

순환 잔골재 및 굵은골재를 사용한 SFRC 보의 성능 평가

이현호^{1*}

Capacity Evaluation of SFRC Beams Using Recycled Fine and Coarse Aggregates

Hyun-Ho Lee^{1*}

Abstract: The aim of this study is a large amount use of recycled aggregates. The considering recycled aggregates replacement ratio is 50% that of natural aggregates. In order to increase the shear capacity of beams, that may be weakened by use of recycled aggregates, steel fibers are reinforced. The main variables are steel fiber volume fractions such as 0%, 0.5%, 0.75% and 1.0%. After the test, it could confirm that the strength and deformation capacity of beams with the steel fiber content values of 0.5% and 0.75% are comprehensively enhanced compared to non reinforcement. After evaluating the shear strength by using shear strength equations of previous researches, it concluded that the strength equation of Oh et al. (2008) is able to predict the shear strength of SFRC beams on the safety side.

Keywords: Recycled coarse aggregate, Recycled fine aggregate, SFRC beams, Steel fiber, Volume fraction, Shear strength

1. 서 론

환경부에서는 2011.12월 제2차 건설폐기물 재활용 기본계획에서 생태환경보전 및 자원순환성 강화 인프라 구축을 목표로 설정하였으며, 3대 추진정책을 바탕으로 7대 중점 추진과제를 선정하였다. 3대 추진정책은 배출저감, 환경보전 및 자원순환성강화 및 건설폐기물 관리정책 및 산업인프라 구축이다. 이중 환경보전 및 자원순환성강화는 순환골재 실질 재활용율 45% 달성을 목표로 하고 있다.

2013년 4월 15일 개정·공고된 순환골재 품질기준은 콘크리트용으로 사용할 수 있는 순환골재의 품질기준을 다음과 같이 제시하고 있다. 즉 순환 굵은골재의 절대 건조 밀도(g/cm^3)는 2.5이상, 흡수율(%)은 3.0이하, 순환 잔골재의 절대 건조 밀도(g/cm^3)는 2.2이상, 흡수율(%)은 5.0이하로 규정하고 있다. 또한 순환골재를 콘크리트용 골재로 활용하기 위해서는 골재의 내구성 확인이 필요하며 순환 굵은골재는 설계기준강도 27 MPa까지의 콘크리트에 적용되는 것으로 규정하고 있다. 순환골재를 사용하여 설계기준강도 21 MPa 이상 27 MPa 이하의 콘크리트(기둥, 보, 슬래브, 내력벽 등)를 제조할 경우,

순환 굵은골재의 최대량은 투입되는 총 굵은골재 용적의 30% 이하로 치환하여 사용할 것을 권장하고 있다. 또한 잔골재는 천연 잔골재를 사용하도록 기술하고 있다. 또한 순환 굵은골재 최대치수는 20 mm 또는 25 mm 이하로 하되, 가능한 20 mm 이하를 권장하고 있다.

품질기준에서 굵은골재의 사용량을 30% 이하로 권장한 것은 순환골재가 콘크리트용으로 사용된 사례나 실적이 적고, 순환골재를 생산하는 과정에서의 품질관리, 레미콘 플랜트에서 콘크리트 제조, 운반, 타설, 시공 및 품질검사 등에 이르는 전반적인 품질관리 사례가 많지 않으므로 신중하게 사용하는 것이 필요하기 때문이라고 기술하고 있다. 실질적으로 순환 굵은골재를 구조용으로 사용되는 경우 적으므로, 순환골재의 품질관리에 많은 어려움이 예상되며, 구입도 어려운 실정이다. 그렇지만 일본 JIS A 5021(2011)의 콘크리트용 재생골재 H에서는 절건밀도 및 흡수율에 대한 기준을 제시하고 있으나, 사용용도는 제한이 없다고 규정하고 있다. 따라서 환경적 자원순환성강화라는 측면에서 순환골재의 대량사용 등에 대한 검토가 적극적으로 필요한 일정이다.

강섬유(steel fiber)는 콘크리트에 발생하는 균열을 효과적으로 제어할 수 있는 섬유보강재로 널리 인식되고 있으며, 사용 부위가 증가하고 있다. 적정량의 강섬유 보강은 경제성을 확보할 수 있으므로, 콘크리트의 낮은 인장 강도, 취성적인 파괴 특성 등 개선되어야 할 단점들을 적극적으로 개선할 수 있는 재료이다. 강섬유 보강 콘크리트(SFRC, steel fiber reinforced concrete)는 콘크리트에 단섬유 형태의 강섬유를 보강한 것으로

¹정회원, 동양대학교 건축소방행정학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: hhlee@dyu.ac.kr

Professor, Department of Architecture & Fire Service Administration, Dongyang University

•본 논문에 대한 토의를 2017년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

로, 보강되지 않은 콘크리트에 비하여 강도증진, 취성적인 콘크리트 성질개선 및 균열제어효과가 우수한 것으로 평가되고 있다. 부재에 있어 강섬유 보강된 보는 일반 콘크리트 보에 비하여 균열 강도 및 전단강도가 증가하며, 특히 연성능력의 증진이 우수한 것으로 평가되고 있다.

본 연구는 순환 잔골재와 굵은 골재의 구조부재 적극 사용을 목표로 하고 있다. 따라서 순환골재의 치환율 및 추가적인 성능 개선으로 강섬유를 이용한 보의 구조성능을 평가한다. 주요 변수는 순환골재 치환율, 강섬유 혼입률이며, 기존 제안식으로 전단강도를 평가한다.

