

강섬유의 특성이 강섬유보강 콘크리트의 압축 및 휨 인성에 미치는 영향

임동균¹, 장석준^{2*}, 정권영³, 윤다애¹, 윤현도⁴

Effects of Steel Fiber Properties on Compressive and Flexural Toughness of Steel Fiber-Reinforced Concrete

Dong-Gyun Lim¹, Seok-Joon Jang^{2*}, Gwon-Young Jeong³, Da-Ae Youn¹, Hyun-Do Yun⁴

Abstract: Effects of tensile strength and aspect ratio of steel fiber on compressive and flexural behavior of steel fiber-reinforced concrete (SFRC) with high- and normal-strength were investigated. Also, this study explores compressive behavior of SFRC with different loading rate. For this purpose, four types of steel fiber were used for SFRC with specified compressive strength of 35 and 60 MPa, respectively. Cylindrical specimens with a diameter of 150 mm and height of 300 mm were made for compression test, and prismatic specimens with a 150×150 mm cross-section and 450 mm span length were made for flexural test. Test results from compression and flexural tests indicated that the toughness of concrete significant increased with steel fibers. Especially, using steel fiber with high tensile strength and aspect ratio can be lead to performance improvement of high-strength SFRC. In this study, equations are suggested to predict compressive toughness ratio of SFRC from flexural toughness ratio.

Keywords: Steel fiber, Tensile strength, Aspect ratio, Toughness

1. 서 론

강섬유의 혼입은 일반 콘크리트의 취성적 파괴를 예방하고, 인장강도 및 에너지소산 능력을 증진시킨다. 또한 콘크리트의 전단강도 및 구속력 향상에도 효과적이며, 따라서 철근콘크리트 부재의 전단철근(Aoude et al., 2012; Minelli and Plizzari, 2013; Sahoo and Kumar, 2015) 및 구속철근(Aoude et al., 2009; Germano et al., 2016; Jang et al., 2018)을 강섬유보강 콘크리트(Steel Fiber-Reinforced Concrete, SFRC)로 대체하는 연구가 국내외에서 활발하게 진행되고 있다.

역학적특성 중 휨 인성지수는 SFRC의 주요한 특성으로 알려져 있으며(Jhonston, 1982; Banthia and Trottier, 1995; Nataraja et al., 2000), ACI318-14(2014)에서는 철근콘크리트 보의 최소 전단보강근 대체를 위한 SFRC의 성능을 강섬유 혼입률과 휨 인성지수를 통해 규정하고 있다. 상기의 휨 인성지수는 3등분 점 휨 실험을 통해 얻은 하중-처짐 곡선의 면적에 근거 한 휨

인성을 초기균열강도로 무차원화하는 방법으로 산정된다. 본 연구에서도 ASTM C1609(2012)에서 제시된 방법에 따라 SFRC의 휨 인성지수를 평가하였으며, 초기균열강도의 경우 선행연구(Jang et al., 2015)를 통해 검증된 방식으로 산정하였다. SFRC의 압축인성 평가는 휨 인성에 비해 연구사례가 적으나, SFRC의 구속력을 나타내는 유용한 지표로 활용될 수 있으며, 압축응력-변형 곡선 예측을 위한 활용성이 높다. 압축 인성 또한 휨 인성과 유사하게 하중-변위 곡선의 면적으로 통해 산정되며, 압축강도를 통해 무차원화 하는 방식으로 압축 인성지수를 산정한다(Nataraja et al., 1999). 따라서 본 연구에서는 다양한 강섬유가 사용된 SFRC의 압축 및 휨 인성지수를 평가하고, 두 특성의 관계를 연구하고자 한다.

SFRC의 역학적특성은 주로 강섬유 혼입률에 따라 결정되며, 강섬유의 형상비도 중요한 요인으로 알려져 있다(Yazici et al., 2007). 또한 기존연구결과에 따르면 높은 인장강도의 강섬유를 사용할 경우 고강도 SFRC의 성능을 크게 개선할 수 있는 것으로 나타났다(Köksal et al., 2012; Jeong et al., 2018). 따라서 본 연구에서는 인장강도 1,600 MPa급 고강도 강섬유를 사용한 실험을 계획하였다.

본 연구에서는 강섬유의 형상비 및 인장강도가 보통강도 및 고강도 SFRC의 역학적특성에 미치는 영향을 평가하고자 하며, 이를 위해 국내에서 생산된 총 4종류의 강섬유를 사용한 설계기준 압축강도 35 및 60 MPa급 SFRC의 압축 및 휨 거동을 평가하였다.

