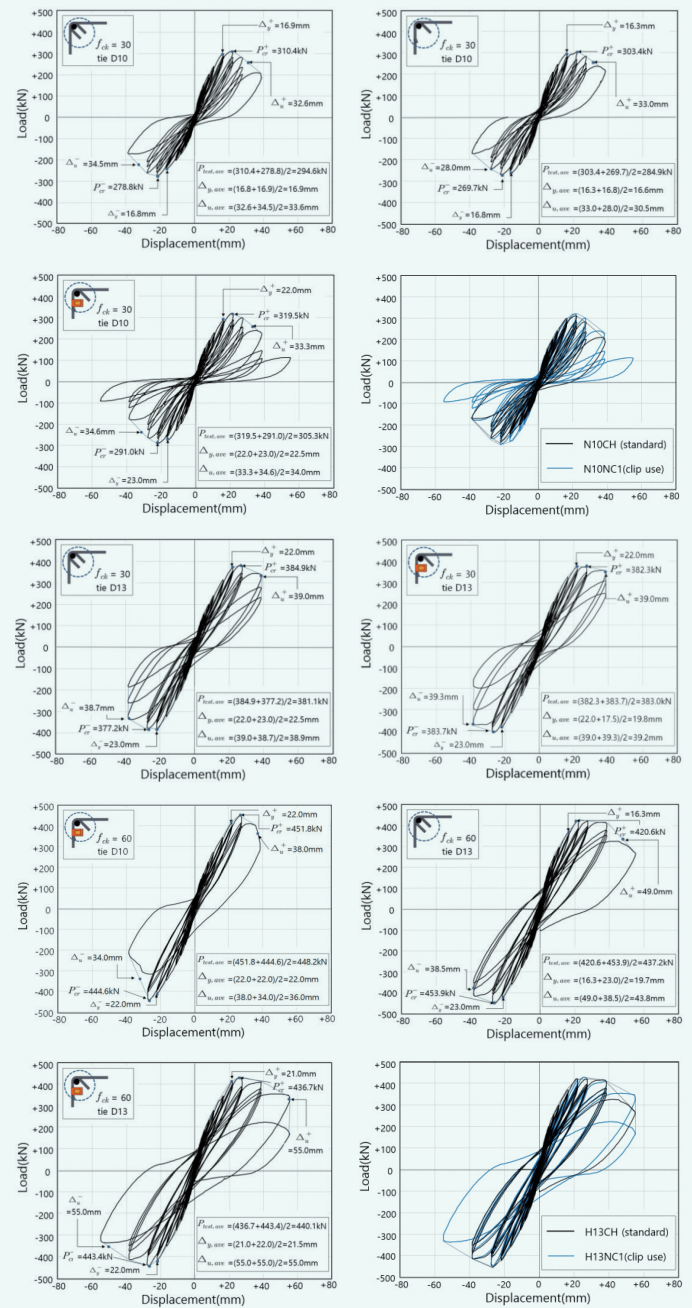
[그림 5.1] 반복횡하중 실험체 형상 및 설치



[그림 5.3] 주철근 좌굴 길이 비교

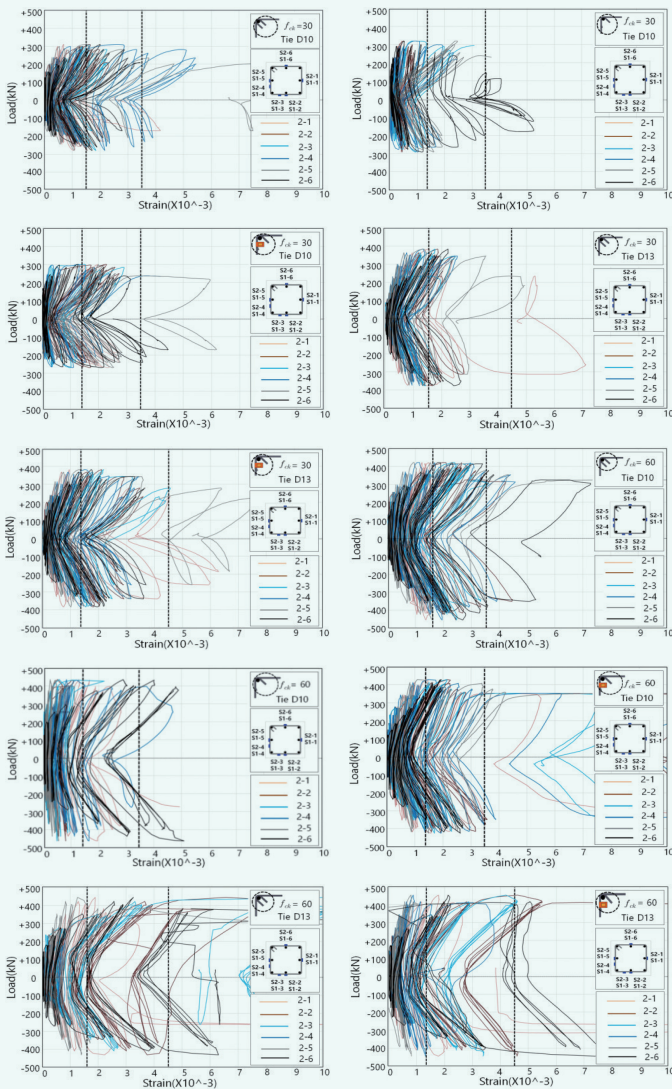


[그림 5.4] 실험종료후 갈고리 변형 형상 비교

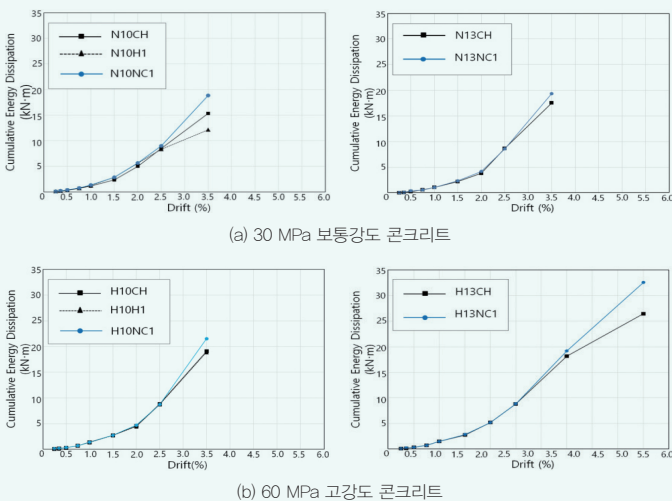


[그림 5.2] 횡하중-횡변위 관계 그래프 비교

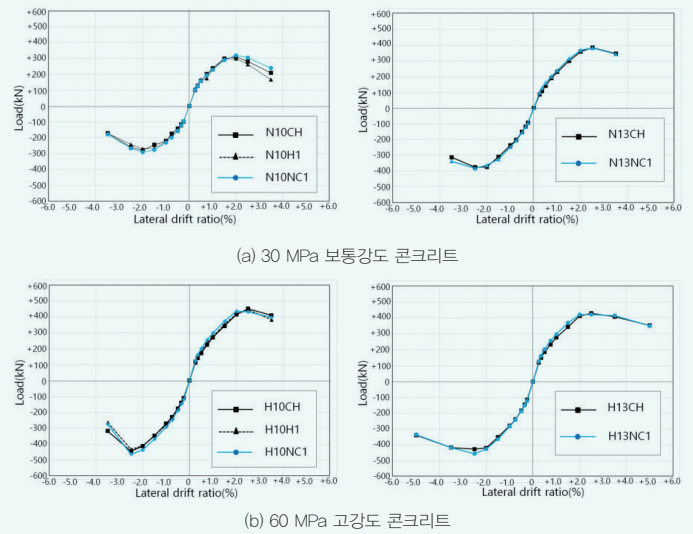
반면, 기준을 준수하지 않는 상세로 한쪽 단부 90° 갈고리를 적용한 실험체에서는 갈고리 탈락 현상도 중심축하중 실험에서 보여준 결과와 같이 초기에 발생하였으며, 주철근 변형률 관계에서도 양단 135° 표준갈고리의 기준 상세에 비교할 때 매우 컸다. 피철근 변형률에서도 기준 상세와 비교할 때 크게 미치지 못하여 연성능력에서도 성능이 상당히 부족한 결과를 나타냈다. 이는 중심축하중 실험검증에서와 마찬가지로 현장에서 기준을 준수하지 않는 경우 철근콘크리트 기둥의 내력 저하를 초래할 수 있음을 보여주는 결과이다.



