

# 철근콘크리트 원형기둥의 나선철근 최소철근비에 대한 평가

김영식<sup>1</sup>, 김형국<sup>2</sup>, 박천범<sup>3</sup>, 김상우<sup>4</sup>, 김길희<sup>5\*</sup>

## Evaluation of Minimum Spiral Reinforcement Ratio of Circular RC Columns

Young-Seek Kim<sup>1</sup>, Hyeong-Gook Kim<sup>2</sup>, Cheon-Beom Park<sup>3</sup>, Sang-Woo Kim<sup>4</sup>, Kil-Hee Kim<sup>5\*</sup>

**Abstract:** Spiral reinforcement in a circular column plays an effective role in the ductile behavior of a column through position fixing and buckling restraining of the longitudinal reinforcement, and confining core-concrete. Each country has suggested the minimum volumetric ratio of spiral reinforcement in order to secure the ductility of concrete columns. The minimum volumetric ratio of spiral reinforcement suggested by ACI 318-14 and the national concrete structure design standard was developed based on the theory of Richard et al. (1928); furthermore it has been used until now. However, their theory cannot consider the effects of high strength concrete and high strength reinforcement, and arrangement condition of the spiral reinforcement. In this study, a modified minimum volumetric ratio equation is suggested, which is required to improve the ductility of reinforced concrete circular columns and to recover their stress. The modified minimum volumetric ratio equation suggested here considers the effect of the compressive strength of concrete, the yield strength of spiral reinforcement, the cross sectional area of columns, the pitch of spiral reinforcements and the diameter of spiral reinforcement. In this paper, the validity of the minimum volumetric ratios from ACI 318-14 and this study was investigated and compared based on the results of uniaxial compression experiment for specimens in which the material strength and the spiral reinforcements ratio were used as variables. In the end of the study, the modification method for the suggested equation was examined.

**Keywords:** Spiral reinforcement, Volumetric ratio, RC circular column, Confinement effect

### 1. 서 론

철근콘크리트(이하 RC) 기둥은 구조물의 하중을 부담하는 부재로 콘크리트와 축방향 철근이 대부분 그 역할을 하며, 지진 및 풍하중 등으로부터 유사시 인명피해를 최소화하기 위하여 각국에서는 횡보강근(띠철근 및 나선철근)의 최소철근비를 제시하여 기둥의 안전성을 확보하고 있다. 특히 나선철근은 띠철근에 비하여 콘크리트의 횡팽창을 효과적으로 억제하고 연성적인 거동을 보일뿐만 아니라 시공성이 비교적 우수한 것으로 보고(Lee, 2013)되고 있다.

RC 기둥에 설계되는 나선철근의 최소철근비 산정식은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 일축압축력을 받는 기둥의 피복콘크리트

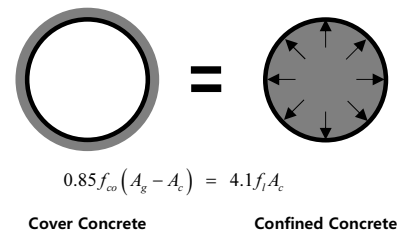


Fig. 1 Conceptual diagram for minimum requirement of lateral reinforcement

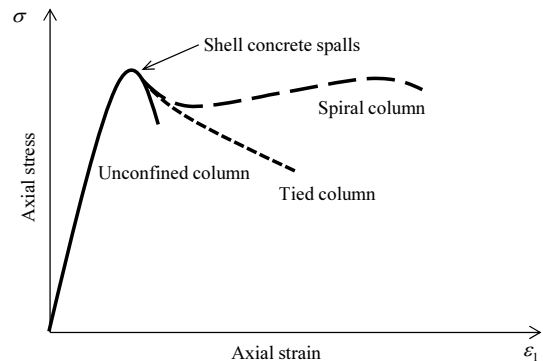


Fig. 2 Comparison of total axial load-strain curves of tied and spiral columns

<sup>1</sup>정회원, ㈜에이스원테크 기업부설연구소, 책임연구원

<sup>2</sup>정회원, 공주대학교 건축학부, 연구교수

<sup>3</sup>정회원, 공주대학교

<sup>4</sup>정회원, ㈜허브구조엔지니어링, 연구소장

<sup>5</sup>정회원, 공주대학교 건축학부, 교수, 교신저자

\*Corresponding author: kimkh@kongju.ac.kr

Department of Architectural Engineering, Kongju National University, Cheonan, Chungcheongnam-do

•본 논문에 대한 토의를 2017년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

트와 나선철근으로 구속된 코어콘크리트의 힘이 동일하다는 가정으로 성립된다. Fig. 2는 횡보강근으로 구속된 RC 기둥의 일축압축 시 거동을 나타낸다. 띠철근으로 구속된 기둥은 횡구속 효과가 미미하여 최대응력에 도달한 후 피복콘크리트의 박리와 동시에 취성적 파괴거동을 보인다. 반면, 상대적으로 횡구속 효과가 우수한 나선철근으로 구속된 기둥은 최대응력에 도달한 이후 피복콘크리트의 박리와 동시에 내력 저하가 발생하지만 횡구속 효과로 인하여 2차 최대응력까지 내력이 회복되며 연성거동을 보인다.

띠철근에 비하여 구조성능과 시공성이 우수한 나선철근의 횡구속 효과에 대한 연구는 Richart et al.(1928)의 나선철근으로 구속된 콘크리트의 최대응력과 축변형률 산정식 제안을 시작으로 Balmer(1949), Kent and Park(1971), Popovics(1973), Mander et al.(1988), El-Dash and Ahmad(1995), Razvi and Saatcioglu(1999), Kim et al.(2016) 등에 이르기까지 많은 연구자들에 의해 발전해 왔다. 현행 국내 콘크리트 구조설계 기준(2012) 및 국외의 현행 기준 및 규준은 이러한 연구결과에 기초하여 RC 기둥에 배근되는 나선철근 최소철근비 산정식을 제시하고 있으며, 국외의 현행 기준 및 규준은 Table 1과 같다.