¹학생회원, 충남대학교 건축공학과 석사과정

²정회원, 한국시설안전공단 시설성능연구소 선임연구원, 교신저자

³학생회원, 충남대학교 건축공학과 석사

⁴정회원, 충남대학교 건축공학과 교수

*Corresponding author: jang@kistec.or.kr

Research Institute for Infrastructure Performance, Korea Infrastructure Safety Corporation, 24, Ena-ro 128beon-gil, Jinju-si, Gyeongsangnam-do, Republic of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2019년 5월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 7월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 실험

2.1 실험계획

2.1.1 변위제어속도에 따른 SFRC의 압축거동 평가

현행 KS F 2405(2010)에서는 콘크리트의 압축강도를 평가하기 위하여 매초 0.6 ± 0.4 MPa의 증가속도의 하중제어 방식을 사용하도록 규정하고 있다. 하지만 본 연구에서는 SFRC의 최대하중 이후 거동을 효과적으로 평가하기 위해 변위제어 방식을 적용하였다. 기존문헌의 실험결과에 따르면, 변위제어 방식의 적용은 SFRC의 후반부 압축거동 평가에 효과적인 것으로 보고되었다. 하지만 연구자들마다 분당 $0.05 \sim 1.2$ mm 사이의 상이한 변위제어 속도를 적용하고 있어 변위제어 속도에 따른 SFRC의 압축특성 평가가 요구된다(Barros and Figueiras, 1999; Bencardino et al., 2008; Chen et al., 2014; Ou et al., 2012; Carneiro et al., 2014; Ahn et al., 2015; Lee et al., 2015). 이에 본 연구에서는 만능재료시험기 변위제어 속도를 분당 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0 mm로 적용하여 일축압축 실험을 실시하여, 변위제어 속도에 따른 SFRC의 압축특성을 평가하였다. 본 실험을 위해 Table 1에 나타난 설계기준 압축강도 35 MPa인 SFRC를 사용하였으며, Table 2의 형상비 64 및 인장강도 1,200 MPa의 후크형 강섬유를 사용하였다.

2.1.2 섬유종류에 따른 SFRC의 역학적특성 평가

본 연구에서는 SFRC 압축강도 및 강섬유의 종류에 따른 역학적특성을 평가하기 위하여 Table 1과 같이 설계기준 압축강도 35 및 60 MPa의 배합을 계획하였다. 사용된 강섬유의 특성을 Table 2에 나타내었으며, 본 연구에서는 형상비 및 인장강도를 변수로 국내에서 생산된 총 4종류의 후크형 강섬유를 사용하였다. 강섬유의 혼입률은 미국 콘크리트 구조설계기준 (ACI318-14, 2014)에서 제시된 전단보강근 대체를 위한 SFRC의 최소 혼입률인 0.75%로 설정하였다. SFRC의 배합명은

Table 1 Mixture proportions of SFRC

f_{ck}	w/c	V_f (%)	Unit weight (kg/m ³)			
			W	C	S	G
35	0.5	0.75	200	400	729	922
60	0.3		200	666	900	540

f_{ck} : specified compressive strength, V_f : fiber volume fraction

Table 2 Mechanical properties of steel fiber

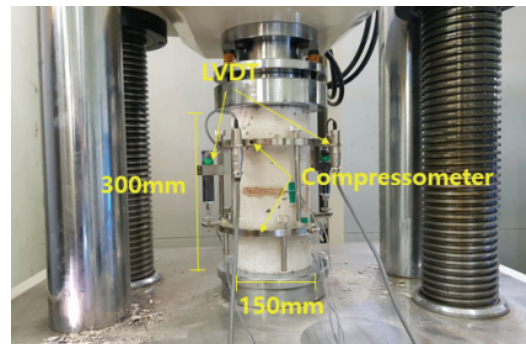
Type	Length (mm)	Diameter (mm)	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)
NS64	35	0.55	64	1,200
HS64				1,600
NS80	60	0.75	80	1,100
HS80				1,600

35-NS64와 같은 형태로 설정하였으며 앞부분 숫자는 SFRC의 설계기준 압축강도를 의미하고, 중앙에 NS 및 HS는 각각 보통강도 및 고강도 강섬유를 나타낸다. 마지막 숫자는 강섬유의 형상비를 의미하며, 강섬유가 보강되지 않은 일반콘크리트의 경우 35-CON 및 60-CON으로 표기하였다.

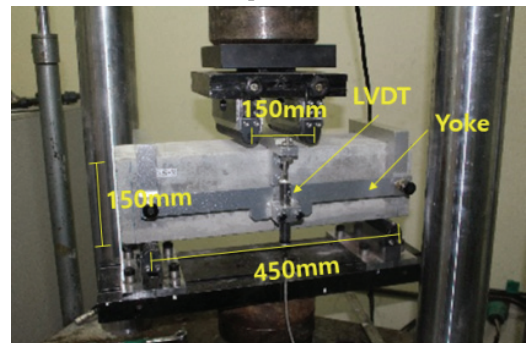
2.2 실험방법

Fig. 1(a)는 압축거동 평가방법을 나타낸 것으로, 2,000 kN 용량의 만능재료시험기를 사용하여 실험을 실시하였다. KS F 2403(2014)에 준하여 압축공시체를 제작하였으며, 최대길이 60 mm의 강섬유의 분산성 확보를 위하여 지름 150 mm, 높이 300 mm의 원주형 공시체를 사용하였다. 압축변형측정을 위해 중앙부 100 mm 구간에 컴프레소미터(compressormeter)를 설치하였으며, 2개의 선형변위계를 사용하여 변형을 측정하였다.

휨 거동 평가방법은 Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같이, ASTM C1609(2012)에 준하여 200 kN의 만능재료시험기를 사용하여 경간 450 mm의 3등분점 가력방식으로 실험을 진행하였다. 휨 공시체의 단면은 섬유의 분산성을 고려하여 150×150 mm로 계획하였으며, 초기균열 이후 강섬유 보강효과를 평가하기 위하여 경간의 1/150 및 1/300 처짐까지의 휨 인성 및 휨 인성지수를 평가하였다. 하중-처짐 관계 측정을 위해 실험체에 요크(Yoke)를 설치하였으며, 2개의 선형변위계를 설치하여 중앙부의 상대처짐을 측정하였다.