[그림 5.5] 반복횡하중 실험에서 하중-변형률 변형률 비교



[그림 5.6] 반복횡하중 실험에서 실험체별 에너지 소산능력 비교

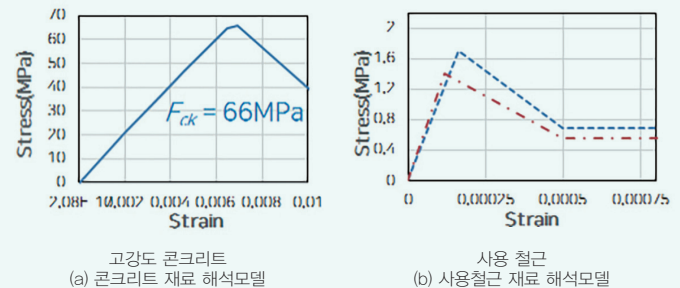


[그림 5.7] 반복횡하중 실험에서 실험체별 포락곡선 비교

6. RCC내진갈고리 적용에 대한 해석평가

6.1 유한요소해석 평가 개요

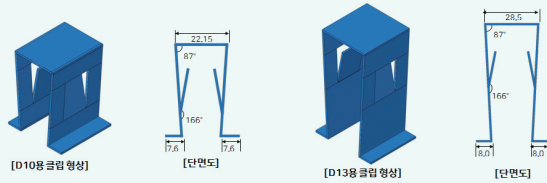
RCC내진갈고리 적용에 대하여 다양한 조건에서 해석을 수행하였으며, 그 수행은 경희대학교 김대진 교수님 연구실에서 수행하였다. RCC 내진갈고리 사용에 따른 해석 평가를 위하여, 철근콘크리트 기둥의 유한 요소 해석 모델을 개발하고, 이를 근거한 해석 결과를 $400 \times 400 \text{mm}$ 기둥으로 시행한 실험결과와 비교하여 정확성을 평가하였다. 또한, 개발된 유한 요소해석 모델을 활용하여 $800 \times 800 \text{mm}$ 의 단면 및 $1,200 \times 1,200 \text{mm}$ 의 단면 기둥을 해석하였다. 유한요소해석을 수행한 결과, RCC 내진갈고리를 적용할 때, 135° 표준갈고리 상세를 적용한 경우와 대등한 성능이 발휘되고 있음을 확인할 수 있었다. 해석할 때의 고려된 사항은 다음과 같다. 유한해석프로그램(S/W)은 ABAQUS/CAE 2018[Part option : Concrete(Deformable, Solid), Plate(Deformable, Shell), Bar(Deformable, Wire), Material ; Concrete: Bi-linear tensile model, Steel: Perfect elasto-plastic model]을 사용하였으며 콘크리트 및 사용 철근의 해석모델은 그림. 6.1.과 같다.



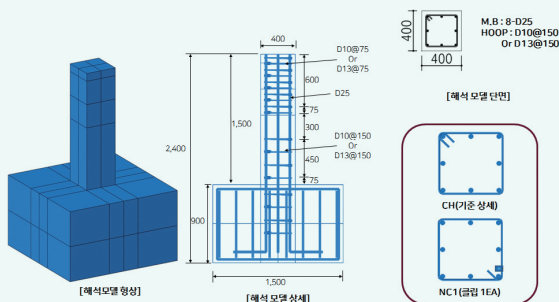
[그림 6.1] 콘크리트 및 사용철근 재료해석 모델

6.2 실험과 해석 결과 비교 분석을 통한 정확성 평가

모든 해석은 실험 조건과 동일한 규격 및 물성의 철근을 적용하였고, 해석모델링에서 RCC내진갈고리에 대한 상세모델링을 실시하여 정확성을 확보하였다. 하중의 범위는 그림. 6.3에서와 같이 기둥 상부면에 및 기둥의 옆면에 가력하였고, 하중 적용에 실제 실험조건과 동일하게 축가력(Y축)은 $0.1P_0$ 의 고정하중으로 하고, 횡하중(Z축)은 점진적으로 가력하였다. 지점 적용은 지점부 하부면은 X, Y, Z 변위에 대하여 고정하였다.

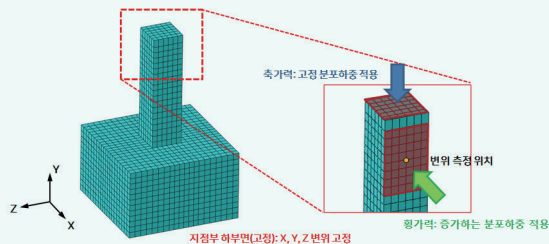


(a) RCC내진갈고리 상세모델링



(b) 반복횡하중 실험체 해석모델링

[그림 6.2] RCC내진갈고리 및 실험체 해석모델링

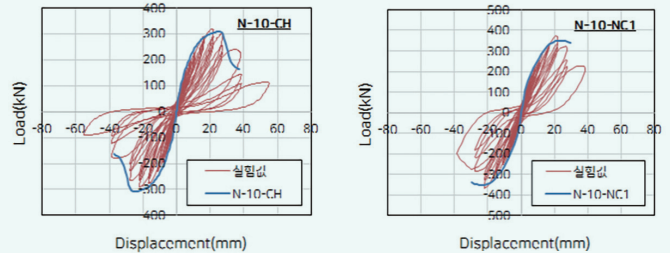


[그림 6.3] 하중 적용 모델링

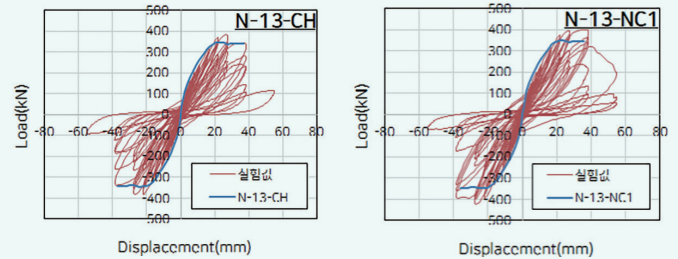
[표 6.1] 해석결과와 실험 실험결과와의 오차 분석

실험체명	ABAQUS 해석결과값	실험 실험 결과값(kN)			오차(%)		
		최대하중 (kN)	정가력 최대하중	부가력 최대하중	정가력 오차	부가력 오차	평균 오차
1. N10CH	308.5	310.4	278.8	294.6	-0.62	9.63	4.51
2. N10NC1	350.6	319.5	291.0	305.3	8.87	20.48	14.84
3. N13CH	344.9	384.9	377.2	381.1	-11.60	-9.37	-10.49
4. N13NC1	347.9	382.3	383.7	383.0	-8.99	-9.32	-9.16
5. H10CH	440.7	436.1	463.2	449.6	-5.11	1.04	-2.04
6. H10NC1	442.6	451.8	444.6	448.2	-2.08	-0.45	-1.27
7. H13CH	441.9	420.6	453.9	437.2	4.82	-2.72	1.05
8. H13NC1	443.9	436.7	443.4	440.1	1.62	0.11	0.87

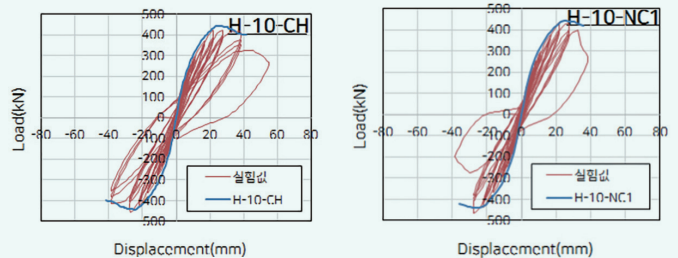
해석한 결과와 실험 결과를 비교 검토한 결과는 표 6.1과 그림. 6.4.에서 보는 바와 같으며, 그 결과 0.87~14.84%의 범위에서 오차가 발생하였다. 이 해석결과와 실험결과를 비교할 때, 내력이 오차는 크지 않아 해석결과와 실험결과는 일치하는 것으로 나타났다.



