

주인장 철근을 가진 HPFRCC 보 부재 전단 강도 예측 모델

이성철¹, 신경준^{2*}

Shear Strength Model for HPFRCC Beams with Main Longitudinal Tensile Reinforcements

Seong-Cheol Lee¹, Kyung-Joon Shin^{2*}

Abstract: Recently, many studies have been conducted on the structural behavior of HPFRCC, but most of the studies focused on the flexural behavior while studies on the shear behavior are limited. In this study, a model has been developed to reasonably predict the shear strength of a HPFRCC beam without stirrups. To develop the model, a HPFRCC beam was simply idealized with upper & lower chords resisting bending moment and a web shear element resisting shear forces. Then, taking into the account of the tensile behavior of HPFRCC, the main diagonal compressive strut angle and shear stress of the web shear element were evaluated on shear failure. Then, the shear strength of the HPFRCC beam could be evaluated. For the verification of the proposed model, the predictions by the proposed model were compared with the test results of 48 HPFRCC beams exhibiting shear failure. The results showed that the proposed model reasonably predicted the actual shear strength with an average of 1.045 and CoV of 0.125. This study are expected to be useful for related researches and design of members or structures to which HPFRCC is applied.

Keywords: HPFRCC, shear, shear strength, compressive strut angle, diagonal crack angle

1. 서 론

시멘트를 원료로 하는 건설재료의 단점인 취성적 파괴 거동을 보완하기 위해 연성이나 강도가 일반 콘크리트보다 월등한 고기능성 시멘트계 복합재료인 HPFRCC(High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite)에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 특히, HPFRCC는 Fig. 1에서 보는 바와 같이, 균열 발생 후 취성 거동 또는 연화 거동을 보이는 일반 콘크리트 또는 섬유보강 콘크리트(Fiber Reinforced Concrete; FRC)와 달리 인장축 응력-변형을 관계에서 초기 균열 후 변형 경화 및 다중 분산 균열을 나타내며 상대적으로 큰 에너지 흡수 능력 등의 특징을 보이고 있다(Naaman and Reinhardt, 1995).

이와 관련하여, 콘크리트 부재의 인장 거동 개선 또는 휨강도 증진 등에 초점을 둔 연구들이 많이 진행되어 왔다. Lee et al.(2010a)은 철근이 배근된 HPFRCC 부재에서의 인장경화현상에 대해 분석하였으며, Shin et al.(2011)은 주인장 철근이 배근된 HPFRCC 보 부재의 휨 거동에 대한 실험 및 이론 연구

를 수행한 바 있다. 최근에 Shin et al.(2019)은 마이크로 섬유를 혼입한 고인성 섬유 보강 콘크리트에 대해 휨인성 및 균열 분산 특성을 실험을 통해 분석하였으며, Yuh and Bae (2019)는 하이브리드 강섬유 보강 초고강도 콘크리트 사용 시 높은 휨강도 및 연성이 확보되는 것을 실험을 통해 분석하였다.

한편, HPFRCC가 적용되는 부재는 휨강도 측면에서 더 큰 하중을 견딜 수 있게 되며, 이에 따라 부재에 작용하는 전단력 또한 커지게 된다. 따라서, HPFRCC가 적용된 부재의 경우 휨강도뿐만 아니라 전단 강도에 대한 고려도 필요하다. 하지만, 기존의 HPFRCC가 적용된 부재의 전단 거동 및 강도에 대한 연구는 활발하지 않은 실정이다. 이와 관련하여, Lee et al.(2015)는 전단 철근이 없는 HPFRCC 보 부재에 대한 실험을 수행하고 전단 강도를 분석하였으나, 전단 강도를 예측할 수 있는 별도의 이론을 제시하지는 않았다. Shimizu et al.(2004)은 HPFRCC 보 부재 실험을 통해 전단 강도 식을 제안하였으나, 실험 변수 및 전단 강도 예측 모델에서 섬유 함량 및 전단 철근양만을 고려한 반면 주인장 철근비 및 전단경간비를 고려하지 않아 적용성에 한계가 있다. Lee and Hong (2017)은 전단 철근이 없는 강섬유 보강 초고성능 콘크리트 I형 보에 대한 실험을 통해 전단 강도가 전단 경간비와 유효깊이에 큰 영향을 받는 것을 확인하였으나, 별도의 전단 강도 모델을 제안하지 않았다.

¹정희원, 경북대학교 토목공학과 조교수

²정희원, 충남대학교 토목공학과 부교수

*Corresponding author: kjshin@cnu.ac.kr

Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2020년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2020년 6월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

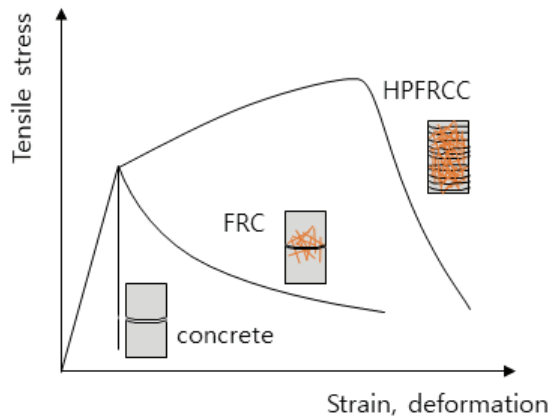


Fig. 1 Tensile behavior of normal concrete, FRC, and HPFRCC (Lee et al., 2017)

따라서, 본 연구에서는 HPFRCC 보 부재에 대한 전단 강도를 합리적으로 산정할 수 있는 모델을 개발하고자 한다. 또한, 제안 모델을 기존의 실험 결과와 비교함으로써 검증하고자 한다.

