

## 고강도 횡보강근의 배근형상에 따른 콘크리트의 거동에 관한 실험적 연구

### Experimental Study on Behavior of Confined Concrete According to Configuration of High-Strength Transverse Reinforcement

김 영 식<sup>1)</sup>      김 동 환<sup>2)</sup>      김 상 우<sup>3)</sup>      김 길 희<sup>4)\*</sup>  
Kim, Young Seek   Kim, Dong Hwan   Kim, Sang Woo   Kim, Kil Hee

#### Abstract

This study estimates the performance of confined concrete according to the configuration of transverse steel bars. The main test variables were the yield strength of spiral reinforcement and configuration of transverse reinforcement. A total of 27 specimens with rectangular cross section were cast and tested under monotonic concentric compression. R-type specimens with rectangular spirals, C-type specimens with circular spirals and O-type specimens with combined shape of rectangular and octagon were designed in this study. From experimental results, it is concluded that the proposed configuration of transverse reinforcement can provided improved ductility to the confined concrete compared to rectangular spiral reinforcement.

**Keywords** : Confined concrete, Configuration, Confinement effect, High-strength reinforcement, Spiral reinforcement

#### 1. 서론

철근콘크리트 기둥의 코어콘크리트를 효과적으로 구속하여 강도와 연성을 증진시키고자 하는 연구는 Mander 등(1988)의 연구를 계기로 많은 발전을 이룩하여 왔다. 나선철근의 경우 일반적으로 사용하는 띠철근에 비하여 횡구속 성능이 크게 높은 것으로 알려져 있다. 그렇지만 직사각형 기둥은 주철근이 변과 나란히 배근되기 때문에 원형 나선철근을 적용하는 경우 횡보강근이 구속하지 못하는 주철근이 발생하게 된다.

국내외 기준(Korea Concrete Institute, 2007, ACI Committee 318, 2008)에서는 직사각형 단면을 가진 철근콘크리트 기둥의 주철근을 효과적으로 구속하기 위하여 사각형태의 띠철근을 적용하도록 권고하고 있다. 그러나 내부 주철근을 횡구속 하기 위하여 추가 띠철근(sub-tie)을 배근하여야 하기 때문에 철근량이 증가하고

배근이 과밀해지는 등 여러 가지 단점이 있어왔다.

최근 건축기술이 발달하면서 건축구조물의 형태가 대형화, 초고층화, 장스팬화 되고 있다. 이와 같은 변화로 인하여 건축물의 자중 증가와 부재 단면 확대 및 철근의 과다배근과 같은 문제에 직면하게 되었다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 재료의 고강도화와 횡보강근의 배근형상에 대한 연구가 있다(Sun-Kyoung Hwang et al, 2002; Sung-Woo Shin et al, 2002; Jong-Keun Kim et al, 2009).

그동안 고강도 재료에 대한 연구는 콘크리트에 집중되어 왔으나 최근에는 고강도 철근에 대한 연구에 관심이 증가하고 있다. 미국의 경우 구조부재에 적용되는 주철근의 고강도화에 대한 연구를 진행하고 있으며(Mast et al., 2008), 일본의 경우 NEW RC 프로젝트(Japan Institute of Construction Engineering, 1998~1992)에서 고강

1) 정회원, 공주대학교 건축공학과 박사과정  
2) 정회원, 공주대학교 건축공학과 석사과정  
3) 정회원, 공주대학교 건축공학과 연구교수  
4) 정회원, 공주대학교 건축공학과 부교수, 교신저자

\* Corresponding author : kimkh@kongju.ac.kr 041-565-9493

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2013년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

도 재료에 대한 연구를 폭넓게 진행한 바 있다. 그렇지만 횡보강근에 대한 기존 연구는 대부분 횡보강근의 전단성능에 초점을 두고 진행되어 왔으며, 횡구속 성능에 미치는 횡보강근의 배근형상 및 항복강도의 영향에 대한 연구는 많지 않다. 특히 직사각형 철근콘크리트 기둥의 횡구속 성능을 향상시켜 철근량을 줄이고자 하는 배근형상에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

이 연구에서는 직사각형 철근콘크리트 기둥을 효과적으로 횡구속하여 재료의 양을 절감하고 시공성을 향상시킬 수 있는 횡보강근 배근형상을 제안하고자 한다. 제안된 배근형상의 횡구속 성능을 검토하기 위하여 횡보강근의 배근형상과 항복강도를 변수로 실험을 수행하였으며 그 결과를 비교·분석하였다.

