



크기효과를 고려한 강섬유 콘크리트 보의 전단강도 분석

오경수¹⁾ · 손동희²⁾ · 최현기³⁾ · 배백일⁴⁾ · 최창식^{5)*}

¹⁾한양대학교 건축공학과 대학원생 ²⁾한양대학교 산업과학연구소 박사후연구원 ³⁾경남대학교 소방안전공학과 교수
⁴⁾한양사이버대학교 디지털건축도시공학과 교수 ⁵⁾한양대학교 건축공학부 교수

Shear Strength Analysis of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrups Considering Size Effect

Gyeong-Su Oh,¹⁾ Dong-Hee Son,²⁾ Hyun-Ki Choi,³⁾ Baek-Il Bae,⁴⁾ and Chang-Sik Choi^{5)*}

¹⁾Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Rep. of Korea

²⁾Postdoctoral Researcher, The Research Institute of Industrial Science, Hanyang University, Seoul 04763, Rep. of Korea

³⁾Professor, Department of Fire Safety Engineering, Kyungnam University, Changwon 51767, Rep. of Korea

⁴⁾Professor, Department of Digital Architectural and Urban Engineering, Hanyang Cyber University, Seoul 04763, Rep. of Korea

⁵⁾Professor, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Rep. of Korea

ABSTRACT This study experimentally compares the shear strength and size effect of plain concrete (PC) beams and steel fiber-reinforced concrete (SFRC) beams without shear reinforcement. Beam specimens with heights of 350, 650, and 950 mm were fabricated, and steel fiber volume ratios were set at 0 % and 1 %. The experimental results indicated that SFRC beams exhibited higher shear strength compared to PC beams, and the reduction in shear strength due to size increase was relatively lower. This was attributed to the bridging effect of steel fibers across crack faces, effectively controlling crack propagation. However, current design standards do not adequately reflect the enhanced shear strength and reduced size effect provided by steel fibers. Therefore, there is a need for a new shear strength formulation that properly accounts for the size effect in SFRC beams.

Keywords : reinforced concrete beam, shear strength, size effect, steel fiber

1. 서 론

건축 기술 발전에 따라 구조물의 장경간화 및 초고층화가 진 행되면서 대형 구조 부재의 사용이 증가하였다. 이러한 추세는 부재의 크기를 자연스럽게 증가시켜, 크기효과(size effect)에 의한 전단강도의 감소라는 중요한 공학적 문제를 야기하고 있다.

Bazant and Kim(1984)은 넓은 균열 발생 시 콘크리트 내 잔 류 인장응력의 감소와 골재 맞물림 작용에 의한 콘크리트 전단 기여분의 감소로 인해 콘크리트와 같은 취성 재료에서 크기효과 가 증대된다고 설명했다. 이를 기반으로 최근 ACI 318-19(2019) 에서는 전단보강되지 않은 철근콘크리트 보의 전단강도 산정 시 크기효과의 영향을 반영하여 대형보에 대한 전단강도를 감소시 키고 있다.

크기효과를 저감하기 위해서는 균열 사이의 잔류인장응력을

증가시키고 골재의 맞물림 작용에 의한 콘크리트 전단 기여분을 향상시킬 필요가 있다. 강섬유는 취성적 재료인 콘크리트 내부 에서 균열의 발생과 확산을 균열면에서의 가교작용(bridging effect)으로 제어하며 전체 구조의 연성과 내구성을 향상시킨다. 또한 콘크리트 자체의 인장 및 휨강도를 증가시켜 구조물에 더 큰 하중을 견딜 수 있는 능력을 부여하며, 강섬유의 무작위 분포 는 콘크리트 매트릭스 내에서 응력을 보다 균일하게 분산시키는 데 도움을 준다. 이에 따라 철근콘크리트 보에 강섬유를 혼입함 으로서 크기효과의 저감을 기대할 수 있다.

그러나 많은 연구가 진행되었음에도 불구하고, 높이가 600 mm 이상인 전단철근이 없는 강섬유 콘크리트(steel fiber-reinforced concrete, SFRC)에 대한 실험은 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 전체 연구 데이터 대비 약 10 %에 불과한 실정이다. 이로 인해 KDS 14 20 22(2021) 및 ACI 318-19에서는 강섬유 혼입을 통해 최소 전단철근을 배치하지 않을 수 있는 보의 최대 높이를 600 mm로 제한하고 있다. 기존 연구를 바탕으로 강섬유 콘크리트는 최소 전단철근의 대체와 더불어 크기효과 저감 또한 가능할 것으로 보이나 높이 600 mm 이상의 대형보에 적용하기

