



## 경사힘이론에 기반한 유라시아의 비틀림 설계법

주현진<sup>1)</sup> · 이득행<sup>2)\*</sup> · 메이르잔 예르자노프<sup>3)</sup> · 김길희<sup>4)</sup> · 이창준<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>나자르바예프대학교 토목환경공학과 박사 후 연구원 <sup>2)</sup>충북대학교 건축공학과 조교수

<sup>3)</sup>나자르바예프대학교 토목환경공학과 박사과정 <sup>4)</sup>공주대학교 건축학부 교수 <sup>5)</sup>충북대학교 건축공학과 부교수

## Torsional Design Method Based on Skew Bending Theory in Eurasia

Hyunjin Ju,<sup>1)</sup> Deuckhang Lee,<sup>2)\*</sup> Meirzhan Yerzhanov,<sup>3)</sup> Kil-Hee Kim,<sup>4)</sup> and Chang-Joon Lee<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>Postdoctoral Scholar, Department of Civil and Environmental Engineering, Nazarbayev University, Nur-Sultan 010000, Rep. of Kazakhstan

<sup>2)</sup>Assistant Professor, Department of Architectural Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk 28644, Rep. of Korea

<sup>3)</sup>Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Nazarbayev University, Nur-Sultan 010000, Rep. of Kazakhstan

<sup>4)</sup>Professor, Department of Architectural Engineering, Kongju National University, Cheonam 31080, Rep. of Korea

<sup>5)</sup>Associate Professor, Department of Architectural Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk 28644, Rep. of Korea

**ABSTRACT** This study introduced the torsional design method specified in Russian Concrete Design Standard (SNiP) for the first time to the Korean structural engineering society; SNiP is being widely used in many Post-Soviet countries throughout the Eurasia region. Its key philosophy and basic background including detailed formulations were provided. The torsional design models specified in other structural design codes, such as ACI 318, CSA, and Eurocode are based on the space truss model with the thin wall tube analogy, while SNiP code model is based on the skew-bending theory considering the two failure modes. A total of 253 reinforced concrete (RC) torsional specimens were collected from literature for verification, and analytical accuracy was also compared to those estimated from other international building codes. It was found that the torsional strength design methods of SNiP and CSA can accurately estimate the torsional strengths of RC members, and Eurocode 2 provided a relatively conservative results. Also, ACI 318 estimated the specimens quite accurately on the conservative side. In addition, it can be observed that it is possible to estimate the torsional strengths of RC members in a conservative manner by applying the limitations on the compressive strength of concrete and yield strength of reinforcement specified in each design code.

**Keywords** : torsion, reinforced concrete, skew-bending theory, Russian design code, torsional database

### 1. 서 론

SNiP(СНиП, строительные нормы и правила)은 러시아의 기술산업 전반에 대한 기준(standard)으로서 소련붕괴 이후(post-soviet)에도 여전히 공학적으로 큰 영향을 미치고 있으며, 대부분의 구소련 국가들에서 채택되어 사용되고 있다(Yerzhanov and Lee 2020). 여기에는 러시아 연방은 물론 카자흐스탄, 몽골, 우즈베키스탄, 키르기스스탄, 타지키스탄, 투르크메니스탄, 조지아, 아르메니아, 아제르바이잔, 벨라루스, 우크라이나, 몰도바 등 여러 유라시아 국가들이 포함되어 있다. 이와 같이 수 많은 국가들이 SNiP 기준을 기반으로 구조물을 설계하고 있으며(fib 2015), 주로 건설수요가

상당히 높은 개발도상국 지역임에도 불구하고 SNiP 설계기준에 대한 선진국들의 이해도가 낮은 실정이다. 이에 대한 이유로는 언어 장벽 및 배경 이론에 대한 제한적인 문서 접근성 등 구소련 사회 특유의 문화적 폐쇄성을 들 수 있다(Yerzhanov et al. 2019). 이 같은 배경으로 인하여 SNiP 설계기준은 세계적으로 잘 알려진 미국의 ACI 318이나 유럽기준(Eurocode 2)과는 다른 나름의 독창적인 철학에 기반한 설계방법론을 제시하고 있다. 이 연구에서 다루고 있는 콘크리트 구조물은 방대한 SNiP 설계기준에서도 ‘(БЕТОННЫЕ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ-번역: 콘크리트 및 철근콘크리트 구조물편)’에 기반하여 설계되며, Yerzhanov et al.(2019), Yerzhanov and Lee(2020)은 SNiP에서 규정하는 콘크리트 및 프리스트레스트 콘크리트 부재의 전단설계모델에 대해 고찰한 바 있다.

최근 콘크리트 재료 및 설계 기술의 발전과 함께(Bernardo 2019; Kuan et al. 2019; Bernardo and Andrade 2020) 다양한 형

\*Corresponding author E-mail : dk@cbnu.ac.kr

Received October 26, 2020, Revised November 23, 2020,

Accepted November 25, 2020

©2021 by Korea Concrete Institute

태의 비정형 건축물의 설계가 빈번해지고 있으며, 특히, 건물시스템의 비대칭성 또는 하중 및 경간의 비대칭성에 의하여 유발되는 기둥과 테두리보 부재에 대한 비틀림 설계 필요성이 증가하고 있다(Ju et al. 2013, 2020a). 특히, 효율적이고 경제적인 부재 설계에 따라 세장한 단면을 구현할 수 있게 되었지만, 이러한 부재에 대한 상세한 내력 검토 및 비틀림 설계에 대한 고려가 필수적인 상황이다(Ju et al. 2020b). SNIIP 기준에서 규정하는 비틀림 설계기준은 1962년 Lessig(1959, 1961)의 경사힘이론을 바탕으로 최초로 도입되었으며(SNIIP 1962), 이후 1984년(SNIIP 1985)까지 계수의 사소한 개정이 이루어졌다. 1991년 구소련의 붕괴 전후로 혼란한 사회 및 정치체제가 한동안 지속되면서 SNIIP 기준의 개정은 거의 이루어지지 않았으며, 2003년(SNIIP 2003) 기존의 설계기준을 간략화한 현재의 비틀림 설계방법(SP 2018)에 이르렀다.

이 연구에서는 다른 국제설계기준들과는 사뭇 다른 철학을 가진 SNIIP의 비틀림 설계기준을 상세히 고찰하고, 국제적으로 널리 사용되고 있는 북미 및 유럽의 구조설계기준과 (Eurocode 2 2004; CSA 2014; ACI 2019) 비교하여 그 합리성을 검증하고자 하였다. 이를 위하여 15개의 문헌(Hsu 1968; McMullen and Ranan 1978; Rasmussen and Baker 1995; Koutchoukali and Belarbi 2001; Fang and Shiau 2004; Chaliotis 2006; Chiu et al. 2007; Bernardo and Lopes 2009; Lee and Kim 2010; Kim et al. 2018; Lee et al. 2018; Joh et al. 2019; Ju et al. 2019; Ibrahim et al. 2020; Kim et al. 2020)에서 총 256개의 순수 비틀림 하중을 받는 철근콘크리트 보 부재를 수집하였으며, 이에 대한 비틀림 강도를 평가하였다.

## 2. SNIIP 비틀림 설계법

### 2.1 경사힘이론(Skew Bending Theory)

경사힘이론은 현재 SNIIP 기준의 비틀림 설계기준의 배경이론으로서, Lessig에 의해 처음 제안되었으며(Hsu 1984), 많은 철근콘크리트 교과서에서 박벽튜브모델이 개발되기 전에 사용되던 고전적인 설계방법으로 소개되고 있다. Fig. 1에 나타난 것과 같이, 경사힘이론에 따르면 직사각형 콘크리트 보의 비틀림 파괴는 3면을 갖는 나선형 경사균열이 네번째 면의 콘크리트 압축대와 연결되면서 야기되는 것으로 가정한다. 파괴 시 파괴면에 의해 분리된 보의 두 부분은 압축영역의 내부면에 존재하는 중립축에 대해 상대적으로 회전한다고 가정한다. 철근콘크리트 부재의 비틀림 강도는 압축대의 중립축에 대한 모멘트 평형( $\Sigma M=0$ )과 압축대에 수직인 힘의 평형( $\Sigma F=0$ )으로부터 유도되며, 반복계산을 통하여 최소값의 비틀림 강도를 결정하게 된다. Lessig는 두 가지 파괴모드를 고려한 힘 경사 이론을 제시하였다. 파괴모드 1에서는 직사각형 철근콘크리트 보 부재가 비틀림 모멘트와 함께 정모멘트에 의해 지배적으로 거동하는 경우로서, Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 균열이 힘 인장에 의하여 부재의 바

