

순환골재를 사용한 SFRC 보의 전단성능

김성은¹, 정재원², 김승훈^{3*}

Shear Performance on SFRC Beam Using Recycled Coarse Aggregate

Seongeun Kim¹, Jaewon Jeong², Seunghun Kim^{3*}

Abstract: Degraded shear performance of reinforced concrete members with recycled coarse aggregate (RCA) compared to flexural strength is a problem. To address this, steel fibers can be used as concrete reinforcement material. In this study, the strength and deformation characteristics of SFRC beams using RCA were to be determined by shear tests. Major experimental variables include the volume fraction of steel fiber (0, 0.5%, 1%), the replacement rate of RCA (0%, 100%), and the shear span ratio ($a/d = 1, 2$). As a result of the experiment, the shear strength of the specimen increased as the rate of mixing steel fiber increased. For specimens with RCA and 1% steel fiber, the maximum shear strengths increased by 1.77 - 6.25% compared to specimens with normal coarse aggregate (NCA). On the other hand, at 0-0.5% steel fiber, the shear strengths of RCA specimens were reduced by 24.2% to 49.2% compared to NCA specimens. This indicates that reinforcement with 1% volume fraction of steel fiber greatly contributes to preventing shear strength reduction due to the use of RCA.

Keywords: Steel fiber, Recycled coarse aggregate, Shear strength, SFRC

1. 서론

1970년대 새마을운동 이후 전국적으로 1만 6600개의 부락이 콘크리트 구조물로 탈바꿈하였다. 이에 따라 현재 30~40년 된 건물들이 많아 건물들의 재개발 또는 신축을 위해 철거하는 건설폐기물이 날로 그 발생량이 증가하고 있으나 매립지 등의 신규 입지가 어려워지므로 그 해결방안은 국민적 과제로 대두되고 있다. 환경부에 따르면 1996년~2016년까지 매년 폐기물 발생량은 증가 추이를 보이고 있으며, 건설폐기물의 하루 발생량은 96년 28,425(톤/일) 대비 16년 176,447(톤/일)으로 발생 추이는 520.7% 증가한 것으로 나타났다. 또한 재건축신축에 의한 골재 잔골재 시멘트 등의 자원 고갈 문제로 대체 방안이 시급한 실정이다.

이런 문제점을 줄이고자 「건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률」에 의거하여 2010년 이후 순환골재 및 순환골재 재활용제품 의무사용 제도가 활성화되었다. 이에 따라 순환골재를 구조재로 사용하기 위하여 순환골재의 치환율에 따른 휨

및 전단 성능을 평가하고자 관련 연구가 활성화되었다.

Song at al. (2009)의 연구에서는 순환골재 치환율 100%와 일반 골재를 대상으로 휨실험을 실시하였다. 실험 결과 순환 골재, 순환잔 골재 콘크리트의 역학적 특성(치환율에 따라 압축강도, 탄성계수, 쪼갬 인장강도, 휨강도)은 치환율에 따라 감소하는 것으로 나타난 반면 순환골재를 100% 치환한 실험체에서 현행 콘크리트 설계 기준을 만족하는 결과가 나타났다. 그러나 Lee at al. (2007)의 연구에서 순환골재 치환율에 따른 변수로 실제 규모의 전단 실험을 시행한 결과 치환율이 증가함에 따라 사인 장 균열 발생과 콘크리트가 탈락하는 취성적 파괴가 나타났으며, 순환골재 치환율 30%를 기준으로 전단강도에 있어서 약 10% 정도 성능 저하가 발생하는 것으로 나타났다.

콘크리트의 취성적인 재료적 특성을 보완하기 위해 최근 강섬유보강 콘크리트 (Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC)의 사용이 증가하고 있다. 콘크리트에 강섬유를 혼입할 경우 콘크리트 구조체에 큰 변형이 일어난 후에 연성적 거동을 유도하며, 인장강도 및 장부 작용, 아치 작용이 향상되는 효과가 이전 연구 결과 (Shin at al, 2015; Kim at al, 2015; Narayanan and Darwish, 1987; Romualdi and Mandel, 1964)로 나타났다.

본 연구에서는 순환골재를 사용한 콘크리트의 전단성능을 향상시키기 위하여 강섬유를 사용하고, SFRC 보의 전단실험을 통하여 강도 및 변형 특성을 파악하고자 하였다. 주요 실험

¹학생회원, 한밭대학교 대학원 석사과정

²학생회원, 한밭대학교 대학원 석사과정

³정회원, 한밭대학교 건축공학과 교수

*Corresponding author: kimsh@hanbat.ac.kr

Department of Architectural Engineering, Hanbat National University, 125 Dongsederu, Yuseong-gu, Daejeon 31458, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

변수는 강섬유 혼입률(0, 0.5%, 1%), 순환골재 치환율(0%, 100%), 전단경간비(a/d = 1, 2) 등이다.

