

최소철근량 이하로 보강된 강섬유보강 보의 휨성능 고찰

강덕만¹, 박용걸², 문도영^{3*}

A Study on the Flexural Performance of Steel Fiber-Reinforced Beams lightly Reinforced Below the Minimum Steel Reinforcement

Duk-Man Kang¹, Yong-Gul Park², Do-Young Moon^{3*}

Abstract: In this study, steel fiber-reinforced concrete beams with ordinary steel reinforcements, that are below minimum steel reinforcement amount specified in domestic concrete structure design code, were tested in flexure until failure. Steel reinforcement ratio considered were 44%, 66%, 78% and 100% of the minimum steel reinforcement. Considered steel fiber volume fractions were 0.25%, 0.50%, 0.75% and 1.00%. In results, it is confirmed that steel fibers greatly improve crack performance. Also, the steel fibers contributed to increment in yield load not in ultimate load. But the increment was not greater than the reduction by steel reinforcement reduction. The use of steel fibers in RC beams lightly reinforced below the minimum reinforcement ratio specified design code reduced ductility greatly. Consequently, steel reinforcement ratio in steel fiber-reinforced beams lightly reinforced below the minimum steel reinforcement should be increased in order to enhance proper ductility.

Keywords: Minimum steel reinforcement, Ductility, Crack Resistant Performance, Load Carrying Performance, Steel Fiber-Reinforced Concrete

1. 서 론

콘크리트 구조물을 설계할 때 요구되는 철근량이 매우 적거나 필요 없다고 하더라도 콘크리트구조기준에서는 극한한 계상태에서 취성과파괴를 방지하고 안전을 도모하기 위하여 최소철근량을 규정하여 보강토록 하고 있다.

최근에는 강섬유를 활용한 고성능 콘크리트의 개발기술이 고도화되면서, 최소철근이 보강된 콘크리트구조에 추가로 강섬유를 적용하여 기준에서 정하고 있는 최소철근량을 추가로 감소시키는 동시에 오히려 변형능력을 개선시키려는 다양한 연구가 시도되었다.

기존 연구에 의하면 터널 복공용 콘크리트에 강섬유보강콘크리트를 적용하여 최소철근량을 추가로 줄일 수 있는 설계 방법과 절차를 제시하였다(Chiaia et al, 2007(a), 2009(b)). 또한, 보도용 콘크리트 패널에 강섬유보강콘크리트를 적용하여 전혀 철근이 보강되지 않은 강섬유 보강 보도 슬래브를 개발

하였다(Fantilli et al, 2015). 이상과 같은 연구는 2010년 발표된 fib Model Code 2010(이하 MC2010)에 그 기술적 근거를 두고 있다. MC2010에 의하면 강섬유보강콘크리트를 사용하여 철근의 일부 또는 전부를 삭제할 수 있으며, 이를 만족하기 위한 재료적, 구조적 성능기준을 제시하고 있다. 그러나 철근 콘크리트 구조물에서 보강철근이 최소철근량 이하가 되면 예기치 않은 파괴가 발생할 수 있는 만큼 부재차원의 검증이 필연적임에도 불구하고 이에 대한 검증연구는 매우 부족한 실정이다.

강섬유보강 콘크리트는 우수한 균열저항성능을 보유하고 있다고 보고되었다. 그러므로 강섬유가 철근과 같이 사용할 때 구조의 연성을 향상시킬 것으로 기대한다. 그러나 Dancygier et al.(2006(a), 2016(b))의 실험결과에 따르면 철근비가 낮을 때 강섬유로 인해 연성이 감소한다고 보고하고 있다. 이와 같은 기대에 반한 실험결과는 철근과 강섬유가 동시에 사용된 구조에 대한 부재수준의 검증연구가 더욱 절실함을 이야기하고 있다.

본 논문에서는 최소철근이하로 보강된 RC보(이하 RC 라 함)와 강섬유와 최소철근이 동시에 보강된 철근/강섬유보강 콘크리트(steel reinforced SFRC, 이하 R/SFRC라 함) 휨부재의 파괴 실험(각각 RC Test, R/SFRC Test라 함)을 수행하고 강섬유량과 철근비에 따른 성능변화를 고찰하고 평가하였다.

2장에서는 실험체의 실험에 대한 개요를, 3~4장에서는 RC

¹정회원, 서울과학기술대학교 철도전문대학원 박사과정

²비회원, 서울과학기술대학교 철도전문대학원 교수

³정회원, 경성대학교 건설환경도시공학과 부교수, 교신저자

*Corresponding author: dymoon@ks.ac.kr

Department of Civil Engineering, Kyung-Sung Univ, Busan 48434, Rep. of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 6월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

와 R/SFRC Test 결과를 토대로 균열상황과 초기균열하중, 항복하중 및 극한하중과 그에 해당하는 변위 결과를 비교하였다. 실험결과를 토대로 5장에 결론을 제시하였다.

2. 실험

2.1 실험변수

2.1.1 RC Test 실험 변수

RC Test의 실험변수는 Table 1에 제시하였다. 국내 콘크리트구조기준(2012)에서 규정하고 있는 최소휨보강철근량을 기준으로 하였으며, 이에 대하여 78%, 66%, 44%의 보강철근

Table 1 Test variable in RC Test

Reinforcement ratio	Calculation	ID for reinforcement ratio
Min. ratio	$\left(\frac{0.25\sqrt{f'_c}}{f_y}\right)b_w d$	1.00A _s
78% of Min. ratio	$0.78 \times \left(\frac{0.25\sqrt{f'_c}}{f_y}\right)b_w d$	0.78A _s
66% of Min. ratio	$0.66 \times \left(\frac{0.25\sqrt{f'_c}}{f_y}\right)b_w d$	0.66A _s
44% of Min. ratio	$0.44 \times \left(\frac{0.25\sqrt{f'_c}}{f_y}\right)b_w d$	0.44A _s

Table 2 Test variable in R/SFRC Test

ID for mix ratio of steel fibers	ID for reinforcement ratio	Fiber mix ratio (%Vol.)	Mixed fiber weight (kg/m ³)
0.25	1.00A _s	0.25	20
0.50		0.50	40
0.75		0.75	60
1.00		1.00	80
0.25	0.78A _s	0.25	20
0.50		0.50	40
0.75		0.75	60
1.00		1.00	80
0.25	0.66A _s	0.25	20
0.50		0.50	40
0.75		0.75	60
1.00		1.00	80
0.25	0.44A _s	0.25	20
0.50		0.50	40
0.75		0.75	60
1.00		1.00	80

량을 실험변수로 하였다. 구분을 위하여 철근비를 변수명으로 사용하였으며, “A_s”는 철근단면적을 의미한다.