## 2. 실험 계획

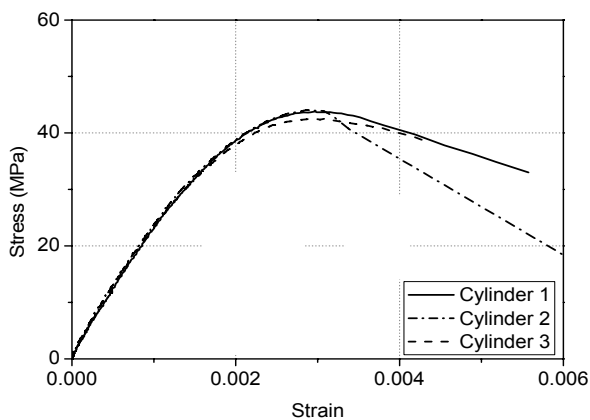
### 2.1 사용 재료

#### 2.1.1 콘크리트

이 실험에서는 Table 1에 나타난 바와 같이 배합강도 45MPa인 콘크리트를 사용하였다. 콘크리트에 사용된 굵은 골재의 최대치수는 13mm, 슬럼프는 170mm, 물결합재비는 43%이었다. 총 9개의  $\phi 100 \times 200$ mm 실린더형

Table 1 Mix proportion of concrete

Design strength (MPa)	$G_{max}$ (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					
				W	C	FA	S	G	AD
45	13	43.0	45.5	175	366	41	769	928	2.85



(a) Concrete

공시체를 제작하였으며, 콘크리트 압축강도시험은 KS F 2405(Korean Standards Association, 2010)에 따라 수행하였다. 실험체 파괴 일에 압축강도를 시험한 결과 44.1MPa를 얻었으며, 그 결과를 Fig. 1(a)에 나타내었다.

#### 2.1.2 철근

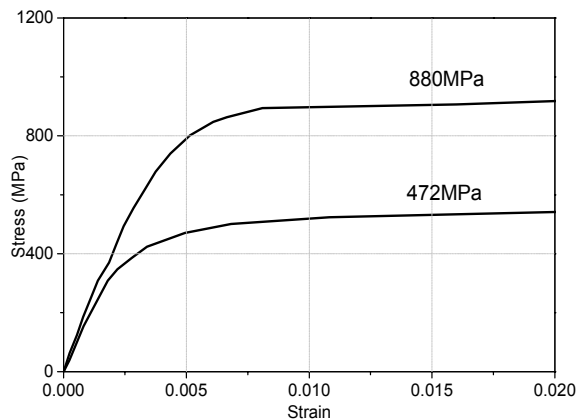
이 실험에서 나선철근은  $\phi 4.5$ mm 원형철근을 사용하였다. 철근의 항복강도는 0.2% 오프셋법으로 472MPa과 880MPa을 얻었으며, 인장강도는 각각 553MPa과 952MPa, 탄성계수는 각각 183GPa과 195GPa이었다. 철근의 인장 시험은 KS B 0802(Korean Standards Association, 2003)에 준하여 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 1(b)와 Table 2에 나타내었다.

### 2.2 실험체 계획

이 연구에서 계획한 실험체 일람표는 Table 3에 나타내었다. 실험체명은 나선철근의 배근형상(R, C, O)과 나선철근의 항복강도(N, H) 순서로 나타내었다. 실험체는 총 9개 시리즈로 구성하였으며 각 시리즈에 동일한 실험

Table 2 Properties of reinforcements

Type	Yield strength (MPa)		$E_s$ (GPa)	Tensile strength (MPa)	
$\phi 4.5$ (Normal-strength)	469	472 (Ave.)	183 (Ave.)	547	553 (Ave.)
	485			557	
	464			557	
$\phi 4.5$ (High-strength)	882	880 (Ave.)	195 (Ave.)	962	952 (Ave.)
	870			937	
	889			956	



(b) Reinforcement

Fig. 1 Stress versus strain relationship of materials

Table 3 Details of specimens and experimental results

Specimens	Cross section (mm)	$f_{yh}$ (MPa)	$s$ (mm)	$\rho_s$ (%)	Peak Stress (MPa)	Axial strain at peak stress (MPa)	Lateral strain at peak stress (MPa)	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\frac{\epsilon_{80}}{\epsilon_{cc}}$
RP	133×133×266	—	—	—	46.6	0.0029	0.0020	—	—
RN		472	42.7	1.20	43.6	0.0050	0.0025	0.94	1.78
RH		880	42.7	1.20	43.4	0.0053	0.0025	0.93	1.82
CP	150×150×300	—	—	—	45.0	0.0059	0.0021	—	—
CN		472	37.6	1.20	42.8	0.0051	0.0027	0.95	1.84
CH		880	37.6	1.20	43.6	0.0054	0.0028	0.97	2.63
OP	141×141×282	—	—	—	44.5	0.0030	0.0023	—	—
ON		472	40.7	1.20	42.9	0.0054	0.0035	0.96	2.05
OH		880	40.7	1.20	42.9	0.0044	0.0029	0.96	2.47

