J Rec Const Resources 7(2)145-150(2019)
https://doi.org/10.14190/JRCR.2019.7.2.145

Print ISSN : 2288-3320
Online ISSN : 2288-369X

철근콘크리트 부재의 비틀림강도에 관한 연구
Study on Torsional Strength of Reinforced Concrete Members

박창규[1*]
Chang-Kyu Park[1*]

(Received April 25, 2019 / Revised May 29, 2019 / Accepted May 30, 2019)

This paper proposes a model for the calculation of the ultimate torsional strength in normal-strength and high-strength concrete beams which include the concrete contribution strength and use a reasonable thickness of shear flow. The adequacy of the proposed model is evaluated by comparing the calculated torsional strength with the experimentally observed results from 104 test specimens reported in the literature. The results are also compared with the calculations of the KCI and the ACI building code equations, and those of other model which include the concrete contribution strength. The comparisons show that the ultimate torsional strengths calculated by the proposed equation and Rahal's equation are closer to the experimentally observed results than those calculated by the code equations.

키워드 : 극한비틀림강도, 콘크리트기여강도, 고강도콘크리트보, 설계기준식

Keywords : Ultimate torsional strength, Conctere contribution strength, High-strength concrete beam, Code equation

1. 서 론

최근 산업기술이 발전함에 따라 고강도 콘크리트와 고강도 철근의 사용이 점점 증가하고 있다. 이에 반하여 현행 설계기준에서 제시하고 있는 RC보의 공칭비틀림강도는 대부분 보통 강도의 콘크리트와 보통 강도의 철근을 사용한 RC보에 대한 실험결과를 근거로 만들어진 값이다. 그리고 공칭비틀림강도에 콘크리트가 기여하는 강도는 무시되고 비틀림철근이 기여하는 강도만이 공칭비틀림강도를 대변하고 있다(KCI Model Code 2017, 2017; ACI Committee 318, 2014). 그러나 고강도 콘크리트의 사용이 증가함에 따라 콘크리트가 비틀림강도에 기여하는 부분이 무시할 수 없게 되었다(Rasmussen and Baker 1995; Fang and Shiau 2004). 따라서 이러한 현실을 반영하여 콘크리트기여 강도를 포함한 새로운 비틀림강도 추정식이 필요하게 되었다.

이를 위해 현행 설계기준에서 제시하고 있는 공칭비틀림강도와 본 논문에서 제안하는 새로운 비틀림강도 추정식을 참고문헌(Kim 1987; Rasmussen and Baker 1995; Koutchoukali and Belarbi 2001; Fang and Shiau 2004; Chiu et al. 2007; Lee et al. 2008; Bernardo and Lopes 2013; Yoon et al. 2014; Kim et al. 2018)에서 발췌한 시험체의 비틀림강도 측정값과 비교함으로써 새로운 비틀림강도 추정식의 타당성을 제시하고자 한다.

2. 콘크리트압축강도와 비틀림강도

콘크리트의 압축강도가 비틀림강도에 기여하는 바를 알아보기 위해 Rasmussen and Baker(1995)는 12개의 보에 대하여 콘크리트의 압축강도를 실험변수로 한 비틀림강도를 측정하였다. 모든 보를 과보강보로 만들어 파괴 시 종방향철근이나 횡방향철근이 항복하지 않고 보의 파괴가 콘크리트 스트럿의 파괴로 이루어지도록 하였다.

횡방향철근비 ρ_t와 종방향철근비 ρ_ℓ는 각각 1.5%와 3.5%이며, 횡방향철근과 종방향철근의 평균 항복강도는 662MPa과 619MPa이고, 콘크리트의 압축강도는 36.3MPa부터 109.8MPa까지 변화한다.

여기서

* Corresponding author E-mail: ckpark@kunsan.ac.kr

[1]군산대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Junbuk, 54150, Korea)

Copyright ⓒ 2019 by Korean Recycled Construction Resources Institute

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

$$\rho_t = \frac{A_t p_h}{A_c s} \times 100, \qquad \rho_\ell = \frac{A_\ell}{A_c} \times 100$$

A_t = 횡방향철근의 단면적

A_ℓ = 종방향철근의 단면적

A_c = 철근콘크리트보의 단면적

p_h = 폐합스터럽의 둘레 길이

s = 횡방향철근의 간격

Table 1은 실험결과를 나타낸 것이며, Fig. 1은 실험결과를 보인 것이다.