2. 기존 연구 및 기준식 고찰

2.1 순환골재 및 SFRC 관련 전단성능 연구 고찰

Nam at al. (2007)은 순환 굵은 골재를 0, 30, 60%로 각각 치환하여 보, 기둥, 철근 인발 실험체를 제작하여 구조 모형시험을 실시하였다. 전단강도의 경우 혼입률 30%에서는 성능 저하가 없는 것으로 나타났으나, 혼입률 60%의 경우 해석 값보다 낮은 강도에서 파괴되었고 구조성능도 많이 저하되는 것으로 평가하였다.

Song at al. (2009)의 연구에서는 순환 굵은 골재 치환율을 변수로 한 휨 실험을 통하여 순환골재 치환율 100%의 경우 치환율에 따른 휨성능 저하는 나타나지 않은 것을 확인하였다.

Lee at al. (2013)은 전단보강이 없는 순환골재 치환율(0, 15, 30, 50%)과 전단경간비 (a/d=2, 3, 4), 인장철근비($\rho=0.80, 1.27, 1.84\%$)를 변수로 총 28개의 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 순환골재의 치환율이 증가함에 따라 압축강도 쪼갠 인장강도 휨강도는 각각 감소되는 경향을 확인하였다. 또한 전단강도의 증가에는 전단경간비와 순환골재의 치환율이 영향을 미치고 있으나 인장철근의 증가는 전단강도에 많은 영향을 미치지 않는 것으로 평가하였다.

Shin at al. (2015)은 순환골재를 사용한 강섬유 혼입률, 전단경간비 및 인장철근비 등을 변수로 총 24개의 실험체를 제작하여 실험을 실시하였다. 실험 결과 강섬유를 보강하지 않은 보는 취성적인 전단파괴가 나타났으며 강섬유를 보강한 보에서는 대부분의 보는 휨 파괴가 나타났다. 또한 강섬유의 혼입률이 증가할수록 휨-전단파괴로 유도되었으나, 강섬유 함유율이 증가함에 따라 섬유 뭉침(Fiber ball) 현상이 나타났다.

Kim at al (2015)은 강섬유와 최소 전단 철근을 보강하여 전단강도에 미치는 영향을 알아보기 위해 콘크리트 강도, 강섬유와 최소 전단 철근 보강 여부를 변수로 실험을 수행하였다. 실험 결과 강섬유 혼입률 0.75%와 최소 전단 철근 보강에 따라 전단강도가 증가하였고 최소 전단 철근의 보강보다 강섬유의 보강 콘크리트의 전단강도 증가율이 더 크게 나타났다.

2.2 기준식 고찰

국내 설계기준인 KCI2012에서 전단력과 휨 모멘트만 받는 RC 부재의 전단강도를 식 (1) 및 (2)와 같이 산정하고 있다.

$$V_c = \frac{1}{6} \lambda \sqrt{f_{ck}} b_w d \quad (1)$$

$$V_c = (0.16 \lambda \sqrt{f_{ck}} + 17.6 \rho_w \frac{V_u d}{M_u}) b_w d \quad (2)$$

여기서, λ 는 경량 콘크리트 사용에 따른 영향을 반영하기 위한 경량콘크리트 계수, f_{ck} 는 콘크리트의 압축강도(MPa), b_w (mm)는 보 폭, d 는 유효춤(mm)이다. M_u 는 전단을 검토하는 단면에서 V_u 와 동시에 발생하는 계수휨모멘트이다. V_c 의 값은 $0.29 \sqrt{f_{ck}} b_w d$ 를 초과할 수 없으며, $V_u d / M_u$ 의 값을 1.0 이하로 취하여야 한다.

캐나다기준(CSA A23.3.-04)에서 MCFT (Modified Compression Field Theory)를 기반으로 평면 유지의 법칙이 성립하는 휨 구역에서 휨모멘트와 전단력을 받는 일반 보에 대한 전단 설계식은 식 (3)과 같다.

$$V_c = 0.2 \sqrt{f_c} b_w d \quad (3)$$

Zsutty (1968)는 전단경간비 2.5 이상 및 미만의 경우로 나누어 전단강도를 각각 식 (4) 및 (5)로 제안하였다.

$$v_c = 2.17 (f_c \rho_w \frac{d}{a})^{\frac{1}{3}} b_w d \quad \text{when } a/d \geq 2.5 \quad (4)$$

$$v_c = 2.17 (2.5 \frac{d}{a}) (f_c \rho_w \frac{d}{a})^{\frac{1}{3}} b_w d \quad \text{when } a/d < 2.5 \quad (5)$$

Narayanan 와 Darwish (1987)는 강섬유 혼입률, 인장철근비, 전단경간비를 고려하여 식 (6)과 같이 전단강도를 제안하였다.

$$v_n = e [0.24 f_{sp} + 80 \rho \frac{d}{a}] + v_b \quad (6)$$

$$F = (\alpha \times V_f \times l_f \times d_f)$$

$$f_{sp} = f_{cu} / (20 - \sqrt{F}) + 0.7 + \sqrt{F}$$

여기서 e 는 아치 작용(arch action)을 고려한 계수로서 $a/d > 2.8$ 인 경우에 1.0이며, 그 외의 경우에는 $e = 2.8(d/a)$ 이다. ρ 는 인장철근비, f_{sp} 는 콘크리트의 쪼갠 인장강도, f_{cu} 는 SFRC 정육면체 공시체의 압축강도, v_b 는 강섬유 부착강도, F 는 섬유 계수, α 는 강섬유 부착계수, l_f 는 섬유의 길이, V_f 는 강섬유 혼입율, d_f 는 섬유의 직경 등을 나타낸다.

