



KCI 전단설계기준에서 재료 계수 적용에 대한 분석

이성철¹⁾ · 유성원^{2)*}

¹⁾경북대학교 건설환경에너지공학부 부교수 ²⁾가천대학교 토목환경공학과 교수

The Effect of Material Factors on KCI Shear Design Provisions

Seong-Cheol Lee¹⁾ and Sung-Won Yoo^{2)*}

¹⁾Associate Professor, School of Architecture, Civil, Environmental, and Energy Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Rep. of Korea

²⁾Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Gachon University, Seongnam 13120, Rep. of Korea

ABSTRACT As recently material factors have been partially or fully adopted in KCI and KIBSE (LSD), it is required to investigate the effect of the material factors on shear design provisions for reinforced concrete beams. This study investigated the effect of the material factors on the shear design provisions in KCI. For the investigation, total 130 reinforced concrete beams with stirrups have been selected. Through comparison of the test results and the shear design provisions, required strength reduction factors were evaluated with consideration of probabilistic distribution. Then, the required strength reduction factors were compared to the equivalent strength reduction factors with the material factors. Through the comparisons, reliability of the shear design provisions were analyzed. The analysis indicated that the reliability with the material factors were similar to the one with the strength reduction factor. Since this study has been conducted with the limited test data, further study is required with more general test results.

Keywords : shear strength, material factor, strength reduction factor, reliability

1. 서 론

콘크리트 구조물의 안전성을 확보하기 위해 설계에서는 일반적으로 하중계수와 저항계수를 고려한다. 이 중 저항계수를 고려하는 방법으로 부재의 파괴 양상에 따른 불확실성을 고려하는 강도감소계수(또는 부재계수)와 재료의 불확실성을 고려하는 재료계수 등 크게 두 가지가 있다. 전자는 파괴 양상에 따른 공칭강도를 산정한 후 강도감소계수를 곱함으로써 설계강도를 계산하는 반면, 후자는 재료의 특성강도에 재료계수를 곱하여 재료에 대한 설계강도를 계산한 후 파괴 양상에 따른 설계강도를 산정한다.

이와 관련하여 콘크리트 구조물에 대한 국내외 주요 전단 설계기준에서 고려하고 있는 저항계수를 Table 1에 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이, 주로 ACI 318(ACI 2014) 등 미국 설계기준과 유사한 설계기준들은 강도감소계수를, Eurocode 2(CEN 2014)와 유사한 설계기준들은 재료계수를 적용하는 것을 알 수 있다.

콘크리트 구조물에 대한 국내 설계기준들을 좀 더 자세히 살펴보면, 교량을 제외한 콘크리트 구조물의 설계에 적용하는 콘크리트구조기준(2012)(이하 KCI(2012))과 콘크리트학회구조기준(2018)(이하 KCI(2017))에서는 강도감소계수를 고려하고 있다. 다만, KCI(2017)는 휨 및 압축을 받는 부재 설계 시 재료계수를 적용할 수 있도록 부록으로 제시하고 있다. 이와는 달리, 도로교 설계에서는 강도감소계수를 고려한 도로교설계기준(KRTA 2010)에서 재료계수를 고려한 도로교설계기준(한계상태설계법)(이하 KBDC(2015))으로 변경되었다.

한편, Table 1에서 보는 바와 같이, 국내외 주요 전단 설계기준에 적용되는 저항계수의 종류는 전단 설계기준의 기반이 되는 이론의 종류와 관련이 없다. 예를 들어 수정압축장 이론(Vecchio and Collins 1986)에 근간을 둔 설계기준 중 AASHTO(2017)는 강도감소계수를 적용하는 반면 CSA(2014)와 fib(2010)는 재료계수를 적용하고 있다. 이와 관련하여, Jude et al.(2018)은 설계기준과 실험결과들을 상세히 비교한 바 있다. 또한, KCI(2012, 2017)의 철근콘크리트 보 부재의 전단 설계기준에 재료계수를 고려하였을 때의 영향에 대해 최근 Lee and Shin(2018)이 연구를 수행하는 등 전단 설계기준에서의 재료계수 적용에 관한 관심이 증가하고 있다.

이 연구에서는 전단철근이 배근된 철근콘크리트 보 부재

*Corresponding author E-mail : imysw@gachon.ac.kr

Received June 23, 2020, Revised July 05, 2020,

Accepted July 21, 2020

©2020 by Korea Concrete Institute

Table 1 Shear design provisions for reinforced concrete beams with stirrups

Provisions	Base theory model	Safety factor for shear design	
KCI (2012, 2017) KBDC (2010) ACI 318 (2014)	45° truss model	SRF	$\phi = 0.75$
AASHTO (2017)	MCFT	SRF	$\phi = 0.90$
KBDC (2015)	Variable angle truss model	MF	$\phi_c = 0.65$ $\phi_s = 0.9$
CSA (2014)	MCFT	MF	$\phi_c = 0.65$ $\phi_s = 0.9$
Eurocode 2 (2004)	Variable angle truss model	MF	$\gamma_c = 1.5$ $\gamma_s = 1.15$
fib (2010)	MCFT	MF	$\gamma_c = 1.5$ $\gamma_s = 1.15$

SRF: strength reduction factor, MF: material factor, MCFT: modified compression field theory (Vecchio and Collins 1986)

를 대상으로 실제 실험 결과와의 비교를 통해, 현행 콘크리트구조기준에서 제시하고 있는 전단 설계기준에 강도감소계수 대신 재료계수를 적용할 경우 설계기준의 신뢰성에 대한 영향을 분석하고자 한다.