(a) Compression test



(b) Flexural test

Fig. 1 Test set-up for mechanical properties

3. 실험결과 및 분석

3.1 가력속도에 따른 SFRC의 압축거동

Fig. 2는 가력속도에 따른 SFRC의 압축거동을 나타낸 것으로, 35-NS64 배합을 대상으로 가력속도별 각 1개의 공시체를 제작하여 실험을 실시하였다. Table 3은 변위제어속도에 따른 SFRC의 실험결과를 정리하여 나타낸 것으로, 변위제어속도가 감소함에 따라 압축강도가 미소하게 감소하는 양상을 나타내었다. 또한 변위제어 속도 1.0 mm에서 하중제어 방식과 유사한 압축강도가 나타났다. 탄성계수의 경우 변위제어 속도 0.05 mm 실험체에서 다소 낮게 평가되었으나, 다른 실험체에서는 유사하게 평가되었다.

Fig. 3은 본 연구의 최대강도 이후 압축거동 평가방법을 나타낸 것으로, 압축인성과 압축인성지수 산정기법을 나타낸다. JSCE-SF5 (1984) 및 Nataraja et al.(1999)의 연구에서 제시된 기법을 근거로 산정하였으며, 변형 0.009 및 0.015까지의 인성 및 인성지수를 산정하였다. 이는 콘크리트의 극한변형률로 알려진 0.003의 각각 3 및 5배까지의 변형을 나타낸다. 압축인성지수는 압축인성을 압축강도로 무차원화 하여 산정하였으며, 산정식을 각각 식 (1) 및 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$TR_{c,3} = \frac{T_{c,3}}{0.9\pi r^2 f_{cu}} \quad (1)$$

$$TR_{c,5} = \frac{T_{c,5}}{1.5\pi r^2 f_{cu}} \quad (2)$$

여기서, $TR_{c,3}$ 및 $TR_{c,5}$ 는 각각 변형 0.009 및 0.015까지의 압축인성지수, $T_{c,3}$ 및 $T_{c,5}$ 는 각각 압축하중-변위 곡선에서 변형 0.009 및 0.015까지의 압축인성(N·mm), π 는 원주율, r 은 실험체의 반지름(mm), f_{cu} 는 압축강도(MPa)를 나타낸다. 압축인성 및 인성지수 평가결과는 Table 3에 나타난 바와 같이, 가력속도가 증가함에 따라 압축인성이 높게 평가되었다. 이는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 가력속도에 따라 초기선형구간 이후 동일한 변형에서 응력이 증가하기 때문으로 판단된다. 반면 압축인성지수의 경우 무차원화로 인해 가력속도에 따른 차이가

미소하게 나타났다.

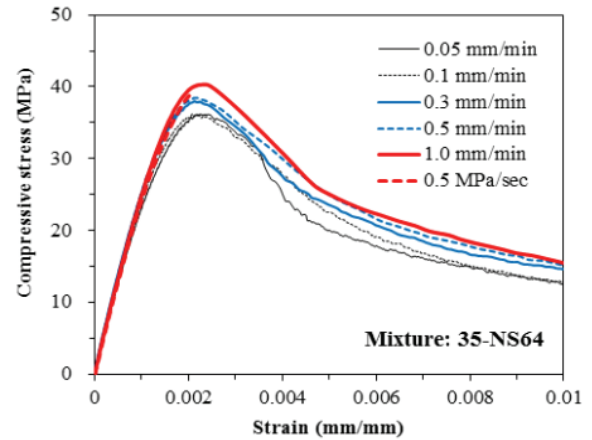


Fig. 2 Effects of loading rate on compressive behavior

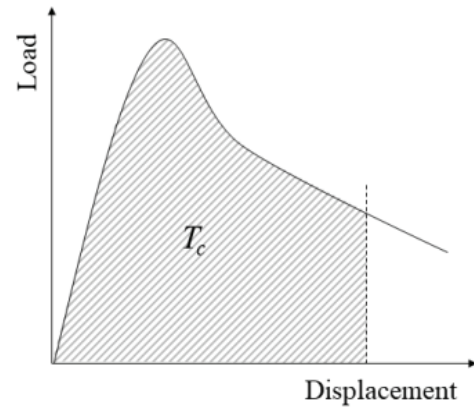


Fig. 3 Compressive toughness of SFRC

3.2 강섬유 특성에 따른 SFRC의 압축거동

Fig. 4는 콘크리트 및 SFRC 압축 공시체의 대표적인 파괴양상을 비교하여 나타낸 것으로, 일반 콘크리트에서는 균열 이후 취성적인 파괴 및 박리현상이 발생한 반면 강섬유를 보강한 경우에는 섬유 가교작용으로 인해 균열진전 및 콘크리트 박리가 완화되는 것으로 나타났다. 배합별 각 3개의 공시체에 대한 실험을 실시하였으며, 편차가 큰 실험체를 제외한