Sharma (1986)는 갈고리형(hooked type)의 강섬유를 사용하여 강섬유 혼입여부, 전단철근의 유무를 변수로 실험을 통하여 식 (7)의 전단강도 예측식을 제안하였다. 이 식은 ACI Committee 544 (1988) 보고서에서 SFRC, HSFRC 보의 전단 설계를 위한 방법으로 소개되었다.

$$v_u = k f_{sp} \left(\frac{d}{a}\right)^{0.25} \quad [\text{MPa}] \quad (7)$$

Oh와 Kim (2008)은 강섬유 보강 콘크리트 휨 부재의 휨 및 전단강도에 대한 설계 기준식과 선행 연구자들의 강도 산정식의 유효성을 분석하여, 강섬유의 인장강도를 고려한 식(8)을 전단강도로 제안하였다.

$$v_u = (0.2e + 0.25F) \sqrt{f'_c} + 75\rho \frac{d}{a} \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$

3. 전단 실험

3.1 실험체 계획

순환골재를 사용한 SFRC 보의 전단성능평가를 위하여 순환골재 치환율(0%, 100%), 강섬유 혼입율(0, 0.5%, 1%), 전단경간비(a/d = 1, 2) 등을 변수로 Table 1과 같이 총 8개의 실험체를 계획하였다.

Table 1 List of specimens

Specimen	Shear span-to-depth ratio, a/d	Replacement Ratio of Recycled Coarse Aggregates (%)	Steel fiber (%)
2R0-S0	2	0	0.0
2R0-S2		0	1.0
2R1-S0		100	0.0
2R1-S2		100	1.0
1R0-S1	1	0	0.5
1R0-S2		0	1.0
1R1-S1		100	0.5
1R1-S2		100	1.0

실험체 단면은 200×250(mm)이고, 길이는 1200(mm)로 제작하였다. 인장철근은 SD400의 D16, 압축철근은 SD400의 D10을 사용하였다. 가력점을 기준으로 좌우 전단경간비가 상이하게 하고 전단경간비가 큰 부분에 전단보강근을 배근하여 전단보강근을 배근하지 않는 부분에 전단파괴가 나타나도록 하였다. 실험체 배근 상세는 Fig. 1에 나타내었다.

3.2 실험 재료

강섬유는 국내 K사로 경기도 화성에서 생산된 번들형 제품으로 Fig. 2과 같은 길이 30mm, 직경 0.5mm 인장강도 900~1650MPa의 후크(Hook) 형태의 제품을 사용하였다.

순환골재는 KS F 2573(콘크리트용 순환 골재)의 규격을 만

족하는 B 업체의 세척 골재로 입경 20~25mm의 골재를 사용하였다.

3.3 실험체 설치 및 가력

변수로 계획된 전단경간비에 맞게 단순보 형태로 실험체를 설치하고 2000kN UTM(Universal Testing Machine)을 사용하여 분당 1mm로 변위제어방식으로 3점 가력 하였다.

가력점 위치의 실험체 하부면에 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 설치 하여 변위를 측정하였고 인장철근에 스트레인게이지를 부착하여 철근의 변형률을 측정하였다.

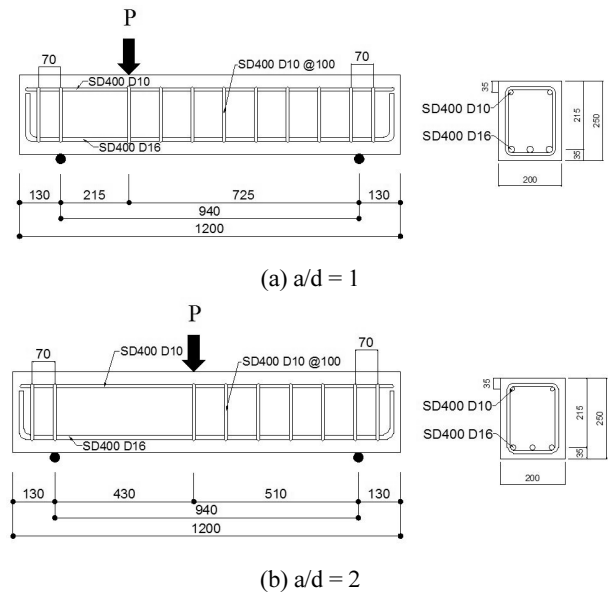


Fig. 1 Details of specimens

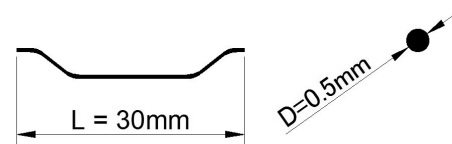


Fig. 2 Details of steel fiber

4. 실험결과 및 분석

4.1 재료시험 및 결과

콘크리트의 압축강도를 평가하기 위하여 KS F 2403에 따라 공시체 Ø100×H200(mm)의 원형몰드로 제작하여 24시간 후 몰드를 탈형하고 수조에 수중양생을 실시하였다.