2. KCI 전단 설계기준 분석

2.1 KCI 전단 설계기준

2.1.1 콘크리트구조기준(KCI 2012)

KCI(2012)에서는 철근콘크리트 보 부재에 대한 전단 설계시 공칭전단강도(V_n)에 강도감소계수($\phi = 0.75$)를 곱한 설계전단강도가 계수하중조합에 의한 계수전단력(V_u) 이상이 되도록 식 (1)과 같이 요구하고 있다.

$$\phi V_n \geq V_u \quad (1)$$

V_n 은 콘크리트와 전단철근에 의한 전단력의 합으로 식 (2)와 같다.

$$V_n = V_c + V_s \quad (2)$$

여기서, V_c 는 콘크리트에 의한 전단강도, V_s 는 전단철근에 의한 전단강도로서, 축력이 작용하지 않고 보통중량 콘크리트 및 수직 스티럽이 사용된 경우에 대해 각각 식 (3) 및 식 (4)로 계산된다.

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} b_w d \quad (\text{simple}) \quad (3a)$$

$$V_c = \left(0.16 \sqrt{f_{ck}} + 17.6 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \quad (\text{detail}) \quad (3b)$$

$$\leq 0.29 \sqrt{f_{ck}} b_w d$$

$$V_s = A_v f_{vy} \frac{d}{s} \leq \frac{2}{3} \sqrt{f_{ck}} b_w d \quad (4)$$

여기서, f_{ck} 는 콘크리트 설계기준 압축강도, b_w 는 복부 폭, d 는 단면 유효깊이, ρ_w 는 인장철근비, M_u 는 계수모멘트, A_v 는 전단철근 면적, f_{vy} 는 전단철근의 항복강도, s 는 전단철근의 간격을 의미한다.

한편, 식 (4)에서 V_s 의 상한값은 최대전단철근비에 대한 제한 사항으로서, 전단철근의 항복을 유도하고 전단력에 의한 주압축대 콘크리트 압괴에 의한 취성 파괴를 방지하는데 목적이 있다.

2.1.2 콘크리트학회구조기준(KCI 2017)

KCI(2017)에서는 철근콘크리트 보 부재에 대한 전단 설계시 대부분 KCI(2012)와 동일한 식들을 제시하고 있다. 다만, Lee(2018)와 Lee and Hwang(2010)의 연구 결과를 바탕으로 전단철근에 의한 전단강도 산정 시 상한값을 식 (5)와 같이 제안하고 있다.

$$V_s = A_v f_{vy} \frac{d}{s} \leq 0.2 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) f_{ck} \quad (5)$$

2.2 등가 강도감소계수

앞에서 살펴본 바와 같이 KCI(2012, 2017)에서는 공칭전단강도(V_n)에 강도감소계수를 곱함으로써 설계전단강도에 대한 안전율을 확보하고 있다. 이 연구에서는 KCI(2012, 2017)에 재료계수 도입에 따른 영향을 분석하기 위해, 강도감소계수 대신 재료계수를 적용하여 설계전단강도를 산정하는 것으로 고려하였다. 이때 등가 강도감소계수는 공칭전단강도에 대한 설계전단강도의 비로 산정할 수 있다. 여기서, KBDC(2015)와 동일하게 콘크리트와 전단철근에 대한 재료계수로서 각각 $\phi_c = 0.65$, $\phi_s = 0.9$ 를 적용하였으며, 전단철근에 의한 전단강도 상한값($V_{s,max}$)에는 콘크리트 압괴에 의해 지배되는 것으로서 $\phi_c = 0.65$ 를 적용하였다. 따라서 등가 강도감소계수는 다음의 식 (6)으로부터 산정하였다.

$$\phi_{eq} = \frac{\phi_c V_c + \min(\phi_s V_s, \phi_c V_{s,max})}{V_c + V_s} \quad (6)$$

여기서, $V_{s,max}$ 는 식 (4) 또는 식 (5)에서의 우측 항으로서 전단철근에 의한 전단강도 상한값을 의미한다.

KCI(2012, 2017)에서 재료계수를 고려한 등가 강도감소계수의 변화를 전단보강비($\rho_v f_{vy}$)에 따라 Fig. 1에 나타내었다.

참고로 등가 강도감소계수 산정 시 간편식(simple)을 활용하였으며, ρ_v 는 전단철근비로서 $A_v/b_w s$ 이다. 또한, 경향 분석의 편이성을 위해 최소전단철근비 규정은 고려하지 않았다. 그림에서 보는 바와 같이 전단보강비가 0에 가까운 경우 등가 강도감소계수가 0.65에 가까운 것으로 나타났으며, 전단보강비가 증가할수록 등가 강도감소계수 또한 0.84~0.86까지 증가하는 것으로 나타났다. 이후 전단보강비가 더욱 증가하여 $V_{s,max}$ 에 의해 지배되는 구간에서는 전단보강비가 증가할수록 등가 강도감소계수가 감소하는 것으로 나타났으며, 이후 콘크리트 재료계수인 0.65를 유지하는 것으로 나타났다. 이는 재료계수를 고려함에 따른 특성으로서, 재료별 전단강도에의 기여도에 따른 영향이 반영된 것으로 설명할 수 있다. 즉, 전단보강비가 작은 경우 콘크리트에 의한 전단강도가 지배적임에 따라 등가 강도감소계수가 콘크리트의 재료계수인 0.65에 가까운 반면, 전단보강비가 증가할수록 전단철근에 의한 전단강도의 비율이 증가하면서 전단철근의 재료계수인 0.90에 점점 가까워지는 것을 알 수 있다. 이후 $V_{s,max}$ 에 의한 영향이 커질수록 전단력에 의한 주압축대 콘크리트의 압괴에 의한 영향이 증가함에 따라 등가 강도감

소계수가 콘크리트의 재료계수인 0.65에 다시 가까워지는 것을 알 수 있다.

한편, KCI(2012)에서 제시하고 있는 $V_{s,max}$ 가 KCI(2017)보다 작은 것으로 인해, KCI(2012)에서 상대적으로 작은 전단보강비에서 $V_{s,max}$ 가 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, 콘크리트 압축강도가 증가할수록 등가 강도계수에 대한 두 기준에서의 $V_{s,max}$ 의 영향이 큰 것을 알 수 있다.