\*  $f_{yh}$ : Yield strength of spiral,  $s$ : pitch of spiral,  $\rho_s$ : ratio of the volume of spiral,  $\epsilon_{cc}$  and  $\epsilon_{80}$ : axial strains at peak stress and 20% stress drop on descending branch, respectively,  $f'_{cc}$ : compressive strength of confined concrete,  $f'_{co}$ : compressive strength of unconfined concrete

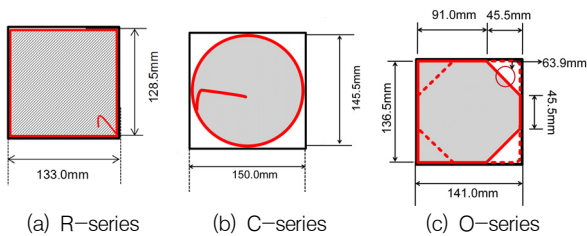


Fig. 2 Cross section of specimens

체를 3개씩 제작하여 총 27개의 실험체로 계획하였다. 실험 변수는 나선철근의 배근형상과 항복강도( $f_y=472$ 와  $880\text{MPa}$ )로 하였다.

이 연구에서는 사각 단면에 배근되는 횡보강근의 형태에 따른 순수한 횡구속 효과를 평가하기 위하여 주철근은 배근하지 않았으며, 횡보강근의 형상은 사각형(R시리즈), 원형(C시리즈) 및 사각과 팔각이 혼합된 형태(O시리즈)로 계획하였다.

실험체의 크기는 Fig. 2에 빗금친 부분으로 나타낸 바와 같이 모든 실험체의 횡구속 면적을 동일하게 계획하였다. 배근형상이 사각형인 R시리즈 실험체는 한 변이 133mm, 배근형상이 원형인 C시리즈 실험체는 직경이 150mm, 이 연구에서 제안한 사각과 팔각이 혼합된 O시리즈 실험체는 한 변이 141mm가 되도록 계획하였다. 또한 실험체 단면의 폭과 높이의 비는 1:2로 하였다.

모든 실험체의 횡보강근은 Fig. 3과 같이 나선형태로 계획하였다. 나선철근의 간격은 모든 실험체가 동일하게 1.2%의 철근비를 가지도록 하기 위하여 R시리즈는 42.7mm, O시리즈는 40.7mm, C시리즈는 37.6mm로 계획하였다. 배근된 나선철근의 변형 상태를 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 실험체의 중앙부에 위치한 나선철근의 네

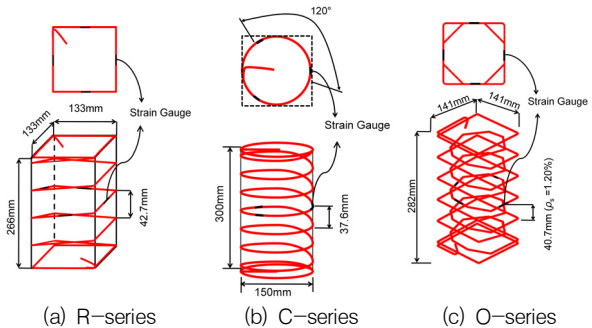


Fig. 3 Details of specimens

방향으로 스트레인 게이지를 부착하였다.

### 2.3 실험체 세팅현황 및 가력방법

실험체의 축변형률과 횡변형률을 측정하기 위하여 Fig. 4와 같이 LVDT를 설치하였다. Photo 1과 같이 종방향 LVDT는 실험구간이 150mm가 되도록 상하부 프레임에 고정하였다. 횡방향 LVDT는 실험체의 중앙부에 위치하도록 상부 프레임에 고정하였으며 중심축하중을 실험체에 가력하기 위하여 Photo 1과 같이 2,000kN 용량의 UTM을 사용하였으며 하중은 실험체에 초당 0.2~0.3MPa의 하중이 발생하도록 변위제어법으로 실험체가 파괴될 때까지 가력하였다.

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 응력-변형률 관계

실험에서 측정한 각 실험체의 실험결과는 Table 3과

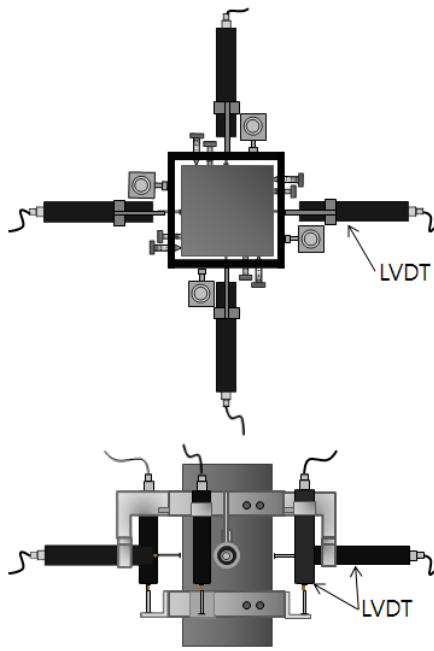


Fig. 4 Test setup of LVDTs



Photo 1 View of test setup

Fig. 5에 나타내었다. Table 3은 동일한 실험체의 평균을 나타내며, Fig. 5는 각 실험체의 응력과 축변형률 및 횡변형률 관계를 나타낸다. 여기서 축변형률은 실험체에 설치한 종방향 LVDT로부터 측정된 결과이다. 횡변형률은 무근실험체의 경우 실험체에 설치한 횡방향 LVDT로부터