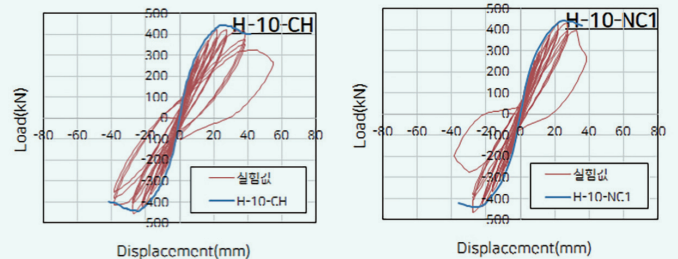
(a) 30 MPa 보통강도 콘크리트에서의 해석과 실험결과 비교(D10)



(b) 30 MPa 보통강도 콘크리트에서의 해석과 실험결과 비교(D13)



(c) 60 MPa 고강도 콘크리트에서의 해석과 실험결과 비교(D10)



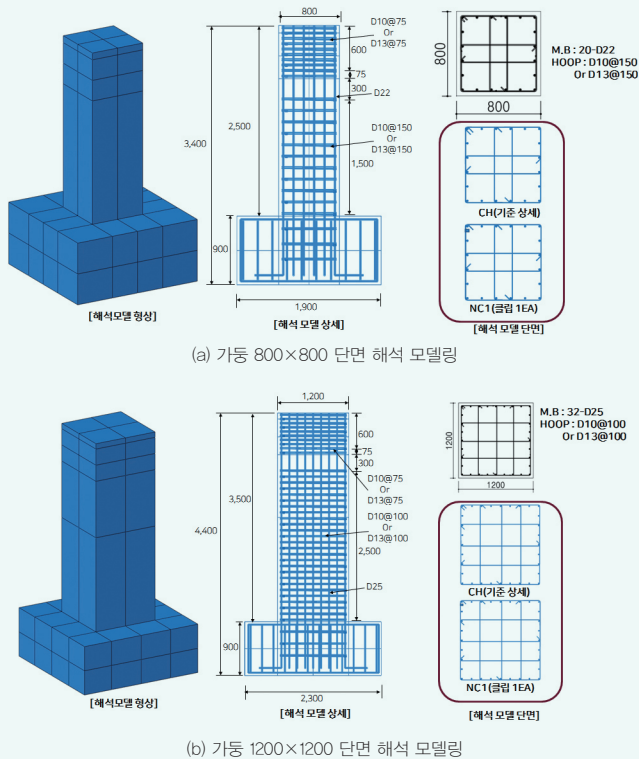
(d) 60 MPa 고강도 콘크리트에서의 해석과 실험결과 비교(D13)

[그림 6.4] 유한요소해석 및 실험결과 비교

6.3 다양한 기둥 단면 크기에서 해석적 평가

실험대 실험에서 모든 철근콘크리트 기둥의 조건에서 실험을 할 수 없으므로 실험에서 실시한 단면외에 다양한 철근콘크리트 기둥 단면을 가정하여 해석을 실시하였다. 다양한 철근콘크리트 기둥 단면 크기 가정은 저층 규모 건축물일 경우 400×400 mm 단면, 중층 규모 건축물일 경우 기둥

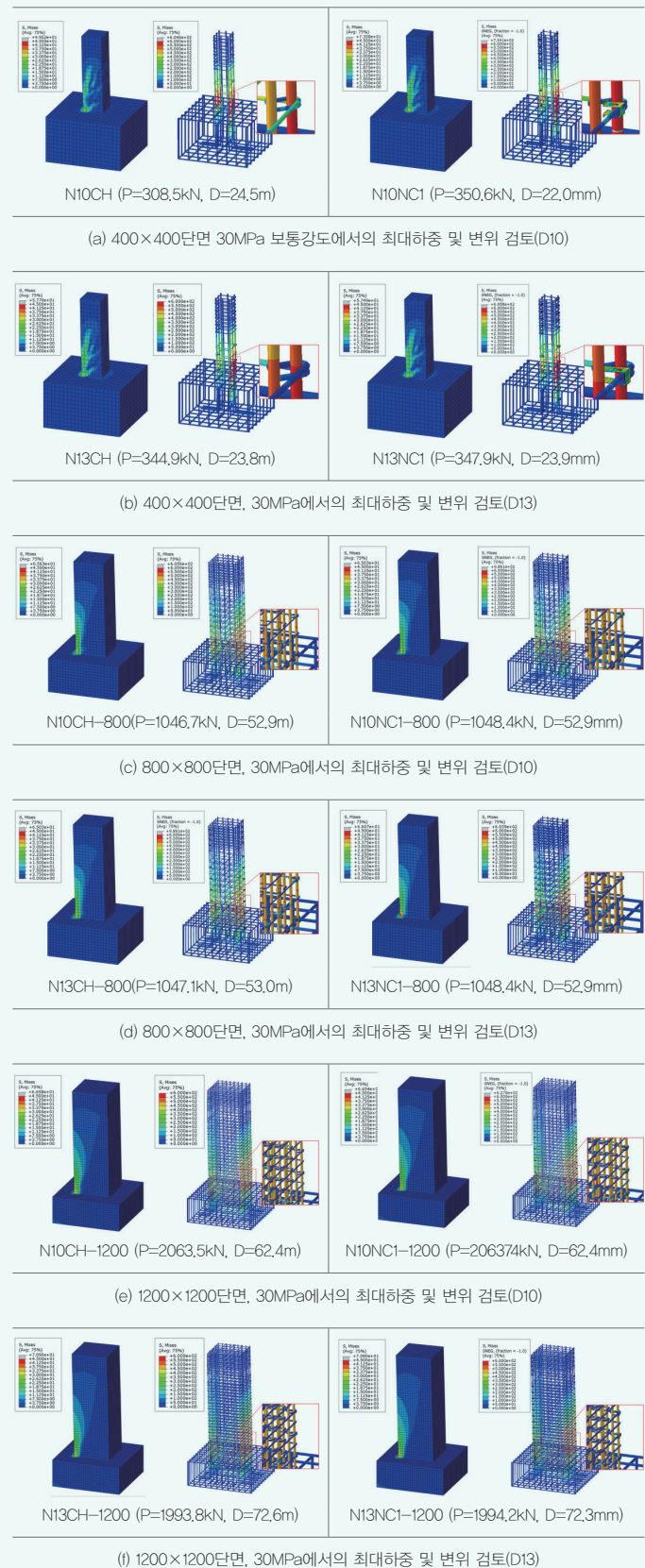
단면 800×800mm, 고층 건축물 또는 전이층의 기둥에서 일반적으로 적용되는 1,200×1,200mm 단면으로 구분하여 해석을 수행 하였다. 이보다 큰 크기의 기둥 단면은 단면적에 따른 단위 면적의 하중 변화가 크지 않는 것으로 확인되었다. 후프철근의 간격변화에 따른 최대하중의 비교 분석을 위하여 후프철근의 간격은 D10,13@100, D10,13@150, D10,13@200로 분류하여 해석결과를 분석하였다. 해석할 때 135° 표준갈고리와 RCC내진갈고리를 적용했을 경우의 최대 하중을 비교 분석하였다. 그 결과, RCC내진갈고리를 적용한 경우에도 135° 표준갈고리와 대등한 내력을 확보하고 있는 것으로 확인되었다.