2. HPFRCC 보 부재 전단 강도 모델 유도

2.1 HPFRCC 보 부재 이상화

집중하중을 받는 단순지지된 HPFRCC 보 부재의 전단 강도를 예측하기 위해 이 논문에서는 Jude et al.(2018)에서 고려된 이상화된 모델을 사용하였다. 즉, Fig. 2에서 보는 바와 같이 전단 경간을 압축력을 받는 상현재, 인장력을 받는 하현재, 그리고 전단력을 받는 복부 전단 요소 등 세 가지 요소로 단순화하여 고려하였다. 따라서, 주어진 단면에 작용하는 휨모멘트는 상현재와 하현재에 의해 저항되며, 전단력은 복부 전단 요소에 의해 저항되는 것으로 고려할 수 있다. 여기서, 전단 파괴에 근접할수록 복부 전단 요소에는 균열 후 사인장 균열 각(또는 주압축대 기울기)이 45도보다 기울어지게 되고, 복부 요소의 종방향으로의 변형을 상·하현재에서 구속함에 따라 복부 전단 요소에 추가적으로 종방향 압축응력이 작용하게 된다(Vecchio and Collins, 1986). 또한, 전단 경간비가 매우 작지 않은 일반적인 보 부재의 경우 복부 전단 요소에 대해 높이 방향으로의 법선 응력은 무시할 수 있다. 일반적으로 직사각형 단면의 경우 복부 전단 요소에서의 전단응력이 보의 깊이 방향으로 균등하게 분포되어 있는 것으로 가정할 수 있다(Vecchio and Collins, 1988).

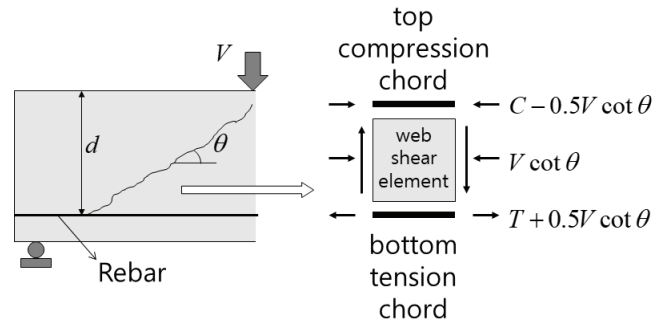


Fig. 2 Idealized model for a shear critical HPFRCC beam

2.2 복부 전단 요소에서의 응력 및 변형률

복부 전단 요소는 사인장 균열 이후 주인장 방향과 주압축 방향으로의 거동이 다르게 되므로 2축 요소로 고려할 수 있다. 여기서, 주인장 및 주압축 응력을 각각 σ_1 및 σ_2 라 하고, 종방향 및 횡방향 응력을 각각 σ_x 및 σ_y , 전단응력을 τ_{xy} 라 하면, 복부 전단 요소에 작용하는 응력에 대한 Mohr's circle은 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 그림으로부터 주인장 및 주압축 응력의 관계는 종방향으로부터 주인장 응력 방향 사이의 각(θ), 즉 주압축대의 기울기를 이용해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_2 = -\sigma_1 \cot^2 \theta \quad (1)$$

한편, 주압축 응력과 주압축 변형률의 관계는 HPFRCC가 나타내는 압축-변형률 거동으로부터 산정할 수 있다. 다만, 주인장 방향으로 균열이 발생한 이후에는 압축연화효과(Vecchio and Collins, 1993)로 인해 주어진 주압축 변형률에 대한 주압축 응력이 균열이 발생하지 않은 경우에 비해 작아지게 된다. 현재 HPFRCC에 대한 압축연화효과에 대한 기존 연구 결과가 없는 관계로, 이 연구에서는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 초기부터 압축강도 도달 시까지의 압축 응력-변형률 곡선을 압축강도까지 직선화함으로써, 식 (2)를 통해 압축연화효과를 간략히 반영하였다.

$$\sigma_2 = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_c'} f_c' \quad (2)$$

여기서, f_c' 은 HPFRCC 압축강도를, ε_c' 은 압축강도 시의 변형률을, σ_2 와 ε_2 는 압축응력 및 압축변형률을 각각 의미한다.

참고로, 전단 철근이 없는 HPFRCC 보 부재의 경우 대부분 복부 전단 요소에서의 주압축 응력이 HPFRCC의 압축강도에 크게 미치지 못하므로, 위 식을 통해 압축연화효과를 비교적 간단히 고려할 수 있다.