공시체 28일 재령 후 KS F 2405에 따라 UTM(Universal

Testing Machine)기로 분당 1mm로 변위 제어하여 압축강도 시험을 실시하였다. 압축강도 시험 결과는 다음 Table. 2와 같다. Table 2에서 R0, R1은 순환골재 유무를 말하며, S0, S1, S2는 각각 강섬유 혼입률 0, 0.5, 1%를 말한다.

철근의 인장시험 결과를 정리하여 Table. 3에 나타내었다.

4.2 최종 파괴시 균열양상

Fig. 3과 Fig. 4에 실험체들의 최종 파단 시 균열상황을 나타내었다. 2R1-S2, 1R0-S2, 1R1-S2 실험체 등 강섬유 1%인 대부분의 실험체는 휨균열과 전단균열이 모두 발생하였고 그 외 실험체는 전단균열만 발생하였다.

전단경간비 1인 실험체들의 전단 균열 각도는 59°~ 64°로 측정되어, 전단경간비 2인 실험체들의 전단 균열 각도 45°~ 50°에 비하여 크게 나타났다.

4.3 하중-변위곡선 및 전단강도

Fig. 5에 하중-변위 곡선을 나타내었다. 변위는 가력점 하부에 설치한 변위계로 측정된 값이다. Fig. 5에서 2R1-S2 실험체가 항복이후 최대하중 시 변위연성비 2.2를 나타내며, 연성적인 거동을 하였다. 1R0-S2, 1R1-S2 실험체 등은 항복 후 2mm 이상의 연성적인 거동을 하다가 전단에 의하여 취성파괴 거동을 나타내었다. 그 외 실험체는 특이한 항복점 없이 최대하중 이후 급격한 취성 거동을 나타내고 있다. 초기 강성은 대체적으로 비슷한 거동을 보였다.

전단경간비 1, 2 실험체들에 대하여 모두 강섬유 혼입률이 클수록 최대하중이 큰 것을 알 수 있다.

Table 4는 실험체별 균열하중(P_{cr}), 최대하중(P_{max}), 최대전단내력(V_{max}), 균열시 평균 전단응력(v_{cr}), 전단강도(v_{max}) 등을 정리하여 나타낸 것이다. Fig. 6에 순환골재 치환율에 따른 전단강도를 비교하여 나타내었다.

Table 4 및 Fig. 6에서 전단강도(v_u)는 강섬유의 혼입률이 증가할수록 전단경간비가 작아질수록 증가하였다. 또한 강섬유 1% 혼입한 순환골재의 경우 일반 골재에 비해 최대전단내력(V_{max})이 1.77~6.25% 증가하였다. 반면에 강섬유 0~0.5% 혼입한 실험체에서는 일반골재에 비해 순환골재가 24.2%~49.2%의 전단내력 저하를 보였다.

강섬유 혼입률에 따른 전단강도를 비교한 결과 전단경간비 2의 경우 혼입률이 0.5%인 실험체에 비하여 1%인 실험체가 일반골재에서 27.3% 전단강도가 증가하였고, 순환골재에서 166.1% 증가한 것으로 나타났다. 전단경간비 1의 경우 혼입률이 0.5%인 실험체에 비하여 1%인 실험체가 일반골재에서 26.1% 전단강도가 증가하였고, 순환골재에서 69.3% 증가한 것으로 나타났다. 이러한 결과를 볼 때 일반골재 보다 순환골재에서 강섬유 혼입에 따른 보강효과가 매우 큼을 알 수 있다.

Table. 2 Compressive strength of concrete

Specimen	f_{ck} (MPa)	Specimen	f_{ck} (MPa)
R0-S0	45.36	R1-S0	45.36
R0-S1	41.71	R1-S1	31.44
R0-S2	46.14	R1-S2	44.23

Table. 3 Properties of steel reinforcing bars in tension

Rebar	d_s (mm)	A_s (mm ²)	E_s (GPa)	f_y (MPa)	f_{fu} (MPa)
Steel-D10	9.5	71.3	184	501	611
Steel-D16	15.9	397.2	198	427	585