ACI 318-14(2014)에서 제시하는 나선철근 최소철근비는 현행 국내 콘크리트 구조 기준과 동일하며, 콘크리트 압축강도, 나선철근 항복강도, 코어면적비 등의 영향을 고려하고 있다. ATC-32(1996)는 ACI 318-14와 구성은 유사하나 축력과 축방향 철근비의 영향이 추가적으로 고려되어 있으며, NZS 3101(2006)은 콘크리트 압축강도, 나선철근 항복강도와 축방향철근의 항복강도와 축력비에 대한 영향을 고려하고 있다.

ACI 318-14에서 제시하는 나선철근 최소철근비 산정식은 Richart et al.의 이론에 기초하고 있어 최근 사용되는 고강도 재료의 물리적 특성 및 기둥의 단면조건과 나선철근의 배근조건에 대한 영향을 제대로 반영하지 못하고 있다. 기둥에 배근되는 나선철근 최소철근비는 현재 사용되는 재료 강도 영역에서 나선철근의 횡구속 효과를 반영할 수 있어야 하며, 이에 대한 기초적인 연구가 필요하다고 판단된다.

이 연구에서는 ACI 318-14에서 제시하는 나선철근 최소철근비에 대한 타당성을 검토하고, 현재 사용되는 고강도 재료의 물리적 성질 및 나선철근의 배근조건을 고려하여 나선철근 최소철근비 산정식의 수정 방안을 고찰하고자 한다.

## 2. ACI 318-14 및 수정 최소철근비 산정식

이 장에서는 ACI 318-14에서 제시하는 나선철근 최소철근비 산정식과 고강도 콘크리트 및 나선철근의 배근조건을 고려하여 수정된 최소철근비 산정식에 관하여 기술한다.

### 2.1 ACI 318-14

ACI 318-14에서 제시하는 나선철근 최소철근비 산정식은 Richart et al.이 제안한 나선철근으로 구속된 콘크리트의 최대응력식에 기초하며 최대응력식은 다음과 같다.

$$f_{cc} = f_{co} + 4.1f_{\ell} \quad (1)$$

여기서,  $f_{cc}$ 와  $f_{co}$  나선철근으로 구속된 콘크리트의 최대응력(MPa)을 나타내며,  $f_{\ell}$ 은 나선철근으로 구속된 코어콘크리트와 나선철근 사이에서 발생하는 횡구속압(MPa)으로서 식의 상제는 다음과 같다.

$$f_{\ell} = 0.5\rho_s f_{yt} \quad (2)$$

여기서,  $\rho_s$ 는 나선철근 체적비,  $f_{yt}$ 는 나선철근 항복강도이다. 횡구속압( $f_{\ell}$ )은 나선철근으로 구속된 콘크리트가 최대응력에 도달하였을 때 나선철근이 항복한다는 가정에 기초한다. ACI 318-14는 식 (1)을 이용하여 나선철근 최소철근비 산정식을 다음과 같이 제시하고 있다.

$$0.85f_{co}(A_g - A_c) = 4.1f_{\ell}A_c \quad (3)$$

$$\rho_s = 0.45 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_{co}}{f_{yt}} \quad (4)$$

여기서,  $A_g$ 는 기둥의 전단면적,  $A_c$ 는 코어콘크리트의 단면적을 의미한다. 그러나 ACI 318-14의 기초로 사용된 Richart 등의 제안식은 보통강도 콘크리트( $f_{co} = 16 \sim 20MPa$ ) 및 보통강도 나선철근( $f_{yt} = 260 \sim 320MPa$ )을 사용한 구속콘크리트에 대한 압축실험 결과에 기초하고 있어 현대의 초고층빌딩 및 대형구조물에 사용되는 고강도 재료의 물리적 성질과

Table 1 Design code

Code	Volumetric spiral reinforcement ratio
ACI 318-14	$\rho_s = 0.45 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_{co}}{f_{yt}} \geq 0.12 \frac{f_{co}}{f_{yt}}$
ATC-32	$\rho_s = 0.16 \frac{f_{co}}{f_{yt}} \left( 0.5 + 1.25 \frac{P}{f_{co}A_g} \right) + 0.13(\rho_l - 0.01)$
NZS 3101	$\rho_s = \frac{(1 - \rho_l m) A_g f_{co}}{2.4 A_c f_{yt} \phi f_{co} A_g} \frac{N^*}{\phi f_{co} A_g} - 0.0084$ $\rho_s = \frac{A_{st}}{155d} \frac{f_y}{f_{yt}} \frac{1}{d_{sp}}$

코어콘크리트의 단면크기, 나선철근 간격의 영향 등에 따른 거동특성 변화를 고려하지 못하는 문제점을 가진다.

## 2.2 수정 나선철근 최소철근비 산정식

이 연구에서는 ACI 318-14에서 제시하는 나선철근 최소철근비 산정식의 한계성을 분석하고, 이를 보완하기 위하여 El-Dash and Ahmad의 이론에 기초한 수정 나선철근 최소철근비 산정식을 개발하였다.