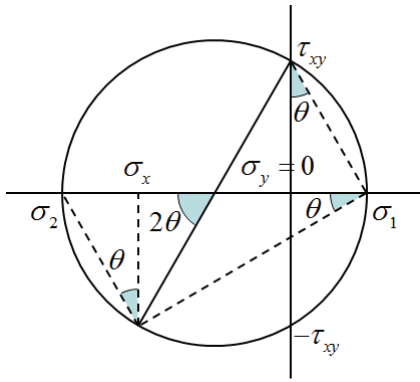


Fig. 3 Stresses on the web shear element

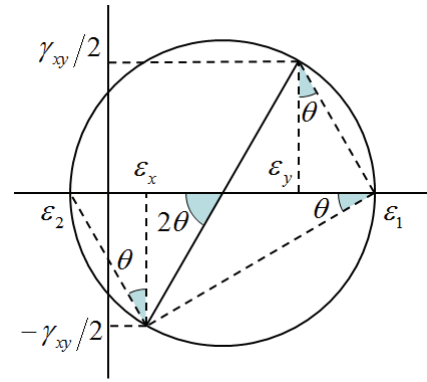


Fig. 5 Strains on the web shear element

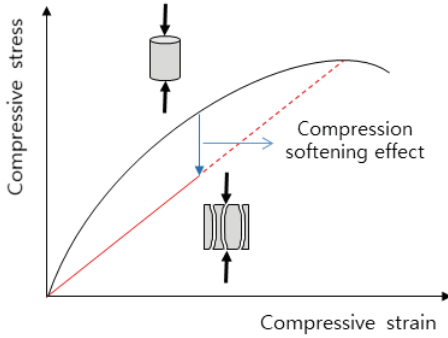


Fig. 4 Simplified compression softening behavior

식 (1) 및 (2)로부터, 복부 전단 요소에서의 주인장 응력과 주압축 변형률의 관계는 다음의 식 (3)으로 정리된다.

$$\epsilon_2 = \frac{\sigma_1 \epsilon_c'}{f_c'} \cot^2 \theta \quad (3)$$

응력과 마찬가지로, 복부 전단 요소의 주인장 및 주압축 변형률을 각각 ϵ_1 및 ϵ_2 라 하고, 종방향 및 횡방향 변형률을 각각 ϵ_x 및 ϵ_y , 전단응력을 γ_{xy} 라 하면, 복부 전단 요소의 변형률에 대한 Mohr's circle은 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 변형률에 대한 주압축대의 기울기는 응력에 대한 주압축대의 기울기와 같으며(Vecchio and Collins, 1986), 그림으로부터 변형률 사이의 관계를 다음의 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_2 &= \epsilon_1 - (\epsilon_1 - \epsilon_x) - (\epsilon_1 - \epsilon_x) \tan^2 \theta \\ &= \epsilon_x - (\epsilon_1 - \epsilon_x) \tan^2 \theta \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서의 주압축 변형률(ϵ_2)을 식 (3)에 대입 후 주압축대 기울기(θ)에 대해 정리하면, 다음의 식 (5)를 유도할 수 있다.

$$\frac{\sigma_1 \epsilon_c'}{f_c'} \cot^4 \theta - \epsilon_x \cot^2 \theta + (\epsilon_1 - \epsilon_x) = 0 \quad (5)$$

따라서, 2차 방정식 형태로 위 식을 풀게 되면, 주압축대 기울기(θ)를 다음으로부터 계산할 수 있다.

$$\cot^2 \theta = \frac{f_c'}{2\sigma_1 \epsilon_c'} \left(\epsilon_x - \sqrt{\epsilon_x^2 - \frac{4\sigma_1 \epsilon_c'}{f_c'} (\epsilon_1 - \epsilon_x)} \right) \quad (6)$$

여기서, 일반적으로 전단경간비가 굉장히 작은 깊은보가 아닌 경우 $0 < \theta \leq 45^\circ$ 이므로, $\sqrt{\quad}$ 앞의 부호는 $-$ 이어야 하며, $\cot \theta > 0$ 이어야 한다.

2.3 HPRC 보 부재 전단 강도 모델

전단 철근이 없는 HPRC 보 부재의 경우, 복부 전단 요소의 주인장 변형률이 HPRC의 최대 인장 응력에 도달한 후 하나의 균열에서 변형이 집중적으로 발생하기 때문에 인장 연화 거동(tension softening behavior)이 시작되는 시점을 일반적으로 최대 전단력이 발휘되거나 전단 파괴가 발생하는 것으로 가정할 수 있다. 다만, Fig. 6에서 보는 바와 같이, 복부 전단 요소 전체에 걸쳐 인장 변형률이 균등하게 분포되지 않으며, 주 사인장 균열 주변에서의 인장 변형률이 상대적으로 크게 된다. 따라서, 이 연구에서는 전단 파괴 시 복부 전단 요소에서의 평균 인장 변형률(ϵ_1)과 HPRC의 최대 인장 응력 도달 시의 인장 변형률(ϵ_{tu})의 관계를 계수 k 를 이용하여 $\epsilon_1 = k\epsilon_{tu}$ 로 표현하였다. 여기서, k 는 기존 문헌(Shin et al., 2015; Lee et al., 2016; Choi et al., 2019)을 참조할 때, 섬유 종류 및 혼입률 등에 따라 달리 설정할 수 있다.

따라서, 전단 철근이 없는 HPRC 보 부재의 전단 파괴 시의 주압축대 기울기는 식(6)에 $\epsilon_1 = k\epsilon_{tu}$ 및 HPRC 최대 인장 응력(σ_{fu})를 대입함으로써 다음으로부터 산정할 수 있다.