*Corresponding author E-mail : ccs5530@hanyang.ac.kr

Received June 18, 2024, Revised July 12, 2024,

Accepted July 19, 2024

©2024 by Korea Concrete Institute

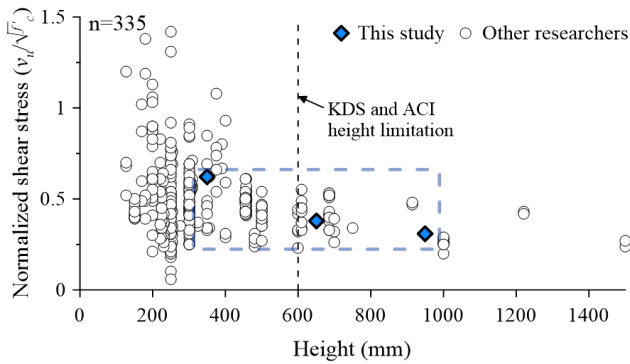


Fig. 1 Database for steel fiber-reinforced beams without stirrups specimens

위해서는 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 높이 350 mm에서 최대 950 mm에 이르는 세 가지 크기의 보 실험체를 제작하였고 강섬유 혼입 여부를 변수로 설정하여 일반 콘크리트(plain concrete, PC)와 SFRC 보의 전단강도를 비교 분석하였다. 이를 통해 SFRC 보의 크기 증가에 따른 크기효과의 저감 정도를 평가하고자 하며, 국내외의 현행 설계기준이 제공하는 설계강도 예측식의 적절성을 평가하고자 한다. 각국의 설계기준은 KDS 14 20 22, ACI 318-19, Eurocode 2(2005)로 제한하였으며, 설계기준식의 적용성 평가에 대한 신뢰성 확보를 위해 본 연구에서 수행된 실험 결과와 함께 기존 연구 결과에서 수행된 실험 결과를 사용하였다.

2. 현행 설계기준

현재 전단보강이 없는 보에 대한 전단설계기준을 Table 1에 정리하였다. 각국의 기준은 크기효과를 고려하는 방식에서 차이를 보인다. KDS 14 20 22는 전단강도 계산식에서 크기효과에 대한 특정 계수를 제공하지 않으며 전단력에 대한 크기효과를 고려하지 않는다. 반면 ACI 318-19와 Eurocode 2는 크기효과를 고려하기 위해 계수를 포함하여 보의 크기에 따라 전단강도를 조정하는 방식을 채택하고 있다. ACI 318-19의 경우 $\lambda_s =$

$\sqrt{2/(1+0.004d)} \leq 1$ 의 크기효과 계수를, Eurocode 2의 경우 $k_s = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2$ 의 크기효과 계수를 고려하여 보의 유효깊이(d)가 증가함에 따라 일정 유효깊이 이상에서 전단강도를 저감하는 방식으로 크기효과를 반영한다.

또한 KDS 14 20 22와 ACI 318-19에서는 SFRC 보에 대해 최소 전단철근 면적 조건으로 보의 높이를 600 mm 이하로 제한하고 있다. 이는 SFRC가 최소 전단철근을 대체 할 수 있다는 것을 시사하지만, 연구결과의 부족으로 인해 높이 600 mm 이상의 대형보에 대한 설계 적용 범위를 확장하지 못하고 있음을 나타낸다. 따라서 더 큰 크기에서의 강섬유 혼입 효과를 평가할 필요성을 나타낸다.

2.1 실험 변수

본 연구에서는 전단철근이 없는 보에 대해 일반 콘크리트(plain concrete, PC)와 SFRC의 전단강도를 비교하였다. ACI 544.1R-96(2002)에 따르면 강섬유 혼입률이 1.5에서 2 %를 초과할 시 콘크리트의 뭉침 현상이 발생할 수 있다고 명시되어 있다. 이 비율은 강섬유의 부피비(volume fraction)를 의미하며 이는 초기 콘크리트의 혼합과 배치 과정에서 실질적으로 현장 적용 가능한 최대 강섬유 혼입량을 나타낸다. 또한 Dinh(2009)의 연구에 따르면 강섬유 혼입률이 1.5 %를 초과할 경우 전단강도의 증가가 상대적으로 감소한 것을 확인했다. 또한 Parra-Montesinos(2006), Kwak et al.(2002) 및 Dinh et al.(2010)의 연구에 따르면 유효깊이가 300 mm 이하인 SFRC 보에서 유의미한 크기효과가 나타나지 않았음을 확인하였고 Minelli and Plizzari(2010)의 연구에서 유효깊이가 940~1,440 mm의 시편 또한 유의미한 크기효과의 증가가 나타나지 않음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 주요 변수를 강섬유의 혼입 여부(0 % 및 1 %)와 유효깊이 275, 575, 875 mm로 설정하였다.

2.2 실험체 제작

SSFRC와 PC 보의 유효깊이에 따른 전단강도를 비교하기 위하여 실험체의 크기를 앞서 변수 설정에 따라 300×350×3,600, 300×650×5,000, 300×950×6,700 mm의 세 가지 크기로 제

Table 1 Shear strength equations of three design codes

Design code	Design codes for beams without shear reinforcement	Size effect factor
KDS 14 20 22	$V_c = 1/6\lambda\sqrt{f'_c}b_wd$ *simplified $V_c = \left(0.16\lambda\sqrt{f'_c} + 17.6\rho\frac{V_u d}{M_u}\right)b_wd$	—
ACI 318-19	$V_c = \left\{0.66\lambda_s\lambda(\rho)^{1/3}\sqrt{f'_c} + \frac{N_u}{6A_g}\right\}b_wd$	$\lambda_s = \sqrt{\frac{2}{1+0.004d}} \leq 1$
Eurocode 2	$V_c = \left\{\frac{0.18}{\gamma_c}k_s(100\rho f'_c)^{1/3} + 0.15\sigma_{cp}\right\}b_wd$	$k_s = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$

Notes: ρ_w : longitudinal reinforcement ratio; M_u : factored moment at the section; f'_c : compressive strength of concrete, d : effective depth of the member; V_u : factored shear force at a section; b_w : width of the web; N_u : axial load; A_g : gross cross-sectional area of the member; λ_s : size effect factor; k_s : size effect coefficient; σ_{cp} : compressive stress of the cross-section