El-Dash and Ahmad는 약 70 MPa까지의 콘크리트 압축강도와 기둥 단면크기, 나선철근 배근조건 등의 영향을 고려한 실험결과를 바탕으로 다음과 같은 나선철근으로 구속된 콘크리트의 최대응력 예측식을 제안하였다.

$$f_{cc} = f_{co} + k_1 f'_\ell \quad (5)$$

여기서,  $k_1$ 은 강도증가계수,  $f'_\ell$ 은 기둥의 단면크기와 나선철근의 배근간격을 고려한 유효 횡구속압으로 다음과 같다.

$$k_1 = 5.1 \left( \frac{f_{co}}{f_y} \right)^{0.5} \left( \frac{d_{sp}}{\rho_s} \right)^{0.25} \quad (6)$$

$$f'_\ell = 0.5 \rho_s f_{yt} \left( 1 - \sqrt{\frac{s}{1.25d}} \right) \quad (7)$$

여기서,  $d_{sp}$ 는 나선철근 직경,  $d$ 는 나선철근으로 구속된 콘크리트의 직경,  $s$ 는 나선철근의 간격을 의미한다. 식 8에서 나선철근의 영향이 고려된 힘  $k_1 f'_\ell$ 과 피복콘크리트에 작용하는 힘이 동일하다는 가정을 이용하여 나선철근 최소철근비를 유도하였다. 수정 산정식 (9)는 식 (6)과 (7)에 고려된 다양한 변수조건을 간소화하기 위하여 Kim et al.(2016)의 실험결과에 기초하여 나선철근 항복강도에 대한 콘크리트 압축강도의 비에 대한 관계로 나타내었다.

$$0.85 f_{co} (A_g - A_c) = k_1 f'_\ell A_c \quad (8)$$

$$\rho_{s,E} = 0.137 \left( \frac{f_{co}}{f_{yt}} \right)^{0.5} \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \quad (9)$$

## 3. 최소철근비 산정식 타당성 평가 실험

이 연구에서는 ACI 318-14에서 제시하는 나선철근 최소철근비와 El-Dash and Ahmad 제안식에 기초한 수정 최소철근

비 산정식의 타당성 검토를 위하여 RC기둥에 대한 일축압축 실험을 수행하였다.

## 3.1 재료물성

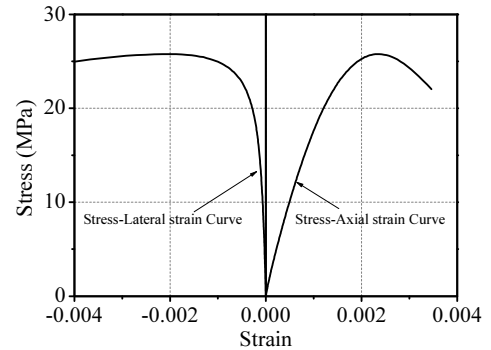
### 3.1.1 재료

이 연구에서 사용한 콘크리트의 설계 배합강도는 25 MPa와 60 MPa로 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 물 시멘트비는 각각 62.9%와 27.2%이다. 굵은 골재의 최대치수는 모두 16 mm로 사용하였으며, 슬럼프와 플로어는 각각 160 mm와 580 mm이다. Table 2은 콘크리트 배합 설계를 나타낸다.

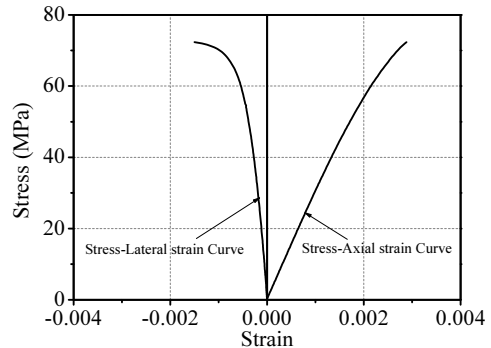
배합강도 별 콘크리트의 역학적 특성을 확인하기 위하여  $\phi$  100 mm×200 mm 크기의 실린더형 공시체를 설계배합강도 별로 15개씩 제작하여, 철근콘크리트 기둥과 동일한 조건으로 양생하였다. 콘크리트 압축강도시험은 콘크리트 타설 28

Table 2 Mix proportion

Strength (MPa)	W/(C+B) (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )						
			W	C	GGBS	FA	S	G	AD
25	62.9	49.0	173	234	-	41 (15%)	888	931	1.93 (0.7%)
60	27.2	43.5	163	330	210 (35%)	60 (10%)	683	894	4.80 (0.8%)



(a) 25MPa

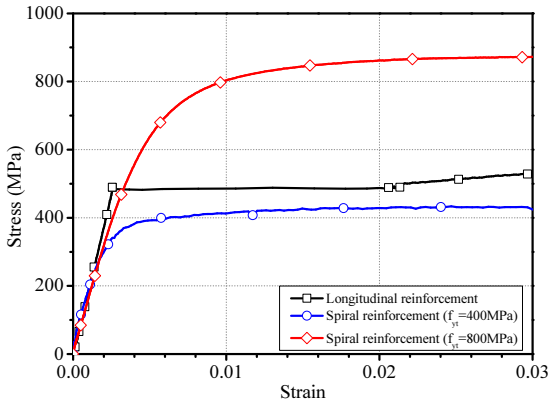


(b) 60MPa

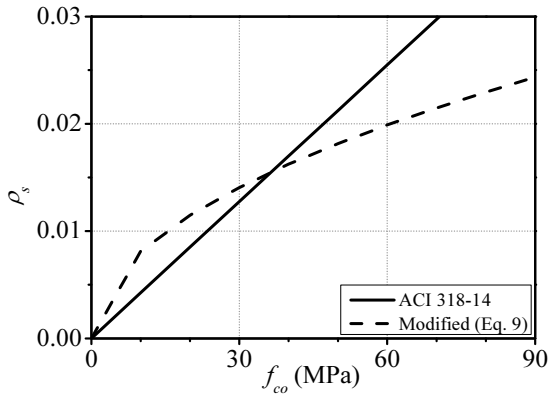
Fig. 3 Stress-strain relationship of concrete