[그림 6.5] 다양한 기둥 단면에서의 유한요소 해석

[표 6.2] 단면크기별 최대하중 및 변위 비교

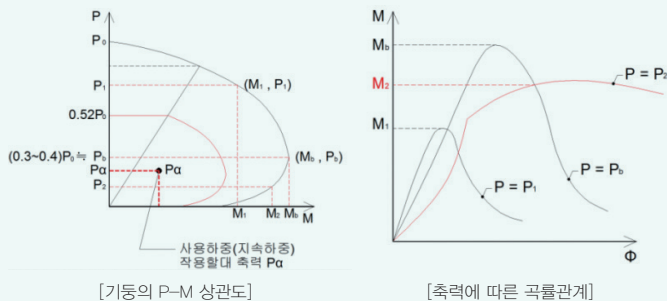
실험체명	ABAQUS해석 결과값		실험체명	ABAQUS 결과값	
	최대하중(kN)	변위(mm)		최대하중	변위
N10CH-800	1046.7	52.9	N13CH-800	1047.1	53.0
N10NC1-800	1048.4	52.9	N13NC1-800	1049.7	53.0
N10CH-1200	2063.5	62.4	N13CH-1200	1993.8	72.6
N10NC1-1200	2063.4	62.4	N13NC1-1200	1994.2	72.3



[그림 6.6] 다양한 기둥 단면별 최대하중에서 해석 결과

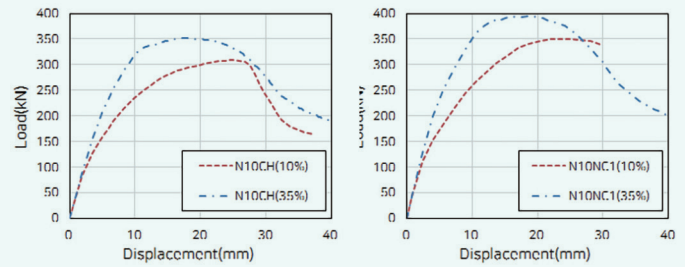
6.4 0.35 P₀ 고축력에서 유한요소 해석결과

한국건축구조기술사회 인증심사 과정에서 0.35P₀이상 고축력하에서의 추가적인 검증이 있어야 한다는 일부 의견이 있어, 단국대학교 정란 교수님과 카이스트 김진근 교수님으로부터 RCC내진갈고리 사용에 대하여 전반적인 자문의견을 받았으며, 실험과 해석을 한 내용이 크게 문제가 없음을 확인하였다. 자문내용의 주요 의견은 철근콘크리트 기둥의 휨거동(특히, 연성거동에 대한 영향)은 작용하는 하중 축력에 크게 좌·우되므로 적절한 결과를 얻기 위하여 반복횡하중 실험에서 작용 축하중의 크기 설정은 중요하고, 사용하중(지속하중보다 약간 큰)이 작용할 때 지진하중이 실제 구조물에서 작용하므로 실험할 때 가능하면 사용하중이 작용할 때의 축력을 가한 다음에 반복횡하중을 실시하는 실험이 바람직하다는 의견을 주셨다. 일반적인 건축구조물(건물)의 경우, 사용하중이 작용할 때 기둥의 축력은 (0.1~0.25)P₀(f_{ck}A_g) 정도이므로 이번 반복횡하중 실험에 적용한 0.1P₀ 값은 적절하다는 자문의견도 같이 주셨다. 자문의견에 대한 종합적인 의견으로 RCC내진갈고리 사용은 내진갈고리 이상의 성능이 확보되고 있으며 철근콘크리트 기둥에서 RCC내진갈고리 사용의 문제는 전혀 없다는 의견을 내려주셨다.

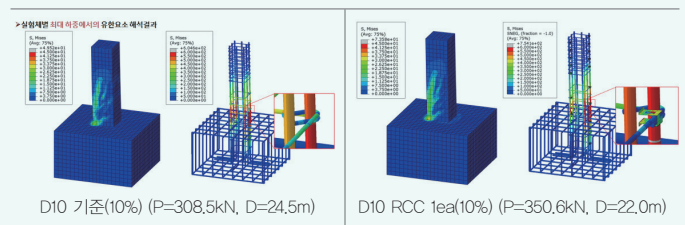


[그림 6.7] 기둥 P-M 상관도 및 축력에 따른 곡률관계

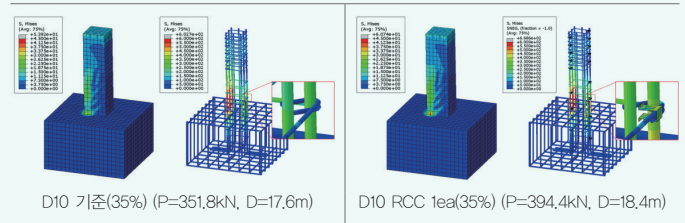
그럼에도 불구하고, 한국건축구조기술사회에서 RCC내진갈고리 기술에 대하여 인증할 때 축력비 0.25P₀이하의 경우로 제한사항이 두었다. 이에 따라, 0.25P₀를 초과하는 경우에 대하여 추가 해석을 수행하였으며, 추가 해석을 수행할 때 사용하중은 크게 작용하더라도 0.35P₀를 초과할 수 없다는 교수님들의 의견을 근거로 0.35P₀에서의 해석값과 0.1P₀에서의 해석값을 실시한 후 그 결과값을 비교하였다. 비교 결과, 0.35P₀에서도 RCC내진갈고리를 적용하였을 때 응력과 변위가 135° 표준갈고리와 비교할 때 대등한 최대하중에 대하여 저항 할 수 있는 것으로 확인되었다. 0.35P₀ 고축력의 하중을 재하 시 표 6.3에서 보는 바와 같이 락철근 D10의 경우, RCC 내진갈고리를 사용할 때 최대하중이 각각 351.8kN 및 394.4kN으로 RCC 내진갈고리를 사용할 경우에서 양단 135° 표준갈고리를 사용할 때보다 더 큰 최대하중 값을 지닐 수 있었다.



[그림 6.8] 0.35 고축력에서의 유한요소해석 결과



(a) D10(10%) 실험체에서의 기준과 RCC 1개 적용할 때 최대하중 비교



(b) D10(35%) 실험체에서의 기준과 RCC 1개 적용할 때 최대하중 비교

[그림 6.9] 저축력 및 고축력에서의 최대하중 및 변위 비교

[표 6.3] 0.35 P₀와 0.1 P₀와 축하중 작용할 때 해석결과

실험체명	ABAQUS해석 결과값		실험체명	ABAQUS해석 결과값	
	최대하중 (kN)	변위 (mm)		최대하중 (kN)	변위 (mm)
D10기준 (10%)	308.5	24.5	N10NC1 (10%)	350.6	22.0
D10기준 (35%)	351.8	17.6	N10NC1 (35%)	394.4	18.4

이 해석결과로서 한국건축구조기술사회에서 이번 RCC내진갈고리에 대하여 고축력 환경에서도 문제가 없음을 확인할 수 있었고, 0.25P₀이하로 제한한 점은 인증할 때 너무 보수적인 관점에서 적용한 사항으로 판단된다.

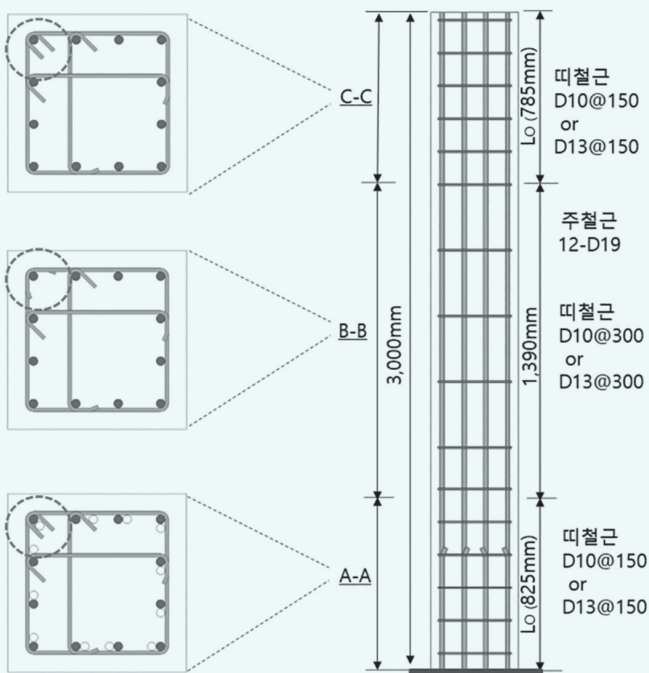
7. 시공성 및 경제성 평가

7.1 시공성 평가

시공성 평가를 위하여 기둥 크기는 5~10층 규모 중 · 저층 건축물에 일반적으로 가장 많이 적용되고 있는 기둥 크기 3,000×400×400mm를 적용하였다.