Table 3 Effect of loading rate on compressive properties of SFRC

Loading rate	f_{cu} (MPa)	E_c (GPa)	ϵ_0 ($\mu\epsilon$)	$T_{c,3}$ (kN·mm)	$T_{c,5}$ (kN·mm)	$TR_{c,3}$	$TR_{c,5}$
0.05 mm/min	36.3	24.7	2243	396.4	554.5	0.69	0.58
0.1 mm/min	36.1	26.0	2097	411.2	574.3	0.72	0.60
0.3 mm/min	38.0	27.1	2140	429.5	611.4	0.71	0.61
0.5 mm/min	38.4	26.6	2019	442.2	634.3	0.72	0.62
1.0 mm/min	40.4	26.3	2287	453.9	654.4	0.71	0.61
0.5 MPa/sec	40.6	25.4	2117	-	-	-	-

E_c : modulus of elasticity, ϵ_0 : strain at compressive strength

Table 4 Effect of steel fiber properties on compressive behavior of SFRC

Mixture code	f_{cu} (MPa)	E_c (GPa)	ϵ_0 ($\mu\epsilon$)	$T_{c,3}$ (kN·mm)	$T_{c,5}$ (kN·mm)	$TR_{c,3}$	$TR_{c,5}$
35-CON	35.8 (± 0.7)	25.7 (± 0.3)	2217 (± 79)	284.2 (± 22.6)	349.3 (± 32.7)	0.49 (± 0.03)	0.36 (± 0.03)
35-NS64	35.1 (± 1.3)	25.2 (± 0.5)	2198 (± 159)	357.4 (± 24.1)	490.6 (± 27.0)	0.64 (± 0.02)	0.53 (± 0.01)
35-HS64	38.9 (± 0.2)	25.8 (± 0.5)	2318 (± 40)	445.2 (± 25.9)	640.5 (± 60.2)	0.72 (± 0.04)	0.62 (± 0.06)
35-NS80	33.9 (± 0.1)	22.3 (± 2.6)	2383 (± 127)	371.1 (± 2.5)	517.2 (± 16.6)	0.69 (± 0.00)	0.58 (± 0.02)
35-HS80	35.5 (± 0.0)	23.5 (± 0.0)	2503 (± 0)	406.5 (± 0.0)	581.0 (± 0.0)	0.72 (± 0.00)	0.62 (± 0.00)
60-CON	68.3 (± 1.6)	30.2 (± 0.5)	3194 (± 17)	-	-	-	-
60-HS64	65.8 (± 1.1)	28.5 (± 0.4)	3439 (± 264)	-	-	-	-
60-NS64	65.3 (± 1.0)	30.5 (± 0.7)	3183 (± 45)	-	-	-	-
60-NS80	64.3 (± 2.0)	30.0 (± 0.9)	3139 (± 283)	-	-	-	-
60-HS80	65.1 (± 2.3)	31.0 (± 0.2)	2907 (± 157)	-	-	-	-

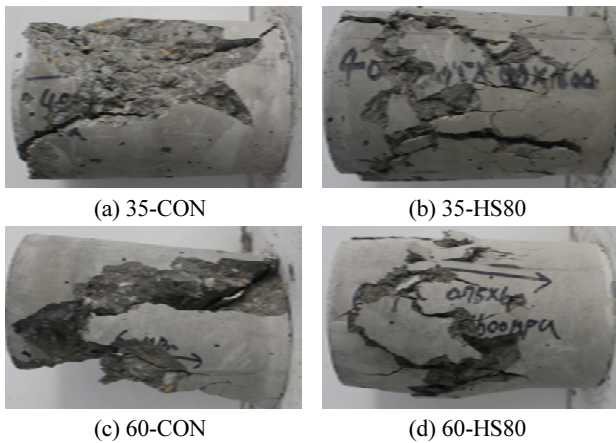
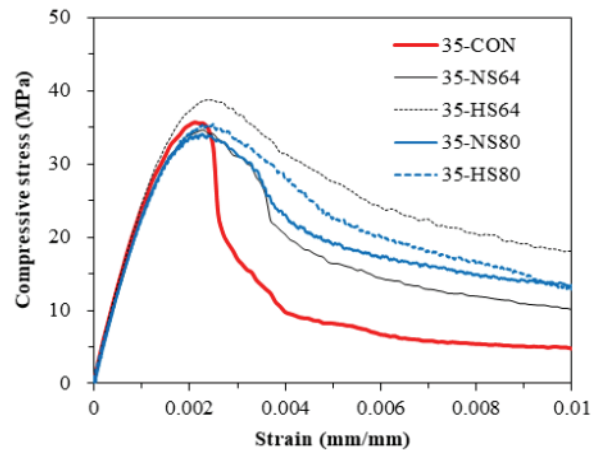