**Table 3** Mechanical properties of reinforcement

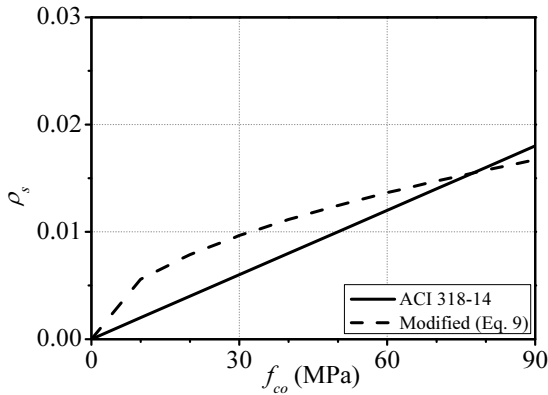
Type	Bar size	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Yield strain
Longitudinal reinforcement	D13	483.5	562.3	0.0026
Spiral reinforcement	φ6	393.9	437.0	0.0023
		827.3	878.2	0.0048



**Fig. 4** Stress-strain relationship of reinforcements



(a) Normal-strength spiral ( $f_{yt} = 400MPa$ )



(b) High-strength spiral ( $f_{yt} = 800MPa$ )

**Fig. 5** Analysis results for minimum spiral reinforcement ratio

일 후 KS F 2405에 준하여 수행하였다. Fig. 3은 설계배합강도 별 공시체의 평균 응력-변형률 관계를 나타내며, 배합강도 별 공시체의 평균 압축강도는 각각 25.6 MPa와 72.5 MPa로 계측되었다.

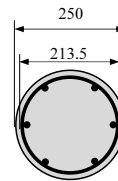
철근콘크리트 기둥에 사용된 주철근은 D13 이형철근이며, 횡보강근으로 사용된 나선철근은 φ6.5 mm 직경의 원형철근이다. 철근인장시험은 KS B 0802에 준하여 수행하였으며, 그 결과는 Table 3와 Fig. 4에 나타내었다.

### 3.2 실험체 계획

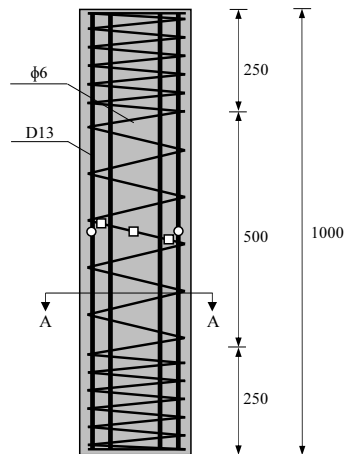
이 연구에서는 철근콘크리트 기둥에 배근되는 나선철근의 최소철근비에 대한 ACI 318-14와 수정 최소철근비의 해석결과를 비교 및 평가하기 위하여, 15 mm의 피복콘크리트를 갖는 직경 250 mm, 높이 1,000 mm의 철근콘크리트 원형기둥 8개를 제작하였다. 실험체의 설계에 사용된 주요 변수는 콘크

**Table 4** Properties of specimens

Specimens	$f'_c$ (MPa)	$f_{yt}$ (MPa)	$\rho_{s,min}$	$s$ (mm)
AN25	25.6	393.9	0.0105	60
PN25	25.6		0.0129	49
AN60	72.5		0.0253	25
PN60	72.5		0.0197	32
AH25	25.6	827.3	0.0053	120
PH25	25.6		0.0090	70
AH60	72.5		0.0126	50
PH60	72.5		0.0140	45



□ : strain gauge(spiral reinforcement)  
○ : strain gauge(longitudinal reinforcement)



**Fig. 6** Specimen details

리트 압축강도 및 나선철근 항복강도의 최소철근비로 Table 4에 실험체 상세를 나타내었다.

나선철근의 최소철근비는 Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 ACI 318-14 규준과 제안모델을 이용하여 콘크리트 압축강도와 나선철근 항복강도를 변수로 산정하였으며, 주철근은 모든 실험체에 6대씩 배근하였다. 또한 주철근 및 나선철근의 변형을 계측하기 위하여 Fig. 6에서와 같이 기둥 중앙부에 위치한 주철근과 나선철근에 스트레인 게이지를 부착하였다.

### 3.3 실험방법 및 계측

Fig. 7은 기둥 실험체의 세팅현황을 나타낸다. 실험체의 축방향 변위를 계측하기 위하여 실험구간인 실험체 중앙부 500 mm 구간에 변위계(이하 LVDT)를 120°도 간격으로 설치하였다. 기둥 실험체의 실험구간 외 구간에는 단부 압괴에 의한 선행 파괴를 방지하기 위하여 실험체의 상단과 하단에 강관커버를 설치하였다.

실험체 가력에는 5,000 kN 용량의 유압 만능시험기를 사용

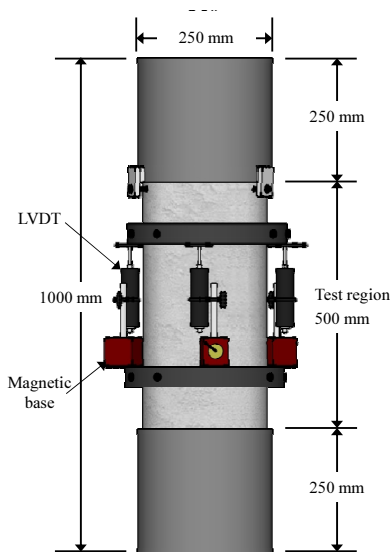


Fig. 7 Test setup

하였으며, 기둥 실험체의 내력이 최대내력의 80% 이하로 감소될 때 까지 실험구간에 초당 0.008 mm의 변위가 발생하도록 변위제어 방식으로 재하 하였다.