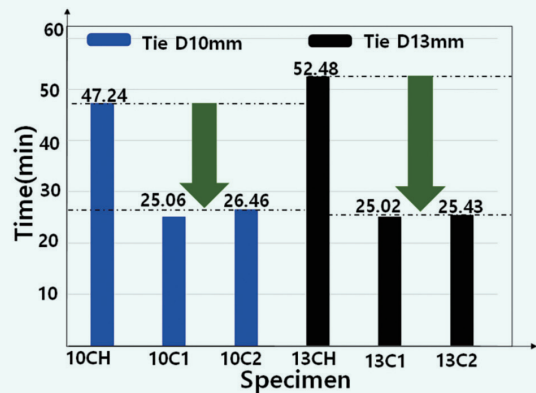
[표 7.1] 시공성 평가를 위한 Mock-up 기둥 분류

실험체	기둥 단면	갈고리 시공	
		기 준	대 체
① 10CH ④ 13CH		한쪽 단부 135° 갈고리	135° 유지 파이프 장비 이용 135° 각으로 구부림
		다른 한쪽 90° 갈고리	
② 10C1 ⑤ 13C1		한쪽 단부 135° 갈고리	135° 유지 RCC로 결속
		다른 한쪽 90° 갈고리	
③ 10C2 ⑥ 13C2		한쪽 단부 90° 갈고리	양단 모두 RCC로 결속
		다른 한쪽 90° 갈고리	



[그림 7.1] 시공성 평가 Mock-up 기둥 단면

기둥내 철근 배근은 그림. 7.1과 같이 현장에서 가장 사용성이 많은 중간모멘트골조 상세를 적용하였다. 시공성 평가 결과, 각각의 경우에 작업 시간 측정과정은 그림. 7.3과 같으며 작업시간 측정결과 및 작업난이도, 품질평가의 종합 비교는 표 7.2와 같다. 표준갈고리 상세의 10CH, 13CH 기둥의 경우, 기둥 1개내 주철근과 띠철근 모두 배근조립 완료하는 데 10CH는 47분 24초, 13CH는 52분 48초로 띠철근 직경에 관계없이 약 50분 정도 소요되었다. 철근 배근조립 과정에서 띠철근 D13인 경우, 반드시 2명의 작업자가 필요하여 상단과 하단에서 각 1명이 작업하는 것에 비하여 시간이 좀 더 소요되었다. 작업자와 면담으로 실제 현장에서는 1개 기둥내 철근 배근 조립은 약 1시간 소요되고 1일(하루) 작업 8시간 기준일 때, 8개 기둥을 조립 가능하다고 하였다. RCC내진갈고리로 단부 90°갈고리에 결속하는 경우 띠철근 직경과 결속해야 할 RCC내진갈고리의 개수에 관계없이 기둥 1개내 철근 배근조립 완료하는데, 10C1, 10C2, 13C1, 13C2의 조립 완료시간인 각각 25분 06초, 25분 48초, 25분 02초, 25분 43초로 약 25분대로 측정되었다. 이와 같은 결과에서 RCC를 사용하는 경우, 작업시간은 표준갈고리 상세를 적용하는 경우에 비하여, 1/2로 단축되는 효과가 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 작업시간이 1/2로 단축된 가장 큰 이유는 표준갈고리 상세를 적용한 경우에 비하여 RCC를 사용할 경우, 90° 갈고리인 상태에서 135° 각으로 구부리는 시간이 불필요하기 때문이다.



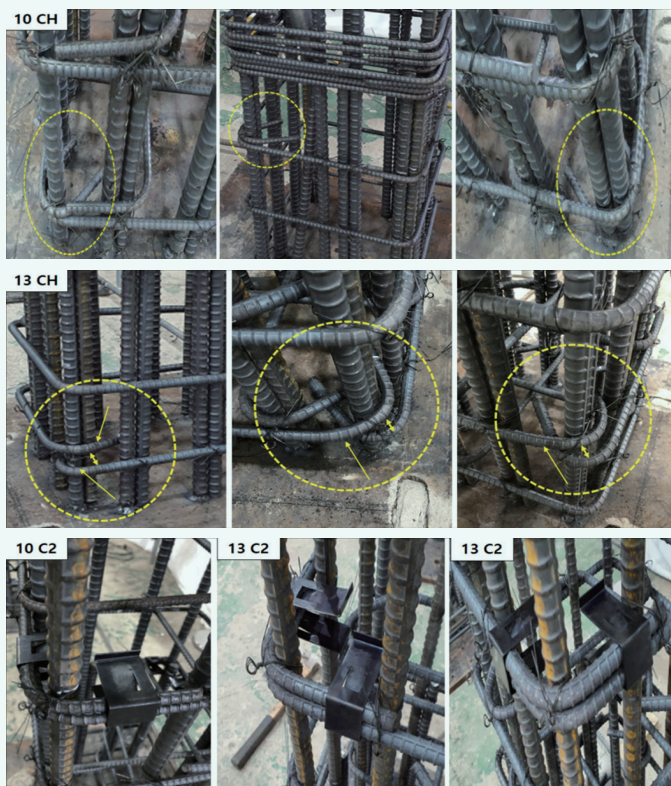
[그림 7.2] Mock-up기둥 철근 배근 작업완료 시간 비교

[표 7.2] 작업시간 및 갈고리 품질상태 비교

평가 대상	작업 난이도	갈고리 품질상태	작업 시간
10CH	- 겹침이음 구간에서 135° 각으로 구부리는 데 다소 어려움 · 기둥 위 · 아래 구간에서 각자 작업 가능	- 일반적으로 양호 · 겹침이음 구간에서 콘크리트 피복두께 유지 상태 양호	47분 24초
10C1	- RCC 체결 작업 매우 쉬움	- 갈고리 상태 양호 · 겹침이음 구간에서 콘크리트 피복두께 유지 상태 양호	25분 06초
10C2			25분 48초
13CH	- 일반적으로 작업하기 매우 어려움 · 겹침이음 구간에서 135°로 구부리는 데 반드시 2인 필요 · 겹침이음 구간에서 135° 각으로 구부리는 데 매우 어려움	- 품질 상태 불량 · 구부리는 반경 때문에 겹침이음 구간에 콘크리트 피복두께 유지 상태 불량 · 갈고리 구부리는 작업으로 주철근 변형 발생 초래	52분 48초
13C1	- RCC 체결 작업 매우 쉬움	- 갈고리 상태 양호 · 겹침이음 구간에서 콘크리트 피복두께 유지 상태 양호	25분 02초
13C2			25분 43초

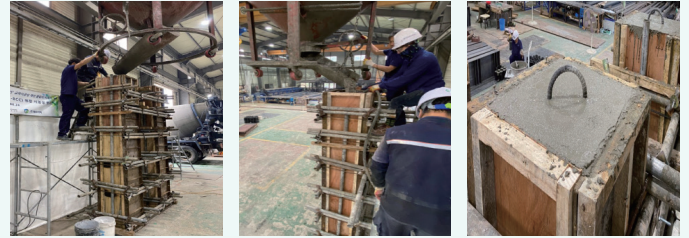


[그림 7.3] 각 Mock-up 기둥 단계별 작업 사진



[그림 7.4] 갈고리 품질상태 비교

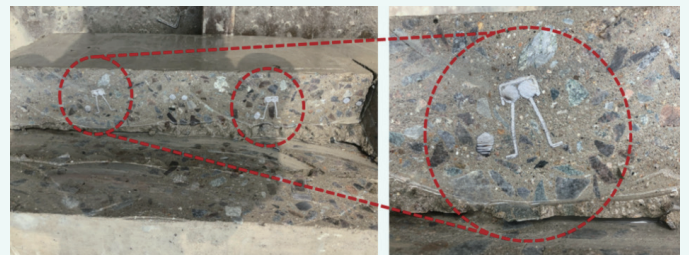
철근콘크리트 기둥의 띠철근 갈고리에 RCC로 결속하고 RCC의 양 날개 공간 사이로 콘크리트 충전이 잘 되어 묻혀있는 지 확인하기 위하여 먼저 현장과 동일한 방법으로 그림. 7.5. (a)와 같이 레미콘을 타설하였다.