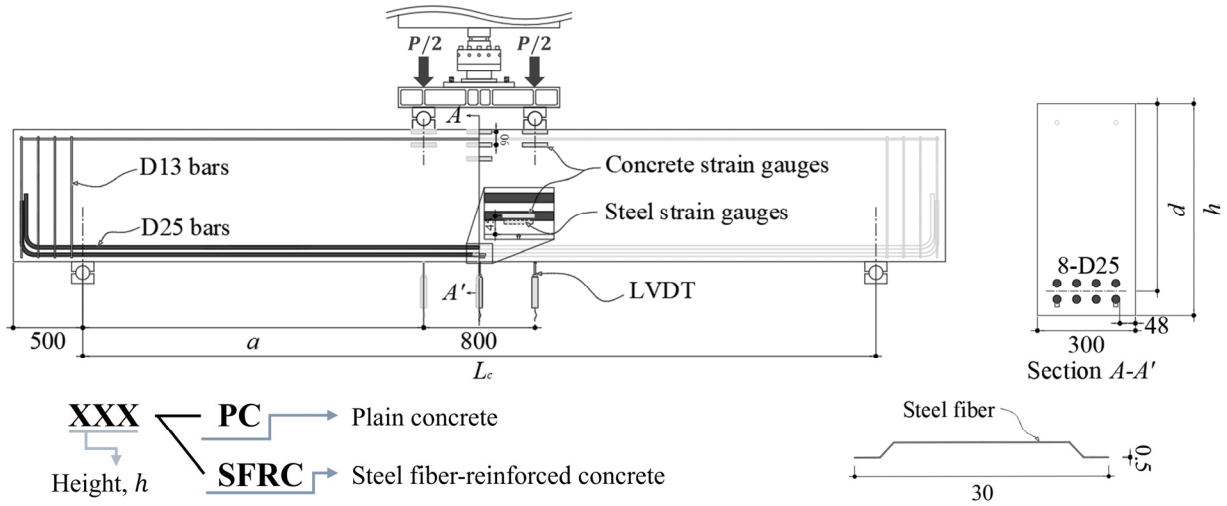


Fig. 2 Details of geometry and test setup (unit: mm)

Table 2 Experimental variables

Specimen	f_{ck} (MPa)	b_w (mm)	V_f (%)	d (mm)	h (mm)	L_c (mm)	a (mm)
350-PC	40	300	0	275	350	2,600	900
350-SFRC			1				
650-PC			0	575	650	4,000	1,600
650-SFRC			1				
950-PC			0	875	950	5,700	2,450
950-SFRC			1				

Notes: f_{ck} : characteristic compressive strength; b_w : beam width; V_f : volume fraction ratio of steel fiber; d : effective depth; h : beam height; L_c : distance between support points; a : shear span

작하였고 이를 Table 2에 정리하였다. 크기별 강섬유 혼입 여부를 변수로 설정하여 총 6개의 보가 제작되었으며 실험체명의 앞부분은 보의 높이(h)를 나타내며, 뒷부분은 강섬유 혼입 여부에 따라 PC ($V_f=0$ %)와 SFRC ($V_f=1$ %)로 나타내었다. 인장철근은 양단의 갈고리를 통하여 정착하였으며, 제작에 사용한 콘크리트는 KS F 4009(KATS 2022)에 의거한 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고 배합비를 Table 3에 나타내었다. SFRC에 사용한 강섬유의 제원은 Table 4에 나타내었다. 또한 콘크리트의 재료 시험을 위해 SFRC와 PC를 KS F 2403(KATS 2019)에 따른 $\emptyset 100 \times 200$ mm의 원주형 공시체와 ASTM C 1609(2007)에 따른 $100 \times 100 \times 400$ mm의 무근콘크리트 보 형태의 공시체를 제작하여 실험체와 동일한 조건에서 양생하였다.

2.3 가력 및 측정계획

전단강도를 비교 평가하기 위하여 Fig. 2와 같이 4점 가력 실험을 수행하였다. 가력 지점은 보의 중앙에서 양측으로 400 mm 인 지점으로 설정하였으며, 지지점은 실험체 양단에서 500 mm 떨어진 지점으로 설정하였다. 2,000 kN 용량의 만능재료시험기 (universal testing machine, UTM)를 사용하여 0.004 mm/s

Table 3 Mixture proportions of concrete

Specified strength (MPa)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad
40	30.1	42.8	164	463	693	927	4.4

Notes: W/C: water-cement ratio; S/a: sand-aggregate ratio; W: water; C: cement; S: sand; G: gravel; Ad: high-range water-reducing admixture

Table 4 Material properties of steel fiber

Fiber type	d_f (mm)	l_f (mm)	l_f/d_f	Density (kg/m ³)
Hooked-end	0.5	30	60	7,850

Notes: d_f : fiber diameter; l_f : fiber length

변위제어로 가력을 진행하였다. 또한 인장철근의 항복 여부를 확인하기 위해 인장철근 중앙에 철근용 변형률 게이지를 부착하였고 실험체 중앙 하부의 선형 가변 변위 변환기(linear variable displacement transducer, LVDT)를 기준으로 2 mm마다 가력을 중지한 뒤 균열을 확인하였다.