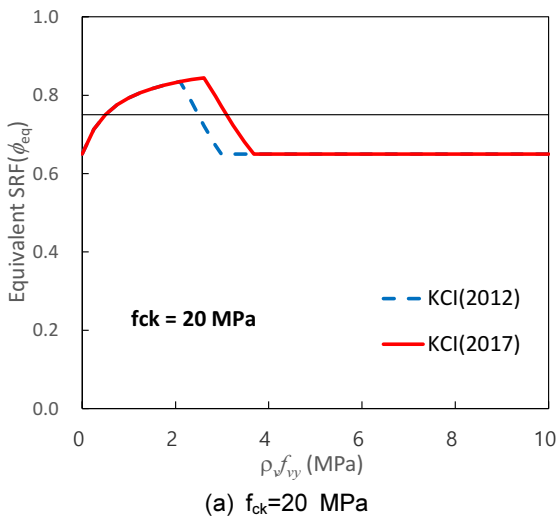
3. 전단보강 철근콘크리트 보 데이터베이스

3.1 시험체 선별

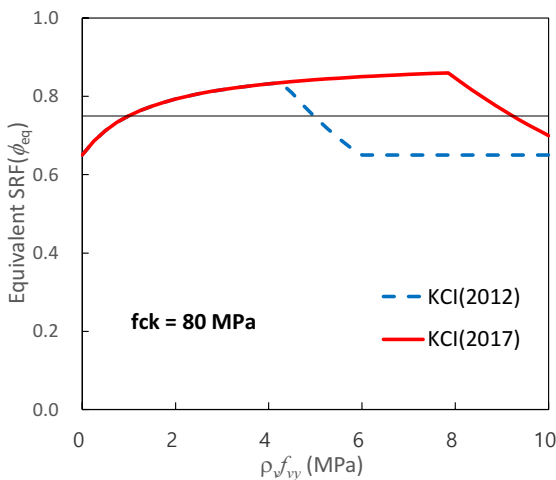
KCI(2012, 2017) 전단 설계기준에 재료계수를 적용한 경우 설계기준의 신뢰성을 분석하기 위해 이 연구에서는 KCI Committee 103(2016)에 있는 전단보강 철근콘크리트 보 데이터베이스(이하 KCI103DB2)를 참고하였다. KCI103DB2는 총 510개의 전단보강 철근콘크리트 보의 시험 결과를 포함하고 있다. 다만, 주인장 철근 항복 후 전단파괴가 발생할 경우 최대 하중이 주인장 철근의 항복에 의해 지배되지만, KCI(2012, 2017) 전단 설계기준에서는 이러한 주인장 철근의 항복에 따른 전단강도에의 영향이 고려되어 있지 않다. 따라서 이 연구에서는 파괴 전 주인장철근의 항복이 발생한 것으로 판단되는 시험체들을 데이터베이스에서 제외하였다. 또한, 전단경간비(a/d)가 2보다 작은 경우 아치효과로 인해 스트럿-타이 모델을 적용하는 것이 일반적이므로, 전단경간비가 2보다 작은 시험체들 또한 데이터베이스에서 제외하였다. 결과적으로 KCI103DB2에서 전단 파괴 발생 시 주인장철근이 항복하지 않고 전단경간비가 2 이상인 시험체는 총 130개이며, 이 연구에서는 이들 시험체에 관한 결과를 설계기준 분석에 활용하였다. Table 2는 이 연구에서 고려된 전단보강 철근콘크리트 보들에 대한 주요 변수들의 범위를 간략히 정리한 것이다. 참고로, 표에서 f'_c 는 시험체의 실제 콘크리트 압축강도, a 는 전단경간, ρ 는 주인장철근비를 의미한다.

3.2 설계기준과의 비교

선별된 130개의 전단보강 철근콘크리트 보에 대해 KCI(2012, 2017)에서 예측한 공칭전단강도(V_n) 대비 실험에서



(a) $f_{ck}=20$ MPa

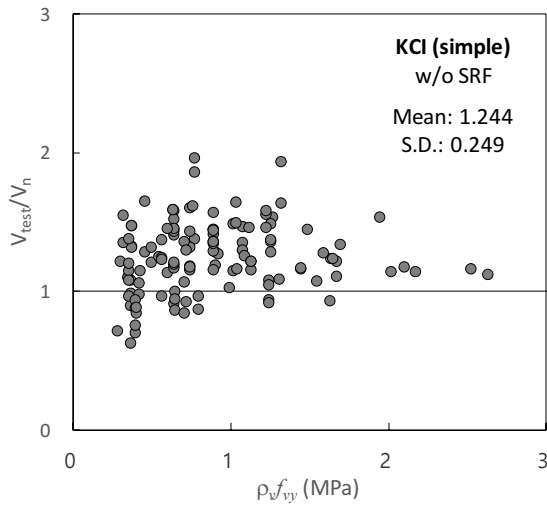


(b) $f_{ck}=80$ MPa

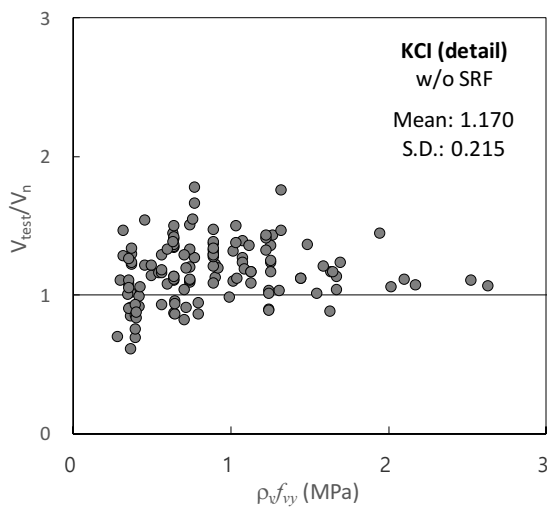
Fig. 1 Comparison of equivalent strength reduction factors