2. 기존 연구

Lee et al.(2016)은 순환골재를 혼입한 콘크리트에 강섬유가 적용되었을 때, 역학적 특성과 변형특성으로서 압축강도, 탄성계수, 건조수축 및 크리프의 특성을 평가하였다. 시험변수는 순환 굵은골재 치환율 0, 30%와 강섬유 혼입율 0, 0.5 및 1.0%이다. 평가 결과, 초기재령에 있어 순환 골재를 혼입한 콘크리트의 압축강도는 천연골재를 사용한 콘크리트에 비해 낮은 압축강도를 나타내었으나, 장기재령으로 갈수록 천연골재 콘크리트와의 압축강도의 차이는 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 이러한 압축강도의 차이는 강섬유를 혼입함으로써 천연골재 콘크리트와 동등수준의 압축강도를 확보할 수 있는 것으로 평가되었다. 순환 골재를 혼입한 콘크리트의 탄성계수는 천연골재를 사용한 콘크리트에 비해 낮은 값을 나타내었으나, 콘크리트보다 높은 탄성계수를 갖는 강섬유를 혼입함으로써, 천연골재 콘크리트와 동등수준의 성능을 확보할 수 있는 것으로 평가되었다.

Dinh et al.(2016)은 압축을 받는 비정형 강섬유 보강 콘크리트의 역학적 특성을 평가하였다. 압축 시험은 섬유의 용적율과 압축강도 수준으로 진행되었다. 평가결과 비정형 강섬유 보강은 콘크리트의 인성, 최대 응력에서의 변형을 및 프와송 비 등을 향상시켰다. 또한 시험결과를 근거로 섬유 용적율 및 압축강도를 변수로 한 탄성계수 및 최대 응력 예측식 및 해석모델을 제안하였다.

Shin et al.(2015)은 순환골재를 사용한 강섬유보강 콘크리트보의 전단거동을 알아보기 위하여 순환골재 치환율은 30%로 고정하고, 전단경간비, 인장철근비 및 강섬유 혼입율을 변수로 한 총 24개의 강섬유 보강 콘크리트보를 만들어 실험하였다. 또한 순환골재를 사용한 강섬유 보강 콘크리트보의 전단강도를 여러 연구자들의 제안식과 비교·분석하였다. 대부분의 실험값이 제안식에 의한 이론값보다 높게 나타나 순환골재를 사용한 강섬유보강 콘크리트보를 구조부재로 사용하

여도 적절한 것으로 평가하였다.

Lee(2015)는 순환골재 대량 사용에 대한 연구의 일환으로 순환 굵은골재 치환율에 따른 슬럼프, 압축강도 및 할렬인장강도를 평가하였다. 순환 굵은골재 치환율 60%까지는 슬럼프 150 mm 이상을 확보하여 작업성을 확보하였으나, 치환율 100%에서는 작업성 확보가 곤란한 것으로 평가되었다. 순환골재를 사용하여도 압축강도의 저감은 없는 것으로 평가되었다. 이는 기존 시험결과와 다른 것으로, 순환 굵은골재의 불순물을 수작업으로 제거함에 따른 강도 증진과, 슬럼프가 낮게 나오더라도 다짐을 충실히 한 점에 기인한 것을 판단된다. 이는 할렬인장강도 비교에서는 알 수 있는데, 순환 굵은골재가 증가할수록 강도가 증가되는 것으로 평가되었다. 즉 순환골재 사용에 따른 강도 저하 요인은 고품질의 순환골재 사용 및 다짐으로 보완될 수 있음이 확인되었다.

Shin et al.(2015)은 순환골재를 사용한 강섬유 보강 콘크리트보의 전단거동을 알아보기 위하여 순환골재 치환율은 30%로 고정하고, 전단경간비, 인장철근비 및 강섬유 용적율을 변수로 한 성능실험을 실시하였다. 또한 순환골재를 사용한 강섬유 보강 콘크리트보의 전단강도를 여러 연구자들의 제안식과 비교하였다. 그 결과 실험값이 제안식보다 높게 나타나 순환골재를 사용한 강섬유보강 콘크리트보를 구조부재로 사용하여도 무방하다고 평가하였다.

Ha (2013)은 순환골재와 고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 강섬유 보강 RC보의 구조성능 향상 평가를 위한 연구를 진행하였다. 표준실험체, 순환골재와 고로슬래그 미분말을 치환한 실험체 및 순환골재와 고로슬래그의 치환율에 강섬유를 보강한 실험체를 1/2 축소 제작하여 실험을 수행하였다. 실험결과 순환골재와 고로슬래그 미분말을 치환한 콘크리트에 강섬유를 보강한 실험체의 경우 표준실험체보다 압축강도는 최대 9%, 최대내력은 1~6%, 연성능력은 각각 1.02~1.13배 증가하는 결과를 나타내었다. 또한, 충분한 연성적인 거동과 안정적인 휨인장 파괴를 나타내는 것으로 평가하였다.

Lee et al.(2004, 2005)은 강섬유 보강계수와 전단보강근을 고려한 SFRC 부재의 전단강도 산정에 관한 연구를 진행하였다. 그 결과, 강섬유 보강 콘크리트의 부재 실험결과에 대한 검토와 분석으로부터, SFRC 부재의 강섬유 보강계수를 제안하였다.