## 4. 실험 결과 및 분석

### 4.1 실험결과

Table 5와 Fig. 8은 ACI 318-14와 수정 최소철근비 산정식의 해석결과를 적용한 철근콘크리트 원형기둥 실험체의 실험 결과 및 응력-변형을 관계를 나타낸다. 콘크리트 압축강도 (25.6 MPa)와 나선철근 항복강도(393.9 MPa)가 동일하며, ACI 318 규준과 수정 나선철근 최소철근비 산정식에 의해 나선철근의 최소철근비가 0.0105, 0.0129로 각각 다르게 적용된 AN25와 PN25 실험체의 경우(Fig. 8(a)), 최대응력( $f_{cc}$ )은 각각 33.0 MPa과 33.5 MPa로 나타났으며, 최대응력 시 축변형률 ( $\epsilon_{cc}$ )은 각각 0.0033, 0.0035로 유사하게 계측되었다.

최대응력 시 축변형률 대비 내력이 최대응력의 85%이하로 저하되는 시점의 축변형률의 비  $\epsilon_{cc,85}/\epsilon_{cc}$ (이하, 연성지수)는 나선철근의 최소철근비가 약 20% 높은 PN25 실험체가 AN25 실험체에 비하여 약 1.6배 높게 나타났다. 두 실험체에 배근된 나선철근은 실험체가 파괴되기 전에 모두 항복하였으나, 최대응력 이후 내력이 저하된 이후 나선철근의 횡구속 효과에 의한 내력 회복현상은 나타나지 않았다. 이를 통해 ACI 318-14 규준과 제안모델이 기둥 실험체의 내력회복 및 연성 증진에 요구되는 나선철근 최소철근비를 과대평가하고 있음을 확인하였다.

AN60, PN60 실험체(Fig. 8(b))의 실험 당일 콘크리트 압축 강도는 72.5 MPa로 설계강도(60 MPa)에 비하여 높은 강도를 보였다. 콘크리트 압축강도가 72.5 MPa인 경우 ACI 318 규준과 제안모델에 의한 나선철근 최소철근비는 각각 0.0316, 0.0218로 적용되어야 하나 실험체 제작 시 콘크리트 설계 강

Table 5 Experimental results

Specimens	$f'_c$ (MPa)	$f_{cc}$ (MPa)	$f_{cc,2}$ (MPa)	$\epsilon_{cc}$	$\epsilon_{cc,85}$	$\epsilon_{cc,85}/\epsilon_{cc}$
AN25	25.6	33.0	-	0.0033	0.0098	2.93
PN25		33.5	-	0.0035	0.0169	4.82
AN60	72.5	80.7	82.7	0.0026	0.0163	6.21
PN60		88.1	-	0.0035	0.0144	4.07
AH25	25.6	32.8	-	0.0025	0.0051	1.99
PH25		33.8	-	0.0030	0.0160	5.28
AH60	72.5	85.1	-	0.0028	0.0034	1.23
PH60		82.4	-	0.0027	0.0069	2.55