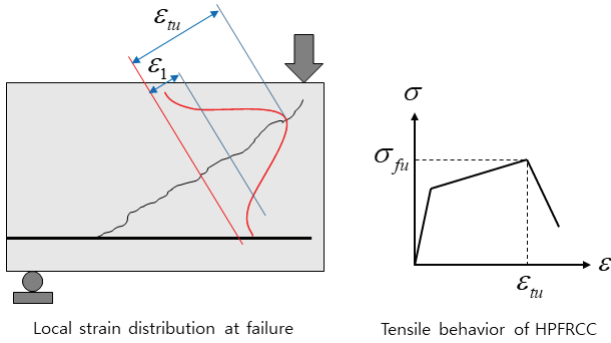


Fig. 6 Relationship between average and local tensile strains

$$\cot^2\theta = \frac{f'_c}{2\sigma_{fu}\varepsilon'_c} \left(\varepsilon_x - \sqrt{\varepsilon_x^2 - \frac{4\sigma_{fu}\varepsilon'_c}{f'_c} (k\varepsilon_{tu} - \varepsilon_x)} \right) \quad (7)$$

여기서, ε_x 는 복부 전단 요소의 종방향 변형률로서 보 부재 단면 중앙 깊이에서의 종방향 변형률로 대체할 수 있다. 이와 관련하여, AASHTO LRFD (2017), CSA A23.3 (2014), CEB-FIP (2013)의 전단설계기준에서는 ε_x 를 휨에 대한 단면 해석으로부터 산정하는 것으로 제안하고 있다. HPFRCC 보 부재의 경우 압축상현재의 변형률이 인장하현재의 변형률에 비해 매우 작기 때문에, 제안 모델에서는 계산의 편의를 위해 주인장 철근 변형률의 절반으로 다음과 같이 간단히 계산하였다.

$$\varepsilon_x = 0.5 \frac{T}{E_s A_s} = 0.5 \frac{M}{E_s A_s z} \quad (8)$$

여기서, E_s 및 A_s 는 각각 주인장 철근의 탄성계수 및 면적, M 은 고려하는 단면에 작용하는 휨 모멘트, a 는 전단 경간의 길이, z 는 M 에 대한 단면 내 모멘트 팔길이를 의미한다.

따라서, 주압축대 기울기(θ)를 주어진 모멘트(M)에 대해 산정할 수 있으며, 주압축대 기울기(θ) 및 HPFRCC 최대 인장 응력(σ_{fu})를 이용해 다음의 식으로부터 최대 전단 강도(v_{ult}) 및 최대 전단력(V_{ult})을 산정할 수 있다.

$$V_{ult} = v_{ult} b_w z = \sigma_{fu} \cot\theta \quad (9)$$

여기서, b_w 는 단면 복부 폭을 의미한다.

한편, 이 연구에서 제안한 전단 강도 모델을 설계에 활용할 경우, 계수하중조합에 의한 M 이 주어지므로 별도의 반복 계산과 정 없이 전단 강도를 바로 계산할 수 있다. 이와 달리, 특정 시험체에 대한 전단 강도 예측 등과 같이 M 이 주어지지 않을 경우, Fig. 7에서와 같이 반복 계산 과정을 통해 전단 강도를 계산할 수 있다.

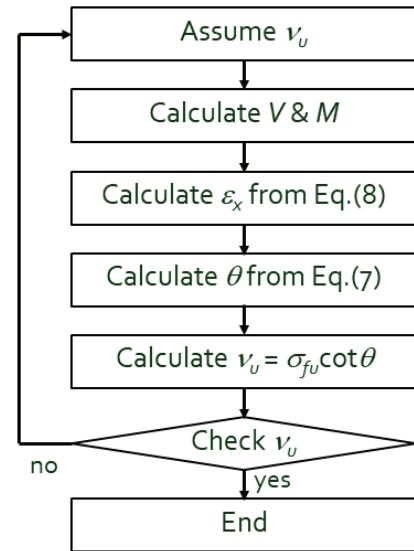


Fig. 7 Algorithm for the shear strength of a HPFRCC beam

즉, 전단 강도를 우선 가정한 후 이로부터 M 및 ε_x 계산 후 주압축대 기울기(θ)를 계산하고, 이로부터 전단 강도를 계산한 후 초기 가정한 전단 강도와 비교함으로써 주어진 HPFRCC 보 부재에 대한 전단 강도를 산정할 수 있다.

3. 제안 모델의 검증

3.1 기존 HPFRCC 보 부재 실험 개요

앞에서 제안한 모델의 검증을 위해, 이 연구에서는 Lee et al. (2015)에 의해 수행된 전단 철근이 없는 HPFRCC 보 부재의 전단 강도 실험 결과를 활용하였다. Lee et al. (2015)은 섬유 종류 및 혼입률, 주인장 철근비, 그리고 전단 경간비를 실험 변수로 총 48개의 시험체에 대해 실험 수행 및 전단 강도를 측정하였다. Fig. 8에 나타난 바와 같이, 모든 시험체는 100×200 mm 직사각형 단면으로 되어 있으며, 주인장 철근으로 주인장 철근비 1.53~3.60%에 해당하는 D16~D25의 철근을 깊이 130 mm에 배근하였다. 또한, 전단 경간을 조정함으로써 2.0~3.5의 전단 경간비가 고려되었다.