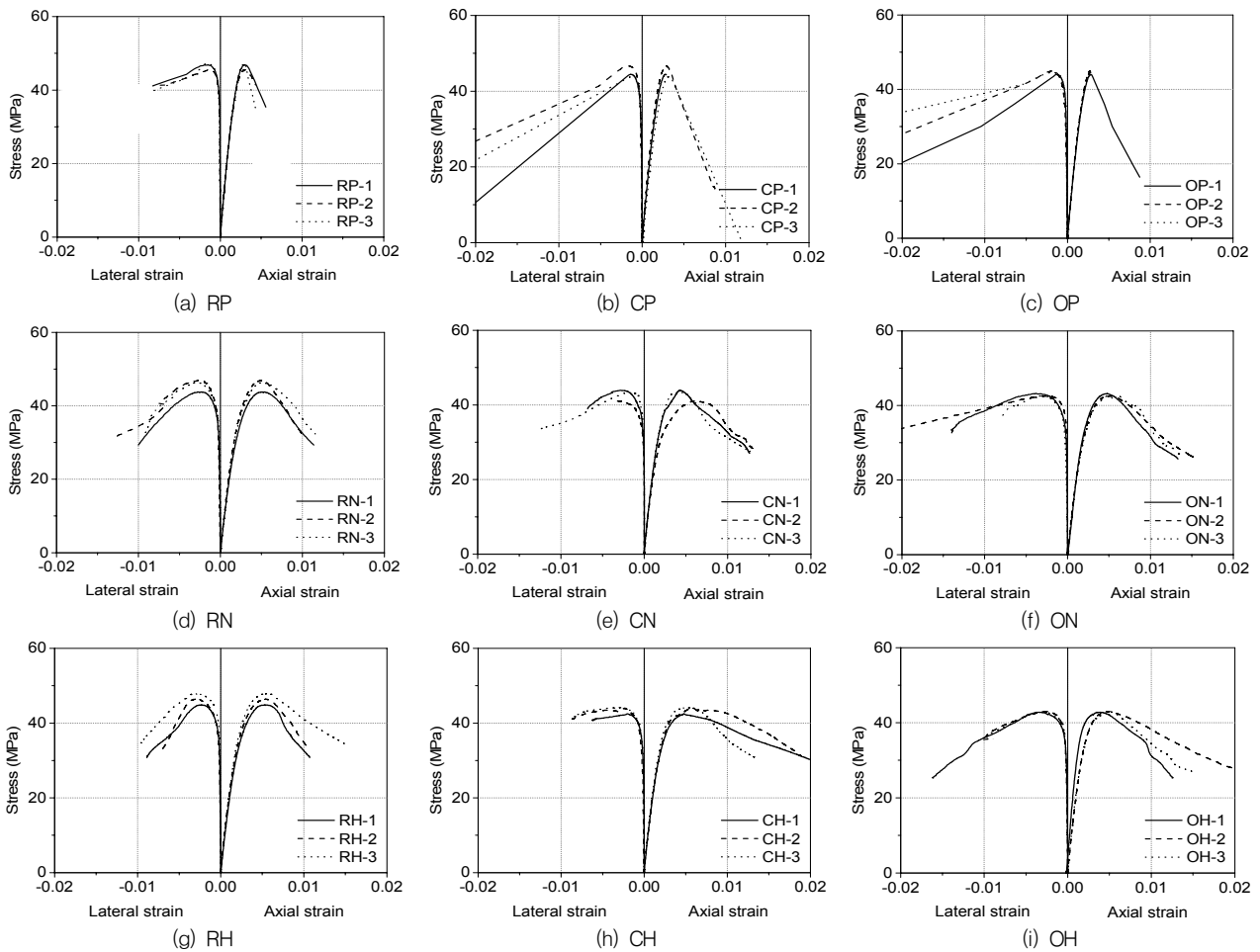


Fig. 5 Stress versus strain relationships of tested specimens

얻은 결과인 반면, 횡보강근을 가지는 실험체는 횡보강근에 부착한 스트레인 게이지로부터 계측된 결과다. 횡방향 LVDT는 피복콘크리트가 없는 본 실험의 특성 때문에 안정적인 값을 얻지 못하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 무근 실험체의 경우 최대하중 이후 취성적인 거동을 보인 반면, 횡보강된 실험체의 경우 최대하중 이후 보다 연성적인 거동을 나타내었다.