콘크리트의 압축강도가 비틀림강도에 기여하는 바를 알아보기 위해 Fang and Shiau(2004)는 콘크리트의 압축강도와 철근비를 실험변수로 하여 16개의 보에 대한 극한비틀림강도를 측정하였다. Table 2는 실험결과를 보인 것이다. 이로부터 콘크리트의 압축강

Table 1. Experimental test results

Beam	f_c', MPa	f_{ys}, MPa	T_E, kN · m
B30.1	41.7	665	16.62
B30.2	38.2	669	15.29
B30.3	36.3	672	15.25
B50.1	61.8	665	19.95
B50.2	57.1	665	18.46
B50.3	61.7	665	19.13
B70.1	77.3	658	20.06
B70.2	76.9	656	20.74
B70.3	76.2	663	20.96
B110.1	109.8	655	24.72
B110.2	105.0	660	23.62
B110.3	105.1	655	24.77

f_c' = compressive strength of concrete
f_{ys} = yield strength of stirrup
T_E = torsional strength from experiment

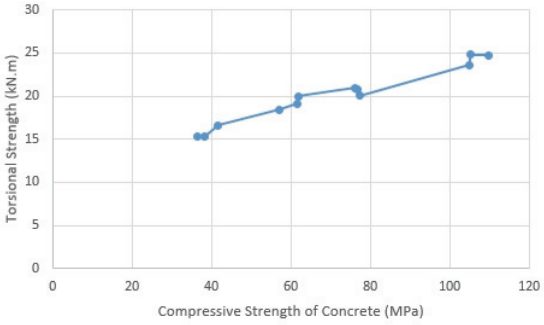

Fig. 1. Torsional strength and compressive strength of concrete

Table 2. Effects of concrete strength on ultimate torsional strength

Specimen no.	f_c', MPa	$\rho_t + \rho_\ell$, %	$\frac{f_c'(HSC)}{f_c'(NSC)}$	$\frac{T_u(HSC)}{T_u(NSC)}$
H_06_06	78.5	1.2	2.21	1.15
N_06_06	35.5			
H_06_12	78.5	1.8	2.21	1.21
N_06_12	35.5			
H_12_12	78.5	2.3	2.21	1.33
N_12_12	35.5			
H_12_16	78.5	2.8	2.21	1.42
N_12_16	35.5			
H_20_20	78.5	4	2.21	1.51
N_20_20	35.5			
H_07_10	68.4	1.6	2.04	1.13
N_07_10	33.5			
H_14_10	68.4	2.3	2.04	1.08
N_14_10	33.5			
H_07_16	68.4	2.3	2.04	1.23
N_07_16	33.5			
Average			2.15	1.26

T_u = ultimate torque
HSC = high strength concrete
NSC = normal strength concrete

도가 증가할수록 비틀림강도가 증가하는 경향을 알 수 있으며, 철근비가 클수록 이러한 경향은 더욱 크게 나타났다.

Rahal(2013)은 콘크리트의 압축강도를 고려하여 실험값을 통계적으로 처리한 비틀림강도 추정식을 제안하였다. 즉

$$T_n = 0.33(f_c')^{0.16} A_c \left(A_L f_{yL} \frac{A_t f_{yt}}{s} \right)^{0.35} \le 2.5(f_c')^{0.3} \frac{A_c^2}{p_c} \quad (1)$$

여기서

T_n = 극한 비틀림모멘트 추정값

A_L = 종방향철근의 전체 단면적

f_{yL} = 종방향철근의 항복강도

A_t = 횡방향 비틀림철근의 단면적

f_{yt} = 횡방향 비틀림철근의 항복강도

p_c = 단면의 외곽 둘레길이

3. 현행 설계기준에 의한 공칭비틀림강도

한국콘크리트구조 학회기준(KCI Model Code 2017, 2017)에서 제시하는 공칭비틀림강도는 다음과 같다. 비틀림모멘트에 저항하기 위한 수직철근은 다음 식 (2)를 사용하여 산정하여야 한다.