(a) 레이콘 타설



(b) 기둥 단면 커팅후 RCC 묻힘 상태 확인



[그림 7.5] 콘크리트내 RCC 묻힘 상태 확인

콘크리트 양생후, 거푸집 탈형과 함께 RCC내진갈고리를 결속한 위치에서 기둥 단면을 커팅하여 콘크리트내 연결장치가 잘 묻혀 있는 지 그 상태를 확인하였다. 확인결과, 그림. 7.5 (b)와 같이 매우 충실하게 잘 충전되어 있었다. 또한, 다른 위치의 RCC내진갈고리에서도 묻힘 상태는 동일하게 잘 충전되어 있음을 확인하였다. 콘크리트의 충전이 잘되는 이유는 레미콘 타설 과정에서 RCC의 양 날개 공간사이로 들어갈 수 있는 크기의 잔 골재와 콘크리트가 채워지고 공간사이로 들어가지 못한 굵은 골재는 자연스럽게 다른 공간에 채워지기 때문에 분석된다. 이와 같은 결과로부터, 콘크리트내 RCC의 묻힘 상태는 결속된 위치에 관계없이 잘 충전되는 것으로 판단할 수 있었다.

7.2 경제성 평가

RCC기둥에서 135° 표준갈고리 상세를 적용하는 경우와 RCC내진갈고리로 띠철근 90° 갈고리에 결속하는 경우의 경제성 평가는 소요되는 노무비 비율을 통하여 분석하였다. 그 분석결과는 표 7.3과 같다. 표 7.3에 적용한 노무비는 기둥 철근 조립에 2인(경력 10년, 경력 20년) 1조를 기본으로

[표 7.3] RCC내진갈고리 사용과 작업일에 따른 비용 분석

(단위 : 천원)

평가 대상	갈고리 형상	직접비	간접비	RCC내진갈고리	총 비용	비용 절감
10CH		- 1일(8 시간): 1일×2인×219천원 = 438천원 · 총 75개 기둥÷(1일 8개 기둥) = 9.4일 · 9.4일×438천원/1일 = 4,117천원 ①	4,117×1.2 = 4,940 ②	RCC내진갈고리 사용 없음	①+② = 9,057	기 준
10C1		- 1일(8 시간): 1일×2인×219천원 = 438천원 · 총 75개 기둥÷(1일 16개 기둥) = 4.7일 · 4.7일×438천원/1일 = 2,059천원 ①	2,059×1.2 = 2,471 ②	- 10개 RCC /1기둥 : 총 750개 RCC · 750개 클립×1,500원/1개=1,125천원 ③	①+②+③ = 5,655	37.6%
10C2		- 1일(8 시간): 1일×2인×219천원 = 438천원 · 총 75개 기둥÷(1일 16개 기둥) = 4.7일 · 4.7일×438천원/1일 = 2,059천원 ①	2,059×1.2 = 2,471 ②	- 20개 RCC /1기둥 : 총 1,500개 RCC · 1500개 클립×1,500원/1개=2,250천원 ④	①+②+④ = 6,780	25.1%
13CH		- 1일(8 시간): 1일×2인×219천원 = 438천원 · 총 75개 기둥÷(1일 8개 기둥) = 9.4일 · 9.4일×438천원/1일 = 4,117천원 ①	4,117×1.2 = 4,940 ②	- RCC내진갈고리 사용 없음	①+② = 9,057	기 준
13C1		- 1일(8 시간): 1일×2인×219천원 = 438천원 · 총 75개 기둥÷(1일 16개 기둥) = 4.7일 · 4.7일×438천원/1일 = 2,059천원 ①	2,059×1.2 = 2,471 ②	- 10개 RCC /1기둥 : 총 750개 RCC · 750개 RCC×2,000원/1개=1,500천원 ③	①+②+③ = 6,030	31.9%
13C2		- 1일(8 시간): 1일×2인×219천원 = 438천원 · 총 75개 기둥÷(1일 16개 기둥) = 4.7일 · 4.7일×438천원/1일 = 2,059천원 ①	2,059×1.2 = 2,471 ②	- 20개 RCC /1기둥 : 총 1500개 RCC · 1500개 RCC×2,000원/1개 =3,000천원 ④	①+②+④ = 7,530	16.9%

[Note] 5층 건축구조물 기준, (15개 기둥/ 1층) ×5층 = 총 75개 기둥, 2인 1조, 219,000원/ 1인 철근배근공 평균 임금, 띠철근 D10용 클립 1,500원/ 1개, 띠철근 D13용 2,000원/ 1개.

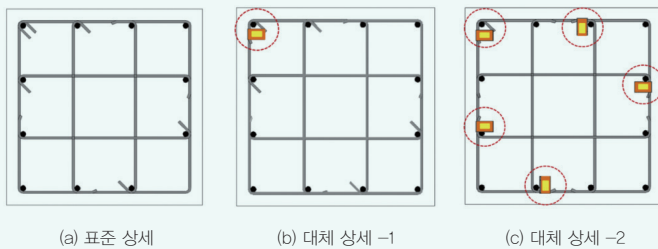
하는 현장과 동일하게 적용하였다. 1인 철근 배근공의 1일(하루) 평균 임금은 2020년초에 대한건설협회에서 제시한 철근공 최근 노임단가 219,392원(2020.1.1.기준)을 적용하였다. 표 7.3에서 적용한 간접노무비 '1.2'의 비율은 2020년 조달청 시설공사 원가계산 제비율 적용기준을 적용하였다. 원가계산 제비율 적용기준에 적시된 직접노무비에 7.2~8.1%의 곱으로 나타내는 간접노무비 비율과 이렇게 산출된 전체 노무비에 5.6~8.3%를 적용하는 기타 경비 비율 그리고 산재보험료 적용 비율 3.73%, 기타 각종 관리비용에 해당하는 비율을 고려하여 그 합계 비율인 약 20%로 계산 적용하였다. 건축물 규모 중에서 중·저층 규모의 철근콘크리트 라멘구조 건축물에서 1층당 15개 기둥(3×5열)이 있는 평면을 기준으로 전체 5층 규모 건축물의 총 기둥 개수는 75개로 계산하였다. 작업자 면담 및 시공성 평가 결과를 바탕으로, 2인 1조가 3.0m 높이의 1개 기둥내 주철근과 띠철근 모두 배근 조립 완료하는 데 소요 시간을 약 1시간을 계산하였다. 그러므로, 1일(하루) 8시간 작업 기준일 때 8개의 기둥을 철근 조립할 수 있는 것으로 계산하였다. RCC사용할 때 RCC 사용 개수에 관계없이, 기둥 1개내 RCC의 결속과 철근 모두를 배근 조립하는 데 걸리는 시간은 약 30분이 소요되므로 1일(하루) 16개의 기둥 조립이 가능한 노무비로 계산하였다. 사용되는 RCC의 개수는 RCC 1개로 결속하는 경우 1개 기둥에 10개, RCC 2개로 결속하는 경우 1개 기둥당 20개의 RCC가 사용되는 것으로 재료비를 계산하였다. RCC 사용시, 각각 해당하는 가격은 현재 판매가격을 기준으로 띠철근 D10인 경우, 1개당 1500원, 띠철근 D13인 경우, 1개당 2000원을 계상하여 최종 노무비와 함께 계산 후 종합 비교하였다. 비교 분석 결과, 표 7.3에서의 비용절감 %에서 보는 바와 같이, 표준갈고리 상세를 적용한 기

둥에 비해 RCC로 결속하는 경우, 띠철근 직경에 관계없이 약 17~38%의 비용절감 효과가 있었다. 이와 같이 비용절감 효과에 양호한 이유는, 기둥 1개의 철근 배근 완료하는 데 RCC의 사용할 때 작업시간이 1/2로 단축됨에 따라 1일(하루) 기준 표준갈고리 상세를 적용하는 경우보다 2배 많은 개수의 기둥을 조립할 수 있기 때문이다. 또한, RCC 사용에 따라 비용절감 효과에 차이가 있는 것은 RCC 1개와 2개를 사용하는 개수에 따라 기둥 1개 조립에 소요되는 RCC의 재료비 차이 때문이다. 경제성 평가 결과를 종합하면, 5층 규모 기둥 총 75개인 경우를 기준으로 띠철근 직경에 관계없이 RCC를 1개 사용하는 경우, 약 32% 이상의 비용 절감효과가 있으며, 2개를 사용하는 경우 약 17%이상의 비용 절감 효과가 있는 것으로 나타났다. RCC를 사용하는 것은 135° 표준갈고리 상세를 적용한 경우에 대비해 비용 절감 효과가 우수하며 특히, RCC 1개를 사용하는 경우, 약 32%의 비용 절감효과가 있는 것으로 평가할 수 있었다.