Table 2 Database for shear critical reinforced concrete beams with stirrups

Properties	Region
f'_c (MPa)	20.0~125.3
d (m)	0.126~0.925
a/d	2.000~4.457
$\rho_v f_{vy}$ (MPa)	0.285~2.636
ρ	0.010~0.057



(a) Simple method



(b) Detailed method

Fig. 2 Comparison of the test results with KCI shear design provisions with no strength reduction factor

측정된 전단강도의 비를 전단보강비에 따라 Fig. 2에 나타내었다. 참고로, 이 연구에서 고려된 시험체 중 $V_{s,max}$ 의 영향을 받는 시험체는 없었으며, 따라서 KCI(2012)와 KCI(2017)의 결과는 서로 동일하다. 그림에서 보는 바와 같이 간편식을 사용한 경우 평균 1.244, 표준편차 0.249로 상세식을 사용한 경우(평균 1.170, 표준편차 0.215)보다 조금 더 보수적으로 시험체의 전단강도를 평가하는 것으로 나타났다. 전단강도 비율이 1보다 작은 시험체의 수는 간편식 및 상세식에 대해 각각 24개 및 26개인 것으로 나타났으며, 대부분 전단보강비가 1 MPa보다 작은 범위에 속하는 것으로 나타났다.

4. 재료계수를 고려한 신뢰성 분석

4.1 시험체 데이터베이스에 대한 등가 강도감소계수

데이터베이스에서 선별된 총 130개의 시험체에 대해 등가 강도감소계수를 산정한 후 Fig. 1에 나타난 등가 강도감소

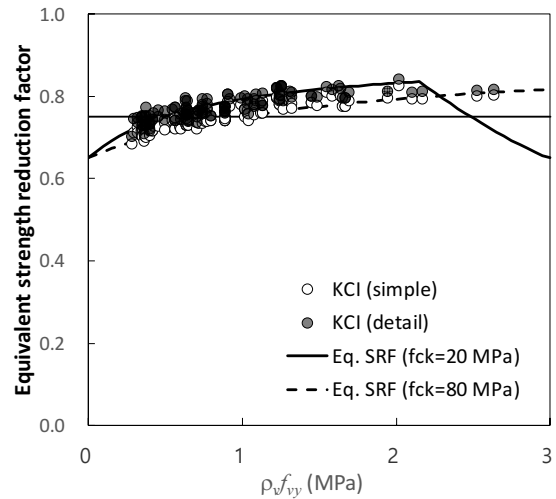


Fig. 3 Equivalent strength reduction factor for RC beams with stirrups

계수와 함께 Fig. 3에 비교하였다. 참고로, KCI(2017)에 의한 등가 강도감소계수는 $V_{s,max}$ 에 의한 영향을 제외하면 KCI(2012)의 결과와 동일하다. 즉, 콘크리트 압축강도가 20 MPa에서 전단보강비가 2 MPa 이상일 경우 등가 강도감소계수가 감소하는데, 이는 KCI(2012)에서만 나타나는 현상이다. 또한, 전단보강비가 크지 않음에 따라, 시험체에 대해 산정한 등가 강도감소계수는 KCI(2012)와 KCI(2017)가 서로 동일하다. 그림에서 보는 바와 같이, 시험체에서 사용된 콘크리트의 압축강도가 최소 20 MPa, 최대 125.3 MPa로 다양함에 따라 그림에서 나타낸 KCI(2012)에 근거한 등가 강도감소계수로부터 조금의 변동성이 있는 것으로 나타났으나, 전단보강비의 변화에 따른 경향은 전반적으로 일치하는 것으로 나타났다. 또한, 등가 강도감소계수가 0.75보다 큰 시험체의 수가 단순식 및 정밀식에 대해 각각 59개 및 98개였으며, 정밀식을 사용할 경우 단순식과 비교해 등가 강도감소계수가 조금 더 큰 것으로 나타났다. 다만, 이 연구에서 고려된 130개의 시험체 중 $V_{s,max}$ 의 영향을 받는 시험체는 없었으며, 향후 전단보강비가 큰 시험체에 관한 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

4.2 파괴 확률을 고려한 요구 강도감소계수

4.2.1 확률 분포의 가정

일반적으로 모집단에 대한 표준편차가 알려진 경우 설계기준에 의해 산정된 전단강도 대비 실험에 의해 측정된 전단강도의 비가 정규분포 또는 로그정규분포를 따르는 것으로 가정하여 확률론적 분석을 수행할 수 있다. 하지만, 이 연구에서 선택한 전단보강 철근콘크리트 보에 대한 데이터베이스는 표본집단으로서, 설계기준의 신뢰성을 분석하기 위해 모집단에 대한 확률론적 분석을 수행하는 것이 더 합리적이다. 따라서 이 연구에서는 Fig. 4에서 도시한 바와 같이 데이터베이스에서 고려된 시험체 수(표본의 수)에 따른 확률론

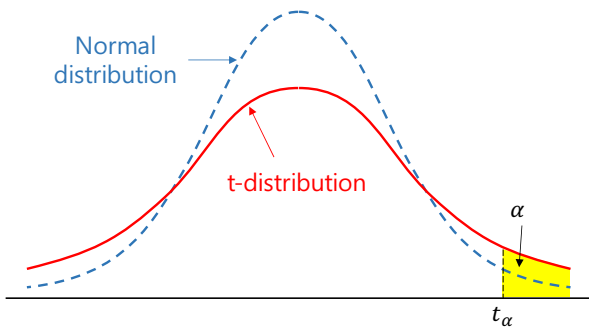


Fig. 4 Comparison of normal distribution and t-distribution

적 분포 영향을 고려한 t -분포를 활용하였다(Kim 2013). 참고로 표본의 크기가 커질수록 t -분포의 형태가 평균에 밀집하게 되며, 표본의 크기가 120개 이상이 되면 정규분포와 거의 동일하게 된다.