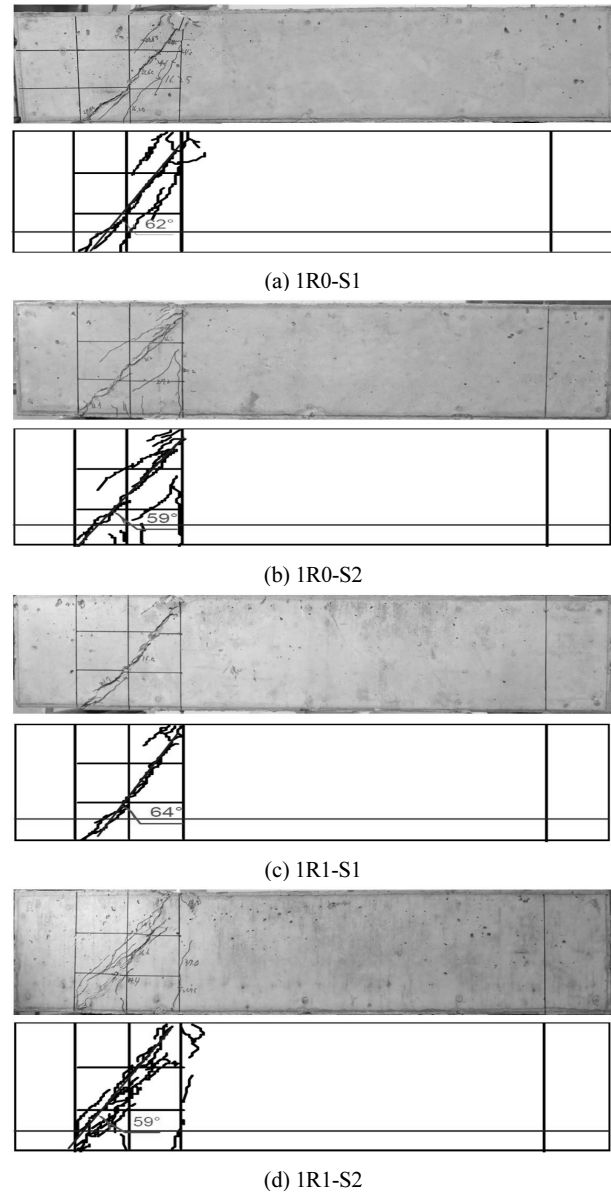


Fig. 3 Crack patterns of specimens (a/d=1)

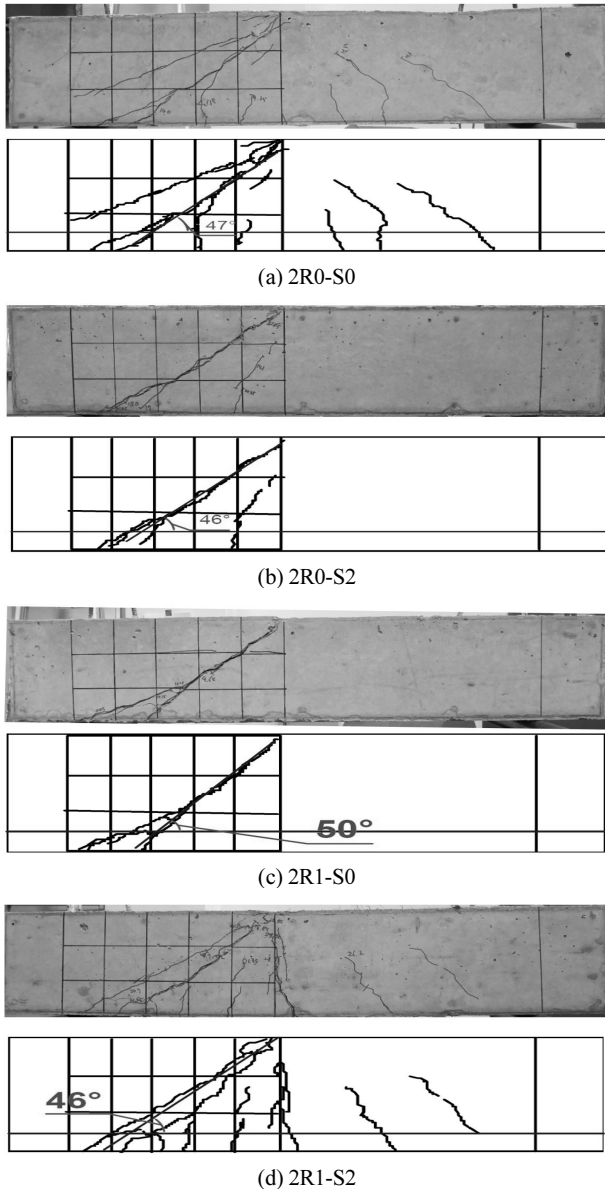
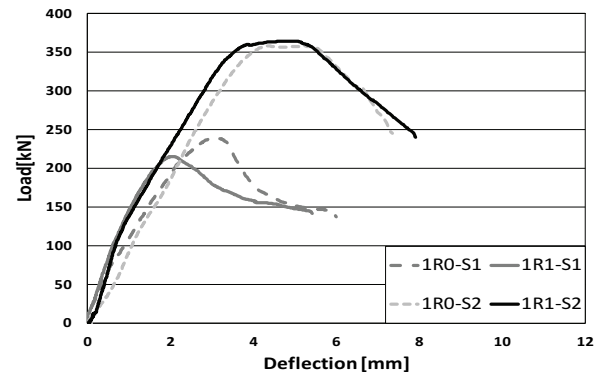