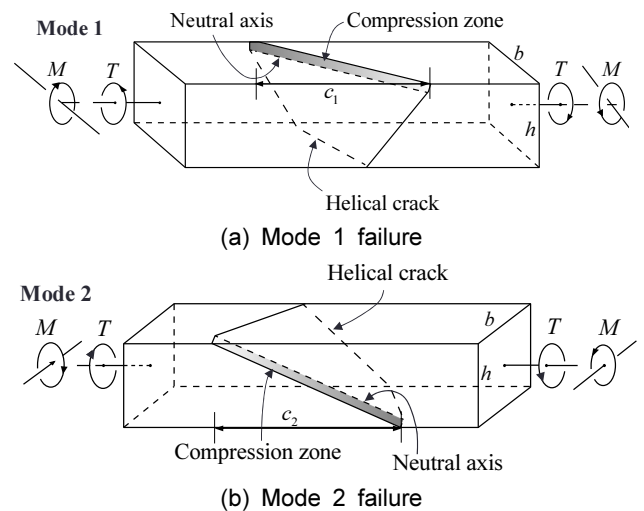


Fig. 1 Failure modes of skew-bending theory

닥면에서 시작되며, 중립축 상부에 경사진 압축대가 형성된다고 가정한다. 반면 파괴모드 2는 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 비틀림 모멘트와 함께 전단력이 지배적으로 작용하는 경우로서, 전단력과 비틀림 모멘트에 의한 전단응력이 중첩되는 수직면에서 부재 길이 방향에 대해 45°로 초기 균열이 형성된다고 가정한다. 이때 중립축과 압축대는 전단력과 비틀림 모멘트에 의해 유발된 전단응력이 서로 상쇄되는 면, 즉, 균열이 처음 발생하는 면의 반대 수직면에 형성된다. Lessig의 모델 이후 Collins et al.(1965, 1968)은 부모멘트를 고려한 세 번째 파괴모드를 제시하였으며, 전단파괴에 대한 경험식을 추가로 고려한 모델이 1973년 호주 기준(SAA 1973)에 채택된 바 있다. 경사힘이론에서는 파괴면을 가로지르는 길이방향 철근과 스티럽은 부재의 파괴 시 모두 항복한 것으로 가정하고 철근의 장부 효과와 콘크리트의 인장 강도는 무시한다(Hsu 1984). 또한, 파괴영역 내에서의 스티럽은 동일한 간격을 갖는 것으로 간주한다. 그 밖에 압축대에서의 전단 응력과 파괴면에서 비틀림의 뒤틀림 요소는 부재강도에 영향을 미치지 않는 것으로 가정한다.

### 2.2 비틀림 설계법

현행 SNIIP(SP 2018) 기준에서 제시하는 철근콘크리트 부재의 비틀림 설계 규정은 1962년 SNIIP의 설계모델을 간략하게 수정한 형태이다. 각 모드에 대해서 순수 비틀림 강도식을 제시하고 이를 힘 모멘트 및 전단력과 관계식으로 다른 하중과의 조합을 고려하도록 각각 식 (1)과 식 (2)로 제시하고 있다.

$$\frac{T}{T_{n1}} \leq \sqrt{\left(1 - \frac{M}{M_n}\right)^2} \quad (1)$$

$$\frac{T}{T_{n2}} \leq 1 - \frac{V}{V_n} \quad (2)$$

여기서,  $T$ ,  $M$  및  $V$ 는 각각 부재에 작용하는 비틀림 모멘트, 휨 모멘트 및 전단력,  $T_{n1}$ 과  $T_{n2}$ 는 각각 파괴모드 1과 2에 대한 공칭 비틀림 강도,  $M_n$ 와  $V_n$ 는 각각 공칭 휨강도 및 전단 강도이다.

비틀림과 휨모멘트는 2차 곡선의 관계식으로 정의되며, 비틀림과 전단력 간의 관계는 보강비에 따라 다소 차이가 있는 것으로 보고되었지만(Ju et al. 2020c), 여기서는 전단응력을 받는 콘크리트 부재의 취성적 특성을 고려하여 안전측의 선형관계로 정의되었다. 각 모드에서의 비틀림 강도는 식 (3)과 식 (4)로 산정할 수 있다.

$$T_{n1} = 0.9A_{11}f_{yt}\frac{b}{c_1}h + 0.9A_t f_{yt}\frac{c_2bh}{s(2h+b)} \quad (3)$$

$$T_{n2} = 0.9A_{12}f_{yt}\frac{b}{c_2}b + 0.9A_t f_{yt}\frac{c_2bh}{s(2b+h)} \quad (4)$$

여기서,  $A_{11}$ 은 Fig. 1(a)에 나타난 파괴모드 1의 단면 하단부에 위치한 길이방향 철근의 단면적,  $A_{12}$ 은 Fig. 1(b)에 나타난 파괴모드 2의 수직면에 위치한 길이방향 철근의 단면적,  $f_{yt}$ 는 길이방향 철근의 설계기준항복강도,  $b$ 는 단면의 폭,  $h$ 는 단면의 높이,  $A_t$ 는 간격  $s$  내의 비틀림에 저항하는 페쇄스터립 한가닥의 단면적,  $f_{yt}$ 는 횡방향 철근의 설계기준항복강도,  $s$ 비틀림 철근의 간격이다.  $c_1$ 은 파괴모드 1에서 압축대의 길이방향 투영길이이며,  $\lambda\sqrt{A_{11}f_{yt}(2h+b)s/A_t f_{yt}}$ 으로 산정될 수 있고,  $2h+b$ 와  $\sqrt{2b(2h+b)}$ 의 작은 값보다 커서는 안 된다. 다시 여기서,  $\lambda = 1.2 - 0.4M/M_n$ 이며, 이는 파괴모드 1에서 휨 모멘트의 영향을 클 경우 파괴면이 길이 방향에 수직인 단면에 가깝게 형성되기 때문에 이를 고려하여, 휨 모멘트의 크기에 따라 투영길이를 좀 더 작은 값으로 조정할 수 있도록 규정한 것이다.  $c_2$ 는 파괴모드 2에서 압축대의 길이방향 투영길이로서,  $\sqrt{A_{12}f_{yt}(2b+h)s/A_t f_{yt}}$ 으로 산정되며,  $2b+h$ 와  $\sqrt{2h(2b+h)}$  중에서 작은 값보다 커서는 안 된다.

현재 SNiP의 비틀림 설계규정에서는 식 (3)과 식 (4)에서 투영길이의 영향을 간략화 하여 파괴모드 1과 2에 대한 비틀림강도를 각각 아래와 같이 제시하고 있다.

$$T_{n1} = 0.5A_{11}f_{yt}h + A_t f_{yt}\frac{b^2h}{s(2h+b)} \quad (5)$$

$$T_{n2} = 0.5A_{12}f_{yt}b + A_t f_{yt}\frac{h^2b}{s(2b+h)} \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)은 각 파괴모드에 해당하는 식 (3)과 식 (4)의  $c_1$ 과  $c_2$ 를 각각  $b$ 와  $h$ 로 가정하고 각 항의 상수를 안전측으로 제시하여 유도한 것이다.

비틀림 강도는 각 모드에 따라 산정한 비틀림 모멘트 중 작은 값으로 결정되며, 이는 파괴모드 2의 압축대에에서 발

생할 수 있는 콘크리트 파괴강도보다 작아야 한다. 즉, 철근의 항복이전에 발생할 수 있는 콘크리트 분쇄 파괴를 방지하기 위해서 산정된 비틀림 모멘트는 최대 비틀림 강도로 제한된다. 최대 비틀림 강도( $T_{max}$ )는 휨 경사이론으로 유도된 균열 비틀림 강도 수식으로부터 경험적으로 식 (7)과 같이 결정되었다.

$$T_{max} = 0.1f_{ck}b^2h \quad (7)$$

여기서,  $f_{ck}$ 는 콘크리트 설계기준압축강도이다. 실무설계에서 식 (7)의 최대 비틀림 강도는 휨 및 전단력과 조합된 비틀림 하중에 저항하는 단면의 크기를 검토하는 데 사용된다. 여기서, 콘크리트 압축강도( $f_{ck}$ )는 SNiP 기준에 제시된 표에 따라 최대 71 MPa까지 적용할 수 있으며, 철근의 항복강도는 장기하중과 단기 하중에 대해 각각 최대 500 MPa 및 400 MPa로 제한된다.

한편, 휨 경사 이론을 기반으로 유도된 비틀림 강도는 길이방향 철근 및 스테럽의 항복을 가정하고 있으므로, 이를 보장하기 위한 길이방향 철근과 스테럽의 상대적인 보강비를 파괴모드 1과 2에 대하여 각각 식 (8)과 식 (9)로 제한된다.

$$0.5 \leq \frac{A_t f_{yt} b}{A_{11} f_{yt} s} \leq 1.5 \quad (8)$$

$$0.5 \leq \frac{A_t f_{yt} h}{A_{12} f_{yt} s} \leq 1.5 \quad (9)$$

### 3. 국제설계기준들의 비틀림 설계법

현재 국제적으로 널리 사용되는 콘크리트 구조설계기준들(Eurocode 2 2004; CSA 2014; ACI 318 2019)의 비틀림 설계 모델은 SNiP과 달리 Fig. 2에 나타난 박벽튜브 이론 및 공간 트러스 모델을 근간으로 하는 비틀림 설계법을 채택하고 있다(ACI-ASCE 2013). 이들 ACI 318, CSA, 및 Eurocode 2 기준의 비틀림 설계법들은 박벽 유효두께의 정의, 압축경사대의 기울기 결정방법, 콘크리트 압축대 파괴를 방지하기 위한 최대 비틀림 강도 규정 등의 설계 상세를 서로 다르게 규정하고 있지만, 근본적으로 트러스모델을 근간으로 동일한 비틀림 강도 산정식을 제시하고 있다. 이 장에서는 각 기준의 비틀림 설계 방법을 고찰하여, 그 차이와 특징을 살펴보고자 한다.