4.2.2 요구 강도감소계수

전단보강 철근콘크리트 보의 전단강도에 대해, 설계기준에 의한 공칭전단강도(V_n) 대비 실험결과의 비에 대한 평균을 $\overline{v_{test}/v_n}$, 표준편차를 s 라고 하면, 파괴 확률 α 에 상응하는 요구 공칭강도 ϕ_{req} 는 다음의 식으로부터 계산할 수 있다.

$$\phi_{req} = \overline{v_{test}/v_n} - t_\alpha s \quad (7)$$

여기서, t_α 는 자유도(표본 수-1)를 고려한 t -분포에서 왼쪽 또는 오른쪽 끝부분의 넓이가 α 에 해당하는 t 값이다.

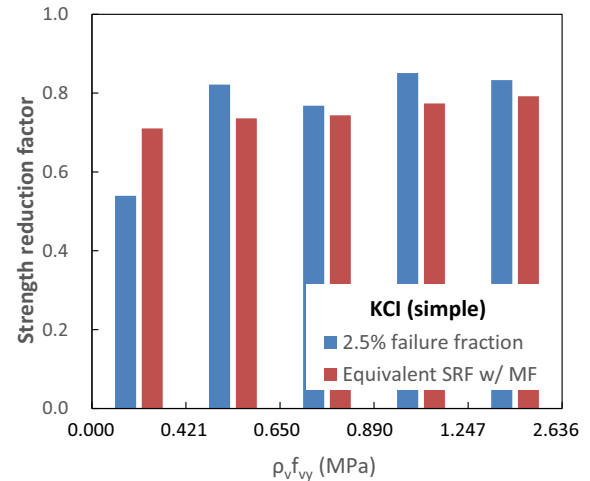
한편, 재료계수의 영향을 고려한 등가 강도감소계수가 전단보강비에 따라 변화하는 것을 고려하여, 전단보강 철근콘크리트 보에 대한 시험체 데이터베이스를 전단보강비에 따라 5구간으로 분류하였다. 참고로, 구간별 시험체 수에 따른 영향을 최소화하기 위해, 각각의 구간에 해당하는 시험체의 수가 비슷하게 전단보강비에 따라 시험체들을 분류하였다. Table 3은 구간별 전단보강비의 범위, 전단보강비의 평균 및 표준편차를 정리한 것이다.

각각의 구간에 대하여 2.5 % 파괴 확률에 상응하는 요구 강도감소계수를 산정한 후, 해당 구간의 시험체들에 대한 등가 강도감소계수와 비교한 것을 Fig. 5에 나타내었다. 참고로 그림에서 표시된 구간별 요구 강도감소계수 및 등가 강도감소계수는 해당 구간에 속하는 시험체들에 대한 산정 결과들을 평균하여 나타낸 것이다. 또한, 이 연구에서 고려한 시험체 데이터베이스에서 식 (4) 또는 식 (5)에 의해 콘크리트 압괴가 발생 가능한 것으로 예측되는 시험체는 없었으며, 따라서 그림에서 두 기준(KCI 2012, 2017)에 의한 결과는 동일하다.

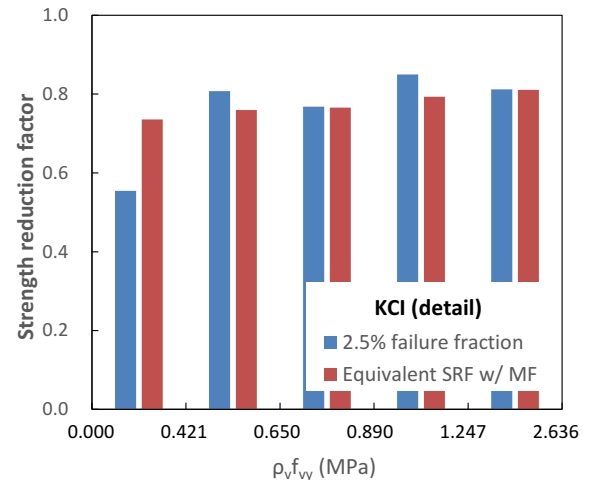
Fig. 5에서 보는 바와 같이, 2.5 % 파괴 확률에 상응하는 강도감소계수를 분석한 결과, 전단보강비가 0.42 MPa 이하인 경우 단순식에 대해 0.54, 정밀식에 대해 0.56으로서 현행 설계기준에서 고려하고 있는 강도감소계수인 0.75보다 상당

Table 3 Shear reinforcement information of the groups

Group	$\rho_v f_{vy}$ (MPa)			No. of specimens
	Region	Mean	S.D.	
I	$\rho_v f_{vy} \leq 0.421$	0.369	0.034	26
II	$0.421 < \rho_v f_{vy} \leq 0.650$	0.595	0.068	28
III	$0.650 < \rho_v f_{vy} \leq 0.890$	0.800	0.074	27
IV	$0.890 < \rho_v f_{vy} \leq 1.247$	1.100	0.111	24
V	$1.247 < \rho_v f_{vy} \leq 2.636$	1.647	0.390	25



(a) Simple method



(b) Detailed method

Fig. 5 Required strength reduction factor for 2.5 % failure fraction

히 작은 것으로 나타났다. 이는 전단보강비가 작은 경우 전단철근보다 콘크리트에 의한 전단강도 기여도가 크고, 콘크리트에 의한 전단강도 기여도에 대한 불확실성이 큰 것에 기인하는 것으로 판단된다. 이와는 달리, 전단보강비가 0.42 MPa를 초과하는 경우 2.5 % 파괴 확률에 상응하는 강도감소계수가 0.77~0.85로서 현행 설계기준 강도감소계수인 0.75를 모두 상회하는 것으로 나타났다. 이는 전단철근에 의한 전단강도 기여도가 콘크리트와 비교해 상대적으로 크고, 전단철근 재료 물성에 대한 불확실성이 콘크리트와 비교해 상

대적으로 작은 것에 기인한 것으로 판단된다. 한편, 단순식보다 정밀식을 사용하였을 경우 전단보강된 철근콘크리트보의 실제 전단강도를 보다 근접하게 예측함에 따라, 정밀식에 대한 2.5 % 파괴 확률 상응 강도감소계수가 단순식과 비교해 전반적으로 조금 큰 것으로 나타났다.