2.1.2 R/SFRC Test 실험 변수

R/SFRC Test의 실험변수는 Table 2에 제시하였다. 일반강도 콘크리트에서 사용하는 강섬유의 혼입비는 체적비에 대하여 최소 0.25%에서 최대 1.00%이다. 따라서 본 실험에서 고려된 강섬유의 혼입비는 0.25%~1.00%로 하였다. 구분은 강섬유 혼입비로 하였다.

2.2 사용재료

본 논문에서 고려한 콘크리트는 설계압축강도 40MPa이며, 시방배합은 Table 3과 같다. 실험체 제작에 사용된 철근은 현대제철에서 제작한 SD400 철근이다. 인장실험을 별도로 수행하지는 않았다. 강섬유는 베카르트코리아(주)의 인장강도 1,100MPa, 길이 35 mm, 직경 0.55 mm, 형상비 64의 후크형 3D Dramix 강섬유를 사용하였다.

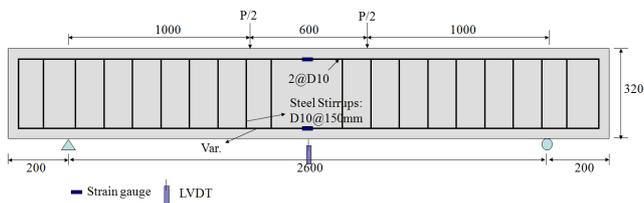
2.3 실험체

Fig. 1(a)와 같이 실험체를 제작하였으며, 콘크리트구조기준(2012)의 규정에 근거하여 계산된 소요 최소철근량은 316 mm²이지만, Fig. 1(b)와 같이 실제로 배근된 철근은 이를 상회하면서 가장 근사한 철근 조합으로 직경 13 mm의 철근 두가닥과 직경 10 mm 철근 한가닥(A_s = 324mm²)을 배근하였다. 최소철근량 이하의 시험체인 0.78A_s, 0.66A_s, 0.44A_s 시험체의 철근은 철근의 직경을 조정하여 배근하였다.

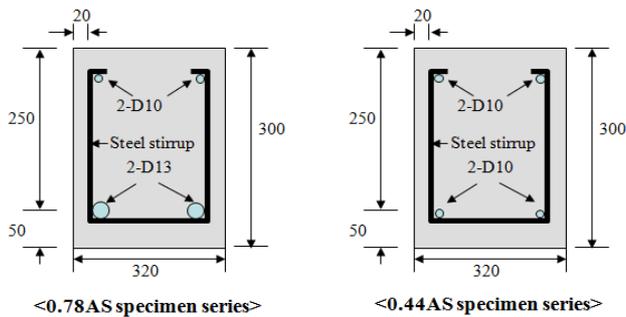
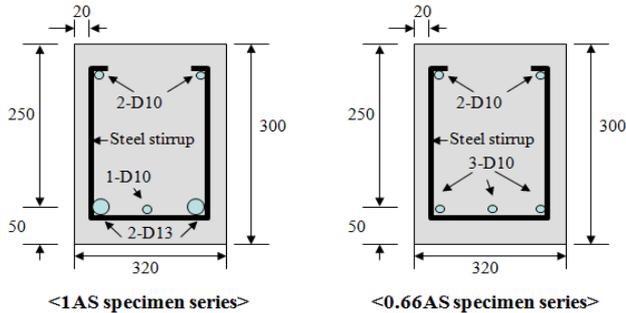
현행 설계기준에 의하면 철근의 간격은 균열폭의 제한을 위하여 상한치를 정하여 배근하도록 하고 있으며, 본 실험체는 규정에 만족하도록 주철근의 간격을 조정하였다. 또한 인장 및 압축철근은 정착길이가 부족하지 않도록 보의 단부에서 같고리 정착하였다. 또한 Fig. 1(a)에 제시한 것과 같이 가력장치의 길이를 고려하여 전단지간길이를 1,000 mm로 계획하고 가력 중 시험체가 휨 파괴 이전에 전단파괴가 발생하지

Table 3 Mix proportion and compressive strength of concrete used

f _{ck} (MPa)	W/B (%)	S/a	G _{max} (mm)	Unit weight (kg/m ³)						Measured strength (MPa)	
				W	C	S	G	A	SF		
40	37	45	25	170	460	777	949	4.4	0	43.4	
									~	20	46.2
									6.6	40	48.9
40	37	45	25	170	460	777	949	6.6	60	36.6	
									80	40.9	



(a) front view



(b) sectional view

Fig. 1 Specimen detail



Fig. 2 Test set-up

않도록 전단보강을 하였다. 사용된 전단보강철근 상세는 직경 10 mm의 스티럽을 150 mm 간격으로 보강하였다. 각 실험체의 배근상세를 Table 4에 제시하였다.

Table 4 Specimen IDs. and reinforcement details

Specimen IDs	Steel fiber (kg/m ³)	Flexure steel reinforcement		Rebars for Comp. and Shear
		detail	A _s (mm ²)	
1.00A _S -0.00*		2@D13 +1@D10	324	0.41
RC Test 0.78A _S -0.00	0	2@D13	253	0.32
0.66A _S -0.00		3@D10	214	0.27
0.44A _S -0.00		2@D10	143	0.18
1.00A _S -0.25		2@D13 +1@D10	324	0.41
0.78A _S -0.25	19.3	2@D13	253	0.32
0.66A _S -0.25		3@D10	214	0.27
0.44A _S -0.25		2@D10	143	0.18
1.00A _S -0.50		2@D13 +1@D10	324	0.41
0.78A _S -0.50	39.0	2@D13	253	0.32
0.66A _S -0.50		3@D10	214	0.27
R/SFRC Test 0.44A _S -0.50		2@D10	143	0.18
1.00A _S -0.75		2@D13 +1@D10	324	0.41
0.78A _S -0.75	58.5	2@D13	253	0.32
0.66A _S -0.75		3@D10	214	0.27
0.44A _S -0.75		2@D10	143	0.18
1.00A _S -1.00		2@D13 +1@D10	324	0.41
0.78A _S -1.00	78.0	2@D13	253	0.32
0.66A _S -1.00		3@D10	214	0.27
0.44A _S -1.00		2@D10	143	0.18

2@ D10@
D10 150

2.4 실험방법

본 실험에서는 200 kN의 액츄에이터를 사용하여 4점 재하 방식으로 하중을 가력하였다. 실험체의 양쪽 단부로부터 200 mm 위치에 강제 롤러를 설치하여 실험체의 지지점으로 하였으며, 지점 사이의 거리는 2,600 mm로 하였다. 하중 가력점은 실험체의 중심에서 각각 300 mm 떨어진 곳에 위치하여, 가력점 사이의 거리는 600 mm로 하였다.

하중재하는 강제 가력보를 액츄에이터와 실험체 사이에 놓고 하중을 재하하였으며, 1.5 mm/min의 속도로 변위제어하였다. 하중값은 액츄에이터에 부착된 로드셀에 의해 측정하였다.