$$T_n = \frac{2A_oA_tf_{yt}}{s}\cot\theta \quad (2)$$

여기서

A_o = 전단흐름으로 둘러싸인 면적

θ = 콘크리트 스트럿의 압축경사각

A_o를 $0.85A_{oh}$로 취할 수 있고, A_{oh}는 폐합스터럽으로 둘러싸인 면적이다. 콘크리트 스트럿의 압축경사각은 $30° \le \theta \le 60°$로서 프리스트레싱되지 않은 부재나 프리스트레스힘이 주철근인장강도의 40% 미만인 경우는 45°로 취할 수 있으며, 프리스트레스힘이 주철근 인장강도의 40% 이상인 경우는 37.5°로 취할 수 있다.

미국 콘크리트 구조기준(ACI Committee 318, 2014)에서 규정하는 공칭비틀림강도식은 한국콘크리트구조 학회기준(KCI Model Code 2017, 2017)의 공칭비틀림강도식과 같다. 다만 A_o를 해석에 의해 결정하되, A_o를 $0.85A_{oh}$로 취할 수 있도록 허용하고 있다.

4. 새로운 비틀림강도 추정식

Rausch(1929)는 최초로 트러스모델에 의한 비틀림강도를 제안하였는데, 콘크리트 스트럿의 경사각을 45°로 가정하였다. 그가 제안한 공칭비틀림강도식은 다음과 같다.

$$T_n = \frac{A_tf_{ty}}{s}(2A_o) \quad (3)$$

즉, 비틀림을 받는 RC부재는 균열 후 선형 1차원 부재를 갖는 공간트러스로 이상화하였다. 각 대각선 콘크리트 스트럿은 폐합스터럽의 중앙에 놓인 직선으로 이상화하였다.

따라서 전단흐름으로 둘러싸인 면적 A_o는 폐합스터럽의 중심으로 둘러싸인 면적으로 정의되었다. 이를 A_1이라 칭하고 독일 설계기준과 다른 곳에 채택되었다(German Standard DIN 4334, 1958). 이러한 가정은 전체 철근비가 1% 정도일 때 수용가능하나 철근량이 증가할수록 비틀림강도가 실제값보다 크게 산정된다. 과소철근보의 철근비가 2.5~3%일 경우 A_1을 사용한 Rausch의 비틀림강도식은 실험값보다 대략 30% 정도 크게 계상된다(Hsu and Mo 2010). 이러한 큰 오차의 원인은 두 가지로 볼 수 있는데, 첫째는 콘크리트의 연화로 인하여 전단흐름두께 t_d가 매우 크게 되는 것이고, 둘째는 비틀림강도 T_n은 A_o의 크기에 비례하기 때문이다.

A_1을 사용한 Rausch의 비틀림강도식의 과대 영향을 감소시키기 위해 Lampert and Thurliman(1968)은 A_o을 코너의 종방향철근의 중심을 연결하는 다각형의 면적으로 제안하였다. 이 면적을 A_2라 칭하고 CEB–FIP Model Code(1978)에 처음으로 제시되었다. A_2의 사용으로 큰 철근비의 경우에 Rausch의 비틀림강도식의 과대 성향을 감소시킬 수 있으나, 전단흐름의 두께에 의한 함수가 아니고, 일정한 값을 갖는 A_o를 가정하는 것은 여전히 실제값보다 큰 비틀림강도값이 산출된다.

Rausch의 비틀림강도식에 대한 또 다른 수정은 Hsu(1968a, 1968b)에 의하여 제안되었고 1971년 초 ACI 설계기준(ACI Committee 318, 1971)에 채택되었다. ACI 설계기준(ACI Committee 318, 1971)에 규정된 공칭비틀림강도는 다음과 같다.

$$T_n = T_c + \frac{A_tf_{yt}}{s}(\alpha_tA_1) \quad (4)$$

여기서

$A_1 = x_1y_1$

x_1 = 폐합스터럽의 짧은 변의 길이

y_1 = 폐합스터럽의 긴 변의 길이

$\alpha_t = 0.66 + 0.33\frac{y_1}{x_1} \le 1.5$

T_c = 콘크리트 기여 공칭비틀림강도

$= \frac{x^2y}{3} \times 0.199\sqrt{f_{ck}}$

x = 직사각형 단면의 짧은 변의 길이

y = 직사각형 단면의 긴 변의 길이

식 (4)에서 전단흐름으로 둘러싸인 면적을 α_tA_1으로 간주하고 있으나, 이는 전단흐름의 두께를 합리적으로 구하지 못한 것이라 할 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 전단흐름의 두께를 합리적으로 구하여 전단흐름으로 둘러싸인 면적을 산출함과 동시에 비틀림강도에 기여하는 콘크리트 기여강도를 포함한 새로운 비틀림강도 추정식을 제안하고자 한다.