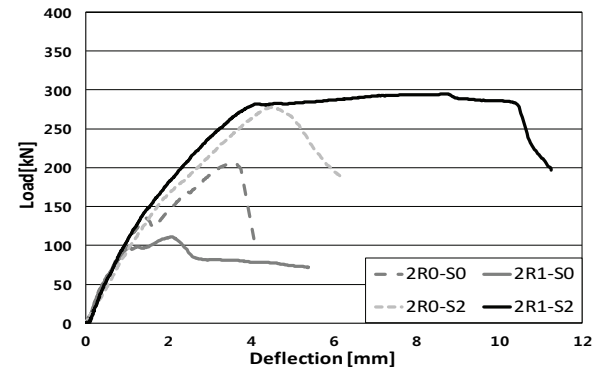
Fig. 4 Crack patterns of specimens (a/d=2)

4.4 하중-변형률 곡선 비교

Fig. 7에 실험체별 하중가력에 따른 가력부 인장철근의 변형률 곡선을 비교하여 나타내었다. Fig. 7에서 2R1-S2, 1R0-S2, 1R1-S2 실험체 등이 인장철근이 항복변형률(0.00216) 보다 큰 변형률을 보이며 소성변형을 한 것으로 평가되었다. 2R0-S2 실험체도 항복변형률 이후 변형률 저하를 보여 1% 강섬유에 따른 전단성능 보강을 확인할 수 있었다. 그 외 실험체는 최대하



(a) a/d = 1

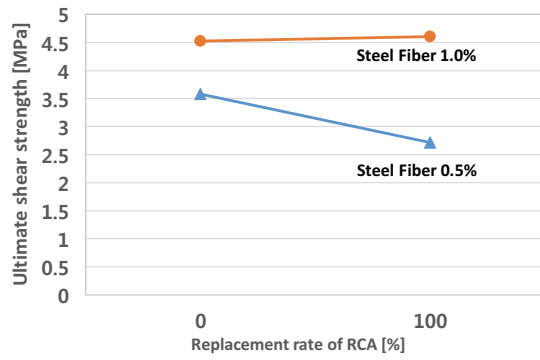


(b) a/d = 2

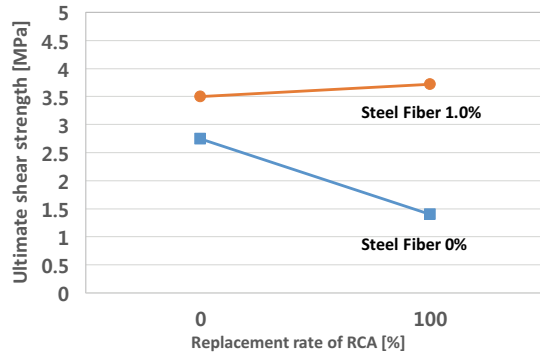
Fig. 5 Load-displacement curves

Table. 4 Test results

Specimen	Crack load P_{cr} (kN)	Maximum load P_{max} (kN)	Maximum shear force V_{max} (kN)	Diagonal tensile crack stress v_{cr} (MPa)	Ultimate shear strength v_{max} (MPa)	Failure mode
2R0-S0	140.6	217.9	118.2	1.77	2.75	shear failure
2R0-S2	148.0	277.3	150.5	1.87	3.50	shear failure
2R1-S0	94.6	110.9	60.1	1.19	1.40	shear failure
2R1-S2	125.9	294.7	159.9	1.59	3.72	flexural + shear failure
1R0-S1	159.3	283.9	219.0	2.01	3.58	shear failure
1R0-S2	266.6	358.0	276.1	3.36	4.52	flexural + shear failure
1R1-S1	161.7	215.2	166.0	2.04	2.72	shear failure
1R1-S2	155.3	364.3	281.0	1.96	4.60	flexural + shear failure