Table 5 Summary of compressive and flexural test results

Concrete type	V_f (%)	f_{ck} (MPa)	f'_c (MPa)	f_{sp} (MPa)	P_{max} (kN)	P_1 (kN)	f_b (MPa)	f_1 (MPa)	f_{300}^D (MPa)	f_{150}^D (MPa)	f_{300}^D/f_b (%)	f_{150}^D/f_b (%)
PC	0	40	48.14	3.43	7.47	7.47	4.57	4.57	—	—	—	—
SFRC	1		36.42	3.74	12.12	11.84	7.42	7.25	6.66	5.38	93	76

Notes: V_f : fiber volume fraction; f_{ck} : characteristic compressive strength; f'_c : measured compressive strength; f_{sp} : splitting tensile strength, P_{max} : peak load, P_1 : first-peak load, f_b : flexural strength at P_{max} , f_1 : flexural strength at P_1 , f_{300}^D : residual strength at net deflection of $L/300$, f_{150}^D : residual strength at net deflection of $L/150$

2.4 재료시험

KS F 2405와 KS F 2423을 따라 원주형 콘크리트 공시체의 압축 및 쪼갬 인장 강도 시험을 수행하였으며 KS F 2408 및 ASTM C 1609(2007)에 따라 무근콘크리트 보 공시체의 휨 강도 시험을 수행하였다. 모든 시험은 UTM을 사용하여 가력하였고 그 결과를 Table 5에 나타내었다.

SFRC 공시체의 압축 강도는 36.42 MPa로 PC 공시체에 비하여 약 24 % 감소하였는데 이는 강섬유의 가교작용이 인장상태에서는 그 기능이 발휘되지만 압축상태에서는 오히려 떨어진 작업성으로 인한 공극 발생으로 인해 균열이 발생하여 압축강도가 더욱 낮아진 것으로 판단된다. 반면, 쪼갬 인장 강도는 3.74 MPa로 PC 공시체에 비하여 약 10 % 증가하였다.

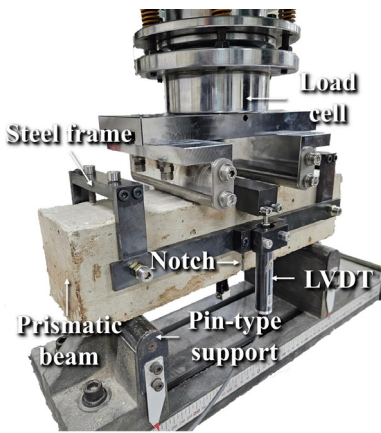


Fig. 3 Four-point bending test setup

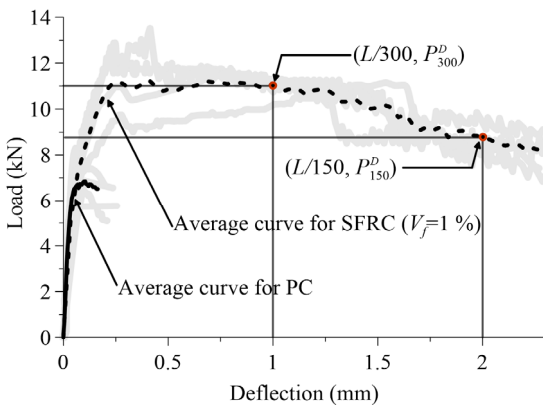


Fig. 4 Four-point bending test results

Table 6 Test results of reinforcing steel material strength

Rebar	f_y (MPa)	f_{ym} (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_y (mm/mm)
D25	SD500	594.34	730.45	0.00297

Notes: f_y : nominal yield stress; f_{ym} : measured yield stress; f_u : tensile stress; ϵ_y : yield strain

휨 강도 시험은 무근콘크리트 보를 제작하여 수행하였으며 Fig. 3과 같이 공시체의 중앙 하단부에 30 mm의 노치(notch)를 내어 중앙부의 파괴를 유도하였다. 또한 특수 제작된 철제 프레임(steel frame)을 장착 후 양쪽에 LVDT를 설치한 뒤, UTM으로 4점 가력하여 무근콘크리트 보 공시체의 성능을 평가하였다.

휨 강도 시험 결과 SFRC 공시체는 PC 공시체에 비하여 약 53 % 증가하였다. ACI 318-19에서는 강섬유 콘크리트 사용 하기 위해 처짐 $L/300$ (=1 mm), $L/150$ (=2 mm)일 때의 강도가 첫 번째 피크 지점 강도의 90, 75 %를 충족하도록 규정하고 있다. Fig. 4와 같이 SFRC 무근콘크리트 보 공시체는 시험 결과 위 기준을 각 처짐별 93, 76%로 충족하였다. 또한 인장철근의 기계적 특성 평가를 위하여 KS B 0802(KATS 2018)를 따라 인장 강도 시험을 수행한 결과, D25 인장철근의 항복강도는 594.3 MPa이며 그 결과를 Table 6에 정리하였다.

3. 실험 결과 분석

3.1 하중-처짐 관계

실험을 통한 PC와 SFRC 보의 하중-처짐 관계에 대한 실험 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 모든 실험체는 최대 하중의 경험과 함께 파괴에 이르렀으며, 연성 거동을 하지 않는 것으로 나타났다. PC 실험체의 전단강도 대비 SFRC 실험체의 전단강도는 높이가 증가함에 따라 75 %, 102 %, 169%로 모든 높이에서 SFRC 실험체가 PC 실험체보다 높은 최대 전단강도를 보였다.

Fig. 6에는 각 실험체의 전단강도를 나타내었으며 실험체의 크기 및 강섬유의 전단강도에 대한 효과를 나타내었다. 높이 950 mm 실험체를 650 mm 실험체와 비교했을 때 PC 실험체는 크기효과로 인하여 전단강도가 6 % 감소한 반면, SFRC 실험체는 25.4 % 증가하였다. 또한 SFRC 실험체의 경우 높이가 증가함에 따라 한 단계 낮은 크기의 실험체의 전단강도 대비 26.9 %, 25.4 %의 균일한 강도 증가율을 보였다.