Fig. 6은 횡보강근 항복강도에 따른 응력-변형률 관계에 대한 실험결과를 나타낸다. 여기서 실험결과는 동일한 실험결과 중에서 대표적인 값을 선택하여 나타내었다. 배근형상이 직사각형인 R시리즈 실험체의 응력-변형률 관계를 나타낸 Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이, RP 실험체의 최대응력과 최대응력시 축변형률은 각각 43.5MPa와 0.0029로 나타났다. 횡구속된 RN 실험체의 최대응력과 최대응력 시 축변형률은 각각 43.5MPa와 0.0050, RH 실험체는 각각 43.4MPa와 0.0053이었다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 횡구속된 실험체의 최대응력은 무근 실험체와 유사하게 계측되었으나 최대응력시 축변형률은 무근 실험체보다 약 1.7배 증가하였다. 무근인 RP 실험체는 최대하중 이후 취성적인 거동을 보인 반면, 횡보강된 RN 및 RH 실험체는 최대하중 이후 보다 연성적인 거동을 나타내었다. 횡보강근 항복강도 증가에 따른 연성증진은 최대하중 이후 관찰되었으나 그 효과는 크지 않았다. 이는 배근 형상이 가지는 기하학적 특성 때문으로 판단되며 Table 3에서 보는 바와 같이 최대응력시 횡보강근의 변형률이 거의 유사함을 알 수 있다.

Fig. 6(b)는 배근형상이 원형인 C시리즈 실험체의 응력-변형률 관계를 나타낸다. Table 3에서 보는 바와 같이 CP 실험체의 최대응력과 최대응력시 축변형률은 각각 45.0MPa와 0.0059로 나타났다. 횡구속된 CN 실험체의 최대응력과 최대응력시 축변형률은 각각 42.8MPa와 0.0051로 나타나 횡구속에 의한 응력증진은 관찰되지 않았으나 최대응력시 변형률이 약 1.7배 증가하여 횡구속에 의한 연성증진을 확인할 수 있었다. CH 실험체는 최대응력이 43.6MPa로 응력증진이 없었던 반면, 최대응력시 축변형률은 0.0054로 무근 실험체에 비해서는 1.8배 증가하였지만 CN 실험체에 비해서는 거의 증가하지 않았다. 이는 비록 배근형상이 원형이라 할지라도 직사각형 단면에 적용되는 경우 구속하지 못하는 콘크리트의 면적이 상대적으로 많아서 발생하는 현상으로 판단된다. 그렇지만 최대하중 이후 거동에서는 횡보강근의 항복강도가 증가할수

록 연성적인 거동을 보였으며, 이러한 경향은 사각형인 R시리즈 실험체보다 두드러졌다. 이는 피복이 탈락한 이후 코어 콘크리트를 횡구속하는 성능이 사각형보다 원형에서 더 높기 때문으로 판단된다.