#### 3.1 미국(ACI 318-19) 및 국내 기준(KCI-17)

ACI 318(2019) 및 국내 KCI(2017) 기준에서는 철근콘크리트의 공칭비틀림강도를 페쇄스터립의 저항력에 의해 산정하도록 제시하지만, 길이방향 철근과의 힘의 평형을 만족시키기 위해서 비틀림 강도는 식 (10)과 같이 결정된다.

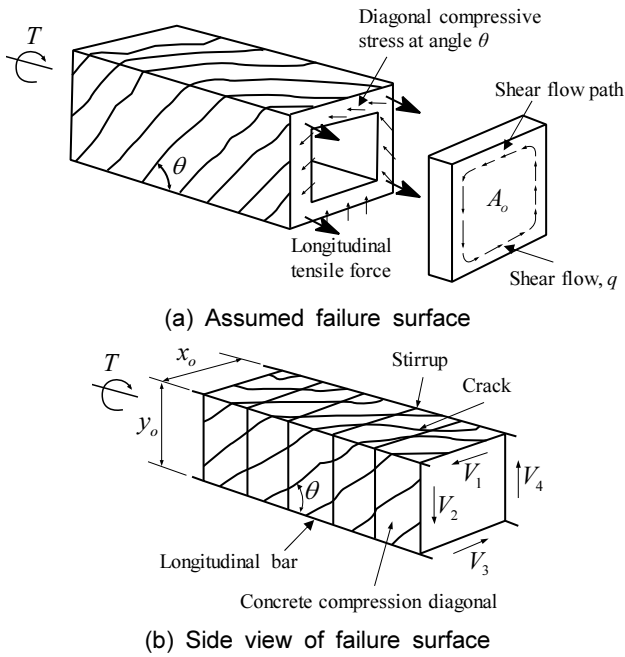


Fig. 2 Idealization of reinforced concrete beam for torsional design

$$T_{n,ACI} = \min\left(\frac{2A_oA_t f_{yt}}{s} \cot \theta, \frac{2A_oA_t f_{yt}}{s} \tan \theta\right) \leq \frac{5}{6} \sqrt{f_{ck}} \frac{1.7A_{oh}^2}{p_h} \quad (10)$$

여기서,  $A_o$ 은 전단흐름에 의해 단혀진 단면적( $=0.85A_{oh}$ ),  $A_{oh}$ 은 가장 바깥의 비틀림 보강철근의 중심으로 단혀진 단면적,  $\theta$ 는 비틀림 해석에서 트리스 유사론에 의한 때 압축 경사재의 경사각,  $p_h$ 는 가장 바깥의 횡방향 폐쇄스터립 중심선의 둘레이다. 콘크리트의 압축강도( $f_{ck}$ )는  $\sqrt{f_{ck}} \leq 8.3\text{MPa}$ 으로 제한되며, 길이방향 철근과 스테립의 항복강도는 최대 420 MPa까지 적용 가능하다. 전단 및 비틀림 문제에서 압축 경사각은 부재의 공칭강도 결정에 있어 중요한 변수임에도 연구자들 간의 합의점이 도출되지 않았으며, 기준마다 상이하게 제시된다. 양방향 철근의 항복을 가정한다면, 길이방향 철근과 스테립의 힘의 평형 관계를 통해 식 (10)과 같이 산정할 수 있으며, ACI 318-19(2019)에서는  $\theta$ 를 최소 30°에서 최대 60°로 제한한다.

$$\theta = \cot^{-1}\left(\sqrt{\frac{A_t s}{A_t p_h} \frac{f_{ly}}{f_{ty}}}\right) \quad (11)$$

다만 설계목적으로서 프리스트레싱되지 않은 부재나 프리스트레스 힘이 주철근 인장강도의 40% 미만인 경우는 45°, 프리스트레스 힘이 주철근 인장강도의 40% 이상인 경우는 37.5°를 사용할 수 있도록 규정하고 있다. 여기서,  $A_t$ 는 길이방향 철근의 단면적이다.

### 3.2 캐나다 기준(CSA-A23.3-14)

CSA-14(2014)에서는 철근콘크리트 부재의 공칭 비틀림 강도를 식 (12)와 같이 산정하도록 하고 있다.

$$T_{n,CSA} = \frac{2A_oA_t f_{yt}}{s} \cot \theta \leq 0.25f_{ck} \frac{1.7A_{oh}^2}{p_h} \quad (12)$$

기본적으로 ACI의 식 (10)과 동일하게 폐쇄스터립의 저항력에 의한 비틀림 강도를 산정하며,  $A_o$ 역시 ACI와 동일하게  $0.85A_{oh}$ 으로 정의된다. CSA-14는 전단 설계 시에는  $\sqrt{f_{ck}} \leq 8\text{MPa}$ 로 콘크리트 압축강도를 제한하지만, 비틀림 설계 시에는 콘크리트 압축강도 제한값을 명시하지 않는다. 철근의 항복강도는 최대 500 MPa까지 적용가능하며, 최대 비틀림 강도 및 압축경사대의 기울기  $\theta$ 는 부재의 길이방향 변형률( $\epsilon_x$ )을 고려하여 식 (13)과 같이 산정된다.

$$\theta = 29^\circ + 7000\epsilon_x \quad (13)$$

$\epsilon_x$ 는 외력에 의한 길이방향 변형률로서 계수하중을 고려하여 식 (13)과 같이 산정된다.

$$\epsilon_x = \frac{M_f/d_v + 0.5N_f + \sqrt{(V_f - V_p)^2 + \left(\frac{0.9p_h T_f}{2A_o}\right)^2} - A_p f_{fo}}{2(E_s A_s + E_p A_p)} \quad (14)$$

여기서,  $M_f$ 는 계수 모멘트,  $d_v$ 는 유효 전단 깊이로서  $0.9d$ 와  $0.72h$  중 큰 값,  $d$ 는 압축연단에서부터 길이방향 인장철근의 중심까지의 거리,  $N_f$ 는 계수 축력,  $V_f$ 는 계수 전단력,  $V_p$ 는 유효프리스트레스 힘의 수직 성분,  $T_f$ 는 계수 비틀림 모멘트,  $A_p$ 는 휨 인장영역에서의 긴장재 단면적,  $f_{po}$ 는 프리스트레스 긴장재의 감압응력,  $E_s$ 와  $A_s$ 는 각각 비긴장 철근의 탄성계수 및 단면적이다. 또한, 부재에 작용하는 힘에 의한 평형조건을 고려하여 인장축과 압축축에서의 길이방향 철근의 저항력은 각각 식 (15a), 식 (15b)보다 크도록 설계되어야 한다.

$$F_{tt} = \frac{M_f}{d_v} + \sqrt{(V_f - 0.5V_s - V_p)^2 + \left(\frac{0.45p_h T_f}{2A_o}\right)^2} \cot \theta \quad (15a)$$

$$F_{lc} = -\frac{M_f}{d_v} + \sqrt{(V_f - 0.5V_s - V_p)^2 + \left(\frac{0.45p_h T_f}{2A_o}\right)^2} \cot \theta \quad (15b)$$

여기서,  $V_s$ 는 전단철근에 의한 단면의 공칭전단강도이다. 순수 비틀림 하중을 받는 철근콘크리트 부재의 경우에는 식 (14)에서 휨인장 철근( $A_s$ ) 대신 전체 길이방향 철근의 단면적( $A_t$ )을 사용하고, 전체 단면적이 인장력에 저항하는 것으로 간주할 수 있다. 따라서, 식 (14)의 길이방향 변형률( $\epsilon_x$ )은 식 (16)으로 간략화 할 수 있으며, 길이방향으로 힘의 평형

역시 식 (17)과 같이 비틀림 모멘트만을 고려하여 산정할 수 있다.

$$\epsilon_x = \frac{0.45p_h T_u}{A_o A_t E_s} \quad (16)$$

$$F_l = \frac{0.45p_h T_f}{A_o} \cot\theta \leq A_t f_{y1} \quad (17)$$

CSA 기준에서 제시하는 비틀림 설계모델에 따라 실험체들의 순수 비틀림 강도를 평가하는 경우에는 길이방향 변형률( $\epsilon_x$ )이 비틀림 모멘트의 함수이기 때문에, 비틀림 모멘트를 가정하고 반복계산을 수행하여 가정된 비틀림 모멘트가 식 (12)에 의해 계산된 비틀림 모멘트에 수렴할 경우, 비틀림 강도로 간주하였다. 또한, 길이방향 철근이 항복응력에 도달할 경우, 식 (17)에 의해 산정한 비틀림 모멘트로서 비틀림 강도를 제한하였다.