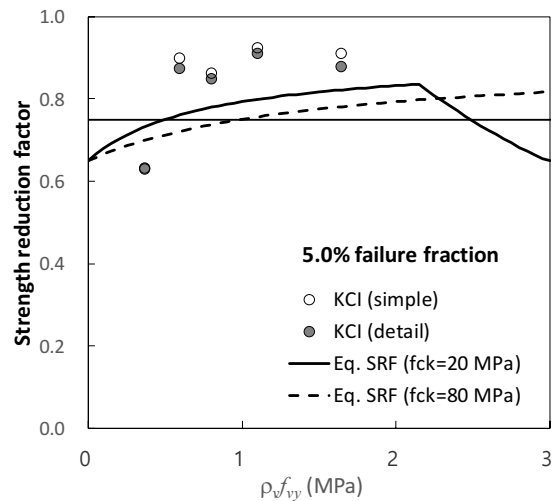
4.3 파괴 확률에 따른 영향

파괴 확률 5.0 %, 2.5 %, 그리고 1.0 %에 상응하는 각 구간별 요구 강도감소계수를 등가 강도감소계수 및 현행 설계기준 강도감소계수인 0.75와 함께 Fig. 6에 비교하였다. 참고로, 2.2절에서 살펴본 바와 같이 콘크리트 압축강도가 20 MPa로 낮은 경우 등가 강도감소계수 산정 시 콘크리트 압괴의 영향이 KCI(2012)에서 더 크게 고려되므로, 그림에서 KCI(2012)에 근거한 등가 강도감소계수를 고려하였다.

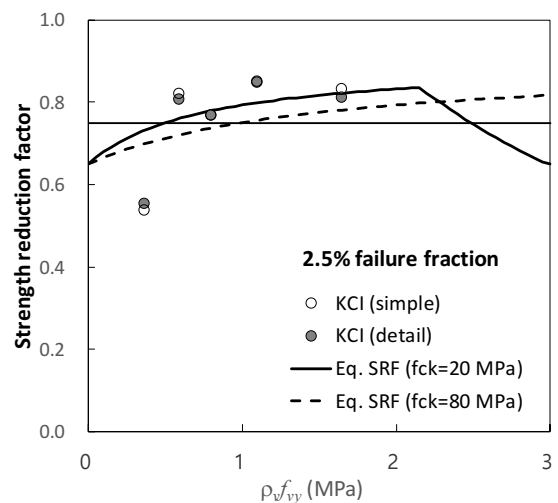
Fig. 6에서 비교한 바와 같이, 전단보강비가 0.421 MPa 이하인 경우 5.0 %의 파괴 확률에 상응하는 요구 강도감소계수가 0.63으로 나타나, 현행 설계기준에서의 강도감소계수 0.75뿐만 아니라 재료계수 도입에 따른 등가 강도감소계수보다 더 작은 것으로 나타났다. 이는 전단보강비가 작은 경우 콘크리트에 의한 불확실성이 커짐에 따라 충분한 안전을 확보가 어렵다는 것을 의미한다. 한편, 전단보강비가 0.421 MPa를 초과하는 경우 2.5 % 파괴 확률에 상응하는 요구 강도감소계수가 0.75 및 등가 강도감소계수와 유사하거나 조금 상회하는 것으로 나타났다. 이와는 달리, 1.0 % 파괴 확률에 상응하는 요구 강도감소계수는 전반적으로 0.75 및 등가 강도감소계수보다 작은 것으로 나타났다. 따라서 현행 설계기준에 강도감소계수 0.75와 재료계수를 도입하는 경우 모두 2.5 %의 파괴 확률로 비슷한 안전성을 확보하는 것으로 판단된다. 다만, 전단력에 의해 주압축대 콘크리트 압괴 발생이 가능한 경우에 해당하는 시험체가 없으므로, 향후 이에 관한 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

4.4 신뢰성 분석

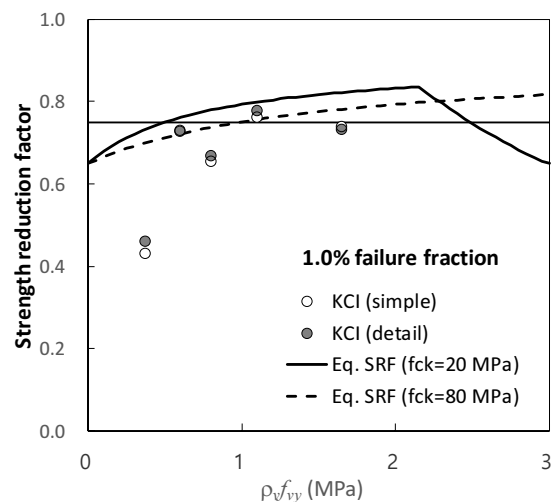
강도감소계수와 재료계수 적용에 따른 설계기준의 신뢰성을 분석하기 위해, 설계전단강도에 대한 실험에서 측정된 전단강도의 비를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 상세식이 간편식과 비교해 조금 더 합리적으로 설계전단강도를 산정하는 것으로 나타났다. 또한, 강도감소계수 및 재료계수 모두 평균값 및 표준편차에 대해 비슷한 것으로 확인되었다. 따라서 이 연구에서 고려한 시험체를 바탕으로 KCI(2012, 2017)의 전단 설계기준에서의 저항계수 영향 분석 결과가 매우 유사한 것으로 분석되었다. 다만, 전단보강비가 1 MPa보다 큰 경우 재료계수 적용에 따른 등가 강도감소계수가 증가함에 따라 시험결과/설계전단강도의 비가 조금 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 시험결과/설계전단강도의 비가 1보다 작은 비안전측 시험체의 수가 설계기준 간편식에 재료계수를 적용한 경우 2개(1.54 %), 나머지 3가지