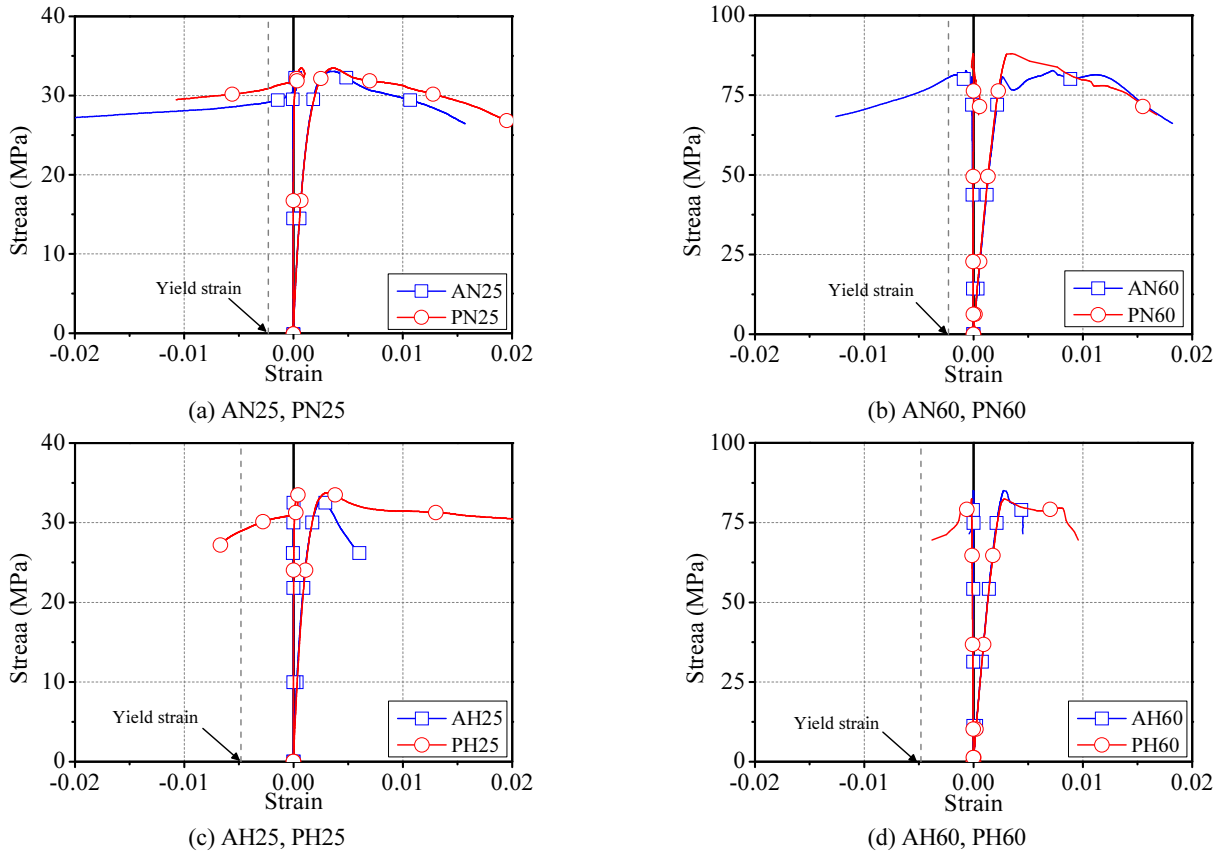


Fig. 8 Stress-strain relationship of tested specimens

도(60 MPa)에 의한 나선철근 최소철근비 산정결과에 따라 실제 최소철근비에 비하여 약 20%, 10%씩 낮은 0.0253, 0.0197로 적용되었다.

두 실험체의 최대응력은 각각 80.7 MPa, 88.1 MPa로 계측되었으며, 최대응력 시 축변형률은 각각 0.0026, 0.0035로 나타났다. 연성지수는 나선철근 철근비가 약 28% 높게 적용된 AN60 실험체가 PN60 실험체에 비하여 약 1.5배 높게 나타났다.

PN60 실험체는 최대응력 이후 나선철근의 횡구속 효과에 의한 내력회복은 관찰되지 않았으며, 나선철근의 변형률 또한 실험이 진행되는 동안 낮은 값을 나타내었다. 반면, AN60 실험체는 최대응력 이후 저하된 내력이 2차 최대응력(82.7 MPa)까지 회복되는 양상을 나타내었으며, 2차 최대응력을 나타내는 시점에서 나선철근이 항복하였다. 이는 AN60 실험체에 배근된 나선철근 최소철근비가 콘크리트 압축강도 72.5 MPa에 배근되어야 하는 실제 최소철근비보다 작았음에도 불구하고 나선철근 최소철근비에 의해 요구되는 거동조건을 만족시키는 결과를 나타내고 있어 ACI 318-14 규준이 무근콘크리트 압축강도가 60 MPa~70 MPa인 구간의 나선철근의 최소철근비를 과소평가하고 있음을 보여준다.

보통강도 콘크리트(25.6 MPa)와 고강도 나선철근(827.3 MPa)

인 사용한 AH25, PH25 실험체의 최대응력은 각각 32.8 MPa, 33.8 MPa로, 최대응력 시 축변형률은 각각 0.0025, 0.0030로 유사하게 계측되었으나, 연성지수는 나선철근 철근비가 약 70% 높은 PH25 실험체가 AH25 실험체에 비하여 약 2.7배 높게 나타났다.

그러나 두 실험체는 모두 최대응력 이후 저하된 내력의 회복은 나타나지 않았으며, 나선철근의 변형은 매우 작거나 최종 파괴 시점에서 나선철근이 항복하는 양상을 나타내었다. 이를 통해 ACI 318-14 규준과 제안모델이 보통강도 콘크리트와 고강도 나선철근을 사용한 철근콘크리트 기둥 실험체에 대한 최소철근비를 과대평가하는 것을 확인하였다. Fig. 8(d)는 AH60, PH60 실험체의 응력-변형률 관계를 비교한 것이다. 두 실험체의 최대응력은 각각 85.1 MPa, 82.4 MPa이며, 최대응력 시 축변형률은 각각 0.0028, 0.0027로 유사하게 계측되었다. 철근비가 11% 높게 적용된 PH60 실험체의 연성지수는 AH60 실험체에 비하여 약 2.1배 높게 나타났다. PH60 실험체의 경우 최대응력 이후 저하된 내력의 회복을 보였으나 회복되는 내력의 정도는 크지 않았다.

두 실험체에 배근된 나선철근은 실험체가 파괴되는 시점까지 모두 항복하지 않아 나선철근의 횡구속 효과가 미미하였

음을 알 수 있었다. 하지만 실제 콘크리트 압축강도에 따른 철근비에 비하여 나선철근이 적게 배근된 점을 고려한다면, 제안모델의 최소철근비 산정결과가 나선철근 최소철근비의 요구조건에 근접하다는 것을 확인할 수 있다.

#### 4.2 실험결과 분석

Fig. 9는 콘크리트 압축강도에 따른 나선철근 최소철근비의 해석결과와 실험결과를 비교하여 나타내고 있다. Fig. 9에서 실선은 ACI 318-14에 의한 해석결과를, 점선은 수정 최소철근비 산정식에 의한 최소철근비이다. 또한 심볼은 해석결과에 의하여 RC 원형기둥 실험체에 배근된 나선철근 철근비를 의미한다.

AN25, AH25 실험체(□)와 PN25, PH25 실험체(○)는 해석결과와 실험체에 사용된 콘크리트 압축강도가 일치하여 나선철근의 철근비가 동일하게 적용되었다. 반면, AN60, AH60 실험체(△)와 PN60, PH60 실험체(☆)의 경우 실험체에 사용된 콘크리트 압축강도가 해석결과보다 높게 나타나 실제로 배근되어야 하는 최소철근비(AN60, AH60: ▲, PN60, PH60: ★)보다 적은 양의 철근이 배근되었다.