### 3.3 유럽 기준(Eurocode 2-04)

Eurocode 2(2004)에서는 철근콘크리트 부재의 공칭 비틀림 강도를 ACI와 동일하게, 공간트러스 모델의 힘의 평형으로 산정되는 비틀림 강도에서 길이방향 철근 혹은 종방향 철근이 항복하는 경우 중 작은 값을 비틀림 강도로 취하게 되며, 콘크리트 분쇄 파괴 시점을 최대값으로 취하여 식 (18)로 산정한다.

$$T_{n,EC} = \min\left(\frac{2A_k A_t f_{yt} \cot\theta}{s} \cot\theta, \frac{2A_k A_t f_{y1} \tan\theta}{u_k} \tan\theta\right) \leq 2\nu\alpha_{cw} f_{ct} A_k t_{ef} \sin\theta \cos\theta \quad (18)$$

여기서, Fig. 3에 나타낸 바와 같이 유효두께( $t_{ef}$ )의 중심선을 전단흐름 경로로 정의하며, 이에 의해 둘러싸인 길이( $u_k$ ) 및 면적( $A_k$ )의 함수로 비틀림 강도를 산정한다. 유효두께( $t_{ef}$ )는 식 (19)로 정의된다.

$$t_{ef} = \max(A_c/u, 2C) \quad (19)$$

여기서,  $A_c$ 는 중공단면을 포함한 단면 최외곽의 둘레로 둘러싸인 전체 단면적,  $u$ 는 단면의 최외곽 둘레길이,  $C$ 는 피복 두께로서, 길이방향 철근의 중심에서 부재 표면까지로 정의된다. 또한, 식 (18)에서,  $\nu$ 는 전단 및 비틀림에 의해 균열이 발생한 콘크리트의 유효강도 계수로서,  $0.6(1 - f_{ck}/250)$ 으로 산정된다.  $\alpha_{cw}$ 는 압축영역의 응력상태에 따른 계수로서 비긴장 부재에서 1.0을 사용할 수 있다.  $f_{ct}$ 는 콘크리트 설계압축강도이며, 이 연구에서는 다른 기준들과의 비교를 위하여  $f_{ck}$ 와 동일한 것으로 간주하였다. 이때, Eurocode 2는 콘크리트 압축강도와 철근의 항복강도를 각각 최대 90 MPa와 600 MPa까지 허용한다. 압축경사각( $\theta$ )은 설계 시 스티립의 항복

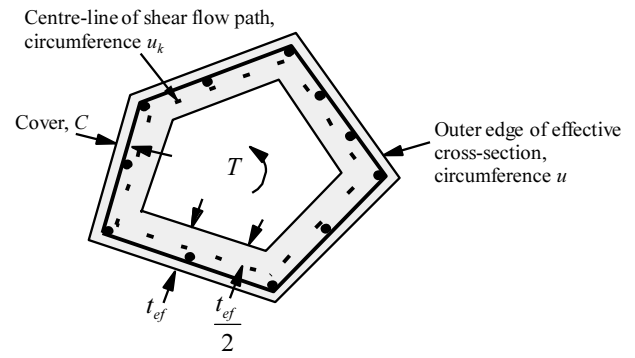


Fig. 3 Section of torsional member used in Eurocode 2

과 콘크리트 압축대의 분쇄파괴가 동시에 일어나는 균형 파괴 시점을 가정하여 결정하게 된다. 다시 말해, 식 (18)의  $2A_k A_t f_{yt} \cot\theta/s$ 와 최대비틀림 모멘트  $2\nu\alpha_{cw} f_{ct} A_k t_{ef} \sin\theta \cos\theta$ 가 동일할 때의 압축경사각을 산정한다. 다만,  $\cot\theta$ 는 1.0~2.5으로 제한되며, 이는 대략 21.8~45°에 해당한다.

## 4. 비틀림 설계모델에 의한 평가 및 비교

### 4.1 비틀림 데이터베이스 및 비틀림 강도 평가방법

SNiP을 포함하여 앞서 살펴본 비틀림 설계방법들의 정확도를 검증하기 위해서 기존 문헌(Hsu 1968; McMullen and Ranan 1978; Rasmussen and Baker 1995; Koutchoukali and Belarbi 2001; Fang and Shiau 2004; Chalioris 2006; Chiu et al. 2007; Bernardo and Lopes 2009; Lee and Kim 2010; Kim et al. 2018; Lee et al. 2018; Joh et al. 2019; Ju et al. 2019; Ibrahim et al. 2020; Kim et al. 2020)으로 부터 총 256개의 순수 비틀림 하중을 받는 철근콘크리트 부재 실험체를 수집하였다. 모든 실험체는 길이방향 철근과 페쇄스터립으로 보강되었으며, 최소 철근비 이하로 보강된 실험체 3개를 제외하여 총 253개의 실험체를 평가 대상으로 고려하였다. 모두 직사각형 단면의 실험체이며, 일부 중공단면 실험체도 평가대상에 포함되었다. Fig. 4는 실험체들의 주요 변수별 분포를 나타낸 것이다. 실험체들의 콘크리트 압축강도( $f_{ck}$ )는 14.3~109.8 MPa, 철근의 항복강도( $f_{yt}$ )는 260~690 MPa, 양방향 철근비의 합( $\rho_l + \rho_t$ )은 0.31~6.30 %로서 광범위한 분포의 변수들을 포함하고 있다. 길이방향철근비와 스티립의 철근비는 각각  $\rho_l = A_l/A_c$ 와  $\rho_t = A_t p_h/(A_c s)$ 으로 산정하였다. 이 중 대부분 실험체들의 길이방향 철근이 단면의 상하부 대칭으로 보강되어 있으며, 이를 고려하여 SNiP의 비틀림 강도 산정을 위해 필요한 하부 및 수직면에 배치된 철근의 단면적( $A_{t1}, A_{t2}$ )을 구분하여 고려하였다.

이 연구에서 사용한 기준은 앞서 소개한 SNiP을 비롯하여 ACI 318, CSA 및 Eurocode 2이다. 세부적으로 압축대 길이방향의 투영길이( $c_1, c_2$ )를 이용하여 비틀림 강도를 산정하는 SNiP 상세모델과 식 (5) 및 식 (6)로 산정되는 간략화 모델을 각각 이용하여 실험체들의 비틀림 강도를 평가하였다. 또한,