Fig. 4 Failure mode of SFRC under compressive loading

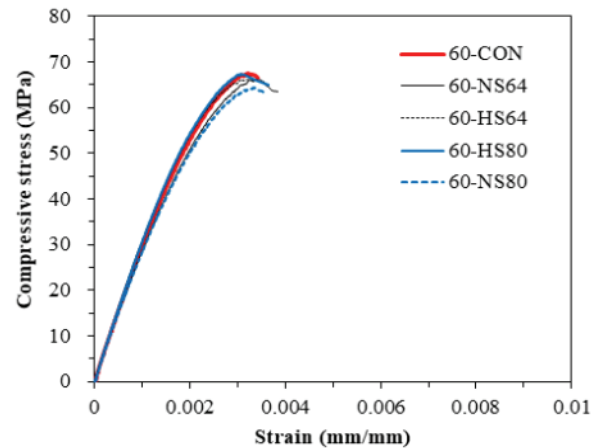
실험체의 압축특성을 정리하여 Table 4에 나타내었다. Fig. 5는 사용된 강섬유의 인장강도 및 형상비에 따른 SFRC의 대표적인 압축응력-변형 곡선을 나타낸 것으로, 본 연구에서는 60 MPa급 고강도 SFRC를 고려하여 사전연구 중 가장 낮은 속도인 0.05 mm/min을 적용하여 실험을 실시하였다. 하지만 Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 설계기준 압축강도 35 MPa급 SFRC의 후반부 거동은 비교적 잘 평가되었으나, Fig. 5(b)와 같이 60 MPa급 SFRC의 경우 최대강도 이후 취성적인 파괴양상을 나타내며 후반부 거동 평가가 어려운 것으로 판단된다. 이는 압축강도 시 만능재료시험기의 최대하중과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단되며, 강섬유의 길이로 인해 공시체의 지름을 작게 할 수 없는 경우 스프링 등의 추가적인 보강요소를 활용하여 고강도 SFRC의 압축인성 평가를 실시해야 할 것으로 사료된다.

강섬유의 보강여부 및 섬유종류에 따른 SFRC의 탄성계수 및 압축강도의 변화는 미소한 것으로 판단되며, 예상된 바와 같이 압축강도가 증가함에 따라 SFRC의 탄성계수가 증가하는 양상을 나타내었다. 반면 최대하중 이후 후반부 거동에서 강섬유효과가 높게 나타났으며, 압축인성지수의 경우 강섬유를 보강함에 따라 크게 증가하는 것으로 나타났다. 또한 인장

강도가 높은 강섬유를 사용할 경우 높은 압축인성지수를 나타내었으며, 보통강도 강섬유를 사용한 경우에는 형상비가 증가함에 따라 압축인성지수가 증가하는 것으로 나타났다.



(a) Specified compressive strength of 35 MPa



(b) Specified compressive strength of 60 MPa

Fig. 5 Compressive behavior of SFRC

3.3 강섬유 특성에 따른 SFRC의 휨 거동

ASTM C1609(2012)에 따른 SFRC의 휨 인성 산정기법을

Fig. 6에 나타냈으며, 실험체 지간의 1/300 및 1/150 처짐까지의 인성지수를 각각 식 (3) 및 (4)에 근거하여 산정하였다.

$$TR_{f,300} = \frac{300 T_{f,300}}{f_1 b h^2} \quad (3)$$

$$TR_{f,150} = \frac{150 T_{f,150}}{f_1 b h^2} \quad (4)$$

여기서, $TR_{f,300}$ 및 $TR_{f,150}$ 은 각각 경간의 1/300 및 1/150 처짐까지의 휨 인성지수, $T_{f,300}$ 및 $T_{f,150}$ 은 휨 하중-처짐 곡선에서 경간의 1/300 및 1/150 처짐까지의 휨 인성 (N·mm), f_1 은 초기 균열 휨 강도 (MPa), b 는 실험체의 너비 (mm), h 는 실험체의 높이 (mm)를 나타낸다.

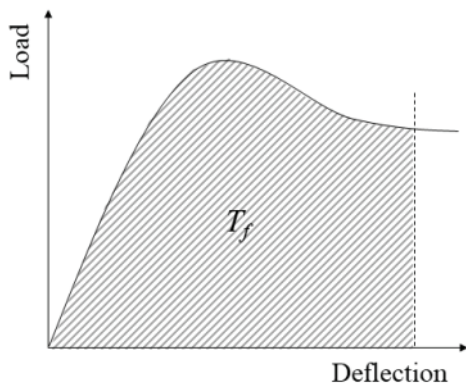
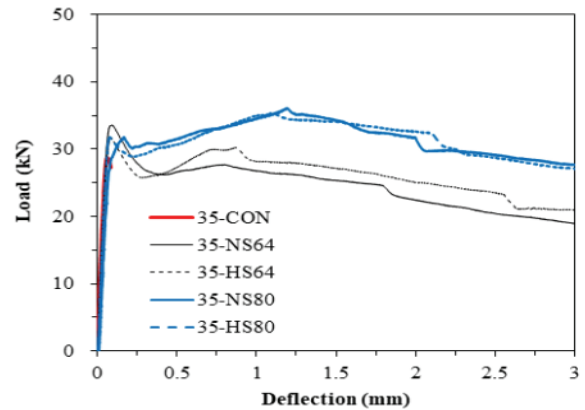