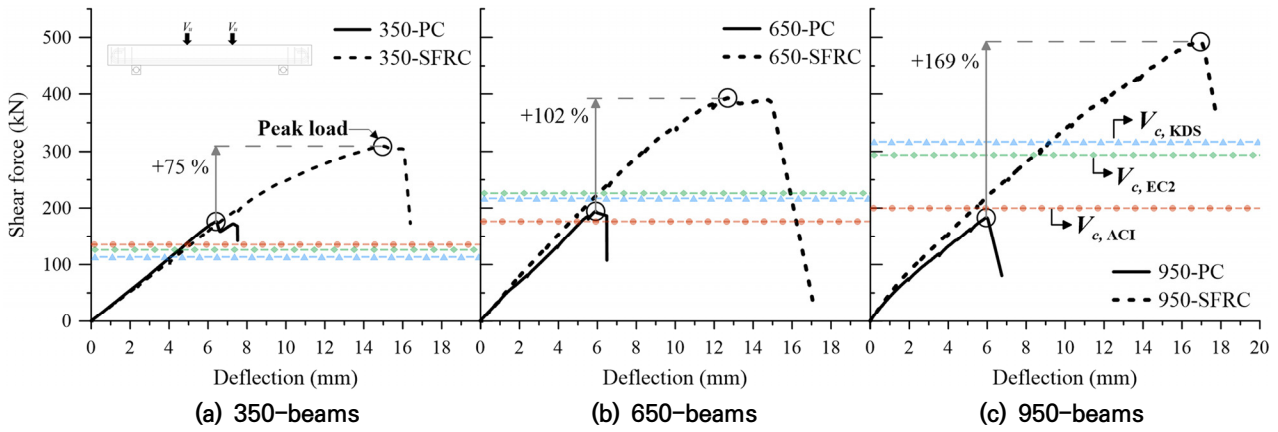


Fig. 5 Shear strength and deflection curves of different beam types

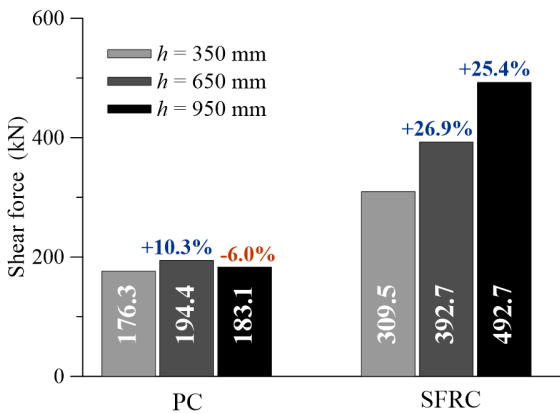


Fig. 6 Shear strength by height: PC vs. SFRC

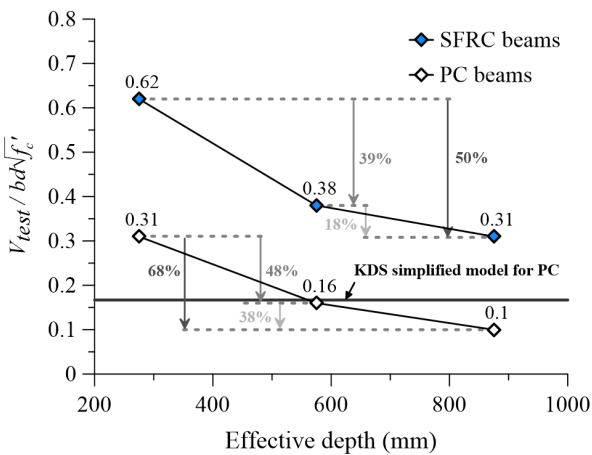


Fig. 7 Normalized shear stress-effective depth relationship

또한 각국의 설계기준이 보유하고 있는 전단강도 평가식의 적절성 검토를 위해, 각 설계기준에 의거한 PC 실험체별 전단강도를 계산하여 Fig. 5에 함께 나타내었다. 세 가지 기준 중 KDS 14 20 22에서의 예측값은 크기가 작은 실험체에 대해서는 가장 낮게, 크기가 큰 실험체에 대해서는 가장 높게 평가하는 결과를 보여, 실험체의 크기에 따른 예측값의 차이가 가장 큰 것으로 나타났다. Eurocode 2의 경우 크기효과를 고려하고 있지만, 보의 높이 증가에 따라 커지는 크기효과를 적절하게 반영하지 못하는

것으로 나타났다. 반면, ACI 318-19의 크기효과 계수는 PC 실험체의 크기효과를 적절히 반영하는 것으로 확인되었다.

추가로 PC와 SFRC 실험체의 정규화된 전단응력과 유효깊이 간의 관계를 분석하였고 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 유효깊이가 증가함에 따라 모든 구간에서 정규화된 전단응력의 감소가 PC 실험체 대비 SFRC 실험체에서 낮은 값을 나타낸 것을 확인했다. SFRC 실험체의 경우 높이 350 mm에서 950 mm로 증가하면서 전단응력의 감소율은 약 50%를 나타냈으며 이는 PC 실험체의 68% 감소율에 비해 상대적으로 낮은 것을 확인했다. 특히 950 mm 높이의 실험체에서 PC 대비 SFRC의 전단응력은 약 310%로 3개 크기의 시험체 중 가장 큰 비율로 증가하였다.