전단흐름의 중심으로 둘러싸인 면적은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A_o = (x - t_d)(y - t_d) \quad (5)$$

Bredt의 방정식으로부터 전단흐름두께 t_d는 다음과 같이 간단하게 구할 수 있다(Hsu and Mo 2010).

$$t_d = \frac{T_n}{2A_o\tau_{\ell t}} \tag{6}$$

$A_o = m_1 A_c$와 $\tau_{\ell t} = m_2 f_c^{'}$로 가정하여 식 (6)에 대입하면

$$t_d = C_m \frac{T_n}{A_o f_c^{'}} \tag{7}$$

여기서 $C_m = 1/(2m_1 m_2)$

과소철근보에서 m_1은 0.55~0.85의 값을 m_2는 0.13~0.22의 값을 갖는다(Hsu and Mo 1983). m_2의 작은 값은 콘크리트의 연화가 그 원인이다. 철근량이 증가하면 m_2의 값은 증가하는 반면 m_1의 값은 감소한다. 그러므로 $m_1 m_2$은 근사적으로 0.125로 정할 수 있으며 C_m은 4가 된다(Hsu and Mo 2010). 즉

$$t_d = \frac{4T_n}{A_o f_c^{'}} \tag{8}$$

전단흐름의 두께를 합리적으로 구한 식 (8)의 t_d를 식 (5)에 대입하고 이를 다시 식 (4)의 $\alpha_t A_1$을 대체하면 다음과 같은 비틀림강도 추정식을 얻을 수 있다.

$$T_n = T_c + \frac{A_o A_t f_{yt}}{s} \tag{9}$$

식 (9)의 우측 두 번째 항은 횡방향 비틀림철근의 기여 강도를 나타내며, 첫 번째 항은 콘크리트의 기여 강도를 나타낸다. 또한 두 번째 항은 공간트러스이론에 의한 횡방향 비틀림철근의 비틀림강도라고 볼 수 있으며, 첫 번째 항의 콘크리트 기여 강도는 콘크리트 스트럿의 전단저항으로 인한 것이다(Hsu 1984).

5. 새로운 비틀림강도의 검증

두 설계기준식 KCI Model Code 2017(2017), ACI Committee 318(2014)와 Rahal(2013)의 비틀림강도 추정식, 새로운 비틀림강도 추정식 각각에 대하여 참고문헌(Kim 1987; Rasmussen and Baker 1995; Koutchoukali and Belarbi 2001; Fang and Shiau 2004; Chiu et al. 2007; Lee et al. 2008; Bernardo and Lopes 2013; Yoon et al. 2014; Kim et al. 2018)에서 발췌한 104개의 보에 대한 극한비틀림강도의 측정값과 각각 비교하였다. Table 3은 그 비교결과를 보인 것이다.

KCI Model Code 2017(2017), ACI Committee 318(2014), Rahal (2013)의 비틀림강도 추정식, 새로운 비틀림강도 추정식과 실험값