작용하중으로 인한 보의 처짐을 측정하기 위하여 보의 중앙부 인장측에 L자형 강재를 부착하였다. LVDT의 측정부를 L자 강재에 접촉시켜 변위를 측정하였다. LVDT는 Tokyo Sokki사의 CDP-100으로 100 mm용량의 LVDT를 사용하였

다. 실험 측정값들은 데이터로거(TSD-302)로 받아들여 컴퓨터를 이용하여 실험결과를 정리하였다.

3. RC Test 실험결과 및 고찰

3.1 파괴모드 및 균열

Fig. 3과 같이 모든 RC Test 실험체는 등모멘트 구간에 발생한 균열이 주균열로 성장하면서 보의 상단에 이르러 최종적인 파괴가 발생하는 연성적인 휨파괴가 발생하였다. 주목할 것은 균열의 수와 균열의 폭이 철근비에 따라 크게 달라지는 것을 확인할 수 있다. 최소철근량에서 철근량이 줄어들수록 균열의 수는 크게 감소하며, 균열의 폭은 크게 증가하는 것으로 확인되었다. 정량적인 비교, 분석을 위하여 Fig. 4에 최종 파괴 후 측정된 균열 수, 균열간격, 최대균열폭과 최외측 균열간 거리를 비교하여 나타내었다. 균열의 수는 시간내에 발견된 휨균열의 수를 조사한 것이며, 균열간격은 발생한 균열간의 간격을 줄자로 측정된 후 평균한 값이다. 최대 균열폭은 실험 종료 후 가장 균열폭이 큰 주균열의 폭을 균열경으로 측정된 값이며, 최외측 균열간 거리는 시간내에서 발생한 균열 중 최외측에 발생한 균열간의 거리를 줄자로 잰 값이다.

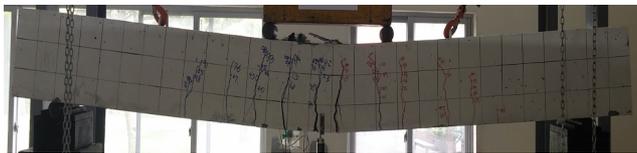


Fig. 3 Failure of 1.00A_s-0.00 specimen

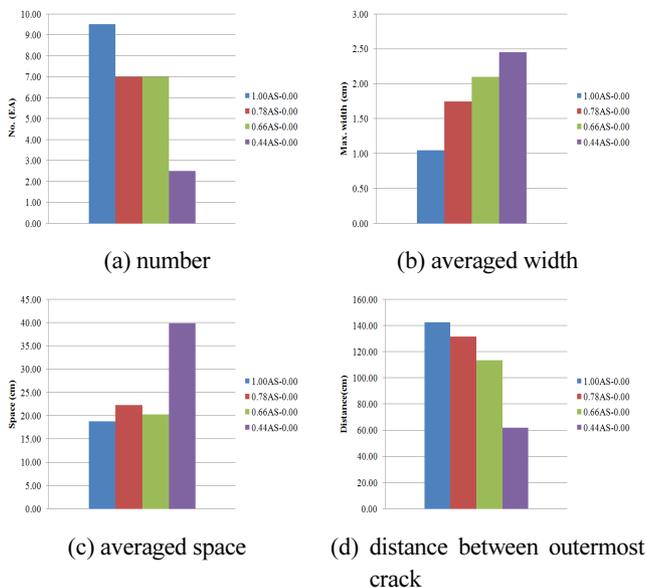


Fig. 4 Crack results in RC specimen

철근비가 감소할수록 균열 수가 감소하면서 균열폭이 증가하는 경향이 명확하게 나타난다. 특히 최소철근비의 44%만 보강된 보의 균열은 단지 3개에 불과하며 균열폭이 25 mm에 달하는 것을 볼 수 있다. 0.66A_s-0.00 실험체도 균열의 수는 6개이지만 2개의 균열은 주철근 위치에서 멈춘 균열이며, 나머지 4개만이 하중이 증가하면서 성장하여 파괴에 이른 것을 확인하였다. 이와 같은 결과로 볼 때, 최소철근의 44% 이하의 철근으로는 보에 발생하는 휨변형을 보의 전단면에 고르게 분포시키는 것에 한계가 있다고 판단된다.

3.2 하중-변위거동

Fig. 5는 RC Test 실험체의 하중-변위곡선을 나타내고 있다. 철근비가 감소할수록 휨강도가 감소하며, 최대하중에 해당하는 변위가 감소하는 경향을 볼 수 있다. 즉, 전반적인 거동을 거시적인 관점에서 판단할 때 철근량이 감소할수록 연성적인 거동에서 취성적인 거동으로 변화됨을 확인할 수 있다.

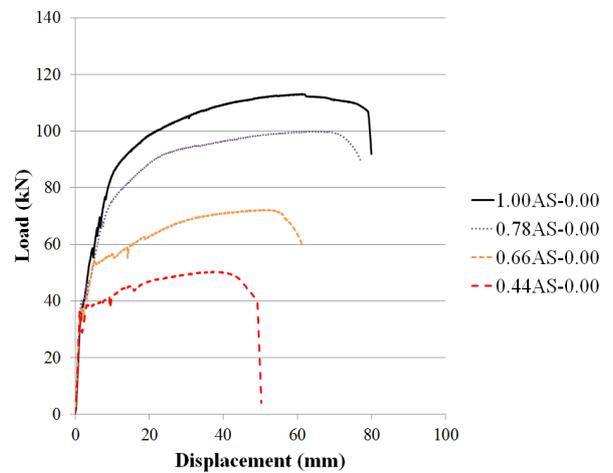


Fig. 5 Load-displacement curves for RC Test

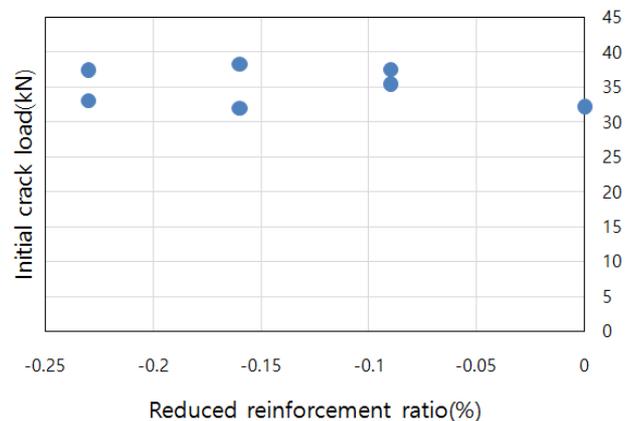


Fig. 6 Initial crack load results for RC Test

3.3 콘크리트 초기균열하중 변화

콘크리트 초기균열하중 P_{cr} 의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. RC 실험체의 P_{cr} 은 철근비와 상관없이 거의 유사한 것을 확인할 수 있다. 초기균열은 콘크리트의 응력이 파괴계수를 초과할 때 발생하기 때문에 철근량에는 크게 영향을 받지 않는다. 본 실험으로부터 관측된 RC 실험체의 평균 초기균열강도 P_{cr} 는 34.7 kN이다.