시험에서 고려된 HPFRCC 배합비는 W/B=0.6으로서 굵은 골재 없이 모래와 플라이애쉬가 배합수 질량 대비 각각 1.17 및 1.33으로 혼합되었으며, 모든 시험체에 동일하게 적용되었다. 다만, 섬유 혼입에 따른 영향을 검토하기 위해 Table 1에 정리된 바와 같이 3가지의 섬유 혼입률이 고려되었다. 참고로, P1 및 P2의 배합에서는 섬유 길이가 짧은 마이크로 타입의 섬유들만 혼입되었으며, PS 배합에서는 섬유 길이가 상대적으로 긴 매크로 타입 섬유가 함께 혼입되었다. P1, P2, PS 배합

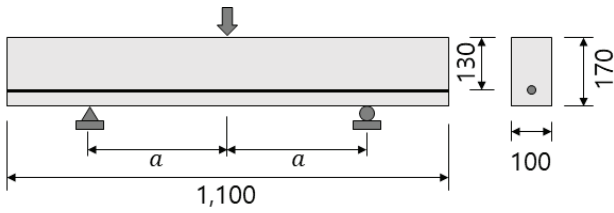


Fig. 8 HPFRCC beams tested by Lee et al. (2015)

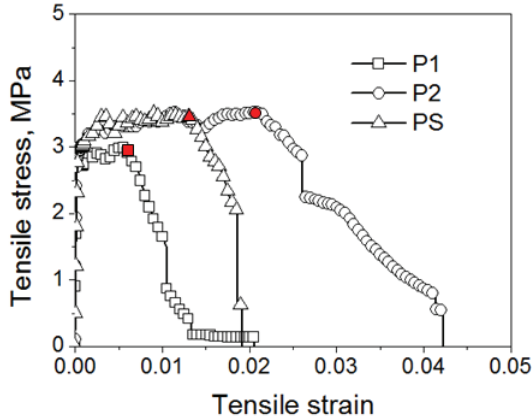


Fig. 9 Tensile behavior of HPFRCC

Table 1 Fiber volumetric ratio in HPFRCC

Fiber type	P1 (%)	P2 (%)	PS (%)
PVA 8 mm (REC15)	1.1	2.3	1.8
Steel 30 mm (RF4000)	-	-	0.5

Table 2 Main characteristics of HPFRCC

HPFRCC	f'_c (MPa)	ϵ'_c	σ_{fu} (MPa)	ϵ_{tu}
P1	42.2	0.0029	2.8	0.007
P2	42.2	0.0034	3.3	0.020
PS	43.0	0.0034	3.3	0.014

에 대한 HPFRCC의 압축강도는 각각 42.2, 42.2, 43.0 MPa이었다. 각각의 배합에 대한 인장 거동은 직접 인장 실험을 통해 측정되었으며, 실험으로부터 측정된 인장 응력-변형률 거동을 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 정리된 바와 같이, 인장경화현상이 뚜렷하게 나타났으며, 그림에서 빨간색 점으로 표시된 최대 인장 응력 시 변형률은 P1, P2, PS 배합에 대해 각각 0.007, 0.020, 0.014로 측정되었다.

한편, HPFRCC 각 배합에 대한 압축 및 인장 거동에서의 주요 재료 물성치를 Table 2에 정리하였다.

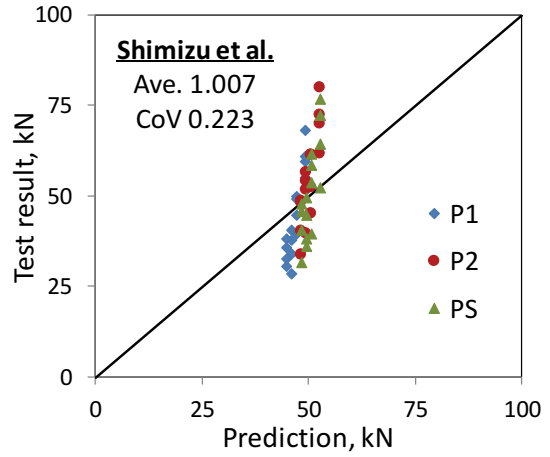
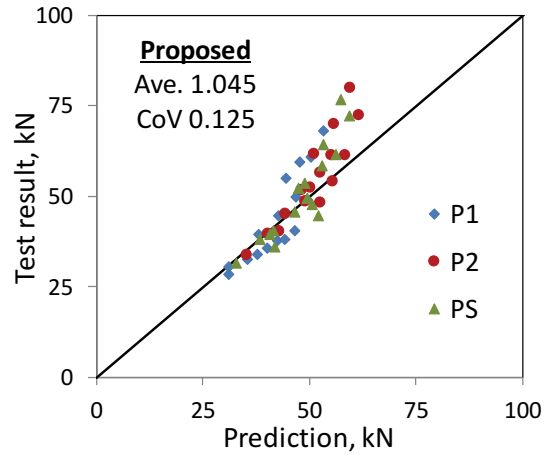


Fig. 10 Comparison of the predictions with the test results on the ultimate shear force