8. 향후 추진계획

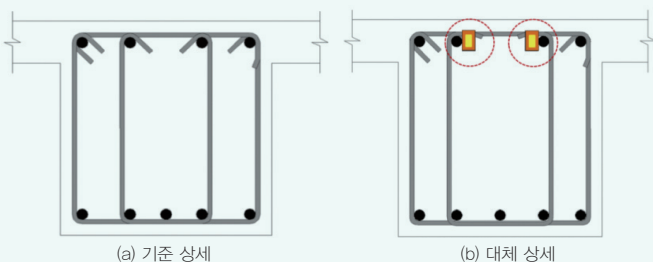
이번 연구결과를 근거로 모든 철근콘크리트 구조물에서 135° 표준갈고리를 충분히 대처할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나, 다시 언급하면 이번 한국건축구조기술사회 인증과정에서 RCC내진갈고리의 사용에 있어 보통 및 중간모멘트 골조의 축력비 0.25이하 압축부재 적용이라는 단서 조항을 제한한 점은 너무 과도한 제한사항이라고 판단된다. 그에 대한 주된 이유는, 1차 및 2차 부차 및 정착거동의 합성성능 검증 실험을 통하여 충분히 대처할 수 있는 성능 보유 결과값을 보여주었기 때문이다. 또한, 135° 표준갈고리만으로 과도한 구속력을 가져야 하는 것으로 여기는 것은

잘못된 생각으로, 부족한 구속성능은 모든 구조기준에서 내부보조근(Cross tie)의 추가 배근 등의 다른 보강 조치가 명시되어 있기 때문이다. 이번 한국건축구조기술사회의 인증과정에서 $0.25P_u$ 이하 축력비라는 제한 사항에 대해서도 $0.35P_u$ 축력비를 적용한 유한요소 해석을 통하여 문제가 없음을 검증하였다. 그럼에도 불구하고 한국건축구조기술사회에서 이를 받아들여지지 않고 일방적으로 제한한 점이 있다. 아쉽게도 이런 사항에 대하여 우선 앞서 기술한 $0.35P_u$ 고축력에서의 해석결과로 제한사항에 대하여 삭제할 공식적으로 요청할 계획이다. 당연히 향후 추진 실험결과에서도 기존 상세를 적용한 경우와 RCC내진갈고리를 적용한 결과가 대등한 결과를 도출하겠지만, 다시한번 실험으로 보다 확실하고 분명한 결과를 보여 주기 위하여 올해년도 내에 실험분석 결과를 제시할 예정이다. 그 다음으로, 철근콘크리트 구조부재의 모든 내진갈고리와 135° 표준갈고리를 대체하기 위하여 21년과 22년의 연구로 그림. 8.1~8.3과 같은 추가 연구를 실시할 예정이다. 이후, 국내 건축구조기준에 반영을 추진할 것이며, 그 다음으로 ACI 기준 반영에 추진할 예정이다. 언급한 향후 추가 연구는 첫째, 이번 연구에서 철근콘크리트 기둥내 후프철근(Hoops)의 내진갈고리 성능 평가를 중점적으로 시행함에 있어서 내부보조근이 생략한 점이 있다. 그러므로, 내부보조근이 배근된 상태에서 중심축하중 및 반복횡하중 실험을 실시할 예정인 데 특히, 한국건축구조기술사회에서 제한한 $0.25P_u$ 이하 축력비에 대해서 반복횡하중 추가 실험에서는 $0.35P_u$ 고축력에서의 검증을 가장 먼저 실시할 예정이다. 또한, 보다 확실한 휨성능 검증을 위하여 전단 경간비를 4.0이상으로 실시할 예정이다.



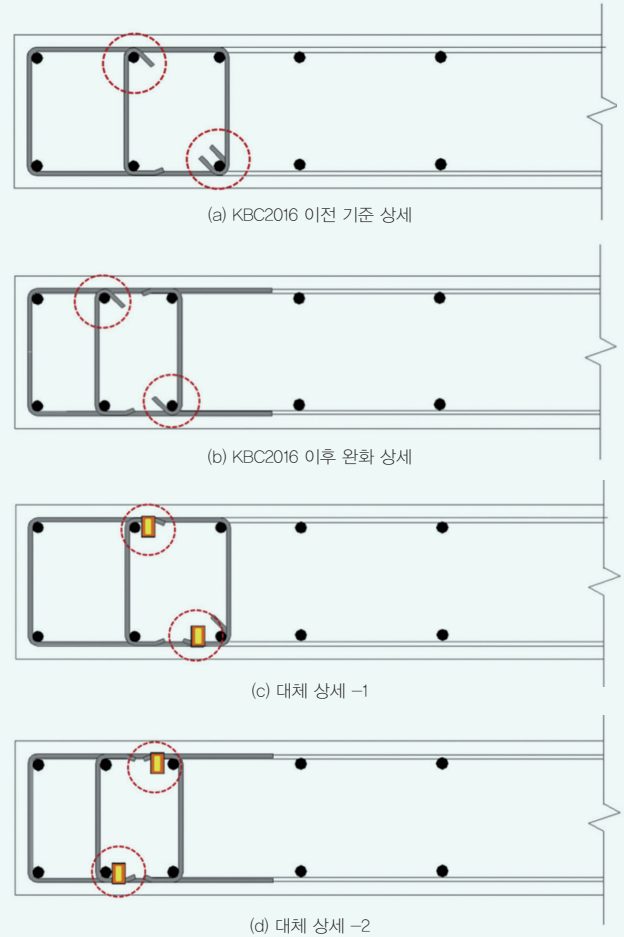
[그림 8.1] 내부보조근 배근 상태에서 실험 검증 계획 단면

둘째, 거더에서 일반적으로 시공이 어려운 사항으로 보고 되고 있는 내진갈고리 배근 상세에 대하여 대체 상세에 대해 검증할 예정이다.



[그림 8.2] 거더내 내진갈고리 대체 상세

셋째, 135° 표준갈고리 시공의 어려움으로 지속적으로 보고 되고 있는 특수전단벽 경계요소에 대해서도 그림. 8.3과 같이 여러 가지 대체 상세를 가지고 검증할 예정이다. 이러한 추가 검증과정에서 RCC내진갈고리 상세가 보완되어야 할 사항이 발견될 경우, RCC내진갈고리의 자체 가격은 높이지 않는 상태에서 형상 개선을 지속적으로 추진하여 품질 개선을 도모할 예정이다.