3.4 항복하중 변화

Fig. 7은 최소철근비로부터 철근비 감소에 따른 항복 하중비의 변화 그래프를 나타내었다. 각 보의 철근비를 ρ , 최소철근비를 ρ_{min} , 최소철근 보인 1.00A_S-0.00의 항복하중을 $P_{y,min}$, 각 RC보의 항복하중을 P_y 라 할 때, Fig. 7에서 X축은 $(\rho - \rho_{min})$ 이며, Y축의 값은 항복하중비 $P_y/P_{y,min}$ 이다. 최소철근비 이하로 철근비가 감소할수록 항복하중이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 최소철근비의 78%만 보강된 0.78A_S 실험체의 항복하중은 1.00A_S 실험체 항복하중의 70%이며, 0.66A_S는 80%, 0.44A_S는 60%에 불과하다.

최소철근비 이하 구간에서 감소된 철근비와 항복하중과의 관계를 고찰하기 위하여 선형 1차식으로 실험자료를 보강하였으며, 추세식과 추세선을 추가하였다. 선형 보강식은 식(1)과 같다. 철근비가 0.1% 감소할 때 항복하중은 최소철근보강 보 항복하중의 17.8%가 감소하는 것을 알 수 있다.

$$\frac{P_y}{P_{y,min}} = 1.78(\rho - \rho_{min}) + 1 \quad (1)$$

3.5 극한하중 변화

Fig. 8에서와 같이 보의 극한하중도 항복하중과 마찬가지로 최소철근비에서 철근비가 감소할수록 감소하는 것을 확인할 수 있다.

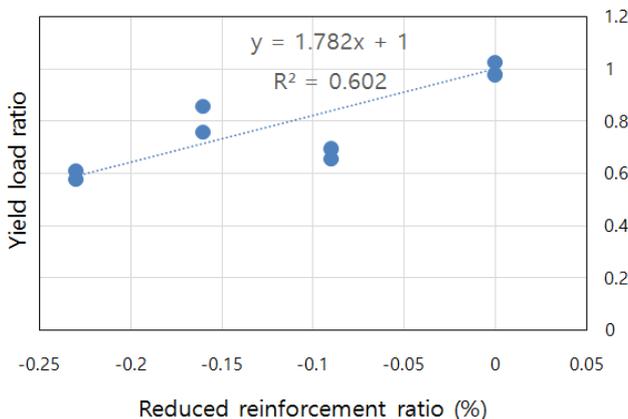


Fig. 7 Yield load results for RC Test

할 수 있다.

실험결과를 선형보간하고 식 (2)와 같은 추세선식을 검토한 결과, 철근비가 0.1% 감소할 때 극한하중은 22.2% 감소하는 것으로 나타나 극한하중의 감소율이 항복하중의 감소율을 상회하는 것으로 나타났다.

$$\frac{P_u}{P_{u,min}} = 2.22(\rho - \rho_{min}) + 1 \quad (2)$$

3.6 변위비

보의 수직변위는 보의 연성거동을 평가하는데 사용된다. 일반적으로 철근콘크리트 보의 연성은 항복시의 변위에 대한 최대하중에 해당하는 변위의 비 μ_y 로 평가하며, 식 (3)으로 구할 수 있다. Fig. 9는 μ_y 의 결과를 그래프로 나타내고 있다.

$$\mu_y = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (3)$$

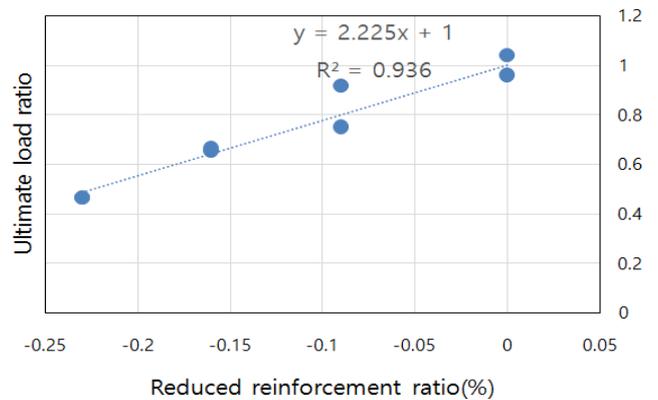


Fig. 8 Ultimate load results for RC Test

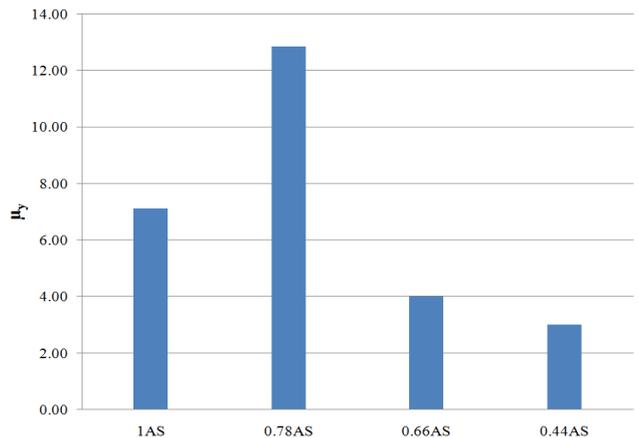


Fig. 9 Ratio of ultimate displacement to yield displacement(μ_y) for RC specimens

전체적으로 철근비가 감소할 때 μ_y 가 감소하는 것으로 나타났다. 0.78A_s의 μ_y 는 오히려 증가하였으나, 0.66A_s와 0.44A_s의 μ_y 는 최소보강 보의 57%, 43%에 불과하다. 극한하중의 감소율과 거의 유사하다.

Kwon and Yoon(2002)의 연구에서는 일반적으로 구조물의 연성파괴를 유도하기 위한 보통 철근콘크리트 구조물의 최소 연성지수를 3으로 제시하였다. Shin et al.(2010)의 연구에서는 지진활동이 높은 지역에서는 고강도 콘크리트 휨 부재의 최소연성지수는 3이상 이라고 제시하고 있다. 또한 Rashid and Mansur(2005)의 연구에서는 콘크리트 강도가 30MPa이며, 철근이 일렬배근 되었을 때 최소연성지수는 3으로 제시하였다. 실험결과 0.44A_s의 μ_y 값이 3으로 거의 임계치에 있음을 알 수 있다.