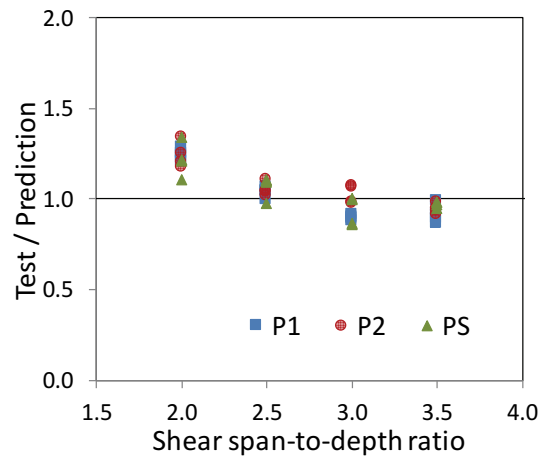
3.2 실험 결과와의 비교 및 검증

전단 철근이 없는 HPFRCC 보 부재에 대해 제안 모델을 통해 전단 강도를 예측하였으며, 예측한 결과를 실험 결과와 함께 Table 3 및 Fig. 10에 정리하였으며, Fig. 10에서는 기존 모델인 Shimizu et al.(2004)와 함께 비교하였다. 참고로, HPFRCC 보 부재 전단 강도 예측 시 직접 인장 실험으로부터 측정된 최대 인장 응력에 상응하는 인장 변형률과 전단 파괴 시 복부 전단 요소의 평균 주인장 변형률의 관계를 의미하는 계수 k 를 P1, P2, 그리고 PS 배합에 대해 각각 0.50, 0.20, 그리고 0.25로 가정하였다. 참고로, 다중 분산 균열이 발생하는 경우 섬유 혼입물 및 섬유 형상비(섬유 길이/단면 직경)가 증가할수록 국부와 평균 변형률의 차이가 커지는 것으로 보고된 바 있으며(Deluce et al., 2014; Lee et al., 2016), 이는 섬유 혼입물 및 섬유 형상비가 증가할수록 k 가 증가하는 것을 의미한다. 따라서 이 연구에서는 이러한 경향을 고려하여 계수 k 를 설정하였다.

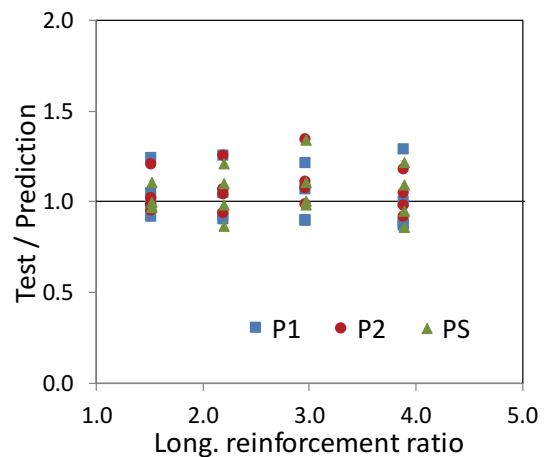
표 및 그림에서 보는 바와 같이 전단 강도에 대한 실험/예측값의 비가 전체 48개의 부재에 대해 평균 1.045, 변동계수

Table 3 Comparison between the test results and predictions on the shear strength of HPFRCC beams

HPFRCC	ρ_s (%)	a/d	$V_{u,test}$	$V_{u,pred}$	$V_{u,test}/V_{u,pred}$
P1	1.528	2.0	55.1	44.5	1.237
		2.5	39.8	38.1	1.043
		3.0	28.5	31.1	0.917
		3.5	30.7	31.1	0.986
	2.204	2.0	59.7	47.7	1.253
		2.5	44.8	42.8	1.046
		3.0	34.1	37.8	0.901
	2.978	2.0	61.0	50.3	1.213
		2.5	50.0	46.8	1.067
		3.0	37.9	42.6	0.890
	3.898	3.5	35.9	40.2	0.893
		2.0	68.3	53.2	1.285
2.5		49.2	49.6	0.993	
P2	1.528	3.0	40.7	46.5	0.877
		3.5	38.2	44.1	0.865
		2.0	61.8	51.4	1.203
2.204	2.5	45.2	44.5	1.016	
	3.0	39.6	40.3	0.982	
	3.5	33.7	35.5	0.950	
2.978	2.0	70.0	55.8	1.254	
	2.5	52.3	50.5	1.036	
	3.0	51.5	48.3	1.066	
3.898	3.5	40.3	43.0	0.936	
	2.0	79.8	59.6	1.340	
	2.5	61.4	55.5	1.108	
P3	1.528	3.0	56.4	52.7	1.072
		3.5	48.5	49.3	0.984
		2.0	72.3	61.6	1.173
2.204	2.5	61.3	58.5	1.047	
	3.0	54.1	55.6	0.972	
	3.5	48.3	52.8	0.914	
2.978	2.0	52.4	47.4	1.105	
	2.5	39.7	40.8	0.973	
	3.0	38.3	38.4	0.997	
3.898	3.5	31.9	33.0	0.966	
	2.0	64.3	53.2	1.210	
	2.5	53.8	49.1	1.098	
PS	1.528	3.0	36.2	41.9	0.864
		3.5	40.8	41.6	0.981
		2.0	76.9	57.3	1.341
2.204	2.5	58.6	53.1	1.105	
	3.0	49.5	49.4	1.002	
	3.5	45.7	46.7	0.980	
2.978	2.0	72.5	59.4	1.219	
	2.5	61.6	56.3	1.094	
	3.0	44.9	52.2	0.859	
3.898	3.5	47.8	50.6	0.945	
	Average				1.045
	CoV				0.125



(a) Shear span-to-depth ratio



(b) Longitudinal reinforcement ratio

Fig. 11 Effect of main parameters on the shear strength prediction with the proposed model

(Coefficient of Variation, CoV)가 0.125로서, 제안된 모델이 실제 실험에서 측정된 HPFRCC 보 부재의 전단 강도를 비교적 정확히 잘 예측하는 것으로 나타났다. 또한, 각각의 HPFRCC 배합에 대한 실험/예측값의 비에 대한 평균(변동계수)이 P1, P2, 그리고 PS에 대해 각각 1.024(0.139), 1.066(0.110), 1.046(0.122)로서 크게 다르지 않아, HPFRCC 배합에 따른 인장 거동의 특성을 전단 강도 산정 시 제안 모델이 합리적으로 고려한 것으로 판단된다. 한편, 그림에서 비교된 바와 같이 기존 모델인 Shimizu et al.(2004)는 전단 강도 예측에서 평균이 1.007로 나왔으나, 주요 변수들의 영향을 합리적으로 고려하지 않아 CoV가 0.223으로 크게 나타나, HPFRCC 보 부재의 전단 강도를 합리적으로 예측하지 않는 것으로 확인되었다.