Fig. 6(c)는 이 연구에서 제안한 O시리즈 실험체의 응력-변형률 관계를 나타낸다. R과 C시리즈 실험체에서와

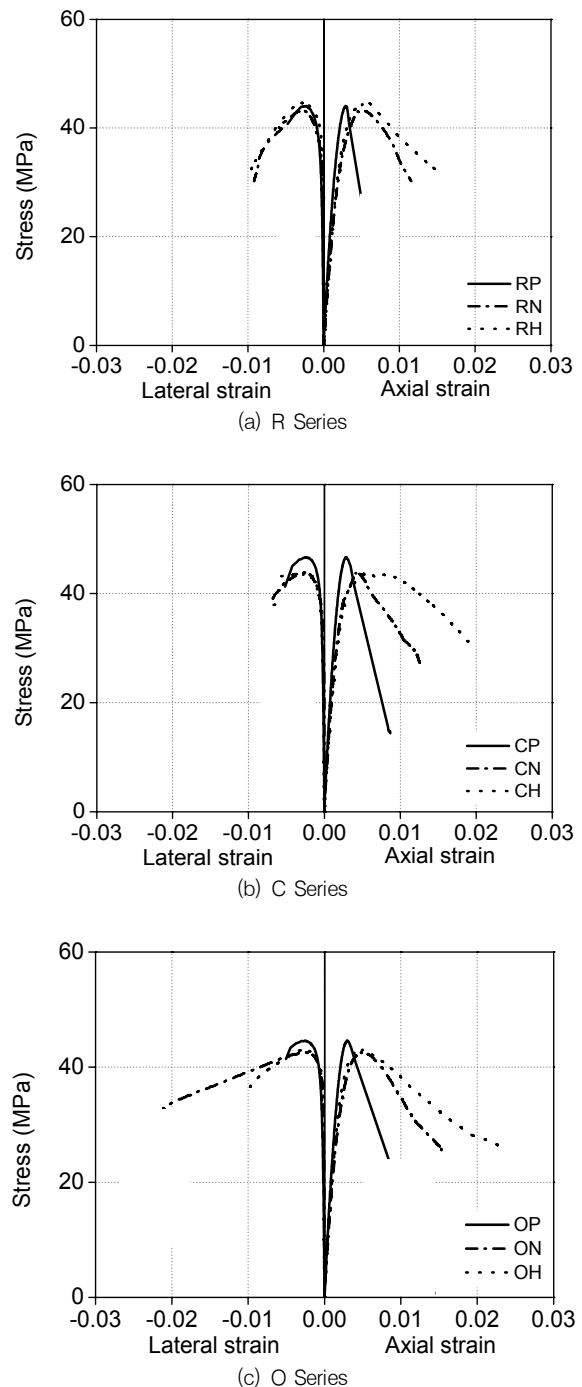


Fig. 6 Stress versus strain relationships according to yield strength of spirals

유사하게 횡구속된 ON과 OH 실험체는 무근 실험체에 비하여 최대응력은 거의 증가하지 않은 반면, 최대응력시 축변형률은 약 1.5배 가까이 증가하였다. 또한 최대응력시 축변형률은 횡보강근 항복강도의 영향이 나타나지 않았으나 최대하중 이후 거동에서는 횡보강근의 항복강도가 증가할수록 연성거동이 증가하였다. 특히 최대하중 이후 연성거동은 R시리즈 실험체보다 C시리즈 실험체와 유사하였으며, 이는 이 연구에서 제안한 배근형상이 원형과 유사한 횡구속 성능을 가짐을 의미한다.

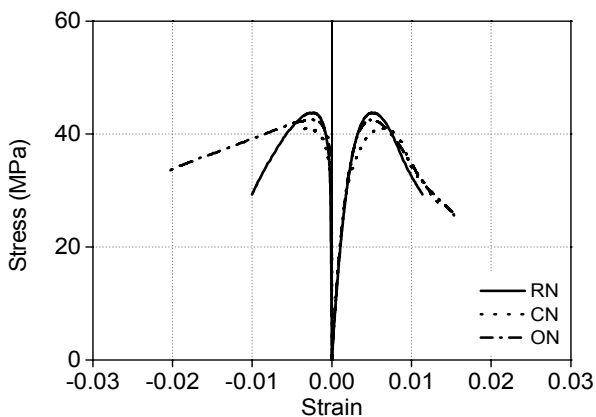
배근형상에 따른 거동의 차이를 비교하기 위하여 Fig. 7에 배근형상에 따른 응력-변형률 관계를 비교하였다. Fig. 7(a)는 보통강도 횡보강근을 사용한 실험체의 응력-변형률 관계를 나타내는 것으로 배근형상에 관계없이 모든 실험체가 서로 유사한 거동을 보임을 알 수 있다. 반면, 고강도 횡보강근을 사용한 실험체의 응력-변형률 관계를 나타낸 Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이, 고강도 횡보

강근을 사용한 실험체의 경우 OH 실험체와 CH 실험체의 최대응력 이후 연성거동이 RH 실험체에 비하여 두드러졌다. 특히 이 연구에서 제안한 배근형태를 가지는 OH 실험체는 원형인 CH 실험체와 유사한 연성능력을 보여 뛰어난 횡구속 효과를 확인할 수 있었다.

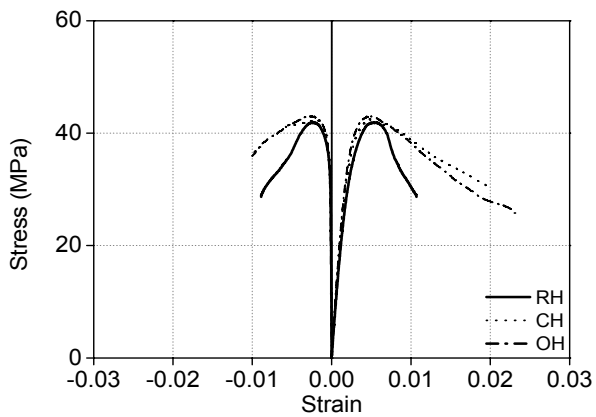
### 3.2 실험체 파괴

실험 종료 후 실험체의 파괴양상을 Photo 2에 나타내었다. 무근 실험체인 P시리즈는 최대하중 이후 콘크리트 균열이 급격히 증가하고 박리가 발생하면서 최종 파괴되었다. R시리즈 실험체의 경우 최대 응력에 가까워지면서 모서리 부분에서부터 콘크리트 박리가 먼저 진행되었으며, 최대응력 이후 네 변으로 박리가 전이되는 양상을 나타내었다.