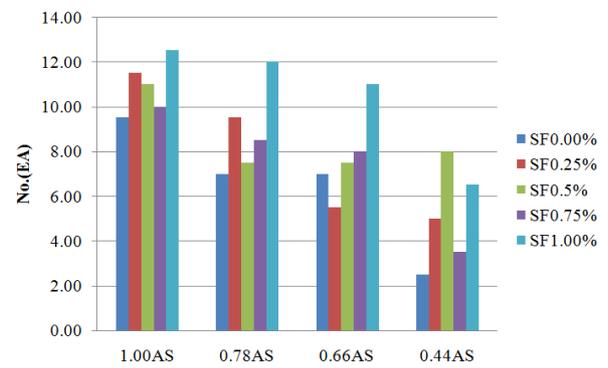
4. R/SFRC Test 실험결과 및 고찰

4.1 파괴모드 및 균열

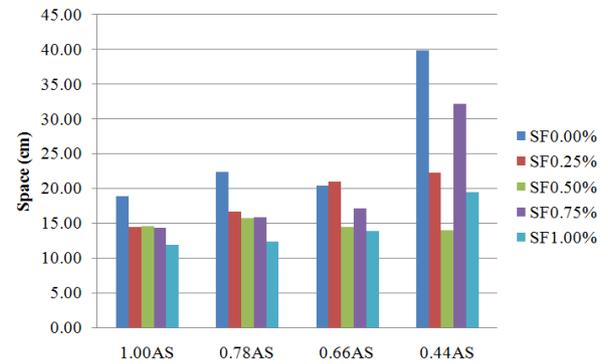
모든 R/SFRC Test 실험체는 휨 파괴를 나타내었다. RC 실험체와 마찬가지로 각 실험체의 균열 수, 균열간격, 최대균열폭과 최외측균열간의 거리를 검토하였으며, 결과는 Fig. 10에 나타내었다.

철근량에 따라 비교하면, 철근량이 감소할수록 균열 수는 감소하고 균열 간격은 증가하며, 최외측 균열간의 거리는 감소한다. 이는 RC 실험체의 실험결과와 유사하다. 다만, RC 실험체의 경우 철근량이 감소할 때 최대균열폭이 증가하는 경향이 명확하게 나타난 반면, R/SFRC 실험체의 최대균열폭은 철근량이 감소하여도 큰 변화 없이 거의 유사한 것으로 나타났다. 강섬유가 균열을 연결함으로써 균열의 성장을 억제한 결과라고 판단된다.

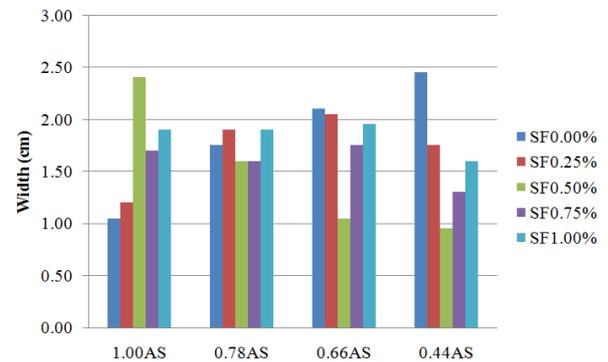
더욱 중요한 측정결과는 동일한 철근량에서 강섬유 혼입량의 증가할 때 균열의 고찰결과이다. 강섬유 혼입량이 0.25%에서 1%로 증가할 때, 균열의 수는 증가, 균열 간격은 감소, 최외측 균열간의 거리는 증가하는 경향을 볼 수 있다. 최소철근 이하로 철근이 감소하게 되면서 불연속적인 휨변형 발생과 변형이 소수 균열에 집중되는 거동을 강섬유가 개선하는데 주요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 균열폭은 강섬유 증가에 따라 명확한 경향성을 나타내고 있지 않다. 1.00A_s 실험체의 경우 강섬유가 증가할 때 최대균열폭이 오히려 커지는 것을 볼 수 있으며, 0.78A_s 실험체는 모든 강섬유 혼입률에 대하여 최대균열폭이 거의 유사한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과로 볼 때, 최대균열폭은 강섬유 혼입비 보다는 강섬유의 분산상태에 따라 영향을 받는다는 추정이 가능하며, 이에 대한 추가적인 분석이 필요하다.