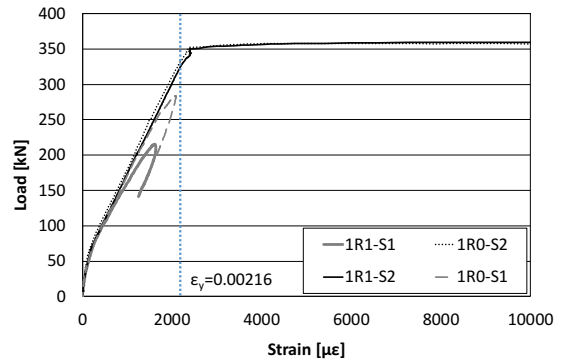


(a) a/d = 1

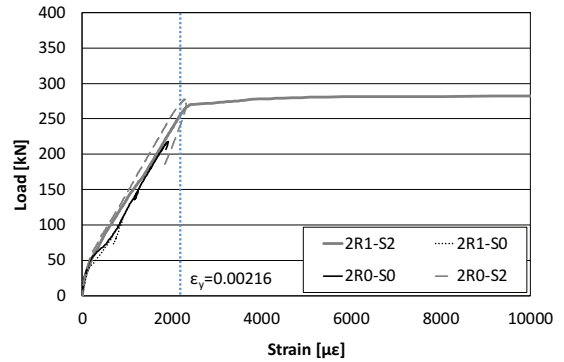


(b) a/d = 2

Fig. 6 Comparison of shear strengths



(a) a/d = 1



(b) a/d = 2

Fig. 7 Load-strain curves

Table. 5 Comparison of V_{max} and V_n by previous proposed formula

Specimen	V_{max} (kN)	V_n (kN)						
		KCI1 (Eq. (1))	KCI2 (Eq. (2))	CSA	Zsutty	Narayanan	Sharma	Oh
2R0-S0	118.2	48.27	60.27	57.92	69.20	76.67	136.38	95.94
2R0-S2	150.5	48.68	60.67	58.42	69.60	95.11	137.54	107.58
2R1-S0	60.1	46.52	58.60	55.83	67.52	74.70	131.45	93.01
2R1-S2	159.9	47.66	59.69	57.19	68.62	93.96	134.67	105.65
1R0-S1	219.0	46.28	51.40	55.54	169.57	202.19	155.52	190.42
1R0-S2	276.1	48.68	53.70	58.42	175.37	216.59	163.57	204.22
1R1-S1	166.0	40.18	45.55	48.22	154.32	188.42	135.02	169.24
1R1-S2	281.0	47.66	52.72	57.19	172.91	214.29	160.15	200.57

Table. 6 Comparison of V_{max}/V_n

Specimen	V_{max}/V_n (kN)						
	$V_{max}/KCI1$	$V_{max}/KCI2$	V_{max}/CSA	$V_{max}/Zsutty$	$V_{max}/Narayanan$	$V_{max}/sharma$	V_{max}/Oh
2R0-S0	2.45	1.96	2.04	1.71	1.54	0.87	1.23
2R0-S2	3.09	2.48	2.58	2.16	1.58	1.09	1.40
2R1-S0	1.29	1.03	1.08	0.89	0.80	0.46	0.65
2R1-S2	3.36	2.68	2.80	2.33	1.70	1.19	1.51
1R0-S1	4.73	4.26	3.94	1.29	1.08	1.41	1.15
1R0-S2	5.67	5.14	4.73	1.57	1.27	1.69	1.35
1R1-S1	4.13	3.64	3.44	1.08	0.88	1.23	0.98
1R1-S2	5.90	5.33	4.91	1.63	1.31	1.75	1.40
Mean	3.83	3.32	3.19	1.58	1.27	1.21	1.21
Standard deviation	1.59	1.54	1.32	0.50	0.33	0.42	0.28

중시 인장철근의 변형률이 항복변형률보다 적은 상태에서 최종 파괴되어 전단파괴를 알 수 있다.

4.5 기준식과의 비교

2.2절의 기준식 고찰에 나타난 전단강도 산정식을 이용하여 공칭전단강도 (V_n)를 평가하여 실험 전단강도 (V_{max})와 비교하여 Table 5와 Table 6에 나타내었다.

KCI2012 및 CSA 기준식은 모두 실험 전단강도에 비하여 적은 값으로 산정되어 안전측으로 평가하고 있었다. 하지만 V_{max}/V_n 이 평균 3.19~3.83로 실험 전단성능을 과소평가하고 있음을 알 수 있다. 이에 비해 기존 연구자들의 제안식은 V_{max}/V_n 이 평균 1.21~1.58로 기준식에 비하여 비교적 오차가 적음을 알 수 있다. Sharam 및 Oh의 제안식은 V_{max}/V_n 이 평균 1.21으로 동일하게 본 실험체의 실험 전단강도를 가장 근접하게 예측하고 있었으며 특히, 표준편차가 Oh 제안식이 0.28로 더 적합한 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 순환골재 사용에 따른 RC 보의 전단성능을 개선하기 위해 강섬유를 혼입한 SFRC 보 실험체를 제작하여, 전단 실험을 실시하였다. 순환골재 유무, 강섬유 혼입률, 전단경간비 등을 변수로 한 실험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 1% 강섬유를 보강한 S2 시리즈 실험체의 경우 인장철근이 항복한 이후 최종 파괴되었다. 특히, 2R1-S2 실험체는 변위연성비가 2.2를 보이며 휨 거동 이후 최종적으로 휨균열과 전단균열이 확대되면서 최종파괴를 나타내었다. S0 및 S1 모든 실험체는 인장철근이 항복하기 이전 전단파괴되었다.
- 2) 실험에 의한 전단강도는 강섬유의 혼입률이 증가할수록 전단경간비가 작아질수록 증가하였다.
- 3) 강섬유 1% 혼입한 순환골재의 경우 일반 골재에 비해 최대전단내력(V_{max})이 1.77~6.25% 증가한 반면에 강섬유 0~0.5% 혼입한 실험체에서는 일반골재에 비해 순환골재가 24.2%~49.2%의 전단강도가 저하되었다. 이를 볼 때 강섬유 보강에 의하여 순환골재 사용에 따른 강도 저하를 방지하는데 크게 기여하는 것을 알 수 있다.
- 4) KCI2012 및 CSA 기준식은 실험체의 전단강도를 크게 안전측으로 평가하고 있었다. 기존 연구자의 제안식을 비교한 결과, 본 실험체의 경우 Oh의 제안식이 실험전단강도/공칭전단강도 값의 평균이 1.21, 표준편차가 0.28로 분석되어 가장 실험값에 근접한 것으로 평가되었다.