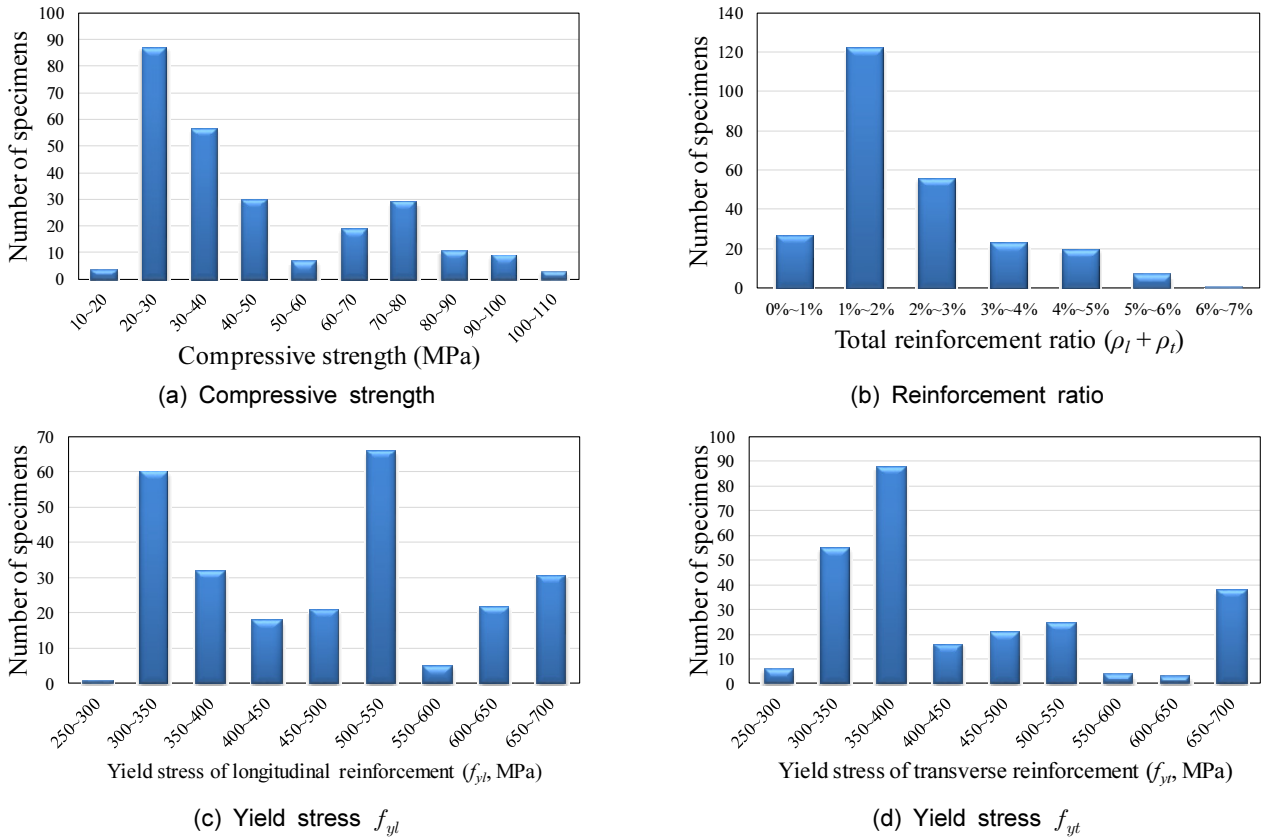


Fig. 4 Distribution of key variables in torsional specimens

객관적으로 실험체를 평가하기 위하여 설계모델 적용 시 재료계수, 하중계수 및 강도감수 계수 등의 안전계수를 고려하지 않았다. 실험체들의 비틀림 강도 평가는 각 기준에서 제시하는 콘크리트 압축강도 및 철근의 항복강도 제한을 고려하였으며, 이를 고려하지 않은 경우와 제한 범위를 벗어나는 실험체들을 제외한 경우를 함께 평가하여 비교하였다. 기준의 제한범위를 벗어나는 실험체들을 제외할 경우, 가장 보수적인 ACI의 콘크리트 압축강도 제한( $\sqrt{f_{ck}} \leq 8.3 \text{ MPa}$ )과 철근 항복강도 제한( $f_y \leq 420 \text{ MPa}$ )을 적용하여 총 87개의 실험체를 평가대상으로 하였다.

#### 4.2 비틀림 설계모델 검증 및 비교

Table 1에는 각 경우에 대한 비틀림 강도 평가 결과를 정리하여 나타내었다. MCFT(modified compression field theory, Vecchio and Collins 1986)를 기반으로 하는 CSA의 모델의 경우, 실험체의 비틀림 강도에 대한 평가모델의 계산 결과 ( $T_u/T_{cal.}$ )가 평균 1.206, COV 27.4 %으로서, 전반적으로 안전측이면서도 정확하게 비틀림 강도를 평가하였다. 다만, ACI 318 평가모델이 COV 24.9 %의 가장 우수한 결과를 나타내었다. SNiP의 상세모델은 실험체들의 비틀림 강도를 평균 1.037, COV 33.4 %로서 양호한 수준으로 평가하였다. 특히, SNiP의 간략화 모델은 상세모델에 비해 다소 낮은 35.4 %의 COV 정확도를 나타내었으나, 평균이 1.178로서 좀 더 안전측으로 실험체들의 비틀림 강도를 산정하였다. 전반적

Table 1 Code assessment of torsional strength

Type		Total	With limitation	Within limitation
Number of specimens		253	253	87
SNiP detailed	Average	0.985	1.037	1.041
	SD	0.327	0.346	0.256
	COV	0.332	0.334	0.246
SNiP simplified	Average	1.116	1.178	1.188
	SD	0.385	0.417	0.309
	COV	0.345	0.354	0.260
ACI 318	Average	1.290	1.384	1.242
	SD	0.313	0.345	0.206
	COV	0.242	0.249	0.166
CSA A23.3	Average	1.187	1.206	1.228
	SD	0.325	0.331	0.243
	COV	0.273	0.274	0.198
Eurocode 2	Average	1.760	1.797	1.859
	SD	0.787	0.788	0.823
	COV	0.447	0.438	0.443

으로 각 설계기준에서 제시하는 비틀림 설계방법은 충분히 안전측의 결과를 제공하는 것으로 판단되며, SNiP의 경우 더 정확한 비틀림 강도 추정을 위해서 상세 모델을 사용할 수 있을 것이다.

Figs. 5와 6은 각 기준에 의해 평가된 비틀림 실험체들의 강도를 각각 콘크리트 압축강도 및 양방향 철근비의 합 ( $\rho_l + \rho_t$ )에 대해서 나타낸 것이다. 그래프에 나타낸 원형의 회색 채움 표식은 각 기준에서 제시하는 콘크리트의 압축강도 및 철근의 항복강도 제한을 고려하지 않고 비틀림 강도를 산정한 결과를 나타낸 것이다. 콘크리트 및 철근의 응력제한을 고려한 경우, 그렇지 않은 경우에 비해 비슷한 정확도와 함께 좀더 안전측으로 실험체들의 비틀림 강도를 평가하였다. 특히, Fig. 5에서 볼 수 있듯이 콘크리트 압축강도 제한에 의해 다소 비안전측으로 산정될 수 있는 실험체들의 비틀림 강도가 더 안전측으로 평가되는 것을 알 수 있다. 이는 콘크리트 압축강도를 상대적으로 낮은 69 MPa로 제한하는 ACI의 비틀림 모델에서 더욱 두드러지며, 콘크리트 압축강도 제

한이 없는 CSA나 90 MPa의 상당히 높은 강도로 제한하고 있는 Eurocode 2에서는 뚜렷한 경향성을 찾아볼 수 없었다. 각 설계모델은 콘크리트 압축강도( $f_{ck}$ )에 따른 뚜렷한 경향성을 나타내지 않았지만, Fig. 6에 나타낸 바와 같이 전반적으로 저보강 실험체들의 비틀림 강도를 보수적으로 평가하는 경향을 나타내었다. 특히, Eurocode 2의 설계모델은 과도하게 안전측으로 비틀림 강도를 평가하는 것으로 나타났는데, 이는 Eurocode 2 모델에서 산정하는 유효단면적이 매우 보수적이며, 압축경사대의 기울기를 산정하는 방법이 매우 보수적인 비틀림 강도를 야기하기 때문이다.

Fig. 6에 나타낸 바와 같이 Eurocode 2의 경우 보강비에 따른 뚜렷한 경향성을 살펴볼 수 있다. 이 설계방법에서는 스테럽의 항복만을 고려한 균형과 시점에서의 압축경사각

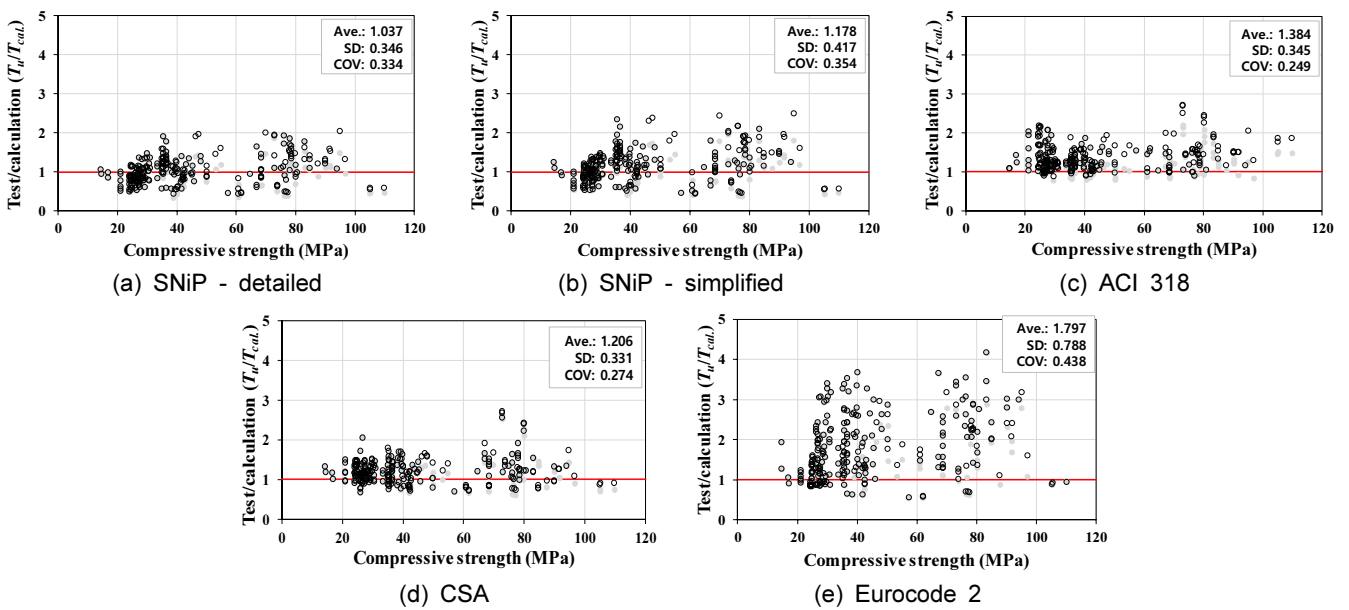


Fig. 5 Verification of design methods according to compressive strength of concrete