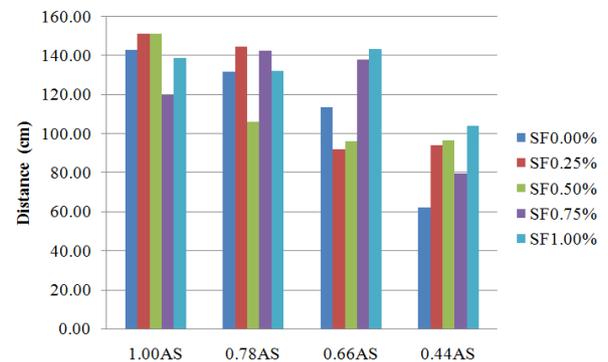
(a) number



(b) averaged space

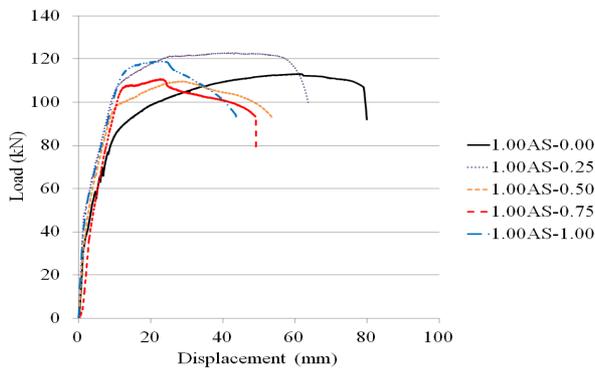


(c) averaged width

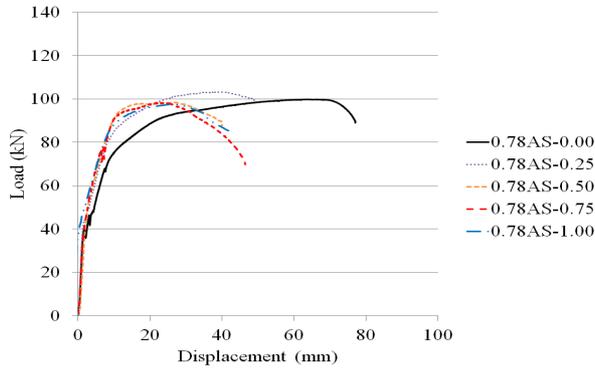


(d) distance between outermost crack

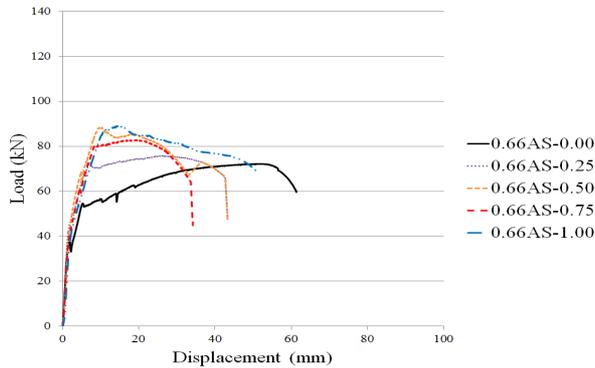
Fig. 10 Crack results in R/SFRC Test



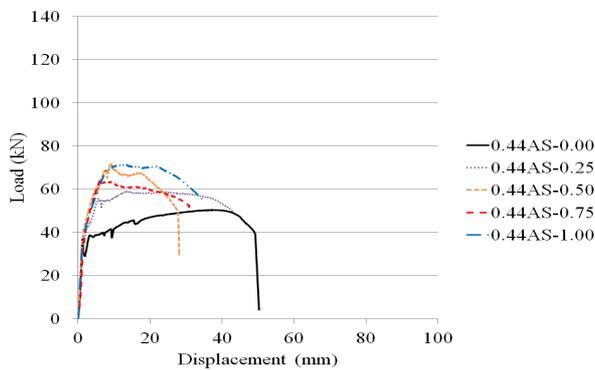
(a) 1.00A_S



(b) 0.78A_S



(c) 0.66A_S



(d) 0.44A_S

Fig. 11 Load-displacement curves for R/SFRC Test

4.2 하중-변위거동

Fig. 11은 R/SFRC Test 실험체의 하중-변위곡선을 나타내고 있다. 주목할 만한 사항은 R/SFRC 보의 항복하중이 동일한 철근보강비인 RC 보의 항복하중에 비하여 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 동일한 R/SFRC 보에서 항복하중이 강섬유 혼입량에 비례하여 증가하지만 그 차이는 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 전반적인 변위의 변화를 살펴보면 R/SFRC 보의 최대하중 변위가 RC 보의 최대하중 변위에 비하여 적은 것을 확인할 수 있다.

4.3 콘크리트 초기균열하중 변화

강섬유의 영향을 분석하기 위하여 강섬유가 혼입되지 않은 RC 실험체의 초기균열하중으로 R/SFRC 실험체의 초기균열하중을 나누어 분석하였다(Fig. 12 참고). 하중비 값이 1 보다 대부분 큰 값을 보이고 있으므로 R/SFRC의 강섬유가 초기균열하중의 증가에 기여하는 것으로 판단된다. 그러나 강섬유 혼입비 증가와는 뚜렷한 경향성을 나타내지는 않는다. RC와 R/SFRC의 초기균열하중 평균의 비를 검토한 결과 Fig. 12에 나타난 것과 같이 강섬유에 의한 초기균열하중의 증가는 약 16%임을 알 수 있다. 이와 같은 초기균열강도의 증가는 섬유로 인한 균열저항성능의 향상 때문이다.

4.4 항복하중 변화

강섬유의 영향을 분석하기 위하여 강섬유가 혼입되지 않은 RC 실험체의 항복하중으로 R/SFRC 실험체의 항복하중을 나누어 분석하였다(Fig. 13 참고). 1.00A_S의 결과에서는 RC의 항복하중 보다 강섬유로 인하여 항복하중이 10%~29%까지 증가하는 것을 확인하였다. 항복하중의 증가는 0.78A_S의 결과에서 60%로 가장 크게 나타났다. 이 결과는 강섬유가 초기균열하중 뿐 아니라 항복하중의 증가에도 영향을 미친다는

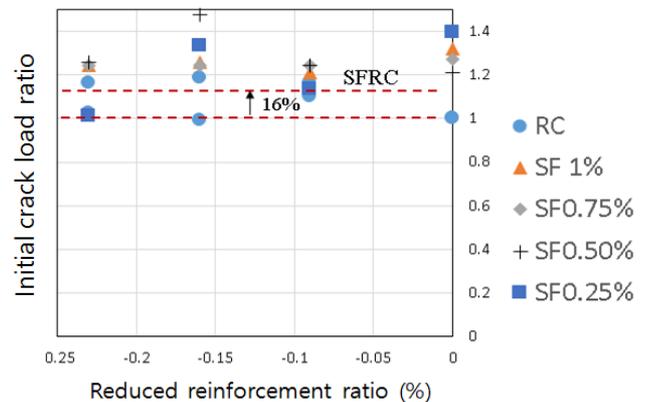


Fig. 12 Initial crack load ratio of R/SFRC specimen to RC specimen

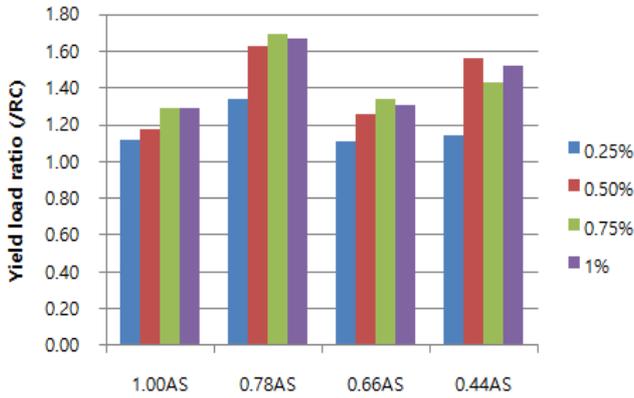


Fig. 13 Yield load ratio of R/SFRC specimen to RC specimen

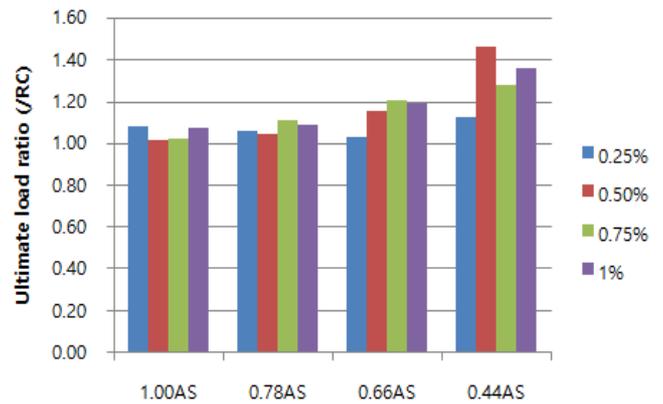


Fig. 14 Ultimate load ratio of R/SFRC specimen to RC specimen

Table 5 Yield load ratio of R/SFRC specimen to 1.00AS-0.00 specimen

ID.	Steel fiber mix ratio				
	0.00%	0.25%	0.50%	0.75%	1.00%
1.00AS	1.00	1.12	1.17	1.29	1.29
0.78AS	0.67	0.90	1.10	1.14	1.12
0.66AS	0.81	0.89	1.01	1.08	1.05
0.44AS	0.59	0.67	0.93	0.84	0.90

Table 6 Ultimate load ratio of R/SFRC specimen to 1.00AS-0.00 specimen

ID	Steel fiber mix ratio				
	0.00%	0.25%	0.50%	0.75%	1.00%
1.00AS	1.00	1.08	1.01	1.02	1.07
0.78AS	0.83	0.89	0.87	0.93	0.91
0.66AS	0.66	0.68	0.76	0.79	0.79
0.44AS	0.46	0.52	0.68	0.59	0.63

것을 보여준다. 또한 항복하중의 증가는 강섬유 혼입량이 증가할수록 거의 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다.