이상의 결과에서 순환골재를 100% 치환하여 사용할 경우 전단성능이 저하되며, 이를 보완하기 위한 방법으로 강섬유 보강이 매우 효과적임을 알 수 있었다. 차후 전단보강근 및 인장철근비를 비롯한 다양한 전단강도 영향인자의 성능평가 실험을 통하여 현행 30% 순환골재 치환율을 상향하기 위한 토대 구축이 필요할 것이다.

References

- ACI Committee 544 (1988), Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.4R-88), American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, 12-14.
- CSA Committee A23.3 (2004), Design of Concrete Structures (CSA A23.3-04), Canadian Standards Association, Mississauga, Canada, 214.
- KCI2012 (2012), Korean Building Code, Korean Concrete Institute, Republic of Korea, 149-150.
- Kim, C. G., Park, H. G., Hong, G. H. and Kang, S. M. (2015), Evaluation on Shear Contribution of Steel Fiber Reinforced Concrete in Place of Minimum Shear Reinforcement, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 27(6), 603-613.
- Lee, J. H., Kim, W. S., Baek, S. M., Kang, Thomas H. K., and Kwak, Y. K. (2013), A Study on the Shear Behavior of Recycled Aggregate Reinforced Concrete Beams without Stirrups, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 25(4), 389-400.
- Lee, W. S., Yun, H. D., Kim, S. W., Choi, K. S., You, Y. C., and Kim, K. H. (2007), The Effect of Replacement Ratio of Recycled Coarse Aggregate on Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Without Shear Reinforcement, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 23(10), 3-10.
- Nam, J. W., Kim, H. J., Kim, S. B., Kim, J. H. Jay and Byun, K. J. (2007), Evaluations of Structural Performance of Recycled Aggregate Concrete According to Replacement Ratios, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, (4), 54-64.
- Narayanan, R., and Darwish, I. Y. S. (1987), Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement, *ACI Journal*, 83(4), 216-227.
- Oh, Y. H., and Kim, J. H. (2008), Estimation of Flexural and Shear Strength for Steel Fiber Reinforced Flexural Members without Shear Reinforcements, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 20(2), 257-267.
- Romualdi, J. P., and Mandel, J. A. (1964), Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement, *ACI Journal*, 61(6), 657-671.
- Sharma, A. K. (1986), Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams, *ACI Journal*, 83(4), 624-628.
- Shin, J. L., Kim, W. S., Baek, S. M., Kang, Thomas H. K., and Kwak, Y. K. (2015), Structural Performance Evaluation of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams with Recycled Coarse Aggregates,

Journal of the Korea Concrete Institute, 27(3), 215-227.
Song, S. H., Choi, K. S., You, Y. C., Kim, K. H., and Yun, H. D. (2009),
Flexural Behavior of Reinforced Recycled Aggregate Concrete
Beams, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 21(4), 431-439.
Zsutty, T. (1968), Beam Shear Strength Prediction by Analysis of
Existing Data, *ACI Journal*, 65(11), 943-951.

Received : 10/24/2018

Revised : 10/28/2018

Accepted : 10/29/2018

요 지 : 순환골재를 사용한 철근콘크리트 부재에서 휨강도에 비하여 전단성능 저하가 문제점으로 제기되고 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로 강섬유를 콘크리트 보강재로 사용할 수 있다. 본 연구에서는 순환골재를 사용한 SFRC 보의 전단실험을 통하여 강도 및 변형 특성을 파악하고자 하였다. 주요 실험변수는 강섬유 혼입률(0, 0.5%, 1%), 순환골재 치환율(0%, 100%), 전단경간비($a/d = 1, 2$) 등이다. 실험결과 실험에 의한 전단강도는 강섬유의 혼입률이 증가할수록 전단경간비가 작아질수록 증가하였다. 강섬유 1% 혼입한 순환골재의 경우 일반 골재에 비해 최대전단내력이 1.77~6.25% 증가한 반면에 강섬유 0~0.5% 혼입한 실험체에서는 일반골재에 비해 순환골재가 24.2%~49.2%의 전단강도가 저하되었다. 이를 볼 때 1% 강섬유 보강에 의하여 순환골재 사용에 따른 강도 저하를 방지하는데 크게 기여하는 것을 알 수 있다.

핵심용어 : 강섬유, 순환골재, 전단강도, 강섬유보강 콘크리트