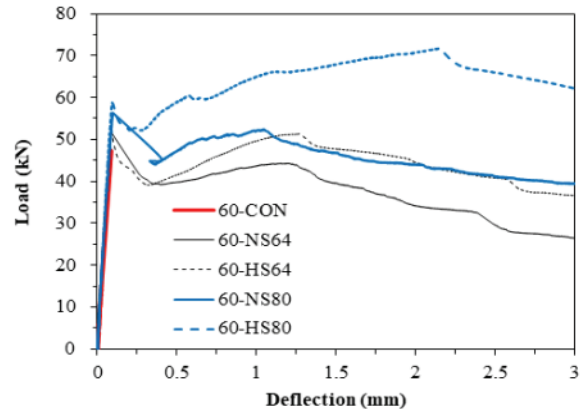
Fig. 6 Flexural toughness of SFRC

배합별 각 3개의 공시체를 제작하여 휨 성능을 평가하였으며, 초기균열 이후 급격한 파괴가 발생한 일부 실험체를 제외한 초기균열강도, 최대 휨 강도, 휨 인성, 휨 인성지수의 평균 및 표준편차를 정리하여 Table 5에 나타내었다. Fig. 7은 강섬유의 종류에 따른 대표적인 SFRC의 휨 거동을 압축강도 수준에 따라 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 설계기준 압

축강도 35 MPa의 SFRC의 경우 강섬유를 보강함에 따라 초기 균열강도 및 휨 강도가 향상되는 것으로 나타났으며, 강섬유의 형상비 및 인장강도에 따른 초기균열의 변화는 미소한 것으로 나타났다. 설계기준 압축강도 60 MPa의 SFRC의 경우 강섬유의 형상비가 증가함에 따라 초기균열강도가 증가하는 것으로 나타났으며, 고인장강도 강섬유를 사용할 경우 휨 강도가 크게 향상되는 것으로 나타났다.



(a) Specified compressive strength of 35 MPa



(b) Specified compressive strength of 60 MPa

Fig. 7 Flexural behavior of SFRC

Table 5 Effect of steel fiber properties on flexural behavior of SFRC

Mixture code	f_i (MPa)	f_c (MPa)	$T_{f,300}$ (kN·mm)	$T_{f,150}$ (kN·mm)	$TR_{f,300}$	$TR_{f,150}$
35-CON	4.10 (±0.27)	4.10 (±0.27)	-	-	-	-
35-NS64	4.65 (±0.12)	5.12 (±0.48)	50.1 (±7.2)	89.8 (±12.7)	0.95 (±0.12)	0.86 (±0.10)
35-HS64	4.21 (±0.24)	4.21 (±0.24)	41.1 (±1.3)	75.5 (±3.6)	0.87 (±0.02)	0.80 (±0.01)
35-NS80	4.36 (±0.29)	5.07 (±0.42)	50.5 (±4.7)	99.6 (±8.1)	1.03 (±0.04)	1.01 (±0.02)
35-HS80	4.07 (±0.17)	4.95 (±0.42)	47.6 (±2.9)	99.3 (±7.2)	1.04 (±0.04)	1.08 (±0.08)
60-CON	6.25 (±0.07)	6.25 (±0.07)	-	-	-	-
60-HS64	6.88 (±0.32)	7.00 (±0.19)	66.4 (±3.3)	112.9 (±3.2)	0.86 (±0.07)	0.73 (±0.05)
60-NS64	6.77 (±0.05)	6.78 (±0.05)	65.1 (±1.9)	126.9 (±6.2)	0.85 (±0.02)	0.83 (±0.04)
60-NS80	7.29 (±0.22)	7.29 (±0.22)	63.3 (±8.9)	114.6 (±21.5)	0.77 (±0.09)	0.70 (±0.11)
60-HS80	7.58 (±0.53)	9.97 (±0.92)	89.5 (±4.1)	196.9 (±15.0)	1.05 (±0.03)	1.15 (±0.02)

f_i : flexural strength

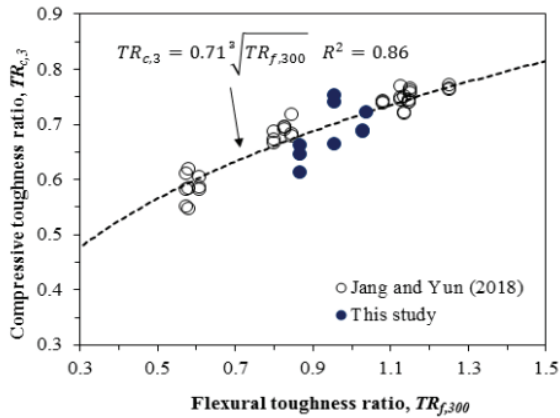
휨 인성지수 평가결과 보통강도 영역에서는 강섬유의 형상비가 증가함에 따라 휨 인성지수가 증가하는 것으로 나타났으며, 인장강도에 따른 영향은 미소한 것으로 나타났다. 반면 고강도 SFRC의 경우 높은 인장강도의 강섬유를 사용할 경우 휨 인성지수가 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 강섬유의 파괴양상과 밀접한 관련을 갖는 것으로 판단된다.

Fig.8에 나타난 바와 같이 보통강도 SFRC의 경우에는 모든 강섬유에서 부착파괴가 발생하지만 고강도 SFRC에서 보통강도 강섬유를 사용할 경우 콘크리트와 강섬유의 부착력 증진으로 인해 강섬유의 부착파괴와 파단이 함께 발생하였으며, 이로 인해 휨 인성지수가 감소한 것으로 판단된다.