3.2 균열 양상

강섬유의 혼입이 균열 양상에 미치는 영향을 확인하기 위하여 실험체의 최종 파괴 시점에서 나타난 균열 양상을 Fig. 8에 나타내었다. 분석 결과 모든 크기에서 SFRC 실험체는 PC 실험체에 비하여 더 넓은 범위에 더 많은 수의 전단균열이 형성된 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 정량화하기 위하여 Dinh et al. (2010)이 제시한 방법을 통해 균열과 관련된 분석을 수행하였고 그 결과를 Table 7에 정리하였다.

Dinh et al.(2010)에 따르면 전단균열의 개수(n)와 총 균열 거리($\sum s$)를 분석하였는데 이때 전단균열의 기준은 보 높이의 절반 이상 진행되고 보의 종방향 축에 대해 $0\sim 80^\circ$ 각도로 경사져 있는 경우에 해당되며, 총 균열 거리는 지점에서 가장 가까운 전단균열이 보의 중앙부를 지나는 지점과 가력점에서 가장 가까운 전단균열이 보의 중앙부를 지나는 지점의 거리로 측정된다.

본 실험에서 SFRC 실험체는 PC 실험체에 비해 모든 크기에서 2~4개의 전단균열이 추가로 형성되었으며, 총 균열 거리는 456~508 mm 더 길게 나타났다. 또한 SFRC 실험체의 평균 균열 간격을 계산하여 유효깊이로 정규화한 결과 평균 0.39로 Dinh et al.(2010)이 제시한 0.40과 유사한 값을 나타내었다.

이러한 결과는 강섬유의 균열면에서의 가교작용이 다중 균열을 넓은 범위에 형성시켜 이를 통해 균열을 효과적으로 제어했음을 보여준다. 따라서 잔류인장응력 증가로 인한 전단 기여분 향상으로 크기효과가 감소한 것으로 판단된다.

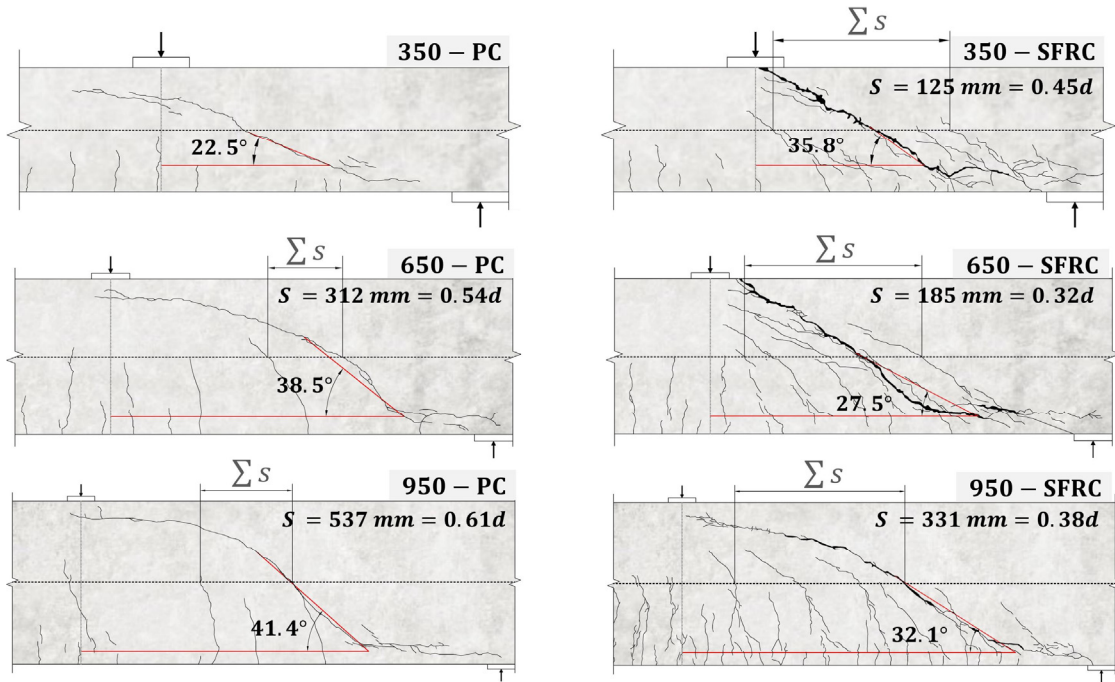


Fig. 8 Crack patterns at failure

Table 7 Crack analysis results

Specimen	n	$\sum s$ (mm)	$s = \frac{\sum s}{n-1}$ (mm)	s/d	θ_c (°)
350-PC	1	—	—	—	22.5
350-SFRC	5	498	125	0.45	35.8
650-PC	2	312	312	0.54	38.5
650-SFRC	5	741	185	0.32	27.5
950-PC	2	537	537	0.61	41.4
950-SFRC	4	993	331	0.38	32.1

Notes: n : number of inclined cracks; $\sum s$: total horizontal distance; s : average inclined crack spacing; θ_c : idealized angle of critical shear crack

3.3 현행 설계기준과의 비교

세 개의 설계기준에 따른 각 실험체의 전단강도 예측값과 각 실험체의 실험 결과 그리고 예측값 대비 실험값의 비율을 계산하여 Table 8에 나타내었다. 또한 다양한 조건에서 유효깊이 증가에 따른 크기효과를 분석하기 위해 기존 연구자들의 전단철근이 없는 PC 실험체 705개, SFRC 실험체 258개, 총 963개의 데이터를 추가로 비교 분석하였고 Fig. 9에 나타내었다.