HPFRCC 보 부재의 전단 강도 예측에 있어 주요 변수의 영향들을 분석하기 위해, 전단 강도에 대한 실험/예측값의 비율

을 전단경간비와 주인장 철근비의 변화에 따라 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 전반적으로 전단경간비 및 주인장 철근비의 변화에 관계없이 제안 모델이 HPFRCC 보 부재의 전단 강도를 비교적 합리적으로 예측하는 것으로 나타났다. 다만, 전단경간비가 2인 부재들에 대해 제안 모델에서 예측한 전단 강도가 실험에서 측정된 전단 강도에 비해 다소 작은 것으로 나타났다. 이는 전단경간비가 작은 보 부재에서 발생하는 아치 효과에 의한 것으로 판단된다. 참고로, 아치 효과가 클수록 보에 작용하는 집중하중이 복부 전단 요소의 전단응력으로 작용하지 않고 지점부로 바로 전달되는 경향이 증가하게 되며, 이에 따라 전단경간비가 작을 경우 아치 효과에 의해 전단강도가 상당히 증가하는 것으로 알려지고 있다 (Kim et al., 1988; Lee et al., 2010a; Kim and Jeong, 2011). 또한, Eurocode 2 (2004) 및 도로교설계기준(한계상태설계법, 2015)에서는 아치 효과를 보수적으로 고려하여 전단경간비가 2.0 이하인 경우 전단경간비가 작을수록 전단경간비에 따라 전단강도를 증가시킬 수 있는 것으로 제시하고 있다. 따라서, 향후 이 연구에서 제안한 모델에 아치 효과를 추가로 고려할 경우 전단경간비가 작은 HPFRCC 보 부재에 대해서도 전단 강도를 합리적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 논문에서는 전단 철근이 없는 HPFRCC 보 부재의 전단 강도를 합리적으로 예측하기 위한 모델을 개발하였다. 모델을 개발하기 위해 HPFRCC 보 부재를 휨 모멘트에 저항하는 상·하현재와 전단력에 저항하는 복부 전단 요소로 간단히 이상화하였다. 이후 HPFRCC의 인장 거동 특성을 바탕으로 전단 파괴 시 복부 전단 요소의 주압축대 기울기 및 전단 응력을 산정하였으며, 이로부터 HPFRCC 보 부재의 전단 강도를 산정할 수 있는 모델을 제안하였다. 제안 모델은 실험에서 측정된 전단 강도와 비교를 통해 검증하였다. 이 연구에서 확인된 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 제안 모델을 바탕으로 총 48개의 전단 철근이 없는 HPFRCC 보 부재의 전단 강도를 예측한 결과, 전단 강도에 대한 실험/예측값의 비가 평균 1.045, 변동계수 0.125로서, 제안 모델이 실제 HPFRCC 보 부재의 전단 강도를 매우 합리적으로 예측하는 것으로 나타났다.
- (2) HPFRCC 보 부재의 전단 강도에 큰 영향을 미치는 주요 변수인 전단경간비 및 주인장 철근비의 변화와 관계없이, 제안 모델이 실험에서 측정된 HPFRCC 보 부재의 전단 강도를 대부분 일관되게 잘 예측하는 것으로

나타났다.

- (3) 전단경간비가 2인 HPFRCC 보 부재의 경우 아치 효과로 인해 실험에서 측정된 전단 강도가 제안 모델에 의해 예측된 전단 강도보다 10.5~34.1% 정도 큰 것으로 나타났다. 따라서, 향후 제안 모델에 아치 효과를 추가로 고려할 경우 HPFRCC 보 부재의 전단 강도를 보다 합리적으로 예측 가능할 것으로 판단된다.
- (4) HPFRCC 보 부재의 전단 강도 예측 시, 이 연구에서는 최대 전단 강도 도달 시 복부 전단 요소의 평균 주인장 변형률과 HPFRCC 직접 인장 실험에서 측정된 최대 인장 응력에 상응하는 인장 변형률의 관계를 단순히 가정하였다. 향후 전체 거동에서의 평균 변형률과 국부 변형률 사이의 관계를 규명하는 추가 연구가 이루어질 경우 제안 모델을 보다 합리적으로 개선할 수 있을 것으로 판단된다.
- (5) 이 연구에서 제안한 모델을 바탕으로 HPFRCC 보 부재의 전단 강도를 합리적으로 산정할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, HPFRCC가 적용되는 부재 또는 구조물 관련 연구 및 설계에 제안 모델이 유용할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 충남대학교에 의해 지원되었음.

References

1. AASHTO (2017), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 8th ed. Washington, DC: AASHTO.
2. CAN/CSA-A23.3-14 (2014), Design of Concrete Structures, Rexdale: Canadian Standards Association.
3. CEB-FIP (2013), CEB-FIP Model Code 2010, International Federation for Structural Concrete (fib), Ernst & Sohn.
4. Choi, S.-W., Choi, J., Lee, S.-C. (2019), Probabilistic Analysis for Strain-Hardening Behavior of High-Performance Fiber-Reinforced Concrete, *Materials*, 12(15), 2399.
5. Deluce, J., Lee, S.-C., Vecchio, F.-J. (2014), Crack Model for Steel Fiber-Reinforced Concrete Members Containing Conventional Reinforcement, *ACI Structural Journal*, 111(1), 93-102.
6. Eurocode 2 (2004), Design of Concrete Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
7. Jude, E. O., Oh, C.-H., 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(3), 301-313.