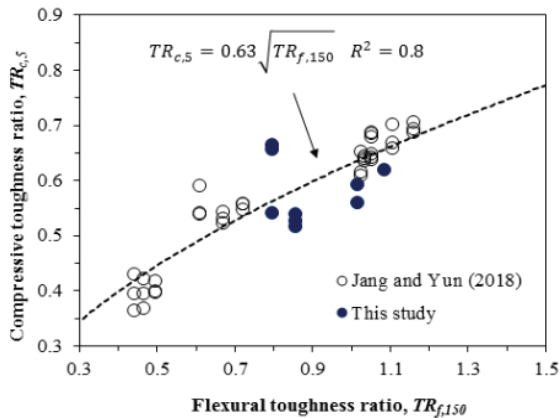


(a) 35-NS64 (b) 60-NS64

Fig. 8 Failure mode of steel fibers



(a) $TR_{c,3}$ and $TR_{f,300}$



(b) $TR_{c,5}$ and $TR_{f,150}$

Fig. 9 Correlations of compressive and flexural ratio

3.4 압축인성과 휨 인성의 상관성

Jang and Yun(2018)의 연구에서는 휨 인성지수에 비해 상대적으로 평가가 어려운 SFRC의 압축인성지수 예측을 위해 휨 인성지수에 근거한 예측방식을 제안하였다. Fig. 9는 본 연구의 실험결과와 Jang and Yun(2018)의 실험결과를 근거로 압축인성지수와 휨 인성지수의 관계를 나타낸 것이다. 예상된 바와 같이 휨 인성지수가 증가함에 따라 압축인성지수가 향상되는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 회귀분석을 통해 기존연구 제안식의 계수를 수정하여, 식 (5) 및 (6)을 제안하였다.

$$TR_{c,3} = 0.71 \sqrt[3]{TR_{f,300}} \quad (5)$$

$$TR_{c,5} = 0.63 \sqrt{TR_{f,150}} \quad (6)$$

Fig. 9에 나타난 바와 같이 본 연구의 제안식은 지간의 1/300 처짐까지의 휨 인성지수를 근거로 극한변형률의 3배까지의 압축인성지수를 예측할 수 있으며, 지간의 1/150 처짐까지의 휨 인성지수를 근거로 극한변형률의 5배까지의 압축인성지수를 예측할 수 있다. 또한 제안된 식은 전반적으로 본 연구 및 기존연구의 실험결과를 잘 예측하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에는 강섬유의 형상비 및 인장강도에 따른 SFRC의 역학적특성을 평가하기 위하여 실시되었으며, 압축 및 휨 거동과 인성지수에 대한 평가를 실시하였다. 본 연구의 실험결과 및 분석을 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 가력속도가 감소함에 따라 압축강도 및 압축인성이 감소하는 경향을 나타내었으나, 압축인성지수의 경우 가력속도에 따른 영향이 미소한 것으로 나타났다. 35 MPa급 SFRC의 경우 혼입률 0.75%에서 후반부 거동이 명확하게 평가되었으나, 60 MPa SFRC의 경우 최대하중이후 취성적 파괴가 나타나면서 후반부 거동 평가가 어려운 것으로 나타났다. 따라서 고강도 SFRC의 압축평가 기법에 대한 추가적인 연구가 요구된다.
- 2) 강섬유의 혼입여부와 역학적특성이 탄성계수 및 압축강도에 미치는 영향은 미소한 것으로 나타났으나, 형상비 및 인장강도가 높은 강섬유를 사용할 경우 압축인성 및 압축인성지수가 높아지는 것으로 나타났다. 휨 거동평가 결과 고강도 강섬유의 효율성은 고강도 SFRC에서 높게 나타났으며, 이는 강섬유의 파괴양상과 밀접한 관련을 갖는 것으로 판단된다.
- 3) 본 연구에서는 상대적으로 평가가 어려운 SFRC의 압축인성지수를 예측하기 위하여 SFRC의 압축 및 휨 인성지수의 상관성을 분석하였으며, 이를 통해 제안식을 도출하였다. 제

안식은 향후 기둥 및 커플링 보 부재에서 SFRC의 구속효과 검증에 위해 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 지역대학우수과학자지원사업 (No. 2016R1D1A3B02008179)의 지원을 받아 수행된 결과입니다.