원형 나선철근으로 횡구속된 C시리즈 실험체의 경우,



(a) Normal strength reinforcement



(b) High strength reinforcement

Fig. 7 Stress versus strain relationships according to configuration of spirals

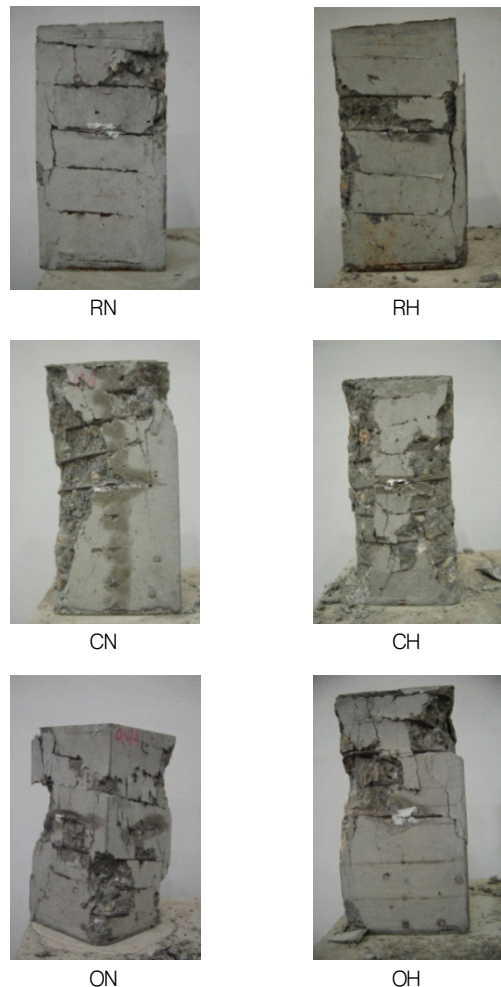


Photo 2 Crack patterns of specimens

최대하중 이후 횡구속 되지 않은 네 모서리 부분의 콘크리트가 박리되었으며, 최종 파괴에 이르러서는 모든 방향에서 콘크리트 박리가 고르게 나타났다. 횡보강근의 형태가 사각형에 팔각형이 결합된 O시리즈 실험체의 경우, 사각실험체와 유사한 파괴양상을 나타내었으며, 특히 나선철근이 팔각으로 접어지는 모서리 부분에서 콘크리트 박리가 상대적으로 집중되어 발생하였다.

### 3.3 연성 증진율

나선철근 항복강도에 따른 연성 증진율은 Table 3에 나타내었다. 여기서 연성은 최대응력시 변형률과 최대응력 이후 최대응력의 80%일 때의 변형률 비로 정의하였다. R시리즈 실험체의 경우, 보통강도 횡보강근을 사용한 RN 실험체와 고강도 횡보강근을 사용한 RH 실험체 사이의 연성증진은 2%로 나선철근 항복강도가 연성에 미치는 영향이 거의 없음을 확인할 수 있었다.

Table 3에서 보는 바와 같이, C시리즈 실험체의 경우 고강도 나선철근을 사용한 CH 실험체가 보통강도 나선철근을 사용한 CN 실험체보다 43% 연성증진 효과를 나타내었다. 이는 세 가지 배근형상 중 연성증진 효과가 가장 높은 것으로 배근형상에 따라 횡보강근 항복강도가 연성증진에 미치는 효과가 다를 수 있음을 의미한다.

Fig. 8은 횡보강근의 형상이 사각형인 R시리즈 실험체를 기준으로 C와 O시리즈 실험체의 연성증진을 나타낸 것이다. Fig. 8에서 보는 바와 같이, 횡보강근의 항복강도가 472MPa인 경우 ON 실험체의 연성은 RN 실험체보다 약 15% 증가하여 3%인 CN 실험체보다 동등 이상의 연

성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

횡보강근의 항복강도가 880MPa인 경우에는 Fig. 8에 나타난 바와 같이 RH 실험체의 연성보다 OH 실험체의 연성이 약 36% 증가하였다. 이는 연성이 RH 실험체보다 45% 증가한 CH 실험체의 80%에 해당하는 것으로, 이 연구에서 제안한 사각과 팔각의 혼합형태가 원형과 유사한 연성능력을 발휘할 수 있음을 의미한다. 이 연구에서 제안된 배근형상은 직사각형 철근콘크리트 기둥에 적용될 경우 코어콘크리트와 내외부 주철근을 효과적으로 구속하여 기둥부재의 횡구속 연성증진에 매우 효과적일 것으로 판단되며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요하리라 판단된다.