Table 3a. Comparison of torsional strengths and test results

Beam	$\frac{T_{\exp}}{T_{KCI}}$	$\frac{T_{\exp}}{T_{ACI}}$	$\frac{T_{\exp}}{T_{Rahal}}$	$\frac{T_{\exp}}{T_{prop}}$	Ref.
ST6	0.823	0.639	0.905	0.749	Kim (1987)
ST7	0.827	0.674	1.072	0.821	
ST10	1.196	0.944	1.199	1.106	
ST11	1.070	0.898	1.272	1.090	
ST6_6	0.836	0.629	0.961	0.825	
ST7_6	0.731	0.550	0.943	0.721	
ST10_6	1.157	0.871	1.144	1.045	
ST6_8	0.846	0.660	0.932	0.773	
ST7_8	0.768	0.628	0.997	0.765	
ST10_8	1.167	0.899	1.154	1.054	
ST11_8	1.093	0.920	1.301	1.117	
ST7_10	0.843	0.686	1.091	0.835	
ST10_10	1.249	0.963	1.236	1.128	
ST11_10	1.115	0.938	1.327	1.139	
B30.1	0.519	0.630	0.976	0.822	Rasmussen and Baker(1995)
B30.2	0.484	0.608	0.921	0.786	
B30.3	0.481	0.620	0.933	0.796	
B50.1	0.635	0.651	1.041	0.882	
B50.2	0.588	0.621	0.986	0.835	
B50.3	0.609	0.625	0.998	0.846	
B70.1	0.646	0.610	0.978	0.840	
B70.2	0.669	0.633	1.013	0.872	
B70.3	0.669	0.637	1.027	0.877	
B110.1	0.799	0.680	1.085	0.955	
B110.2	0.758	0.654	1.051	0.917	
B110.3	0.801	0.689	1.102	0.966	
B5UR1	1.058	0.881	1.081	1.082	Koutchoukali and Belarbi (2001)
B7UR1	0.963	0.730	0.951	0.897	
B9UR1	1.151	0.839	1.061	1.007	
B12UR1	0.989	0.720	0.942	0.875	
B14UR1	1.107	0.783	1.007	0.933	
B12UR2	0.916	0.676	0.894	0.829	
B12UR3	1.043	0.786	0.994	0.980	
B12UR4	1.041	0.787	0.968	0.989	
B12UR5	0.820	0.651	0.877	0.853	
H_06_06	1.277	0.963	1.055	1.057	Fang and Shiau (2004)
H_06_12	1.598	1.205	1.124	1.323	
H_12_12	1.078	0.914	1.189	1.181	
H_12_16	1.361	1.153	1.224	1.491	
H_20_20	1.027	0.984	1.433	1.334	
H_07_10	1.659	1.285	1.224	1.458	
H_14_10	1.033	0.884	1.082	1.128	
H_07_16	1.892	1.466	1.168	1.662	
N_06_06	1.106	0.959	1.038	1.117	
N_06_12	1.322	1.146	1.055	1.335	
N_12_12	0.811	0.859	1.016	1.088	
N_12_16	0.958	1.015	1.050	1.286	
N_20_20	0.679	0.872	1.202	1.112	
N_07_10	1.462	1.303	1.210	1.537	
N_14_10	0.955	0.999	1.121	1.254	
N_07_16	1.535	1.369	1.062	1.614	
F400S150	0.548	0.508	0.482	0.550	Kim et al. (2018)
F400S300	0.908	0.715	0.509	0.638	
F500S150	0.413	0.415	0.430	0.469	
F500S300	0.706	0.586	0.469	0.571	