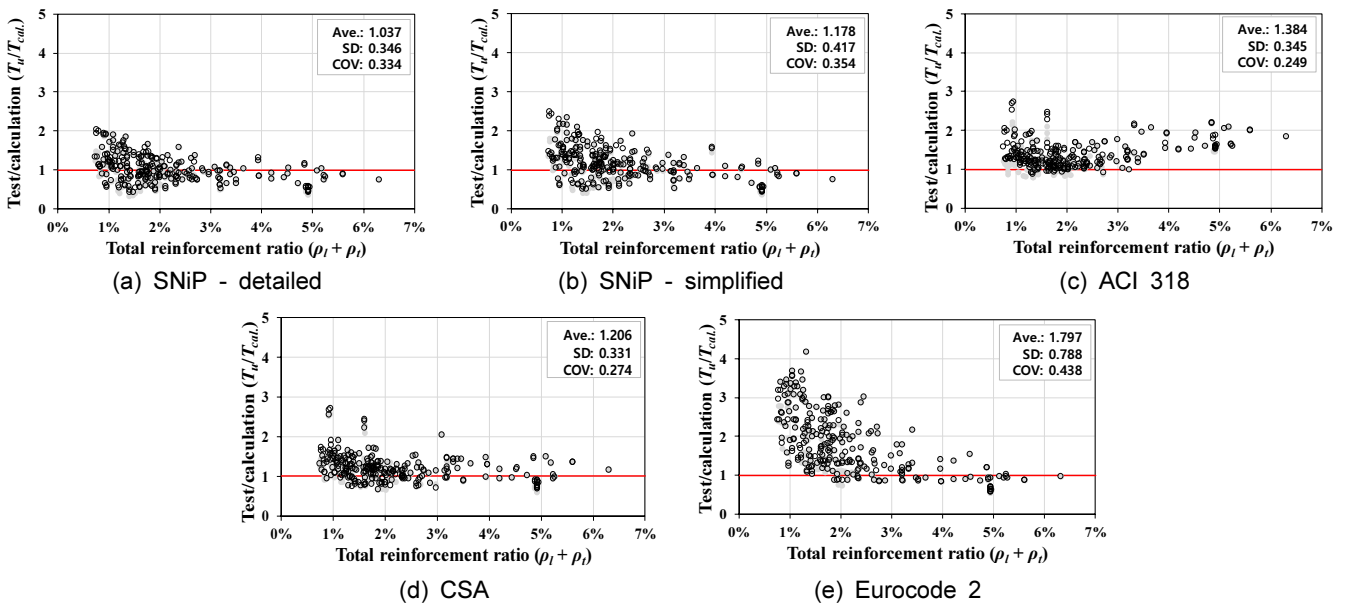


Fig. 6 Verification of design methods according to total reinforcement ratio

( $\theta$ )을 산정하기 때문에 최대 비틀림 강도에 상응하는 스티럽의 기여분을 과도하게 고려하게 되며, 매우 낮은 압축경사대 기울기를 도출하게 된다. 따라서 스티럽의 저항력에 의한 비틀림 강도에 비해 길이방향 철근의 저항력에 의한 비틀림 강도가 매우 낮게 산정되고 이에 의해 최종 비틀림 강도가 결정되기 때문에 횡방향으로 저보강된 실험체들을 매우 보수적으로 평가하게 된다.

Fig. 7에는 이 비교연구에서 산정한 압축경사각( $\theta$ )을 나타낸 것이다. 여기서, 빨간색으로 나타낸 수평 직선은 Eurocode 2에서 제한하는  $\theta$ 의 최대 및 최소값이며, 검은점선은 ACI에서 제한하는  $\theta$ 의 최대 및 최소값을 나타낸 것이다. 여기서, Eurocode 2에 의해 산정된  $\theta$ 를 CSA의 식 (13)을 통해 산정한

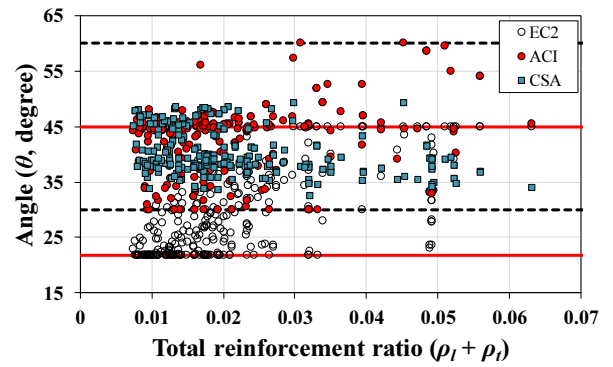


Fig. 7 Inclination of compression strut according to reinforcement ratio

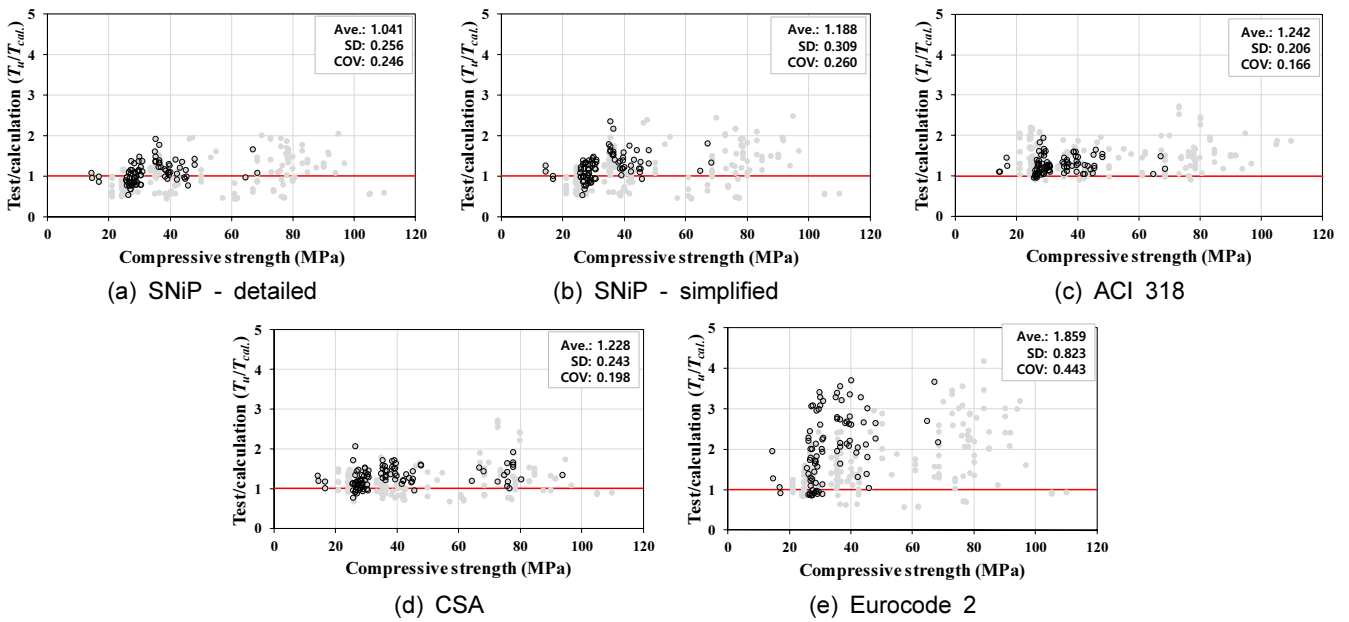


Fig. 8 Verification of design methods only for the specimens within limitation according to compressive strength of concrete

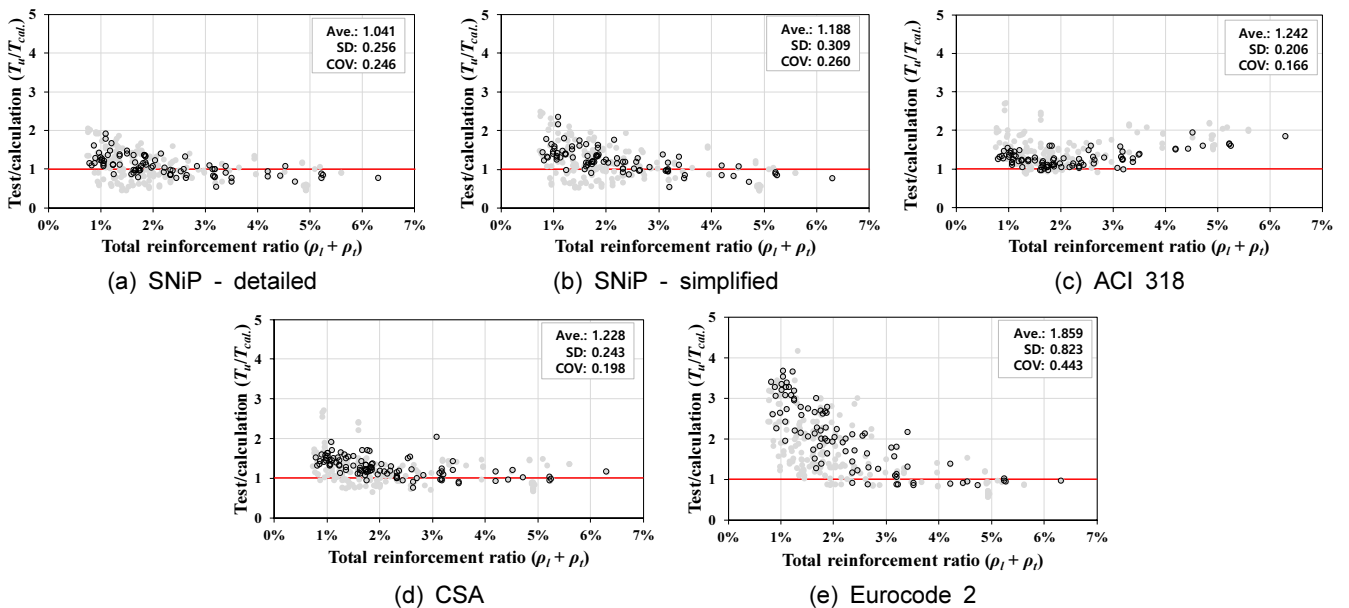


Fig. 9 Verification of design methods only for the specimens within limitation according to total reinforcement ratio