3. 성능 실험

본 연구에서는 순환굵은골재의 대량 사용을 목표로 천연 굵은골재의 50%를 순환 굵은골재로 치환하고, 천연 잔골재의 50%를 순환 잔골재로 치환한 실험체를 계획하였다. 순환

Table 1 Material properties and shape

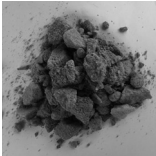
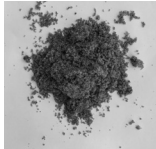
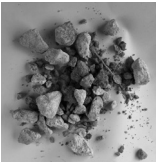
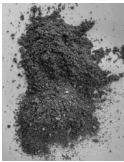

Materials	Physical and chemical properties	Shape
Cement	Density: 3.15 g/cm ³ Fineness: 3,770 cm ² /g	
Coarse aggregate	Max size: 25 mm Density: 2.65 g/cm ³ F.M.: 6.02, Absorption ratio: 1.39	
Fine aggregate	Max size: 5 mm Density: 2.54 g/cm ³ F.M.: 3.05, Absorption ratio: 1.01	
Recycled coarse aggregate	Max size : 25 mm Density : 2.50 g/cm ³ F.M.: 6.57, Absorption ratio: 2.03	
Recycled fine aggregate	Max size: 5 mm Density: 2.51 g/cm ³ F.M.: 3.08, Absorption ratio: 2.03	
Steel Fiber	Length: 30 mm, Diameter : 0.5 mm Density : 7.85 g/cm ³ , Aspect ratio: 60 Tensile strength: 1,140 MPa	

Table 2 Mixing table

Specimen name	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weighty(kg/m ³)				Steel fiber volume fraction (%)		
			Fine aggregate		Coarse aggregate				
			W	C	Natu- ral	Recyc- led			
NS35_S						0.00			
SF35_050_S	55	48	165	300	439	427	462	470	0.50
SF35_075_S									0.75
SF35_100_S									1.00

골재사용시 전단에 취약할 수 있으므로, 강섬유 혼입율 0.5%, 0.75%, 1.0%를 변수로 하였다. 하였다. 실험체 제작 등의 편의를 위하여 D10@100의 전단보강근을 설치하였다. 사용 재료 특성값 및 형상은 Table 1과 같다. 실험 배합은 Table 2와 같으며 콘크리트의 설계압축강도는 24 MPa로 계획하였으며, 사용한 철근의 항복강도는 400 MPa이다. 배합시 슬럼프를 측정하였으며, 콘크리트 경화후 압축강도, 할렬인장강도를 측정하였다. 또한 철근은 항복강도 및 인장강도, 탄성계수를 측정하였다.

강섬유는 Table 1과 같이 길이 30 mm, 지름 0.55 mm인 양

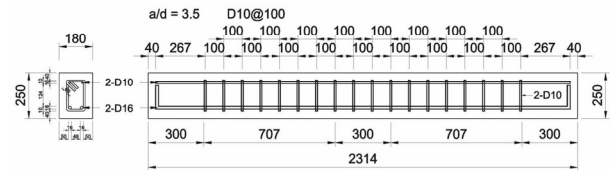


Fig. 1 Specimen detail

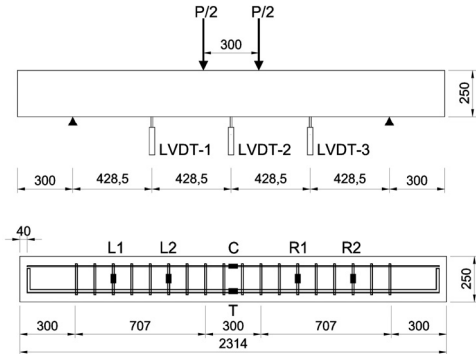


Fig. 2 Loading and measuring plan

단후크형(both hooked end type)을 사용하였다. 실험체의 단면은 폭 180 mm, 춤 250 mm, 길이 2,314 mm로 계획하였다. 실험체의 전단경간비는 3.5이며, 실험체의 지점간 거리는 1,714 mm이다. 이점(two point) 가력하였으며, 인장철근 및 전단철근은 SD 400의 D16 및 D10을 각각 사용하였다. Table 1에 실험체 변수를 나타내었으며, Fig. 1에 실험체 상세, Fig. 2에 LVDT 설치 및 실험체 부착 게이지 위치를 나타내었다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 재료 특성 평가

일반적으로 강섬유 보강된 콘크리트는 슬럼프는 저하되고, 압축강도 및 할렬인장강도는 증가하는 경향이 있다. 또한 순환골재 표면에 묻어 있는 시멘트의 수분 흡수에 의한 슬럼프 및 강도저하 등이 보고되고 있다. Fig. 3에 강섬유 혼입율에 따른 슬럼프를 나타내었다. 강섬유 비보강 슬럼프 160 mm 대비, 강섬유 혼입율 0.75%까지는 슬럼프가 145 mm로 측정되어, 작업성이 확보된 것으로 평가되었다. 그렇지만 강섬유 혼입율 1.0%인 경우, 슬럼프는 100 mm로 평가되어 작업성이 떨어지는 것으로 평가되었다.