Table 3b. Comparison of torsional strengths and test results

Beam	$\frac{T_{exp}}{T_{KCI}}$	$\frac{T_{exp}}{T_{ACI}}$	$\frac{T_{exp}}{T_{Rahal}}$	$\frac{T_{exp}}{T_{prop}}$	Ref.
HAS_51_50	1.594	1.169	1.240	1.047	Chiu et al. (2007)
NAS_61_35	1.988	1.475	1.249	1.228	
HAH_81_35	2.510	1.784	1.222	1.332	
HAS_90_50	1.958	1.432	1.240	1.277	
NBS_43_44	1.347	1.067	1.128	1.101	
HBS_74_17	2.235	1.567	0.946	1.157	
HBS_82_13	2.745	1.892	0.927	1.161	
NBS_82_13	2.579	1.855	0.966	1.358	
HBS_60_61	1.487	1.125	1.247	1.204	
HCS_52_50	1.697	1.189	1.143	1.272	
HCH_62_33	2.220	1.564	1.164	1.538	
HCH_91_42	2.380	1.640	1.173	1.637	
HCS_91_50	2.212	1.546	1.213	1.648	
T1-1	1.183	0.945	1.117	1.004	Lee et al. (2008)
T1-2	1.008	0.879	1.089	1.036	
T1-3	0.972	0.909	1.130	1.117	
T1-4	0.759	0.804	0.996	1.021	
T2-1	1.624	1.200	1.074	1.037	
T2-2	1.370	1.094	1.024	1.163	
T2-3	1.222	1.057	1.021	1.236	
T2-4	1.170	1.052	1.024	1.266	
A1	1.399	1.083	1.093	0.871	Bernardo and Lopes (2013)
A2	1.190	1.015	1.120	1.077	
A3	1.064	0.963	1.097	1.098	
A4	0.966	0.902	1.069	1.085	
A5	0.852	0.854	1.013	1.063	
B1	1.454	1.063	0.916	0.642	
B2	1.219	0.958	1.081	1.000	
B3	0.941	0.799	0.975	0.953	
B4	0.889	0.778	0.969	0.980	
B5	0.774	0.694	0.920	0.898	
C1	1.396	1.037	0.995	0.714	
C2	1.288	0.963	1.045	0.933	
C3	0.984	0.820	0.962	0.949	
C4	0.919	0.818	1.014	1.015	
C5	0.786	0.712	0.911	0.914	
C6	0.701	0.669	1.010	0.884	
T1-C42S40	1.089	0.873	1.085	1.040	Yoon et al. (2014)
T1-C42S50	0.865	0.764	0.940	0.952	
T1-C42S60	0.592	0.585	0.731	0.745	
T1-C70S40	1.239	0.896	1.143	1.049	
T1-C70S50	0.865	0.671	0.870	0.841	
T1-C70S60	0.627	0.529	0.694	0.691	
T2-C42S40	0.747	0.723	0.969	0.918	
T2-C42S50	0.637	0.638	0.842	0.813	
T2-C42S60	0.625	0.601	0.716	0.762	
T2-C70S40	0.876	0.728	1.053	0.945	
T2-C70S50	0.704	0.601	0.862	0.786	
T2-C70S60	1.107	0.915	1.167	1.186	
Average	1.114	0.913	1.030	1.027	
COV	0.432	0.335	0.164	0.237	

을 각각 비교한 결과 평균값이 각각 1.114, 0.913, 1.030, 1.027으로 나타났고, 표준편차는 0.481, 0.306, 0.169, 0.243로 나타났으며, 변동계수는 0.432, 0.335, 0.164, 0.237로 나타났다.

이러한 결과를 종합하여 고찰한 결과 콘크리트의 압축강도를 고려한 Rahal(2013)의 비틀림강도 추정식과 본 논문에서 제안한 비틀림강도 추정식에 의한 비틀림강도가 두 설계기준식보다 실험값에 더 근접하고 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

콘크리트 기여 강도를 포함한 비틀림강도와 현행 콘크리트 구조기준에서 규정하고 있는 콘크리트 기여 강도를 포함하지 않은 공칭비틀림강도를 104개의 보에 대한 실험값과 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 콘크리트 기여 강도를 포함한 비틀림강도를 콘크리트 구조기준에 반영할 수 있도록 설계기준을 개정할 필요가 있다.
2) 고강도철근의 사용으로 인하여 철근의 항복강도만으로 공칭비틀림강도를 구하는 현행 콘크리트 구조기준은 철근의 항복 전에 콘크리트스트럿의 압축파괴가 일어날 수 있으므로 이를 제한하기 위한 규정이 필요하다.
3) 공칭비틀림강도에 기여하는 콘크리트 기여 강도를 합리적으로 반영하기 위하여 비틀림을 받는 철근콘크리트부재에 대한 콘크리트 스트럿의 전단저항 메카니즘을 알아내기 위한 폭넓은 연구가 필요하다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

본 연구는 군산대학교 연구교수 연구지원에 의해 수행되었습니다.

References

ACI Committee 318. (1971). Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318–71). American Concrete Institute, Detroit, MI, 78.
ACI Committee 318. (2014). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318–14). American Concrete Institute, Detroit, MI, 519.

Bernardo, L.F.A., Lopes, S.M.R. (2013). Plastic analysis and twist capacity of high-strength concrete hollow beams under pure torsion, Engineering Structures, **49**, 190-201.

CEB-FIP. (1978). Model Code for Concrete Structures, CEB-FIP International Recommendations, 3rd edn, Comite Euro-International du Beton (CEB), 348.