본 연구의 PC 실험체의 경우 세 가지 설계기준 모두에서 유효깊이가 증가함에 따라 예측값 대비 실험값의 비율이 감소한 것을 확인하였다. 특히 KDS 14 20 22는 크기효과를 반영하지 않아 세 개의 설계기준 중 가장 큰 폭으로 감소한 것을 확인했다. 반면, ACI 318-19의 경우 유효깊이가 증가함에 따라 예측값 대비 실험값의 비율이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, KDS 14

20 22와 Eurocode 2에 비하여 큰 유효깊이에서도 실험값을 비교적 정확히 예측하였다. Eurocode 2는 유효깊이가 작은 경우 세 설계기준 중 가장 정확히 예측하였지만, 크기효과를 반영하고 있음에도 불구하고 실험체의 유효깊이가 커질 때 그 정확도가 유지되지 않는 것으로 확인되었다.

기존 연구자들의 PC 데이터를 분석한 결과, KDS 14 20 22는 본 연구의 실험 결과와 유사하게 유효깊이가 증가함에 따른 예측값 대비 실험값의 비율이 가장 큰 폭으로 감소하였다. ACI 318-19의 경우 크기효과를 적절히 반영하여 세 가지 설계기준 중 예측값이 실험값과 가장 유사히 산정된 것을 확인하였다. 또한 Eurocode 2의 경우 크기효과를 과소평가하여 유효깊이가 증가함에 따라 비율이 감소하였다.

본 연구와 기존 연구자들의 SFRC 실험체를 분석한 결과 세 기준 모두 강섬유 혼입으로 증가하는 전단강도를 반영하지 않아 예측값을 보수적으로 평가하는 경향을 나타내었다. 크기효과를 고려하지 않은 KDS 14 20 22의 경우 PC 실험체와 유사하게 크기가 증가할수록 예측값 대비 실험값의 비율이 감소하는 경향을 나타낸 반면, 크기효과를 반영한 ACI 318-19와 Eurocode 2는 예측값 대비 실험값의 비율이 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 ACI 318-19와 Eurocode 2의 크기효과 계수가 강섬유 콘크리트의 전단강도를 산정함에 있어 저감된 크기효과를 반영하지 못해 전단강도를 과도하게 감소시키기 때문이다.

이에 따라 SFRC 보의 크기효과를 적절하게 반영할 수 있는 전단강도 제안식이 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 SFRC 보의 전단강도와 크기효과를 실험적으로 평가하고 현행 설계기준과 비교하였다.

Table 8 Test results of specimens according to design code

Specimen	V_{test} (kN)	KDS 14 20 22		ACI 318-19		Eurocode 2	
		$V_{test}/V_{cal.}$	$V_{cal.}$ (kN)	$V_{test}/V_{cal.}$	$V_{cal.}$ (kN)	$V_{test}/V_{cal.}$	$V_{cal.}$ (kN)
350-PC	176.26	1.55	113.50	1.30	135.28	1.40	126.11
350-SFRC	309.53	3.05	101.58	2.63	117.67	2.69	114.91
650-PC	194.41	0.89	217.25	1.10	176.39	0.86	226.24
650-SFRC	392.69	2.04	192.31	2.56	153.43	1.90	206.15
950-PC	183.13	0.58	316.98	0.92	199.81	0.62	294.02
950-SFRC	492.72	1.77	279.04	2.84	173.79	1.84	267.91

Note: V_{test} : maximum shear strength ($=P_{max}/2$); $V_{cal.}$: calculated shear strength