Fig. 4의 압축강도 평가결과, 강섬유 혼입율이 0.5%인 경우, 비보강 대비 14.2% 강도가 저하되었으며, 0.75% 및 1.0%인 경우, 11.9% 강도가 저하되는 것으로 평가되었다. 이는 강섬유 혼입에 따른 일반적인 압축강도 저하현상으로, 적절한 배

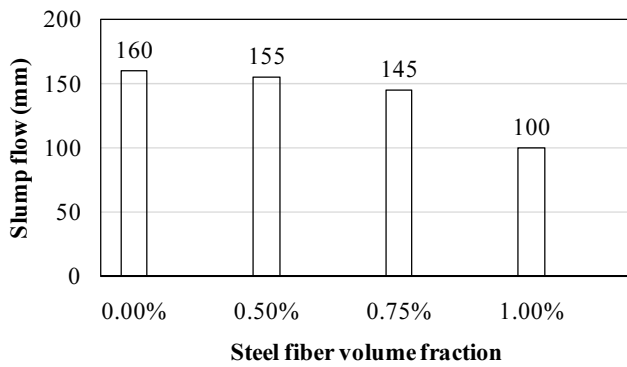


Fig. 3 Slump flow comparison

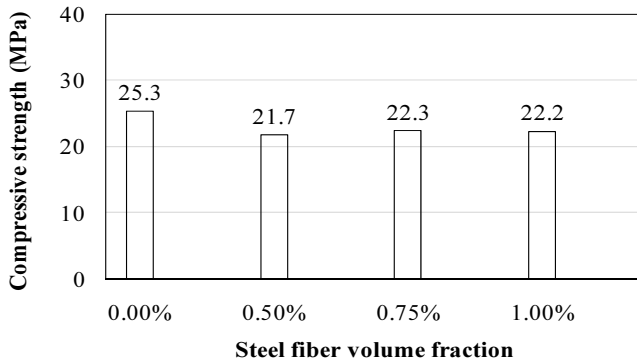


Fig. 4 Compressive strength comparison

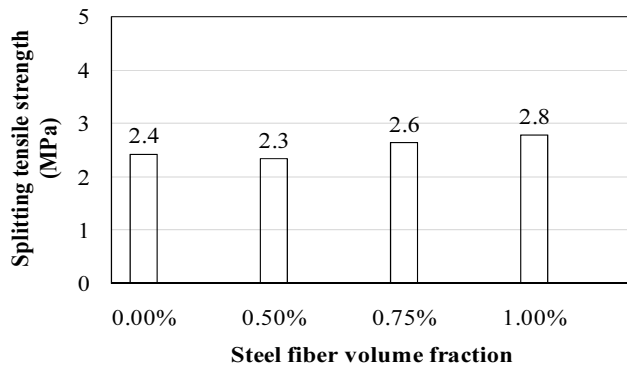


Fig. 5 Splitting tensile strength comparison

합 등으로 강도 저하가 개선될 수 있는 것으로 판단된다. 압축 강도 측정시 측정한 압축변형도를 이용한 탄성계수의 경우, 강섬유 비보강인 경우 11,285 MPa로 평가되었다. 강섬유 보강량이 0.5%, 0.75%, 및 1.0%인 경우 탄성계수는 10,322 MPa, 13,292 MPa 및 13,656 MPa으로 평가되었다. 이로부터 0.5%의 강섬유 보강은 압축강도 및 탄성계수의 저하를 나타내었으며, 0.75%이상의 강섬유 보강은 압축강도 및 탄성계수가 비보강 콘크리트에 근접하는 것으로 평가되었다. 향후 적정

Table 3 Material properties of rebars

Rebar	Yield strength (MPa)	Yield strain ($\times 10^{-6}$)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)
D10	437	4,030	533	108,437
D16	475	5,230	606	90,822

Table 4 Test results

Specimen name	Steel fiber volume fraction (%)	Yield load (kN)	Yield displacement (δ_y , mm)	Maximum load (kN)	Ultimate displacement (δ_{max} , mm)	Ductility ratio (δ_{max}/δ_y)
NS35_S	0.00	76.05	5.08	101.4	5.61	1.1
SF35_050_S	0.50	80.91	5.04	107.9	72.00	14.3
SF35_075_S	0.75	78.44	5.00	104.6	110.60	22.1
SF35_100_S	1.00	78.09	5.17	104.1	100.80	19.5

강섬유 혼입율에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

Fig. 5의 활렬인장강도 평가결과, 강섬유 혼입율이 0.5%인 경우, 비보강 대비 4.2% 강도가 저하되었으며, 0.75% 및 1.0%인 경우, 8.3% 및 16.7% 강도가 증가되는 것으로 평가하였다. 그렇지만 활렬인장강도의 증진이 예상보다 적어 강섬유 배합 설계 및 혼합방법에 대한 신중한 고려가 필요한 것으로 판단된다. 향후 강섬유를 치환재로 고려한 배합설계의 개선이 필요한 것으로 판단된다. Table 3에 철근의 인장시험결과를 나타내었다. 항복강도는 목표 강도를 확보하였으며, 탄성계수는 기준보다 적게 평가되었다. 이는 재료 시험시 인장시험편의 미끄러짐(slip) 의한 것으로 판단된다.