References

- ACI Committee 318 (2014), Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary, American Concrete Institute.
- Ahn, K. L., Jang, S. J., Jang, S. H., and Yun, H. D. (2015), Effects of Aggregate Size and Steel Fiber Volume Fraction on Compressive Behaviors of High-Strength Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 27(3), 228-235 (in Korea, with English abstract).
- Aoude, H., Cook, W. D., and Mitchell, D. (2009), Behavior of Columns Constructed with Fibers and Self-Consolidating Concrete, *ACI Structural Journal*, 106(3), 349-357.
- Aoude, H., Belghiti, M., Cook, W. D., & Mitchell, D. (2012), Response of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams with and without Stirrups, *ACI Structural Journal*, 109(3), 359-367.
- ASTM C1609 (2012), Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), American Society for Testing and Materials.
- Banthia, N., and Trottier, J. F. (1995), Test Methods for Flexural Toughness Characterization of Fiber Reinforced Concrete: Some Concerns and a Proposition, *ACI Materials Journal*, 92, 48-57.
- Barros, J. A., and Figueiras, J. A. (1999), Flexural Behavior of SFRC: Testing and Modeling, *Journal of materials in civil engineering*, 11(4), 331-339.
- Bencardino, F., Rizzuti, L., Spadea, G., and Swamy, R. N. (2008), Stress-Strain Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete in Compression, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(3), 255-263.
- Carneiro, J. A., Lima, P. R. L., Leite, M. B., and Toledo Filho, R. D. (2014), Compressive Stress-Strain Behavior of Steel Fiber Reinforced-Recycled Aggregate Concrete, *Cement and concrete composites*, 46, 65-72.
- Chen, G. M., He, Y. H., Yang, H., Chen, J. F., and Guo, Y. C. (2014), Compressive Behavior of Steel Fiber Reinforced Recycled Aggregate Concrete After Exposure to Elevated Temperatures, *Construction and Building Materials*, 71, 1-15.
- Germano, F., Tiberti, G., and Plizzari, G. (2016), Experimental Behavior of SFRC Columns Under Uniaxial and Biaxial Cyclic Loads, *Composites Part B: Engineering*, 85, 76-92.
- Jang, S. J., Ahn, K. L., and Yun, H. D. (2015), Effects of Aggregate Size and Fiber Volume Fraction on Flexural Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC), *Architectural Institute of Korea*, 31(2), 45-54. (in Korea, with English abstract)
- Jang, S. J., Jeong, G. Y., and Yun, H. D. (2018). Use of Steel Fibers as Transverse Reinforcement in Diagonally Reinforced Coupling Beams with Normal-and High-Strength Concrete, *Construction and Building Materials*, 187, 1020-1030.
- Jang, S. J., and Yun, H. D. (2018), Combined Effects of Steel Fiber and Coarse Aggregate Size on the Compressive and Flexural Toughness of High-Strength Concrete, *Composite Structures*, 185, 203-211.
- Jeong, G. Y., Jang, S. J., Kim, Y. C., and Yun, H. D. (2018), Effects of Steel Fiber Strength and Aspect Ratio on Mechanical Properties of High-Strength Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 30(2), 197-205 (in Korea, with English abstract).
- Johnston, C. D., (1982), Definition and Measurement of Flexural Toughness Parameters for Fiber Reinforced Concrete, *Cement, Concrete and Aggregates*, 4(2), 53-60.
- JSCE-SF5 (1984), Method of Tests for Compressive Strength and Compressive Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete, Japan Society of Civil Engineers.
- Köksal, F., Sahin, Y., and Sahin, M. (2012), Effect of Steel Fiber Tensile Strength on Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concretes, Special Publication, 289, 1-15.
- KS F 2403 (2014), Standard Test Method of Making and Curing Concrete Specimens, Korean Standards Association (in Korean).
- KS F 2405 (2010), Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete, Korean Standards Association (in Korean).
- Lee, S. C., Oh, J. H., and Cho, J. Y. (2015), Compressive Behavior of Fiber-Reinforced Concrete with End-Hooked Steel Fibers, *Materials*, 8(4), 1442-1458.
- Minelli, F., and Plizzari, G. A. (2013), On the Effectiveness of Steel Fibers as Shear Reinforcement, *ACI Structural Journal*, 110(3).
- Nataraja, M. C., Dhang, N., and Gupta, A. P. (1999), Stress-Strain Curves for Steel-Fiber reinforced Concrete under Compression, *Cement and concrete composite*, 21(5-6), 383-390.
- Nataraja, M. C., Dhang, N., and Gupta, A. P. (2000), Toughness Characterization of Steel Fiber-Reinforced Concrete by JSCE Approach, *Cement and Concrete Research*, 30(4), 593-597.
- Ou, Y. C., Tsai, M. S., Liu, K. Y., and Chang, K. C. (2011), Compressive Behavior of Steel-Fiber-Reinforced Concrete with a High Reinforcing Index, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(2), 207-215.
- Sahoo, D. R., and Kumar, N. (2015), Monotonic Behavior of Large-Scale SFRC Beams without Stirrups, *Engineering Structures*, 92, 46-54.
- Yazıcı, Ş., İnan, G., and Tabak, V. (2007), Effect of Aspect Ratio and Volume Fraction of Steel Fiber on the Mechanical Properties of SFRC, *Construction and Building Materials*, 21(6), 1250-1253.

Received : 10/01/2018

Revised : 12/25/2018

Accepted : 03/22/2019

요 지 : 본 연구는 강섬유의 인장강도 및 형상비가 고강도 및 보통강도 강섬유보강 콘크리트(Steel fiber-reinforced concrete, SFRC)의 압축 및 휨 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 실시되었다. 또한 본 연구에서는 가력속도에 따른 SFRC의 압축거동을 평가하였다. 이를 위해 총 4종류의 강섬유가 설계기준 압축강도 35 및 60 MPa급 SFRC에 각각 사용되었다. 압축거동 평가를 위해 지름 150 mm 및 높이 300 mm의 원주형 공시체를 사용하였으며, 단면 150×150 mm 및 지간 450 mm의 각주형 공시체를 사용하여 휨 거동 평가를 실시하였다. 실험결과 강섬유의 혼입은 콘크리트의 인성을 크게 향상시키는 것으로 나타났으며, 고강도 강섬유의 사용은 고강도 SFRC의 성능개선에 효과적인 것으로 나타났다. 아울러 본 연구에서는 SFRC의 휨 인성지수에 근거한 압축인성지수 산정기법을 제안하였다.

핵심용어 : 강섬유, 인장강도, 형상비, 인성