(a) 5.0 % failure fraction



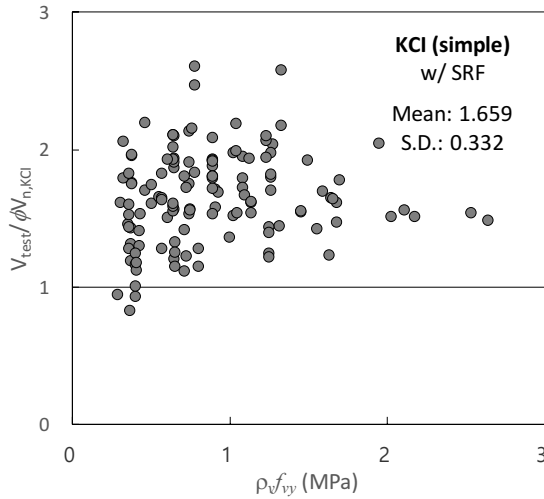
(b) 2.5 % failure fraction



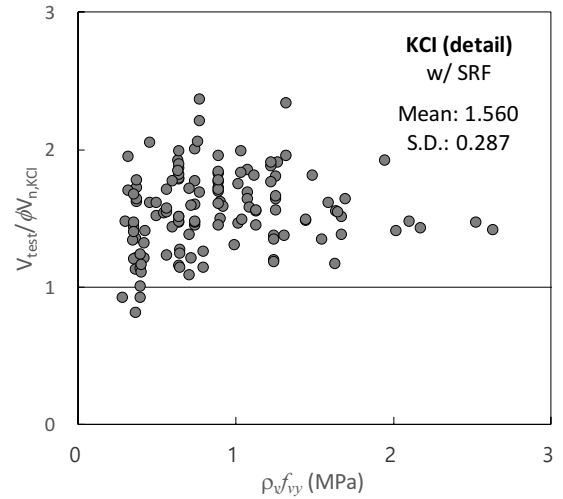
(c) 1.0 % failure fraction

Fig. 6 Comparison of the required and the equivalent strength reduction factors

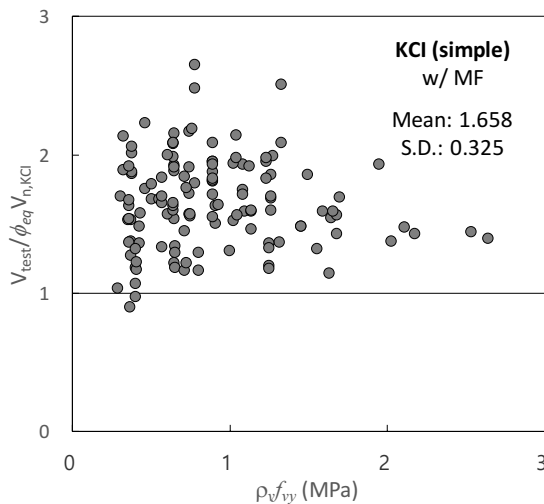
경우 3개(2.31 %)로 나타나, 파괴 확률이 거의 비슷한 것으로 나타났다.



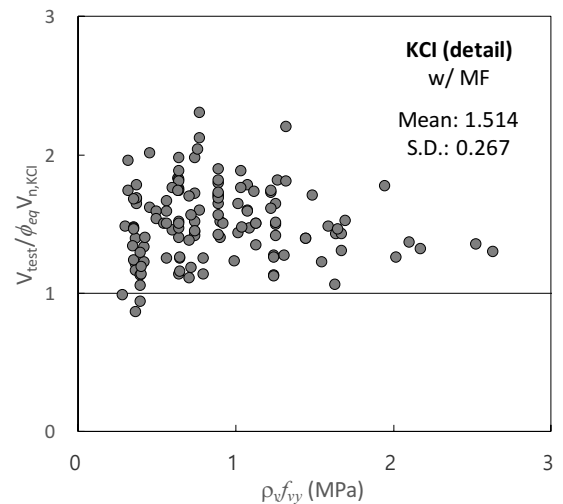
(a) Simple method with strength reduction factor



(b) Detailed method with strength reduction factor



(c) Simple method with material factor



(d) Detailed method with material factor

Fig. 7 Comparison of the test results with KCI shear design provisions with strength reduction factor or material factor

4. 결 론

이 연구에서는 재료계수 도입에 따른 KCI 전단 설계기준에의 영향을 등가 강도감소계수 및 확률론적 접근 방법을 통해 분석하였다. 이를 위해 130개의 전단보강 철근콘크리트 보 시험체를 선별하였으며, 실험결과와 설계기준과의 비교를 통해 재료계수 도입에 따른 KCI 전단 설계기준의 신뢰성에 대해 분석하였다. 이 연구에서 도출된 주요 내용은 다음과 같다.

- 1) 재료계수 도입 시 KCI 설계기준의 등가 강도감소계수를 분석한 결과, 전단력에 의한 주압축대 콘크리트 압괴의 영향이 없는 경우 전단보강비가 증가할수록 등가 강도감소계수가 0.65에서 0.835~0.860으로 증가하는 것으로 나타났다. 이후 전단철근에 의한 전단강도 상한값에 의해 등가 강도감소계수가 점점 감소하여 0.65에 도달하는 것으로 나타났다.
- 2) 기존 문헌으로부터 전단경간비가 2 이상이고 주인장 철근 항복 전 전단파괴가 발생한 130개의 전단보강 철

근콘크리트 보에 대해 데이터베이스를 구축하였다. 구축된 데이터베이스는 전단보강비에 따라 시험체 수를 유사하게 하여 5 구간으로 분류하였으며, 이를 전단 설계기준 신뢰성 분석에 활용하였다.