4.2 파괴 양상

순환하중 및 강섬유를 사용한 보의 실험은 Fig. 6과 같은 1,000 kN용량의 가력장치로 진행하였으며, 실험과 동시에 하중, 변위 및 변형도를 기록하였다. Fig. 7에는 실험체의 파괴 양상을 나타내었는데, 강섬유 비보강인 NS35_S 실험체는 최대하중 101.4 kN 도달 후 급격한 취성(brittle)파괴가 발생하였다. 반면 강섬유가 보강될수록 연성(ductile)거동을 보임을 확인할 수 있었다. 강섬유가 0.5% 보강된 SF35_050_S 실험체는 최대하중 107.9 kN 도달 후 점진적인 파괴가 발생하였다. 강섬유가 0.75% 및 1.0% 보강된 SF35_075_S 및 SF35_100_S 실험체는 최대강도 104.6 kN 및 104.1 kN에 도달 후 연성적인 거동을 보인다 파괴에 도달하였다. 여기서 강섬유가 0.75% 및 1.0% 보강된 경우가 0.5% 보강보다 최대강도가 낮은 것은 실험진행시 발생한 편심에 의한 것으로 판단된다. 그렇지만 최대하중 이후 연성적인 거동은 Fig. 7에서 확인할 수 있었다.

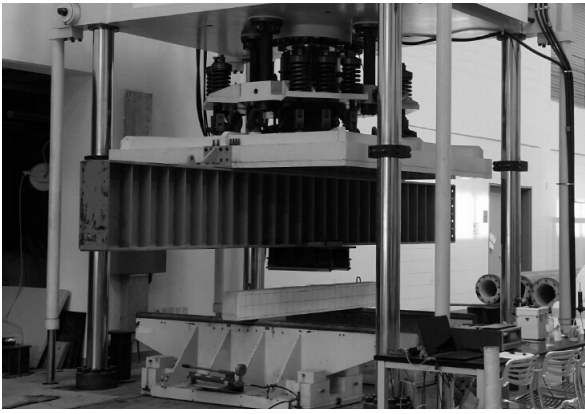
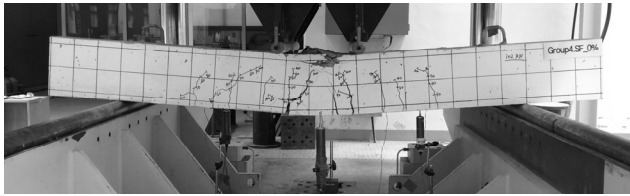
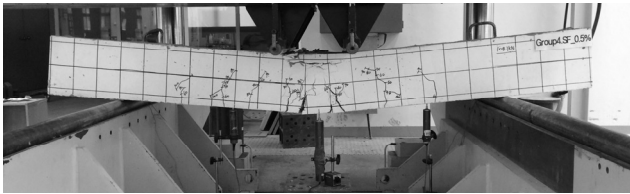


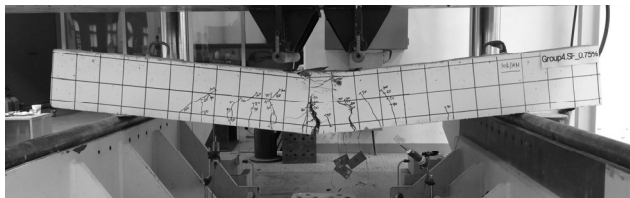
Fig. 6 Loading device



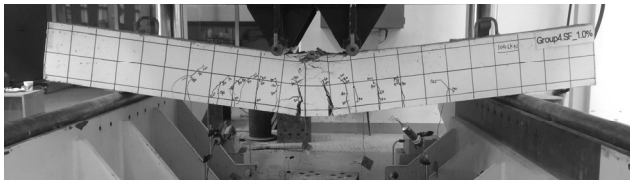
(a) NS35_S



(b) SF35_S



(c) SF35_S



(d) SF35_S

Fig. 7 Final failure shape

4.3 하중-변위 곡선

Fig. 8에 실험체의 하중-변위 곡선을 나타내었는데, 강섬유 보강이 실험체의 강도 및 변형 능력에 많은 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 강섬유 혼입을 0.5%인 경우, 강도능력이 증진되었으며, 연성적인 거동을 보였다. 강섬유 혼입을