Fig. 9에 나타난 해석결과와 실험결과에 기초하여 ACI 318-14와 수정 최소철근비 산정식에 대한 분석 내용은 다음

과 같다. 보통강도 콘크리트를 사용한 원형기둥의 경우 보통강도 나선철근을 사용한 PN25 실험체는 AN25 실험체 보다 약 20%, 고강도 나선철근을 사용한 PH25 실험체는 AH25 실험체 보다 약 70% 많은 나선철근을 사용하였다. 하지만 이들 실험체는 나선철근의 횡구속 효과에 의한 내력회복을 나타내지 않아 ACI 318-14와 수정 최소철근비 산정식이 나선철근의 최소철근비를 과대평가하고 있음을 알 수 있다.

고강도 콘크리트를 사용한 실험체(AN60, PN60, AH60, PH60) 중에서 AN60 실험체는 내력회복 및 2차 최대응력을 나타내었으며, 나머지 실험체에서는 나선철근에 의한 2차 최대응력 증진 효과가 나타나지 않았다. 고강도 콘크리트 실험체의 경우 실제 콘크리트 압축강도(72.5 MPa)가 설계강도(60 MPa)에 비하여 높게 나타나 설계강도에 대한 ACI 318-14와 수정 최소철근비 산정식의 해석결과 보다 각각 10%와 20% 적은 철근비의 철근이 배근되었다. 따라서, ACI 318-14는 보통강도 나선철근과 고강도 콘크리트를 사용한 원형기둥의 최소철근비를 과소평가하며, 고강도 나선철근과 고강도 콘크리트를 사용한 원형기둥의 최소철근비를 과대평가하고 있음을 알 수 있다. 또한, 수정 최소철근비 산정식은 보통강도 나선철근과 고강도 나선철근을 사용한 고강도 콘크리트 원형기둥의 최소철근비를 과대평가하고 있음을 확인하였다.

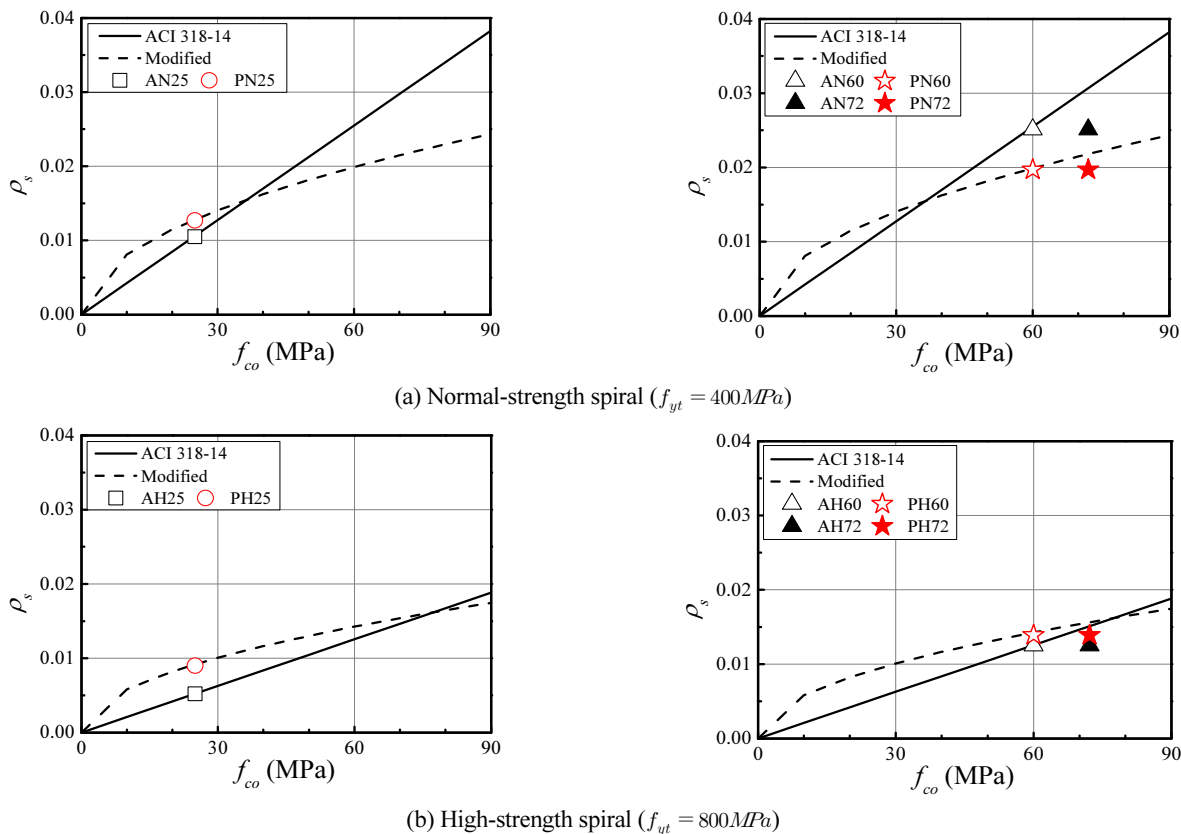


Fig. 9 Comparison of volumetric spiral reinforcement ratio with respect to concrete strength

## 5. 결론

이 연구에서는 고강도 재료의 물리적 특성과 나선철근 배근조건이 고려된 수정 나선철근 최소철근비 산정식을 제시하였으며, 현행 ACI 318-14 규준의 한계성과 수정 나선철근 최소철근비 산정식의 타당성을 검증하기 위하여 나선철근으로 확보된 콘크리트 기둥에 대한 일축압축실험을 수행하였다.