- 3) 공칭전단강도(V_n)와 실험결과를 비교함으로써 구간별 파괴 확률을 고려한 요구 강도감소계수를 도출하였다. 2.5 % 파괴 확률에 상응하는 요구 강도감소계수를 도출한 결과, 전단보강비가 0.42 MPa 이하인 시험체에 대해 0.54~0.56으로 나왔으며, 전단보강비가 0.421 MPa를 초과하는 시험체에 대해서는 0.77~0.85로 나왔다. 따라서 전단보강비가 작은 경우 불확실성이 크에 따라 설계기준의 신뢰성이 감소하는 것으로 판단된다.
- 4) 재료계수를 고려한 설계기준의 등가 강도감소계수와 파괴 확률을 고려한 요구 강도감소계수를 비교한 결과, 전단보강비가 0.42 MPa 이상인 경우 2.5 % 파괴 확률에 상응하는 요구 강도감소계수가 등가 강도감소계수와 유사하거나 조금 상회하는 것으로 판단된다.
- 5) 강도감소계수 또는 재료계수를 고려한 설계전단강도

와 실험결과를 비교 및 분석하였으며, 분석 결과 이 연구에서 고려한 130개의 전단보강 철근콘크리트 보에 대해 실험결과/설계전단강도의 비가 매우 유사한 것으로 나타났다.

- 6) 주압축대 콘크리트 압괴가 발생하는 전단보강비가 큰 철근콘크리트 보에 관한 연구가 추가로 필요한 것으로 판단된다.
- 7) 이 연구에서 고려된 연구 방법은 향후 국내외 주요 전단 설계기준에 대한 신뢰성 분석 및 더욱 합리적인 설계기준 마련에 유용할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호 20NANO-B156177-01) 및 정부(과학기술정보통신부) 재원 한국연구재단의 지원(NRF-2020R1I1A3073831)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- AASHTO (2017) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. 8th Edition, Washington, DC; American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- ACI Committee 318 (2014) *Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)*. Farmington Hills, MI; American Concrete Institute (ACI), 518.
- CEN (2014) *Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings (BS EN 1992-1-1:2014/A1)*. Brussels, Belgium; European Committee for Standardization (CEN). 230.
- CSA (2014) *Design of Concrete Structures (CAN/CSA-A23.3-04)*. Rexdale: Canadian Standards Association (CSA).
- fib (2010) *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Lausanne, Switzerland; The International Federation for Structural Concrete (fib), 244.
- Jude, E. O., Oh, C.-H., and Lee, S.-C. (2018) Single Web Shear Element Model for Shear Strength of RC Beams with Stirrups. *International Journal of Concrete Structures and Materials* 12.
- KCI (2012) *Concrete Design Code and Commentary*. Seoul, Korea; Korea Concrete Institute (KCI). (In Korean)
- KCI (2017) *KCI Model Code 2017*. Seoul, Korea; Kimmoondang Publishing Company. Korea Concrete Institute (KCI). 637. (In Korean)
- KCI Committee 103 (2016) *Comparison of Shear Design Codes and Strength Models for RC Beams*. Seoul, Korea; Korea Concrete Institute (KCI), 322. (In Korean)
- KIBSE (2015) *Korea Highway Bridge Design Code-Limit State Design Method (KBDC-LSD) and Commentary*. Seoul, Korea; Gunsulbook Publishing Company. Korea Institute of Bridge and Structural Engineers (KIBSE), Korea Bridge Design and Engineering Research Center (KBDERC). (In Korean)
- Kim, T.-W. (2013) *Introduction to Statistics*. 3rd edition, Shinyoungsa, 162-165. (In Korean)
- KRTA (2010) *Korean Highway Bridge Design Code*. Seoul, Korea; Korea Road & Transportation Association (KRTA). (In Korean)
- Lee, J.-Y. (2018) Evaluation of Maximum Shear Reinforcement Ratio of Reinforced Concrete Beams based on Truss Model. *Journal of the Korea Concrete Institute* 30(2), 217-227. (In Korean)
- Lee, J.-Y., and Hwang, H.-B. (2010) Maximum Shear Reinforcement of Reinforced Concrete Beams. *ACI Structural Journal* 107(5), 580-588.
- Lee, J.-Y., and Shin, D.-I. (2018) Evaluation of Design Shear Strength of Reinforced Concrete Beams with Material Factor. *Journal of the Korea Concrete Institute* 30(6), 573-582. (In Korean)
- Vecchio, F. J., and Collins, M. P. (1986) The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear. *ACI Journal Proceedings* 83(2), 219-231.

요약 최근 콘크리트학회구조기준과 도로교설계기준(한계상태설계법)에서 설계기준 일부 또는 전체에 재료계수를 반영함에 따라, 재료계수 도입에 따른 철근콘크리트 보의 전단 설계기준에서의 영향에 관한 관심이 증가하고 있다. 이 연구에서는 전단철근이 배근된 철근콘크리트 보 부재를 대상으로, 콘크리트학회구조기준 전단 설계기준에 대한 재료계수의 영향을 분석하였다. 이를 위해 총 130개의 전단보강 철근콘크리트 보 시험체를 선별하였으며, 실험결과 및 설계기준과의 비교를 통해 확률론적 분석 기법을 바탕으로 요구 강도감소계수를 도출하였다. 이후 재료계수를 고려한 등가 강도감소계수와 비교를 통해 재료계수 도입 시 현행 전단 설계기준의 신뢰성을 분석하였다. 분석 결과 재료계수를 적용한 전단 설계기준의 신뢰성이 강도감소계수를 적용한 전단 설계기준과 비슷한 것으로 나타났다. 이 연구는 제한된 시험체 데이터베이스에 대해 수행된 것으로서, 향후 보다 다양한 실험결과를 바탕으로 추가 분석이 필요한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 전단강도, 재료계수, 강도감소계수, 신뢰성