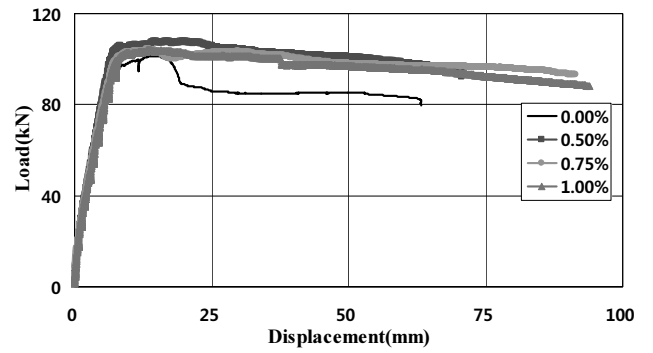


Fig. 8 Load-displacement curve

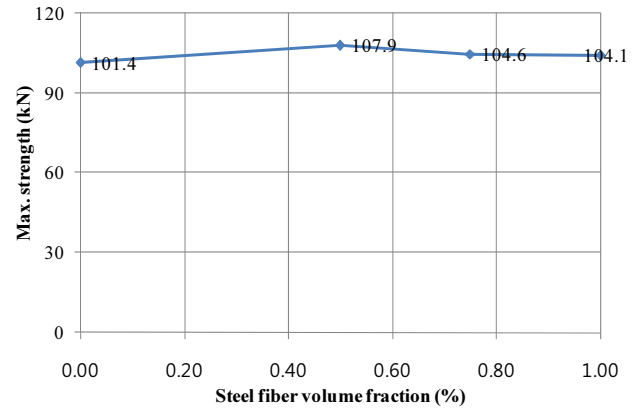


Fig. 9 Max. strength comparison

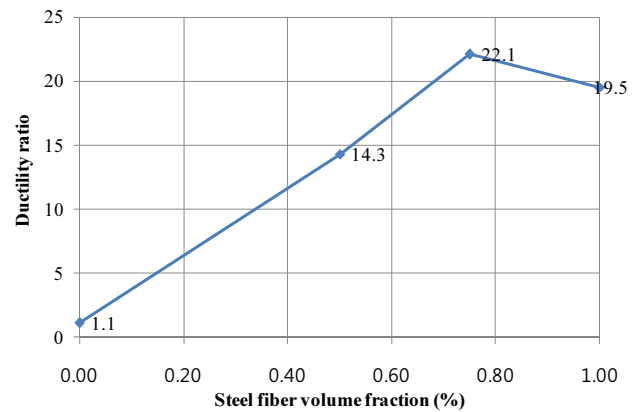


Fig. 10 Ductility ratio comparison

0.75% 및 1.0% 보강의 경우 강도가 0.5% 보강보다 다소 떨어지지만, 최대하중 이후 변형능력이 우수함을 확인할 수 있었다. 이로부터 적정 강섬유 보강이 보부재의 강도 및 변형능력 증진에 효과적임을 확인할 수 있었다.

4.4 강도 및 연성 능력

Table 4에 SFRC 보의 항복강도, 최대강도, 연성비 등을 나

타내었다. 여기서 항복강도 및 항복변위 δ_y 는 기존연구에 의거 최대강도의 75%에 해당하는 강도 및 변위로 산정하였다. 극한변위 δ_{max} 는 최대하중이후 최대하중의 80%까지 저하되는 점의 변위로 산정하였다. 연성비는 극한변위를 항복변위로 나누어서 산정하였다.

강섬유 혼입율에 따른 실험체의 최대강도를 Fig. 9에 나타내었다. 강섬유 비보강 대비, 강섬유가 0.5%, 0.75%, 1.0% 보강될수록 최대강도는 6.4%, 3.2%, 2.7% 증가하였다. 즉 강섬유 보강 0.5% 및 0.75%의 범위에서 강도증진 우수함을 확인할 수 있었다.

Fig. 10에 강섬유 혼입율에 따른 연성비를 나타내었다. 연성비는 부재의 소성능력을 나타내는 것으로 내진설계에 있어 중요한 평가 요소이다. 강섬유 혼입율이 0.5%, 0.75%, 1.0%로 증가할수록 연성비는 14.3, 22.1, 19.5로 나타나, 비보강 연성비 1.1 경우 대비 월등한 연성비 증가를 확인할 수 있었다. 특히 강섬유 0.75% 보강에서는 비보강 대비 약 19배의 연성이 증진되는 것으로 평가되었다.

5. 전단강도 평가

일반적으로 콘크리트에 순환 잔골재 및 굵은골재를 사용한 경우, 근본적으로 천연골재대비 강도 저하 등의 문제가 없는 것으로 대부분의 연구에서 보고하고 있다. 그렇지만 순환골재 생산과정에서 생길 수 있는 품질저하 및 수급이 곤란한 현실을 고려하여 보에 있어 취성적인 전단강도에 대한 평가를 수행하였다. 평가는 강섬유 보강에 대한 기존 전단강도식을 이용하여 진행하였으며, 주요 평가변수는 섬유계수, 할렬인장강도 및 전단경간비이다. 이하에는 대표적인 강섬유 보강 콘크리트에 대한 기존 전단강도식을 정리하였다.

Kwak et al.(2002)은 전단보강근이 없는 경우, 강섬유 보강 콘크리트의 인장강도를 고려한 전단 강도식 (1)을 제안하였다.

$$v_u = 3.7ef_{sp}^{2/3}(\rho_t \frac{d}{a})^{1/3} + 0.8\nu_b \quad (1)$$

여기서

v_u : 전단강도 (MPa)

f_{sp} : 할렬인장강도 (MPa)

e : 1.0 for $a/d > 3.4$, 3.4 d/a for $a/d \leq 3.4$

ρ_t : 인장철근비

a/d : 전단경간비

$\nu_b = 0.41\tau F$, $\tau = 4.15(MPa)$

$F = L_f/D_f \times \rho_f \times d_f$ (fiber factor), 섬유계수

L_f : 강섬유길이

D_f : 강섬유지름

ρ_f : 강섬유 혼입비(ratio)

d_f : 강섬유부착계수

(직선형0.5, 후크형0.75, 톱니형1.0)

Narayanan and Darwish(1987)은 강섬유 보강 콘크리트 보의 섬유인발응력 이론을 근거로 다음의 식 (2)를 제안하였다.

$$v_u = e[0.24f_{sp} + 80\rho \frac{d}{a}] + \nu_b \quad (2)$$

e : 1.0 for $a/d > 2.8$, and 2.8 d/a for $a/d \leq 2.8$

Shin et al.(1994)은 전단보강이 없는 강섬유보강 콘크리트 보의 전단거동에 관한 연구를 통하여, 강섬유 혼입율 및 전단경간비에 대한 전단강도식을 제안하였다.