[그림 8.3] 특수전단벽 경계요소 대체 상세

9. 결론

철근콘크리트 구조물내 135° 표준갈고리의 시공성을 개선하기 위하여 대등한 구조성능이 확보되는 RCC내진갈고리(Rebar Confinement Clip-Seismic Hook)를 개발하였으며, 1차 및 2차 정착거동 특성 실험을 실시하여 충분한 구조성능이 확보될 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러므로, 모든 철근콘크리트 구조물내 내진갈고리와 135° 표준갈고리를 대체할 수 있을 것으로 판단되나 정착거동 실험을 실시한 다음으로 시행한 철근콘크리트 기둥의 중심축하중과 반복횡하중 실험을 근거로 한국건축구조기술사 인증과정에서 철근콘크리트 기둥내 후프철근의 대체 상세로만 인증 받은 아쉬운 점이 있다. 그러나, 이번 인증서만으로도 충분히 모든 철근콘크리트 기둥에서는 135° 표준갈고리를 대체할 수 있을 것으로 판단된다. 그 이

유는 앞서 언급하였듯이 철근콘크리트 기둥내 내진갈고리가 분담해야 하는 저항 응력을 초과할 경우, 다양한 기둥 단면내에서 내부보조근 추가 등 다른 보강 요소가 존재하기 때문이며 RCC내진갈고리가 135° 표준갈고리와 대등한 성능을 보유하고 있는 점이 정착성능 실험에서 충분이 보여주었기 때문이다. 그럼에도 불구하고 더욱더 가시적인 결과를 실제적으로 보여주기 위하여 추가 연구 및 실험을 실시할 예정이며, 이를 통하여 135° 표준갈고리 시공으로 인한 현장에 어려움을 해소함으로써 철근콘크리트 구조물의 품질 향상을 도모하고 향후 지진과 같은 환경에서 피해를 최소화하는데 기여할 예정이다.

10. 당부 및 안내의 글

당부의 글은 7여년의 RCC내진갈고리 개발과정에서 2장에서 언급하였듯이 형상 적합성 판단을 위한 예비성능실험용으로 제작하고 실험하였던 초기 클립형태의 장치(가칭, 리바밴드)가 공인된 기관으로부터 인증서 없이 판매되는 사실이 확인되었다. 또한, 모 건설사 현장에도 사용된 것이 확인되었다.

이는 앞서 2장에서 언급하였듯이, 그림. 2.2.의 초기 연결장치(리바밴드) 중심축하중 실험결과와 같이 축하중 저항성능에 135° 표준갈고리의 기준 상세와 비교할 때 성능에 미치지 못하며, 표 2.1.의 반복횡하중 예비성능 실험결과에서도 보듯이 135° 표준갈고리 기준 상세 실험체와 비교할 때 최대 내력값에서 성능에 미치지 못하는 결과를 보여주고 있다. 반복횡하중 예비성능 실험에서 또다른 문제점은 양단 90° 갈고리 상세를 적용하고 초기 연결장치(리바밴드)를 설치하지 않은 상세의 실험체에서는 오히려 135° 표준갈고리 상세 실험체보다도 더 높은 최대 내력값을 보여주고 있어 실시한 예비성능실험 자체가 신뢰성 있는 실험이라고도 단정할 수 없는 상황으로 형상 적합성 판단용으로만 그 결과를 사용하여야 함에도 불구하고 현장에 사용되어진 셈이다. 기준 상세 결과와 초기 연결장치(리바밴드) 실험체의 이력곡선을 겹쳐 그려 마치 성능이 나오는 것처럼 보이고 있으나, 자세히 살펴보면 이력거동은 유사하긴 하여도 각 단계의 이력에서 최대 내력값이 기준 상세에 미치지 못하고 있는 것을 알 수 있다. 사실 기준 상세의 실험체와 초기 연결장치(리바밴드)를 사용한 실험체의 경우 실험한 개수나 변수의 종류 등을 고려할 때 반복횡하중 일부에서 유사한 이력을 나타내고 있다고 하더라도 대등하거나 그 이상의 성능을 발휘한다고 평가할 수는 없다고 할 수 있다. 더욱이 압축부재로서 가장 중요한 축하중 상태에서 그림. 2.2.의 초기 연결장치(리바밴드) 중심축하중 실험결과와 같이 축하중 저항성능에 양단 135° 표준갈고리 기준 상세 실험체와 비교할 때 성능에 미치지 못하는 데도 이러한 사실 자체를 확인할 수 있는 실험값은 아예 제시하지 않으면서 현장에 사용한 것이다. 이러한 장치를 사용하는 것은 구조안전성 측면에서 매우 중요한 부재인 기둥에 자칫 삼풍백화점과 같은 인명 피해와 물적 손상을 초래할 수 있는 바, 그 사용에 유념하기를 권고하는 바이다. 무엇보다도 초기 연결장치(리바밴드)와 형상 개선된 RCC내진갈고리와 같은 클립형 연결장치의 가장 우선적으로 검증이 필요한 성능이 바로 정착성능으로, 이러한 클립형태의 연결장치는 철근콘크리트 기둥내

심부(Core) 콘크리트에 묻혀 발휘되는 135° 표준갈고리 정착성능과 대등한 성능이 발휘되는 지를 검증하는 정착거동 실험이 우선되어야 한다. 앞으로 저자가 개발한 RCC내진갈고리는 형태상 유사한 장치가 쉽게 나올 수 있는 형상을 가지고 있고 각종 논문에서도 모든 사양이 모두 공개되어 유사한 형태로 제작하기 쉬운 상황이며 이에 따라 임의로 제작한 후 성능이 발휘되는 것처럼 광고하기에 쉬운 상황이다. 그러므로, 유사한 장치를 현장에 사용하게 될 때에는 약간만 형태를 변경하여도 등록이 가능한 특허보다는 공인된 기관으로부터 인증서와 실험성적서에 따른 분석 결과의 적정성을 반드시 동시에 확인한 다음, 사전에 현장의 구조감리나 책임구조기술사의 협의 및 승인 이후에야 그 사용을 권고한다.

안내의 글은 RCC내진갈고리에 관련한 보다 많은 자료는 <http://chrcc.kr> 홈페이지에 확인하면, 보다 많은 내용이 탑재되어 있으니 참고바라며 건의사항이나 제안할 사항이 있다면 언제든지 고언을 하여 주기를 바란다.

감사의 글

이 연구에 대하여 RCC내진갈고리 개발과정에서 지속적인 기술 자문을 해주고 계시는 카이스트 김진근 교수님, 단국대학교 정란 교수님, 서울대학교 홍성걸 교수님께 깊은 감사 말씀 올리며, 유한요소해석을 해주신 경희대학교 김대진 교수님과 실험을 수행해 주신 ㈜페트라텍 강병국 대표님 및 직원분들께 감사 드립니다.

참고문헌

- 박경언, 윤현도 (2020), “클립형 연결장치로 결속된 90도 갈고리를 갖는 띠철근의 정착거동”, 한국구조물진단유지관리공학회, 24권 4호, 2020년 8월, pp. 72-80.
- 박경언, 윤현도 (2020), “철근콘크리트 기둥의 띠철근에서 135° 갈고리 대체 클립형 연결장치의 시공성 및 비용 분석”, 한국건축시공학회, 20권 5호, 2020년 10월, pp. 459-469.
- 박경언 (2021), “철근콘크리트 기둥에서 90도 갈고리 띠철근 결속용 클립형 연결장치의 유효성 평가”, 충남대학교 대학원, 박사학위논문, 2021년 2월
- 김은영, 김용주, 최성모, 김대진, 박경언 (2021), “인발실험을 통한 내진갈고리 대체용 RCC장치의 부착 및 정착의 합성거동”, 한국복합신소재학회 논문집 게재 예정(심사 중)
- 박경언, 윤현도, 홍성걸 (2021), “클립형 연결장치로 결속된 90도 갈고리 띠철근 보강 사각형 단면 철근콘크리트 기둥의 압축거동”, 한국콘크리트학회 논문집 게재 준비 중
- 박경언, 윤현도, 홍성걸 (2021), “클립형 연결장치로 결속된 90도 갈고리 띠철근 보강 사각형 단면 철근콘크리트 기둥의 반복횡하중 저항성능”, 한국콘크리트학회 논문집 게재 준비 중
- 박경언, 김용주 (2020), “띠철근 풀림방지 장치”, 특허번호 10-2148235, 대한민국 특허청, 2020년 8월
- 박경언, 김용주 (2020), “띠철근 고정클립”, 디자인 특허번호 30-1077403, 대한민국 특허청, 2020년 9월