## 4. 결론

이 연구에서는 직사각형 철근콘크리트 기둥에 적용 가능한 배근 형상을 제안하였으며 이에 대한 횡구속 성능을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 실험체가 사각단면인 경우 실험체에 배근되는 횡보강근의 형상과 항복강도에 관계없이 강도증진은 관찰되지 않았다.
- (2) 횡구속된 모든 실험체는 횡보강근의 항복강도가 증가할수록 최대하중 이후 보다 연성적인 거동을 보였으며, 제안된 사각과 팔각의 조합 형태인 O시리즈 실험체에서 원형인 C시리즈 실험체와 유사한 횡구속 거동을 보임을 확인할 수 있었다.
- (3) 제안된 배근형상을 가지는 O시리즈 실험체는 사각형인 R시리즈 실험체보다 보통강도 횡보강근을 사용한 경우 15%, 고강도 횡보강근을 사용한 경우 36% 높은 연성 증진율을 보였다. 이는 3%와 45%인 원형 나선철근을 사용한 C시리즈 실험체와 비교하였을 때 제안된 배근형상을 가지는 실험체에서 코어 콘크리트가 효과적으로 횡구속 되었음을 의미한다.

기둥의 횡구속 거동에는 콘크리트 압축강도, 주철근비, 횡보강근의 비와 항복강도 등 많은 변수에 영향을 받으므로 이에 대한 추가적인 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

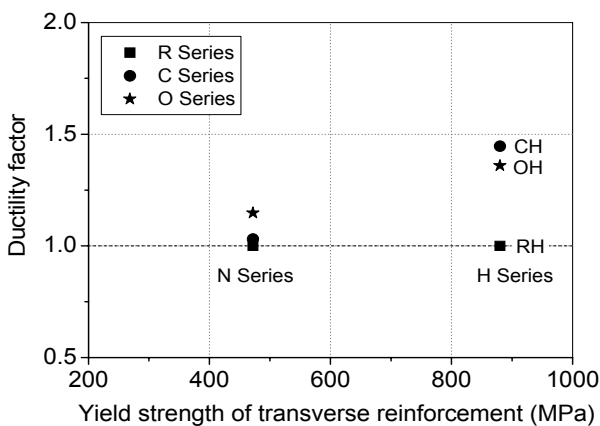


Fig. 8 Ratio of ductility enhancement

---

## 감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2012-0001764)과 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업(2012-0006682)으로 수행된 연구입니다. 또한, 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원(2012R1A1A2039067)을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-08) and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hill, MI, 2008, p.473.
2. J. B. Mander, M. J. N. Priestley and R. Park, "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, vol. 114, No. 8, 1988, pp.1804-1826.
3. Japan Institute of Construction Engineering, New RC Research and Development Report, Japan Institute of Construction Engineering, 1988~1992.
4. Jong-Kuen Kim, Byum-Seok Han and Sung-Woo Shin, "Ductility Capacity of Ultra-high Strength R/C Tied Columns Considering the Axial Load Ratio and Configuration of Transverse Reinforcement", Journal of Architectural Institute of Korea, vol. 25, No. 1, 2009, pp.3-11.
5. Korean Standards Association, Method of Tensile Test for Metallic Materials (KS B 0802), Korean Standards Association, 2003.
6. Korean Standards Association, Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete (KS F 2405), Korean Standards Association, 2010.
7. Robert F. Mast, Mina Dawood, Sami H. Rizkalla and Paul Zia, "Flexural Strength Design of Concrete Beams Reinforced with High-Strength Steel Bars", ACI Structural Journal, vol. 105, No. 5, 2008, pp.570-577.
8. Sung-Woo Shin and Beom-Seok Han, "Confinement Effects of High Strength Reinforced Concrete Tied Columns", Journal of Korea Concrete Institute, vol. 14, No. 4, 2002, pp.578-588.
9. Sun-Kyoung Hwang, Hyun-Do Yun and Soo-Young Chung, "Effects of Transverse Reinforcement on Flexural Strength and Ductility of High-Strength Concrete Columns", Journal of Korea Concrete Institute, vol. 14, No. 3, 2002, pp.365-372.

Received : 04/03/2012

Revised : 06/11/2012

Accepted : 06/14/2012

---

## 요 지

이 연구는 횡보강근의 배근형상에 따른 횡구속된 콘크리트의 성능을 평가하였다. 주요 변수는 횡보강근의 항복강도와 횡보강근의 배근형상으로 하였다. 총 27개의 직사각형 형태의 실험체를 제작하였으며, 단조 집중하중상태에서 실험을 수행하였다. 이 연구에서는 배근형상을 사각형인 R-type, 원형인 C-type 및 이 연구에서 제안한 사각과 팔각이 혼합된 O-type으로 계획하였다. 실험결과, 이 연구에서 제안한 배근형상이 사각형 나선철근과 비교하여 뛰어난 연성능력을 가짐을 확인할 수 있었다.

**핵심 용어** : 횡구속 콘크리트, 배근형상, 횡구속 효과, 고강도 철근, 나선철근