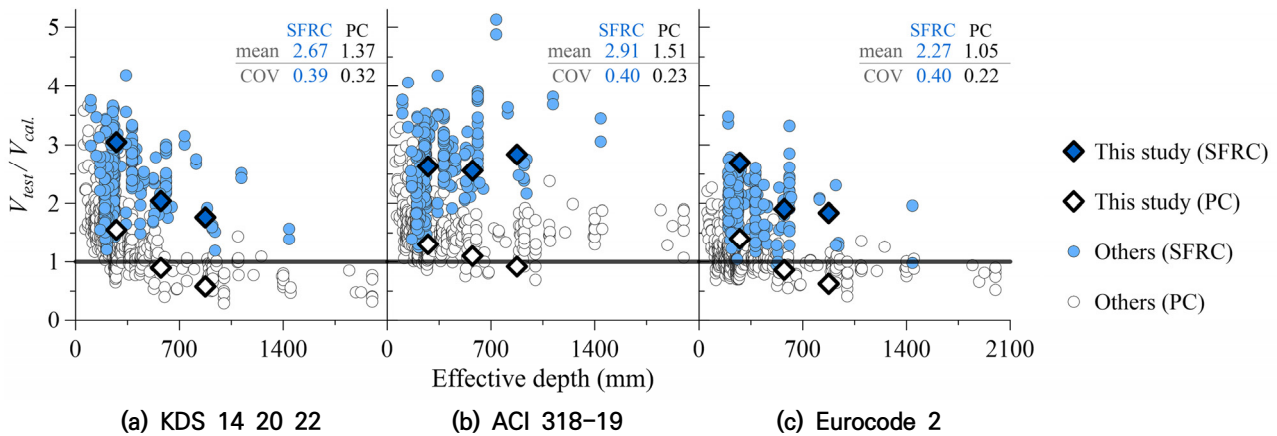


Fig. 9 Comparison of test-to-calculated ratios by design code

- 모든 크기의 SFRC 보는 PC 보 대비 높은 최대 전단강도를 보였다. SFRC 보는 유효깊이 증가에 따라 균일한 전단강도의 증가를 보인 반면, PC 보의 경우 크기효과에 의해 전단강도가 감소하였다. 또한 정규화된 전단응력과 유효깊이를 분석한 결과 SFRC 보는 PC 보에 비하여 낮은 정규화된 전단응력 감소율을 보였다. 따라서 SFRC 보의 크기효과가 PC 보에 비해 저감된 것을 확인했다.
- SFRC 실험체는 균열면에서 강섬유의 가교작용을 통해 PC 실험체에 비해 많은 전단균열과 긴 범위의 총 균열 거리를 형성했다. 이에 따른 잔류인장응력의 증가로 인한 전단 기여분 향상으로 크기효과 저감에 기여한 것으로 판단된다.
- 세 가지 설계기준(KDS 14 20 22, ACI 318-19, Eurocode 2) 분석을 통해 현행 기준이 큰 깊이의 SFRC 보의 전단강도와 크기효과를 충분히 반영하지 못함을 확인했다. PC 실험체 또한 크기효과를 반영하지 않은 KDS 14 20 22의 경우 예측값이 실험값에 비하여 매우 커지는 결과를 나타냈고 크기효과를 반영한 Eurocode 2 또한 큰 깊이의 보에서 크기효과를 적절히 반영하지 못하는 결과를 나타냈다. 따라서 이러한 SFRC 보의 향상된 전단강도와 저감된 크기효과를 적절히 반영하는 새로운 전단강도 제안식이 필요하며 추후 연구를 통하여 이를 도출할 예정이다.

감사의 글

이 연구는 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 지원을 받아 수행된 연구에 의한 결과의 일부입니다. 연구비 지원에 감사드립니다(No.NRF-2020R1F1A1075751, RS-2023-00207763).

References

- ACI Committee 318 (2019) *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19)*. Farmington Hills, MI; American Concrete Institute (ACI). 397-466.
- ACI Committee 544 (2002) *State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete (544.IR-96)*. Farmington Hills, MI; American Concrete Institute (ACI). 7-23.
- ASTM C1609/C1609M-07 (2007) *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam with Third-point Loading)*. West Conshohocken, PA; ASTM International.
- Bazant, Z. P., and Kim, J. K. (1984) Size Effect in Shear Failure of Longitudinally Reinforced Beams. *ACI Journal* 81(5), 456-468.
- CEN (2004) *Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part*

- 1-1: *General Rules and Rules for Buildings (EN. 1992-1-1: 2004)*. London, UK; European Committee for Standardization (CEN), British Standards Institute (BSI).
- Dinh, H. H. Parra-Montesinos, G. J. and Wight, J. K. (2010) Shear Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrup Reinforcement. *ACI Structural Journal* 107, 597-606.
- KATS (2018) *Method of Tensile Test for Metallic Materials (KS B 0802)*. Seoul, Korea: Korea Agency for Technology and Standards (KATS), Korea Standard Association (KSA). (In Korean)
- KATS (2019) *Standard Test Method for Making and Curing Concrete Specimens (KS F 2403)*. Seoul, Korea: Korea Agency for Technology and Standards (KATS), Korea Standard Association (KSA). (In Korean)
- KATS (2022) *Cement-Test methods-Determination of Strength (KS L ISO679 4009)*. Seoul, Korea: Korea Agency for Technology and Standards (KATS), Korea Standard Association (KSA). 1-32. (In Korean)
- KCI (2021) *Shear and Torsion (KDS 14 20 22)*. Sejong, Korea: Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), Korea Concrete Institute (KCI). 30. (In Korean)
- Kwak, Y. K., Eberhard, M. O., Kim, W. S., and Kim, J. (2002) Shear Strength of Steel Fiber-reinforced Concrete Beams without Stirrups. *ACI Structural journal* 99(4), 530-538.
- Minelli, F., and Plizzari, G. A. (2010) Shear Strength of FRC Members with Little or No Shear Reinforcement: A New Analytical Model. *fib Bulletin* 57(1), 211-226.
- Parra-Montesinos, G. J. (2006) Shear Strength of Beams with Deformed Steel Fibers. *Concrete International* 28(11), 57-66.

요 약 본 연구는 전단보강이 없는 일반 콘크리트(PC)와 강섬유 콘크리트(SFRC) 보의 전단강도 및 크기효과를 실험적으로 비교 평가하였다. 이를 위해 높이 350, 650, 950 mm 크기의 보 실험체를 제작하였고 강섬유 혼입률을 0, 1 %로 설정하여 실험을 수행하였다. 실험 결과, SFRC 보는 PC 보에 비하여 높은 전단강도를 보였으며 크기 증가에 따른 전단강도의 감소가 상대적으로 낮게 나타났다. 이는 SFRC의 강섬유가 균열면에 가교하여 균열을 효과적으로 제어하기 때문이다. 그러나 현행 설계기준은 이러한 강섬유의 향상된 전단강도와 저감된 크기효과를 충분히 반영하지 못하고 있다. 따라서 SFRC 보의 크기효과를 적절히 반영할 수 있는 새로운 전단강도 제안식이 필요하다.

핵심용어 : 철근콘크리트 보, 전단강도, 크기효과, 강섬유