실험결과, 현행 ACI 318-14 규준은 보통강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 기둥의 피복콘크리트 박리 이후 저하된 내력의 회복과 연성적 거동 확보에 필요한 나선철근에 대한 최소철근비를 항복강도의 높고 낮음에 상관없이 과대평가하는 반면, 고강도 콘크리트를 사용한 기둥의 경우에는 보통강도 나선철근의 철근비는 과소평가하고 있으며, 고강도 나선철근의 철근비는 과대평가하는 경향을 보였다. 또한, 실험결과로부터 이 연구의 수정 나선철근 최소철근비 산정식이 ACI 318-14와 비교하여 나선철근의 횡구속 효과에 의한 내력회복 및 연성적 거동 확보에 요구되는 철근비에 보다 근사한 값을 제시하고 있음을 확인하였다.

추후연구에서는 나선철근으로 구축된 철근콘크리트 원형 기둥의 이상적인 거동에 요구되는 나선철근의 적정 철근비 산정을 위한 연구와 고강도 재료의 물리적 특성 및 배근조건이 반영된 나선철근 최소철근비 산정식 개발에 대한 심도 있는 검증이 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2014R1A1A2005431)이며, 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. NRF-2015R1A2A2A0100-3397)입니다. 또한 2017년도 과학기술정보통신부의 재원으로 과학벨트기능지구지원사업의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2017K00488)입니다.

## Notation

$A_c$  : area of the confined concrete  
 $A_g$  : total area of the column  
 $A_{st}$  : area of spiral reinforcement  
 $d_{sp}$  : diameter of spiral reinforcement  
 $f_{co}$  : compressive strength of unconfined concrete  
 $f'_c$  : compressive strength of concrete

$f_y$  : yield strength of longitudinal reinforcement  
 $f_{yt}$  : yield strength of spiral reinforcement  
 $m$  :  $f_y / (0.85f_{ck})$   
 $N^*$  : design axial load at ultimate limit state to be taken as positive for compression and negative for tension,  $N$   
 $P$  : design axial load  
 $\rho_l$  : ratio of longitudinal reinforcement  
 $\rho_s$  : ratio of volume of spiral reinforcement to total volume of concrete core

## References

- ACI Committee 318 (2014), Building Code Require for Structural Concrete, ACI 318-14, *American Concrete Institute*, USA.
- ATC-32 (1996), Improved Seismic Design Criteria for California Bridges; provisional recommendations, Applied Technology Council California, USA.
- Balmer, G. G. (1949), Shearing strength of concrete under high triaxial stress-computation of mohr's envelope as a curve, *Structural Research Laboratory Report* No. SP-23, U. S. Bureau of Reclamation, 13.
- El-Dash, K. M. and Ahmad, S. H. (1995), A model for stress-strain relationship of spirally confined normal and high-strength concrete columns, *Mag. Concrete Res.*, 47(171), 177-184.
- Kent, D. C. and Park, R. (1971), Flexural members with confined concrete, *J. Struct. Div. ASCE*, 97(7), 1969-1990.
- Kim, Y. S., Kim, S. W., Lee, J. Y., Lee, J. M., Kim, H. G., and Kim, K. H. (2016), Prediction of stress-strain behavior of spirally confined concrete considering lateral expansion, *Constr. Build. Mater.*, 102(2016), 743-761.
- Korea Concrete Institute (2012), Concrete Structure Design Standard, Korea (In Korean).
- Lee, J. Y. (2013), Reinforced Concrete Structures, DongHwa Technology Publishing Co., 44-45.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R. (1988), Theoretical stress-strain model for confined concrete, *J. Struct. Eng.*, 114(8), 1804-1826.
- NZS 3101 Part 1 (2006), Concrete Structures Standard, Standard Association of New Zealand.
- Popovics, S. (1973), Anumerical approach to the complete stress-strain curve of concrete, *J. Struct. Eng.*, 3(5), 583-599.
- Richart, F. E., Brandzaeg, A., and Brown, R. L. (1928), A study of the failure of concrete under combined compressive stresses, *Bull.* No. 185, University of Illinois, Engineering Experimental Station, Urbana, Ill., 74.

Received : 04/25/2017

Revised : 02/17/2017

Accepted : 05/16/2017



---

**요 지** : 원형 기둥의 나선철근은 축방향 철근의 위치 고정 및 좌굴방지와 코어콘크리트의 충분한 횡구속으로 기둥의 연성거동에 효과적인 역할을 한다. 각국은 기둥에 요구되는 연성을 확보하기 위하여 나선철근의 최소철근비를 제시하고 있다. ACI 318-14와 국내 콘크리트 구조설계 기준에서 제시하는 나선철근 최소철근비는 Richart et al.(1928)의 이론에 기초하여 개발되었으며 현재까지 사용되고 있다. 그러나 Richart et al.(1928)의 이론은 현대의 고강도 콘크리트, 고강도철근 그리고 나선철근의 배근조건 등의 영향을 고려하지 못한다. 이 연구에서는 나선철근으로 구속된 철근콘크리트 원형 기둥의 내력회복 및 연성증진에 요구되는 나선철근에 대한 수정 최소철근비 산정식을 제시한다. 수정 최소철근비 산정식은 콘크리트 압축강도, 나선철근 항복강도, 기둥의 단면적, 나선철근 배근간격, 나선철근 직경의 영향을 고려하고 있다. 이 논문에서는 재료강도 및 나선철근 최적비를 변수로 한 실험체의 일축 압축실험을 통하여 ACI 318-14에 제시하는 나선철근 최소철근비 산정식의 타당성을 검토하고, 그 결과를 토대로 나선철근 최소철근비 산정식의 수정방안을 고찰하였다.

**핵심용어** : 나선철근, 철근비, 철근콘크리트 원형기둥, 횡구속 효과

---