$\theta$  및 힘의 평형을 고려하여 산정한 ACI의  $\theta$ 와 비교하여 나타내었다. Eurocode 2에 의해 산정된  $\theta$ 는 힘의 평형을 고려한 ACI의 식 (11)에 의해 산정된  $\theta$ 에 비해 전반적으로 상당히 낮은 값을 나타내었으며, 앞서 언급한 바와 같이 저보강 실험체에서 특히 낮은 결과를 나타내었다. 특히, 낮은 보강비의 실험체들은 주로 Eurocode 2에서 제시하는 최소 제한치에 의해  $\theta$ 가 결정되었다. 전반적으로 압축경사각 기울기의 제한 범위가 넓은 ACI 모델이 좀 더 분산된  $\theta$ 를 나타냈으며, CSA는 40° 부근에서 조밀한 분포를 형성하였다. 결과적으로 Eurocode 2의 설계방법에 의한  $\theta$ 는 평균 28.4°로 상당히 낮았으나, ACI의  $\theta$ 는 42°로서 40.2°의 평균값을 나타낸 CSA 모델과 유사하게 산정되었다. CSA의  $\theta$ 산정식은 MCFT(Vechhio and Collins 1986; Bentz and Collin 2006) 해석결과에 기반하여 개발되었으므로, 부재의 거동을 반영한 비교적 정확한 모델이라고 간주할 수 있을 것이다. 따라서 Eurocode 2에 의한 비틀림 강도 산정 시 기준에서 제시하는 방법과 같이 균열과 파괴점을 가정한  $\theta$ 산정이 안전측의 설계결과를 제공할 수 있지만, 양방향 철근비를 고려한 힘의 형평에 의해  $\theta$ 를 산정하는 것이 좀 더 정확한 비틀림 강도 평가를 도출할 수 있을 것이다.

Figs. 8과 9는 기준에서 제시하는 콘크리트 압축강도와 철근의 항복강도를 고려하여 제한 범위 내에 존재하는 실험체들만을 대상으로 비틀림 강도를 평가한 결과를 나타낸 것이다. 여기서 원형의 회색 채움 표식은 모든 실험체를 대상으로 한 평가결과를 나타낸 것이다. 적용한 콘크리트 최대 압축강도는 69 MPa이며, 철근의 항복강도는 420 MPa이다. 따라서, Fig. 8에서 콘크리트 압축강도가 69 MPa 이상인 실험체들이 회색 표식으로 표현된 것을 확인할 수 있다. Table 1 및 Figs. 8과 9에 나타낸 바와 같이, 평가결과는 ACI 모델을 제외하고 모든 실험체를 포함한 경우에 비해 전반적으로 다소 안전측의 비틀림 강도를 나타내었으며, COV 정확도는 다소 향상되는 것으로 나타났다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 유라시아의 여러 CIS 국가들에서 채택되어 사용되는 러시아 SNiP에서 제시하는 비틀림 설계모델을 살펴보았다. SNiP의 비틀림 설계모델은 Lessig의 경사힘이론을 기반으로 각각 힘 및 전단을 고려한 비틀림 파괴모드를 반영하도록 이루어져 있으며, 콘크리트의 비틀림 강도 기여분은 무시한다. 또한, 압축대의 길이방향 투영길이( $c_1$ ,  $c_2$ )를 변수로 하는 상세 모델과 이를 고려하지 않는 간략화 모델로 나뉘어져 있으며, 각 파괴모드의 순수 비틀림 강도만을 산정하고 전단 및 비틀림과의 이차 및 선형 관계를 통해 조합하중을 고려하도록 되어 있다.

해당 설계 방법에 따라 실험체들의 비틀림 강도를 평가하기 위해 기존의 실험적 연구로부터 253개의 철근콘크리트 비틀림 부재를 수집하였으며, 국제적으로 널리 사용되는 ACI, CSA, Eurocode 2의 비틀림 설계모델을 함께 비교하여

SNiP 기준의 비틀림 설계모델을 객관적으로 비교하고자 하였다. 이 연구를 통해 도출된 결과는 다음과 같다.

- 1) SNiP 모델은 평균 1.037, COV 33.4%의 비교적 양호한 정확도로 실험체들의 비틀림 강도를 평가하였다. 반면, CSA 기준은 평균 1.206, COV 27.4%의 우수한 정확도로 비틀림 강도를 평가하였다.
- 2) ACI 기준에 의한 평가결과는 평균 1.384, COV 24.9%로서, SNiP 모델에 비해 좀 더 보수적이지만 COV 측면에서 우수한 정확도를 나타내었다. 이는 공간트러스모델에 기반한 힘의 평형을 고려함으로써 비교적 합리적으로 압축경사각( $\theta$ )을 고려할 수 있기 때문으로 판단된다.
- 3) 각 기준에서 제시하는 방법을 통해 비틀림 강도를 산정한 결과, 전반적으로 안전측으로 비틀림 강도를 평가하였으며, 특히, Eurocode 2는 평균 1.797의 매우 보수적인 결과를 나타내었는데, 이는 기준에서 제시하는 압축경사각 산정방법에 큰 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.
- 4) SNiP 모델은 경사힘이론을 기반으로 길이방향 철근과 스티럽의 기여분을 동시에 고려하여 비틀림 강도를 평가한다. 이때, 압축대의 투영길이에 따라 각 방향의 철근 기여분이 상이하게 산정되는데 트러스 모델에서의 압축경사각과 같이 SNiP에서의 압축대의 투영길이를 정확하게 반영할 수 있다면 비틀림 강도를 더욱 정확하게 평가할 수 있을 것으로 판단된다.
- 5) 실제 구조물의 설계에 있어 비틀림 하중이 단독으로 작용하는 경우는 존재하지 않기 때문에 힘 및 전단을 고려한 설계가 필수적이라고 할 수 있으며, 따라서, 추가연구로서 SNiP 및 각 기준에 따라 조합 하중을 고려한 비틀림 성능 평가 모델을 면밀히 검토 및 비교할 필요가 있다.

## 감사의 글

이 논문은 충북대학교 국립대학육성사업(2020)지원을 받아 작성되었음.

## References

- ACI Committee 318 (2019) *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)*. Farmington Hills, MI; American Concrete Institute (ACI). 623.
- Bentz, E. C., and Collins, M. P. (2006) Development of the 2004 Canadian Standard Association (CSA) A23.3 Shear Provisions for Reinforced Concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering* 33(5), 521-534.
- Bernardo, L. F. A. (2019) Modeling the Full Behavior of Reinforced Concrete Flanged Beams under Torsion. *Applied Sciences* 9(13), 2730.