최소철근기준 실험체인 1.00AS-0.00의 항복하중과의 상대 비교를 위하여 각 실험체의 항복하중을 1.00AS-0.00 실험체의 항복하중으로 나눈 결과를 Table 5에 나타내었다. 하중비의 결과가 1 보다 큰 부분을 표에서 음영으로 표시하였다. 철근비가 최소철근비의 44%에 불과한 보에서는 강섬유를 혼입하여도 1.00AS-0.00 실험체의 항복하중에 미치지 못하는 것을 확인할 수 있다. 기본 시험체의 항복하중과 동일한 항복하중을 확보하기 위해서는 이형철근의 최소보강비는 최소철근비의 66% 이상이 되어야 하며, 최소강섬유 혼입률은 0.5% 이상이 되어야 하는 것을 알 수 있다. 최소철근비가 0.41%이고, 0.66AS의 철근비는 0.27%이므로 감소된 철근비는 0.14%이다. 이 결과를 정리하면, 보강철근비가 최소철근비 보다 0.14% 적을 때 이로 인한 항복하중의 감소를 강섬유 혼입을 통해 만회하기 위해서는 최소 강섬유 0.5%를 혼입해야 한다는 결과를 나타내고 있다. 재료의 경제적, 효율적인 측면에서 강섬유가 구조적 하중저항 성능에 미치는 영향은 상대적으로 제한적이라는 결과를 보여준다.

4.5 극한하중 변화

강섬유의 영향을 분석하기 위하여 강섬유가 혼입되지 않은

RC 실험체의 항복하중으로 R/SFRC 실험체의 항복하중을 나누어 분석하였다(Fig. 14 참고). 비교결과, 0.78AS와 1.00AS의 극한강도 증가는 10% 미만으로 미미하다. 0.66AS의 극한강도는 0.75%와 1.0%의 강섬유를 혼입하면 20%의 극한강도 증가가 나타났으며, 0.44AS의 극한강도는 10%~40% 증가되었다. 하중-변위 그래프를 살펴보면(Fig. 11 참고), 0.44AS와 0.66AS는 철근의 항복상태에서 최대하중에 도달한 이후 지속적으로 하중이 감소하는 거동을 보였다. 그러므로 0.44AS와 0.66AS의 극한하중의 증가는 항복하중의 증가이며, 극한하중이 증가한 것이 아니다. 이상의 결과를 정리하면, 강섬유의 증가로 인한 극한강도의 증가는 발생하지 않으며, 각 실험체의 극한하중은 이형철근에 의해 지배된다는 것을 확인할 수 있다.

최소철근기준 실험체인 1.00AS-0.00의 극한하중과의 상대 비교를 위하여 각 실험체의 극한하중을 1.00AS-0.00 실험체의 극한하중으로 나눈 결과를 Table 6에 나타내었다. Table 6에서 음영이 있는 부분은 하중비 값이 1 이상인 부분이다. 0.78AS, 0.66AS, 0.44AS 실험체의 결과가 1 이상인 경우가 전혀 없다. 이 결과는 최소철근비 보다 낮은 철근비로 보강된 실험체의 극한하중은 강섬유를 보강하여도 1.00AS-0.00 실험체의 극한하중을 초과하지 못한다는 것을 의미한다. 결과적으로 강섬유의 보강은 극한한계상태의 하중저항성능에는 전혀 기여하지 못한다는 것을 확인시켜준다.

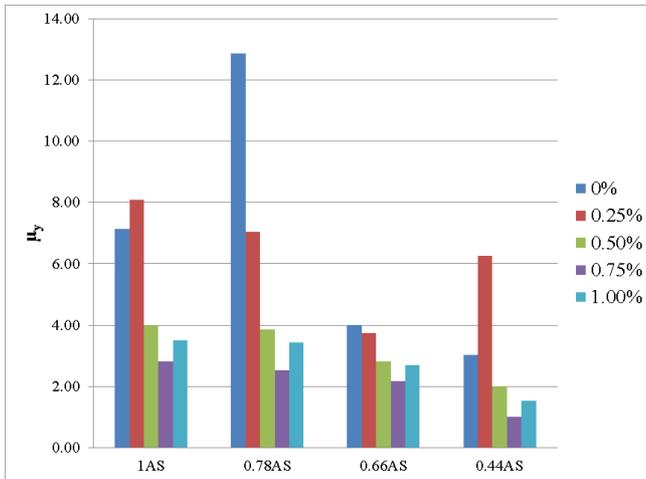


Fig. 15 Ratio of ultimate displacement to yield displacement(μ_y) for R/SFRC specimens

4.6 변위비

R/SFRC보의 변위비 또한 RC보와 동일하게 식 (3)으로 평가하였으며, Fig. 15에 나타내었다.