8. Kim, D.-J., Kim, W., White, R. N. (1998), Prediction of Reinforcement Tension Produced by Arch Action in RC Beams, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 124(6), 611-622.
9. Kim, W., Jeong, J.-P. (2011), Decoupling of Arch Action in Shear-Critical Reinforced Concrete Beam, *ACI Structural Journal*, 108(4), 395-404.
10. Korea Institute of Bridge and Structural Engineers & Korea Bridge Design and Engineering Research Center (2015), Manual of Korea Bridge Design Code (Limit State Design Method), Korea, Kimoonang Publishing Company (in Korean).
11. Lee, S.-C., Cho, J.-Y., Oh, B.-H. (2010a), Shear Behavior of Large-Scale Post-Tensioned Girders with Small Shear Span-Depth Ratio, *ACI Structural Journal*, 107(2), 137-145.
12. Lee, S.-C., Kim, H.-B., Joh, C. (2017), Inverse Analysis of UHPFRC Beams with a Notch to Evaluate Tensile Behavior, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 1-10.
13. Lee, S.-C., Kim, J.-H., Cho, J.-Y., Shin, K.-J. (2010b), Tension Stiffening of Reinforced High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC), *KCI Journal*, 22(6), 859-866 (in Korean).
14. Lee, S.-C., Song, T.-H., Shin, K.-J. (2015), Shear Strength of HPFRCC Beams with Longitudinal Reinforcement, *Materials Research Innovations*, 19(S8), 277-280.
15. Lee, S.-C., Oh, J.-H., Cho, J.-Y. (2016), Fiber Efficiency in SFRC Members Subjected to Uniaxial Tension, *Construction and Building Materials*, 113, 479-487.
16. Naaman, A. E., Reinhardt, H. W. (1995), Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites - HPFRCC, in *Proceedings of HPFRCC 2*, 1-23.
17. Shimizu, K., Kanakubo, T., Kanda, T., Nagai, S. (2004), Shear Behavior of Steel Reinforced PVA-ECC Beams, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.G., Canada.
18. Shin, K.-J., Jang, K.-H., Choi, Y.-C., Lee, S.-C. (2015), Flexural Behavior of HPFRCC Members with Inhomogeneous Material Properties, *Materials*, 8, 1934-1950.
19. Shin, K.-J., Kim, J.-H., Cho, J.-Y., Lee, S.-C. (2011), Flexural Behavior of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC) Beam with a Reinforcing Bar, *KCI Journal*, 23(2), 169-176 (in Korean).
20. Shin, K.-J., Lee, S.-C., Kim, Y.-Y. (2019), High Ductile Fiber Reinforced Concrete with Micro Fibers, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(2), 92-98 (in Korean).
21. Vecchio, F. J., Collins, M. P. (1986), The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, *ACI Journal*, 83(2), 219-231.
22. Vecchio, F. J., Collins, M. P. (1988), Predicting the Response of Reinforced Concrete Beams Subjected to Shear Using the Modified Compression Field Theory, *ACI Structural Journal*, 85(3), 258-268.
23. Vecchio, F. J., Collins, M. P. (1993), Compression Response of Cracked Reinforced Concrete, *Journal of Structural Engineering*, ASCE., 119(12), 3590-3610.
24. Yuh, O.-K., Bae, B.-I. (2019), Evaluation of Flexural Strength and Ductility of Hybrid Fiber Reinforced UHSC Flexural Members, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(6), 61-69 (in Korean).

Received : 02/27/2020

Revised : 04/17/2020

Accepted : 04/23/2020

요 지 : 최근 HPFRCC의 구조 거동에 대한 연구가 많이 이루어져 왔으나, 휨 거동에 대한 연구가 주로 수행된 반면, 전단 거동에 대한 연구는 많이 부족한 상황이다. 이 연구에서는 전단 철근이 없는 HPFRCC 보 부재의 전단 강도를 합리적으로 예측할 수 있는 모델을 개발하였다. 모델을 개발하기 위해 HPFRCC 보 부재를 휨 모멘트에 저항하는 상-하현재와 전단력에 저항하는 복부 전단 요소로 간단히 이상화하였다. 이후 HPFRCC의 인장 거동 특성을 바탕으로 전단 파괴 시 복부 전단 요소의 주압축대 기울기 및 전단 응력을 산정하였으며, 이로부터 HPFRCC 보 부재의 전단 강도를 산정할 수 있는 모델을 제안하였다. 제안 모델의 검증에 위해 기존의 전단 파괴된 48개의 HPFRCC 보 부재의 실험 결과와 비교하였다. 실험과 비교한 결과, 제안 모델이 실제 전단 강도를 평균 1.045, 변동계수 0.125로서 상당히 합리적으로 예측하는 것으로 나타났다. 이 연구의 주요 내용은 향후 HPFRCC가 적용되는 부재 또는 구조물에 대한 관련 연구 및 설계에 유용할 것으로 기대된다.

핵심용어 : HPFRCC, 전단, 전단 강도, 주압축대 기울기, 사인장 균열각