Chiu, H.J., Fang, I.K., Young, W.T., Shiau, J.K. (2007). Behavior of reinforced concrete beams with minimum torsional reinforcement, Engineering Structures, **29**, 2193-2205.

Fang, I.K., Shiau, J.K. (2004). Torsional behavior of normal- and high-strength concrete beams, ACI Structural Journal, **101(3)**, 304-313.

German Standard DIN 4334. (1958). Design of Reinforced Concrete, Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 57.

Hsu, T.T.C. (1968a). Torsion of Structural Concrete - Behavior of Reinforced Concrete Rectangular Members, Torsion of Structural Concrete, Special Publication SP-18, American Concrete Institute, Detroit, MI, 261-306.

Hsu, T.T.C. (1968b). Ultimate torque of reinforced rectangular beams, Journal of the Structural Division, ASCE, **94(ST2)**, 485-510.

Hsu, T.T.C. (1984). Torsion of Reinforced Concrete, Van Nostrand Reinhold Company Inc., 516.

Hsu, T.T.C., Mo, Y.L. (1983). Softening of Concrete in Torsional Members, Research Report No. ST-TH-001-83, Department of Civil Engineering, University of Houston, Houston, Texas, 107.

Hsu, T.T.C., Mo, Y.L. (2010). Unified Theory of Concrete Structures. A John Wiley and Sons, Ltd, Publication.

KCI Model Code 2017. (2017). Concrete Structure Institute Standards 2017, Korea Concrete Institute [in Korean].

Kim, E.K. (1987). Strength and Deformation Characteristics of Reinforced Concrete Members in Pure Torsion, Ph.D Thesis, Sungkyunkwan University [in Korean].

Kim, J.S., Seo, H.S., Lim, J.H., Kwon, M.H. (2018). Experimental study on torsional behavior of RC beams with high strength stirrup, Journal of the Korea Concrete Institute, **30(1)**, 39-46 [in Korean].

Koutchoukali, N.E., Belarbi, A. (2001). Torsion of high-strength reinforced concrete beams and minimum reinforcement requirement, ACI Structural Journal, **98(4)**, 462-469.

Lampert, P., Thurliman, B. (1968). Torsion Tests of Reinforced Concrete Beams, Bericht 6506-2, Institute of Baustatik, ETH, Zurich, Switzerland, 101.

Lee, J.Y., Kim, S.W., Kim, J.H. (2008). Torsional strength and failure modes of reinforced concrete beams subjected to pure torsion, Journal of the Korea Concrete Institute, **20(4)**, 503-511 [in Korean].

Rahal, K.N. (2013). Torsional strength of normal and high strength reinforced concrete beams, Engineering Structures, **56**, 2206-2216.

Rasmussen, L.J, Baker, G. (1995). Torsion in reinforced normal and high-strength concrete beams-part 1: experimental test series, ACI Structural Journal, **92(1)**, 56-62.

Rausch, E. (1929). Design of Reinforced Concrete in Torsion, Technische Hochschule, Berlin, Germany, 53.

Yoon, S.K., Lee, S.C., Lee, D.H., Lee, J.Y. (2014). Failure modes of RC beams with high strength reinforcement, Journal of the Korea Concrete Institute, **26(2)**, 143-150 [in Korean].

철근콘크리트 부재의 비틀림강도에 관한 연구

본 논문에서는 비틀림을 받는 RC 부재의 콘크리트 기여 강도를 포함하고 전단흐름두께를 합리적으로 고려한 비틀림 강도 추정식을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 극한비틀림 강도 추정식을 검증하기 위하여, 현행 콘크리트 구조기준(KCI 2017, ACI 318-14)에서 규정한 공칭비틀림강도와 Rahal의 비틀림강도 추정식, 본 논문에서 제시한 새로운 비틀림강도 추정식에 의한 이론값을 참고 문헌에서 발췌한 104개의 보에 대한 극한비틀림강도 측정값과 각각 비교 검토하였다. 그 결과 콘크리트 기여강도를 반영한 Rahal의 비틀림강도 추정식과 본 논문에서 제안한 비틀림강도 추정식에 의한 극한비틀림강도가 현행 설계기준이 규정한 공칭비틀림강도보다 실험값에 더 가깝게 나타났다.