주목할 사항은 보강철근비에 상관없이 강섬유가 보강되면 μ_y 가 감소하며, 강섬유의 혼입비가 증가할수록 μ_y 의 감소는 심화된다는 사실이다. 1.00A_s 실험체의 μ_y 를 보면, 강섬유 보강전에는 6 이상의 값에서 1%의 강섬유가 혼입되면 절반인 3 이하가 되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 15에서 0.44A_s-0.75의 μ_y 는 1이다. 이는 극한변위가 항복변위와 동일하다는 의미로 항복 이후에 하중이 지속적으로 감소한다는 의미이다. 이와 같이 일반 철근보강콘크리트보에 강섬유가 보강되는 경우 연성의 저하현상은 Dancygier et al, (2006, 2016)의 실험에서도 발견할 수 있다. 또한 연성확보를 위하여 오히려 최소철근량이 증가하여야 한다고 주장하였다. 강섬유 보강으로 인해 균열이 보의 전경간에 고루 분포하지 못하고 국부적으로 발생하게 되고 하중증가와 함께 소수의 균열이 집중적으로 성장하게 되면서 보의 불연속적인 곡률분포가 원인으로 제시되고 있다. 본 연구에서도 거의 유사한 결과를 확인하였으며 이를 근거로 향후 연성도 확보를 위한 최소철근모델에 대한 연구를 진행하고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 콘크리트구조기준(2012)에서 규정하는 최소철근량 이하로 보강된 보에 강섬유를 혼입하여 휨부재를 제작하고, 정적 휨 실험을 수행하고 휨거동의 변화를 고찰하였다. 실험결과를 통하여 획득한 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 국내 콘크리트구조기준(2012)에서 규정하고 있는 최소철근량 이하로 보강된 보에서는 국부적인 소수의 균열이 성장하여 휨파괴가 발생하였다. 그러나 강섬유를 보강하면 균열을 전경간에 분산시키는데 분명한 효과를 발휘하여 균열수는 증가하고 간격은 감소하며, 최외측 균열간의 거리가 증가하는 것을 확인하였다. 그러나, 균열폭은 강섬유의 혼입량이 증가하여도 일관된 경향을 나타내지 않았다. 따라서 다른 인자에 영향을 받는 것으로 판단된다.
- 2) 강섬유의 혼입으로 인해 초기균열하중이 RC보에 비해 16% 증가하였다. 이는 콘크리트 내부에 보강되어있는 강섬유가 콘크리트의 균열을 제어하고 억제하는 역할을 하기 때문이라 판단된다.
- 3) 최소철근량 이하로 보강된 RC보의 경우 철근비 감소에 따른 항복하중과 극한하중의 감소가 발생함을 확인하였으며, 항복하중 보다는 극한하중의 감소가 다소 크다는 것을 확인하였다. 동일한 보강비의 보에 강섬유를 보강하게 되면, 강섬유의 혼입량에 따라 항복하중이 선형적으로 증가되는 것으로 나타났다. 최소철근비 보다 0.14% 적게 보강된 0.66A_s 보의 항복하중이 최소철근비로 보강된 RC보(1.00A_s-0.00)의 항복하중과 동일한 항복하중을 확보하기 위해서는 최소 0.5% 이상의 강섬유를 보강해야 한다. 재료적 관점에서 분석할 때, 철근비감소량 보다 훨씬 많은 3배 이상의 강섬유를 보강해야 최소철근보의 항복하중을 발휘할 수 있다는 결과이다. 따라서 강섬유가 극한한계상태의 하중저항성능을 개선하는 데에는 그 역할이 제한적이라는 것을 확인할 수 있다. 이는 극한하중의 결과에서도 동일한 결과를 획득하였다.
- 4) 극한변위와 항복변위의 비를 변위비(μ_y)로 정의하고 RC보와 R/SFRC의 변위비를 분석한 결과, 기본시험체인 최소철근보강 휨부재의 변위비는 7인데 반해 66%와 44%만 보강된 휨부재의 연성도는 3~4에 불과하여 성능임계치에 근접한 것으로 확인되었다. 그러나 R/SFRC의 경우 항복변위에는 큰 변화가 발생하지 않지만 극한변위가 감소하였다. 최소철근비의 44%와 66%가 보강된 실험체의 일부에서는 보의 항복이후 계속해서 하중이 감소하게 되어 극한변위와 항복변위가 같아지는 것을 확인하였다. 이는 인장철근량이 감소하고 강섬유의 혼입량이 증가할수록 휨부재의 휨거동에 강섬유의 영향이 증가하며, 연성적거동에서 취성적 거동으로 변화된다고 판단된다.

최종적으로 본 실험에서 사용한 강섬유와 강섬유의 혼입비

범위에 대하여 강섬유는 사용한계상태의 균열제어에는 효과적이지만 연성도를 저하시키는 문제가 있는 것을 확인하였다. 이와 같은 결과로부터 판단할 때 강섬유보강으로 사용한계상태의 최소철근비를 감소시킬 수 있으나, 극한한계상태의 최소철근비를 결정할때는 안전을 위한 최소 소요 연성도에 대한 충분한 검토가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2016년 국토교통기술촉진연구사업(16CTAPC 11725301000000)의 지원비를 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

Blanco, A., Pujadas, P., de la Fuente, A., Cavalaro, S., Aguado, A. (2013) Application of constitutive models in European codes to RC-FRC, *Construction and Building Materials*, 40, 246-259.

Chiaia B., Fantilli, A. P., Vallini, P. (2007) Evaluation of minimum reinforcement ratio in FRC members and application to tunnel linings, *Materials and Structures*, 40(6), 593-604.

Chiaia B., Fantilli, A. P., Vallini, P. (2009) Combining fiber-reinforced concrete with traditional reinforcement in tunnel linings, *Engineering Structures*, 31(7), 1600-1606.

Dancygier, A. N., Berkover, E. (2016) Cracking localization and

reduced ductility in fiber-reinforced concrete beams with low reinforcement ratios, *Engineering Structures*, 111, 411-424.

Dancygier, A. N., Savir, Z. (2006) Flexural behavior of HSFRC with low reinforcement ratios, *Engineering structures*, 28(11), 1503-1512.

Fantilli, A. P., Cavallo, A.D., Pistone, D. (2015) Fiber-reinforced lightweight concrete slabs for the maintenance of the Soleri Viaduct, *Engineering Structures*, 99, 184-191.

fib Model Code 2010 (2010) Model Code 2010-Final Draft, *Fédération Internationale du Béton*, 1, 225.

Hendy, C. R., Smith, D. A. (2007) Designer's Guide to EN 1992-2 Eurocode2:Design of concrete structures. Part 2: Concrete bridges, Thomas Telford, Eurocodes Expert, 276-277.

Korea Concrete Institute. (2012) Concrete Design Code and Commentary, Kimoonang Publishing Company, 116-119.

Kwon, S. B., and Yoon, Y. S. (2002) Flexural Behavior of RC Beams Using High-Strength Reinforcement for Ductility Assessment, *Journal of KOSHAM*, 2(1), 119-126.

Rachid, M. A., and Mansur, M. A. (2005) Reinforced hing-strength concrete beams in flexure, *ACI Structural Journal*, 102(3), 462-471.

Shin, S. W., Kang, H., Ahn, J. M., and Kim, D. W. (2010) Flexural capacity of singly reinforced beam with 150MPa ultra high-strength concrete, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 17, 414-426.

Received : 01/17/2017

Revised : 02/27/2017

Accepted : 03/21/2017

요 지 : 본 연구에서는 국내 콘크리트구조기준(2012)에서 규정하고 있는 최소철근량 이하로 보강된 보에 강섬유를 혼입한 강섬유보강철근콘크리트보의 휨과괴 실험을 수행하였다. 실험변수는 철근비와 강섬유의 혼입량으로 하였다. 철근보강비는 최소철근량의 44%, 66%, 78%와 100%로 하였으며, 강섬유의 혼입량은 0.25%, 0.50%, 0.75% 및 1.00%이다. 실험결과, 강섬유는 균열저항성능을 크게 개선시키는 것으로 확인되었다. 또한, 하중저항성능의 관점에서 강섬유는 항복하중의 증가에 기여하지만 극한하중의 증가에는 거의 기여하지 못하는 것을 확인하였다. 강섬유로 인한 항복하중의 증가량은 철근 감소로 인한 항복하중의 감소량에 비하여 미미한 것으로 나타났다. 최소철근보에서 강섬유의 사용은 오히려 연성을 크게 감소시키는 것으로 확인되었다. 따라서 최소철근 휨부재에 강섬유를 사용하기 위해서는 연성도 확보를 위하여 철근비를 증가시켜야 하는 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 최소철근비, 연성도, 균열저항성능, 내하성능, 강섬유보강콘크리트