$a/d \geq 3.0$ 일 때 (3)

$$v_u = 0.19f_{sp} + 93\rho(\frac{d}{a}) + 0.834\nu_b$$

$a/d < 3.0$ 일 때

$$v_u = 0.22f_{sp} + 217\rho(\frac{d}{a}) + 0.8344\nu_b$$

Ashour et al.(1992)은 고강도 강섬유 부재를 포함한 전단강도식을 제안하였다.

$$v_u = (0.7\sqrt{f_{ck}} + 7F)\frac{d}{a} + 17.2\rho_t \frac{d}{a} \quad (4)$$

Oh et al.(2008)은 강섬유 보강 휨부재의 전단강도에 영향을 주는 주요 구조 변수를 적절히 고려하면서 오차율을 최소화할 수 있는 전단강도 산정식을 제안하였다.

$$v_u = (0.7e + 0.25F)\sqrt{f_{ck}} + 75\rho_t \frac{d}{a} \quad (5)$$

e : 1.0 for $a/d > 2.5$, and 2.8 d/a for $a/d \leq 2.8$

순환골재를 사용한 SFRC보의 전단강도를 평가하기 위하여 상기의 제안식을 본 연구의 실험결과에 적용하였다. 타 연구자료 등을 참고하려했으나, 측정값의 분산이 너무 심하여 본 평가에서는 제외하였다. Fig. 11에 본 실험에 의한 전단강

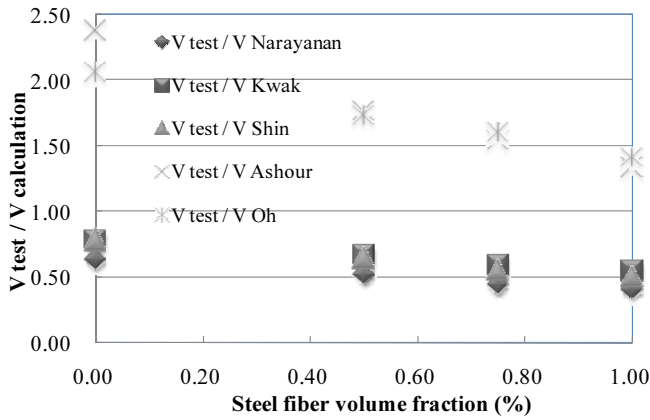


Fig. 11 Shear strength comparison

Table 5 Shear strength equations comparison

Shear strength equation	Kwak et al. (2002)	Narayanan et al. (1987)	Shin et al. (1994)	Ashour et al. (1992)	Oh et al. (2008)
Average	0.50	0.64	0.62	1.76	1.70
Standard deviation	0.10	0.10	0.12	0.45	0.27

도를 제안식으로 나눈 강도비($V_{test}/V_{제안식}$)를 나타내었다. 먼저 강섬유 비보강인 경우, Narayanan and Darwish(1987), Kwak et al.(2002), Shin et al.(1994), Ashour et al.(1992) 및 Oh et al.(2008)의 제안식에 대하여 강도비는 각각 0.64, 0.77, 0.78, 2.38 및 2.06으로 평가되었다. 여기서 Ashour 및 Oh의 제안식은 콘크리트의 할렬인장강도 대신 압축강도를 사용한 것으로 할렬인장강도를 사용한 제안식보다는 안전측으로 전단강도를 예측하는 것으로 판단된다.

이러한 경향은 강섬유가 보강된 경우에도 나타났는데, 할렬인장강도를 사용한 제안식이 실험결과보다 큰 전단강도를 나타내었으며, 압축강도를 사용한 제안식은 실험결과보다 작은 전단강도를 나타내었다.

이러한 결과 등을 정량적으로 평가하기 위하여 Table 5에 제안식별 평균 및 분산을 나타내었는데, Oh의 제안식에 의한 강도비는 평균 1.7 및 분산 0.27로 나타나 실험결과에 근접하는 것으로 나타났다. 따라서 순환골재 및 강섬유를 사용한 보의 전단강도는 Oh의 제안식이 안전측으로 평가 가능한 것으로 판단된다. 그렇지만 할렬인장강도를 사용한 제안식의 분산은 0.1 및 0.12로 평가되어 강섬유 보강시, 이에 대한 적절한 반영이 가능한 것으로 판단된다. 향후 강섬유 보강 콘크리트의 전단강도 산정에 있어 할렬인장강도와 압축강도와 상관에 관한 보완 검토가 필요하며, 통일된 전단내력식의 제안이 필요한 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 환경친화적인 순환골재를 대량 사용하기 위한 연구를 진행하였다. 천연골재를 순환골재로 50% 치환한 보에 전단성능을 증진시키기 위하여 강섬유를 보강하였다. 강섬유 혼입율은 콘크리트 체적의 0%, 0.5%, 0.75% 및 1.0%로 보강하였다. 주요한 연구결과는 아래와 같다.