- Bernardo, L. F. A., and Andrade, J. M. A. (2020) A Unified Softened Truss Model for RC and PC Beams under Torsion. *Journal of Building Engineering* 32(1), 101467.
- Bernardo, L. F. A., and Lopes, S. M. R. (2009) Torsion in High-Strength Concrete Hollow Beams: Strength and Ductility Analysis. *ACI Structural Journal* 106(1), 39-48.
- Chalioris, C. E. (2006) Experimental Study of the Torsion of Reinforced Concrete Members. *Structural Engineering and Mechanics* 23(6), 713-737.
- Chiu, H. J., Fang, I. K., Young, W. T., and Shiau, J. K. (2007) Behavior of Reinforced Concrete Beams with Minimum Torsional Reinforcement. *Engineering Structures* 29(9), 2193-2205.
- Collins, M. P., Walsh, P. F., Archer, F. E., and Hail, A. S. (1965) *Reinforced Concrete Beams Subjected to Combined Torsion, Bending and Shear (UNICIV Report, No. R-14)*. University of New South Wales.
- Collins, M. P., Walsh, P. F., Archer, F. E., and Hail, A. S. (1968) Ultimate Strength of Reinforced Concrete Beams Subjected to Combined Torsion and Bending. Torsion of Structural Concrete SP-18, American Concrete Institute, Detroit, 279-402.
- CSA Committee A23.3-14 (2014) *Design of Concrete Structures (CAN/CSA-A23.3-14)*. Canadian Standards Association (CSA), Canada.
- European Committee for Standardization (CEN) (2004) Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings (BS EN 1992-1-1:2004). London, UK; British Standards Institute (BSI).
- Fang, I. K., and Shiau, J. K. (2004) Torsional Behavior of Normal- and High-Strength Concrete Beams. *ACI Structural Journal* 101(3), 304-313.
- fib (2015) The fib in Russia: New standards. *Structural Concrete* 16(1), 149-150.
- Hsu, T. T. C. (1968) Behavior of Reinforced Concrete Rectangular Members. *ACI Structural Journal* 18(1), 261-306.
- Hsu, T. T. C. (1984) *Torsion of Reinforced Concrete*. Van Nostrand Reinhold, Inc., New York.
- Ibrahim, M. S., Gebreyouhannes, E., Muhdin, A., and Gebre, A. (2020) Effect of Concrete Cover on the Pure Torsional Behavior of Reinforced Concrete Beams. *Engineering Structures* 216(1), 110790.
- Joh, C., Kwahk, I., Lee, J., Yang, I. H., and Kim, B. S. (2019) Torsional Behavior of High-Strength Concrete Beams with Minimum Reinforced Ratio. *Advances in Civil Engineering* 2019(1), 1432697.
- Joint ACI-ASCE Committee 445 (2013) *Report on Torsion in Structural Concrete (ACI 445.1R-12)*. Farmington Hills, MI. American Concrete Institute (ACI).
- Ju, H., Han, S. J., Kim, K. S., Strauss, A., and Wu, W. (2020b) Multi-Potential Capacity for Reinforced Concrete Members under Pure Torsion. *Structural Engineering and Mechanics* 75(3), 401-414.
- Ju, H., Han, S. J., and Kim, K. S. (2020c) Analytical Model for Torsional Behavior of RC Members Combined with Bending, Shear, and Axial Loads. *Journal of Building Engineering* 32(1), 101730.
- Ju, H., Han, S. J., Zhang, D., Kim, J., Wu, W., and Kim, K. S. (2019) Estimation of Minimum Torsional Reinforcement of Reinforced Concrete and Steel Fiber-Reinforced Concrete Members. *Advances in Materials and Engineering* 2019(1), 4595363.
- Ju, H., Lee, D. H., and Kim, K. S. (2019) Minimum Torsional Reinforcement Ratio for Reinforced Concrete Members with Steel Fibers. *Composite Structures* 207(1), 460-470.
- Ju, H., Lee, D. H., Hwang, J. H., Kim, K. S., and Oh, Y. H. (2013) Fixed-Angle Smeared-Truss Approach with Direct Tension Force Transfer Model for Torsional Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Members. *Journal of Advanced Concrete Technology* 11(9), 215-229.
- Ju, H., Lee, D., Kim, J. R., and Kim, K. S. (2020a) Maximum Torsional Reinforcement Ratio of Reinforced Concrete Beams. *Structures* 23(1), 481-493
- KCI (2017) *KCI Model Code 2017*. Seoul, Korea; Kimoondang Publishing Company. Korea Concrete Institute (KCI). 637.
- Kim, C., Kim, S., Kim, K. H., Shin, D., Haroon, M., and Lee, J. Y. (2018) Torsional Behavior of Reinforced Concrete Beams with High-Strength Steel Bars. *ACI Structural Journal* 116(6), 251-263.
- Kim, M. J., Kim, H. G., Lee, Y. J., Kim, D. H., Lee, Y. J., and Kim, K. H. (2020) Pure Torsional Behavior of RC Beams in Relation to the Amount of Torsional Reinforcement and Cross-Sectional Properties. *Construction and Building Materials* 260(1), 119801.
- Koutchoukali, N. E., and Belarbi, A. (2001) Torsional High-Strength Reinforced Beams and Minimum Reinforcement Requirement. *ACI Structural Journal* 98(4), 462-469.
- Kuan, A., Bruun, E. P. G., Bentz, E. C., and Collins, M. P. (2019) Nonlinear Sectional Analysis of Reinforced Concrete Beams and Shells Subjected to Pure Torsion. *Computers and Structures* 222(1), 118-132.
- Lee, J. Y., and Kim, S. W. (2010) Torsional Strength of RC Beams considering Tension Stiffening Effect. *Journal of Structural Engineering* 136(11), 1367-1378.
- Lee, J. Y., Kim, K. H., Lee, S. H., Kim, C., and Kim, M. H. (2018) Maximum Torsional Reinforcement of Reinforced Concrete Beams Subjected to Pure Torsion. *ACI Structural Journal* 115(3), 749-760.
- Lessig, N. N (1959) *Determination of Load-Carrying Capacity of Rectangular Reinforced Concrete Elements Subjected to Flexure and Torsion*. Concrete and Reinforced Concrete Institute Trudy No. 5, Moscow, 5-28. (In Russian)
- Lessig, N. N. (1961) *Studies of Cases of Concrete Failure in*

- Rectangular Reinforced Concrete Elements Subjected to Combined Flexure and Torsion*. Design of Reinforced Concrete Structures, State Publishing Offices for Literature on Structural Engineering, Architecture and Structural Materials, Moscow, 229-271. (In Russian)
- McMullen, A. E., and Rangan, B. V. (1978) Pure Torsion in Rectangular Sections - A Re-Examination. *ACI Structural Journal* 75(10), 511-519.
- Rasmussen, L. J., and Baker, G. (1995), Torsion in Reinforced Normal and High-Strength Concrete Beams Part 1: Experimental Test Series. *ACI Structural Journal* 92(1), 56-62.
- SAA (1973) *SAA Concrete Structures Code*. A.S. CA2-1973, AS 1480-1974. Standards Association of Australia (SAA).
- SNiP 2.03. 01-84. (1985) *Concrete and Reinforced Concrete Structures*. Gosstroy USSR, Moscow.
- SNiP 52-01-2003. (2003) *Concrete and Reinforced Concrete Structures*. Gosstroy USSR, Moscow.
- SP 63.13330. (2018) *Concrete and Reinforced Concrete Structures*. Ministry of Regional Development of the Russian Federation, Moscow.
- State Committee on Construction of the USSR Council of Ministers (1962) *Structural Standards and Regulations (SNiP II-B.1-62)*. State Publishing Offices for Literature on Structural Engineering, Architecture and Structural Materials, Moscow, 1962. (In Russian)
- Vecchio, F. J., and Collins, M. P. (1986) The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear. *American Concrete Institute Journal* 83(2), 219-231.
- Yerzhanov, M., and Lee, D. (2020) Shear Design Method of Eurasia for Concrete Members. *ACI Structural Journal* 117(3), 207-222.
- Yerzhanov, M., Ju, H., Zhang, D., Moon, S. W., Kim, J. R., and Lee, D. (2019) Shear Strength Model of Reinforced Concrete Beams without Stirrup Used in the CIS Countries. *Journal of Structural Integrity and Maintenance* 4(1), 15-25.

**요약** 이 연구에서는 유라시아의 수많은 국가에서 널리 사용되는 러시아 콘크리트 설계기준(SNiP)의 비틀림 설계모델과 그 배경을 소개하고 다른 국가들에서 사용하고 있는 대표적인 콘크리트 설계기준의 비틀림 설계모델과 비교 및 분석하였다. ACI, CSA, Eurocode 등 주요 설계기준에서는 공간 트러스 모델과 박벽튜브 이론에 근거한 비틀림 설계모델을 제시하는 반면, SNiP에서는 경사힘 이론을 기반으로 두 가지 파괴모드를 고려한 독창적인 비틀림 모멘트 강도 산정방법이 제시되어 있다. 각 기준에 의한 비틀림 강도의 평가 정확도를 검증하는 데 사용하기 위하여 기존 문헌으로부터 수집한 253개의 철근콘크리트 비틀림 실험체를 수집하였다. SNiP와 CSA의 비틀림 강도 설계모델은 부재의 비틀림 강도를 상당히 정확하고 합리적으로 평가하는 것으로 나타났으며, Eurocode 2는 상대적으로 안전측의 설계결과를 제공하는 것으로 나타났다. 또한, ACI 기준의 설계모델은 안전측이면서도 가장 우수한 정확도를 나타내었다. 이 밖에 각 현행설계기준에 명시된 콘크리트 압축강도 및 철근 항복강도의 제한치 적용 유무에 따라 비틀림 강도를 평가한 결과, 기준에서 제시하는 방법을 사용할 경우 충분히 안전측의 비틀림 강도를 산정할 수 있는 것으로 확인되었다.

**핵심용어** : 비틀림, 철근콘크리트, 경사힘이론, 러시아 설계기준, 비틀림 데이터베이스