- 1) 강섬유 보강 콘크리트는 강섬유 혼입율이 증가할수록 슬럼프는 다소 저하되는 것으로 평가되었으며, 강섬유 혼입율 0.75%까지는 적절한 작업성을 보유한 것으로 평가되었다. 압축강도 평가결과, 강섬유 혼입율이 0.5%인 경우, 비보강 대비 14.2% 강도가 저하되었으며, 0.75% 및 1.0%인 경우, 11.9% 강도가 저하되는 것으로 평가되었다. 이는 강섬유 혼입에 따른 일반적인 압축강도 저하현상으로, 적절한 배합 등으로 강도 저하가 개선될 수 있는 것으로 판단된다. 할렬인장강도 평가결과, 강섬유 혼입율이 0.5%인 경우, 비보강 대비 4.2% 강도가 저하되었으며, 0.75% 및 1.0%인 경우, 8.3% 및 16.7% 강도가 증가되는 것으로 평가하였다. 그렇지만 할렬인장강도의 증진이 예상보다 적어 강섬유 배합설계 및 혼합방법에 대한 신중한 고려가 필요한 것으로 판단된다.
- 2) 실험체의 하중-변위 곡선을 평가한 결과, 강섬유 보강이 실험체의 강도 및 변형 능력 증진에 많은 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 강섬유 혼입율 0.5%인 경우, 강도능력이 증진되었으며, 연성적인 거동을 보였다. 강섬유 혼입율 0.75% 및 1.0% 보강의 경우 강도가 0.5% 보강보다 다소 떨어지지만, 최대하중 이후 변형능력이 우수하게 증진됨을 확인할 수 있었다.
- 3) 최대하중의 경우, 강섬유가 0.5%, 0.75%, 1.0% 보강될수록 최대강도는 6.4%, 3.2%, 2.7% 증가하였다. 강섬유 보강 0.5% 및 0.75%의 범위에서 강도증진 우수함을 확인할 수 있었다. 또한 연성비 평가 결과, 강섬유 혼입율이 0.5%, 0.75%, 1.0%로 증가할수록 연성비는 14.3, 22.1, 19.5로 나타나, 비보강 연성비 1.1 경우 대비 월등한 연성비 증가를 확인할 수 있었다. 특히 강섬유 0.75% 보강에서는 비보강 대비 약 19배의 연성이 증진되는 것으로 평가되었다.
- 4) 이상의 결과로부터 순환골재 및 강섬유를 사용한 보의 경우, 0.75%의 강섬유 보강이 강도 및 변형능력의 증진, 그리고 고 작업성 확보가 용이한 것으로 판단된다.
- 5) 기존 연구자의 전단강도식으로 실험체의 강도를 산정한 결과, 압축강도를 변수로 Oh et al.(2008)의 제안식이 안전측면에서 사용가능한 것으로 판단된다. 그렇지만 할렬인장강도를 사용한 제안식이 분산은 낮게 평가되어, 향후 강섬유 보강 콘크리트의 할렬인장강도와 압축강도와 상관

에 관한 보완 검토가 필요하며, 통일된 전단내력식의 제안이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. NRF-2014R1A1-A2058614) 및 2016년도 동양대학교 학술연구비의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Ashour, S. A., Hasanain, G. S., and Wafa, F. F.(1992), Shear Behavior of High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams, *ACI Structural Journal*, 89(2), 176-184.
- Dinh, N. H., Choi, K. K. and Kim, H. S.(2016), Mechanical Properties and Modeling of Amorphous Metallic Fiber-Reinforced Concrete in Compression, *Internal Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(2), 221-236.
- Ha, G. J., Yi, D. R., and Ha, J. H. (2013), Evaluation of Structural Performance of RC Beams Retrofitted Steel Fiber consequential Replacement of Recycled Coarse Aggregate and Ground Granulated Blast Furnace Slag, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 25(5), 477-484.
- 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.
- Lee, H. H. (2004), Evaluation of Shear Strength in SFRC Beam without Stirrups Considering Steel Fiber Strengthening Factor, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, 8(2), 213-220.
- Lee, H. H. (2015), Material Strength Evaluation of Recycled Coarse Aggregate by Replacement Ratio, *Proceeding of the Korea sInstitute for Structural Maintenance Inspection*, Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, 19(2), 463-464.
- Lee, H. H. and Lee, T. W. (2016), Experimental Study on Mechanical Properties and Deformation Behavior of Concrete with Recycled Aggregates and Steel Fiber, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 28(3), 357-363.
- Lee, H. H., and Hur, M. W. (2005), Shear Capacity Estimation of SFRC Members Considering Steel Fiber Strengthening Factor and Shear Reinforcement, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 21(5), 35-42.
- 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.
- Sherif, Y., Kareemi, H., Anaam, A., Amani, Z. and Hiba, I. (2015), Strength and Durability Evaluation of Recycled Aggregate Concrete, *Internal Journal of Concrete Structures and Materials*, 9(2), 219-239.
- Shin, J. L., Kim, W. S., Baek, S. M., Kang, T. 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.
- Shin, S. W., Oh, J. K. and Ghosh, S. K. (1994), Shear Behavior of Laboratory-Sized High-Strength Concrete Beams Reinforced with Bars and Steel Fibers, *Fiber Reinforced Concrete Development and Innovations*, ACI SP-142, 181-200.

Received : 12/05/2016

Revised : 12/13/2016

Accepted : 12/14/2016

요 지 : 본 연구의 목적은 순환골재를 대량 사용하기 위한 것이다. 천연골재를 순환골재로 50% 치환한 보의 전단성능을 증진시키기 위하여 강섬유를 보강하였다. 강섬유 혼입율은 0%, 0.5%, 0.75% 및 1.0%이다. 실험 결과, 강섬유 혼입율 0.5%인 경우와 0.75%인 경우의 강도 및 변형능력이 비보강 대비 월등히 증진됨을 확인할 수 있었다. 기존 연구자의 전단강도식으로 실험체의 강도를 평가한 결과, Oh et al.(2008)의 전단강도식이 SFRC 보의 전단강도를 안전측으로 예측할 수 있는 것으로 평가되었다.

핵심용어 : 순환 굵은골재, 순환 잔골재, SFRC 보, 강섬유, 혼입율, 전단강도
