

## 후크형 강섬유 혼입율 및 형상비에 따른 콘크리트의 휨 및 압축 특성

김동휘<sup>1</sup>, 장석준<sup>2</sup>, 김선우<sup>3</sup>, 박완신<sup>3</sup>, 윤현도<sup>4\*</sup>

# Effect of Hooked-end Steel Fiber Volume Fraction and Aspect Ratio on Flexural and Compressive Properties of Concrete

Dong-Hui Kim<sup>1</sup>, Seok-Joon Jang<sup>2</sup>, Sun-Woo Kim<sup>3</sup>, Wan-Shin Park<sup>3</sup>, Hyun-Do Yun<sup>4\*</sup>

**Abstract:** This study investigates the influence of hooked-end steel fiber volume fraction and aspect ratio on the mechanical properties, such as compressive and flexural performance, of concrete with specified compressive strength of 30MPa. Three types of hooked-end steel fibers with aspect ratios of 64, 67 and 80 were selected. The flexural tests of steel fiber reinforced concrete (SFRC) prismatic specimens were conducted according to EN 14651. The compressive performance of SFRC with different volume fractions (0.25, 0.50 and 0.75%) were evaluated through standard compressive strength test method (KS F 2405). Experimental results indicated that the flexural strength, flexural toughness, fracture energy of concrete were improved as steel fiber volume fraction increases but there is no unique relationship between steel fiber volume fraction and compressive performance. The flexural and compressive properties of concrete incorporating hooked-end steel fiber with aspect ratio of 64 and 80 are a little better than those of SFRC with aspect ratio of 67. For each SFRC mixture used in the study, the residual flexural tensile strength ratio defined in Model Code 2010 was more than the limit value to be able to substitute rebar or welded mesh in structural members with the fiber reinforcement.

**Keywords:** Steel fiber reinforced concrete (SFRC), hooked-end steel fiber, aspect ratio, volume fraction, flexure, compression

## 1. 서 론

최근 건축물 및 교량과 같은 사회기반시설물은 사회적 요구에 따라 고층화, 장경간화 및 장수명화 추세에 있으며, 이에 따라 주요 건설재료인 콘크리트는 구조 및 내구성능 향상이 요구되고 있다. 특히 콘크리트는 인장력에 취약할 뿐만 아니라 파괴시 취성적 특성을 보이는 단점이 있다. 따라서 이러한 특성을 개선하기 위하여 콘크리트에 강섬유를 혼입한 강섬유보강 콘크리트(Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC)에 대한 연구가 국·외적으로 많은 연구가 이루어지고 있다(Yoo et al.2015; Almusallam et al.216; Lee 2017). SFRC는 콘크리트 균열면내에서 강섬유의 가교작용을 통하여 콘크리트의 균열 이후 거동을 크게 개선할 수 있는 것으로 보고되고 있다(Chang et al. 1993; Oh et al. 2007; Kal et al. 2010; Kim et al. 2011).

일반적으로 SFRC의 역학적 특성에 대한 주요한 영향인자는 강섬유의 혼입률( $V_f$ ) 및 형상비( $l_f/d_f$ )로 알려져 있다(Jeong et al. 2018). 강섬유 혼입률은 콘크리트의 비빔 및 시공성에 주요한 영향을 끼치므로 콘크리트 내 섬유 보강 효과를 결정하는 주요한 인자이다(Koh et al. 2004). 강섬유 형상비 역시 콘크리트 내 섬유 분산 및 작업성에 중요한 영향을 끼치고 SFRC의 재료적인 균질성을 지배하는 요인이 된다. 따라서 콘크리트의 휨 및 압축성능 개선을 위한 경제적이고 효율적인 후크형 강섬유의 보강 방안을 마련하기 위하여 강섬유 혼입률 및 형상비에 따른 역학적 특성 평가가 요구된다.

## 2. 본 론

### 2.1 실험 계획

이 연구에서는 국내에서 콘크리트 보강용으로 통상 사용되는 약 1,100MPa 인장강도를 갖는 후크형 강섬유의 형상비 및 혼입률이 설계기준강도 30MPa급 보통강도 콘크리트의 압축 및 휨성능에 미치는 영향에 대해 평가하고자 한다. Table 1은 이 연구에 사용된 콘크리트의 배합표이며, 강섬유의 혼입률은 콘크리트 체적비로 0.25, 0.50 및 0.75%이며 이에 따라 강섬유 투입량이 결정되었다. 물/결합재비(W/B) 55% 및 잔골

<sup>1</sup>학생회원, 충남대학교 대학원 석사과정

<sup>2</sup>정회원, 국토안전관리원 건축물관리지원센터 과장

<sup>3</sup>정회원, 충남대학교 건설공학교육과 교수

<sup>4</sup>정회원, 충남대학교 건축공학과 교수

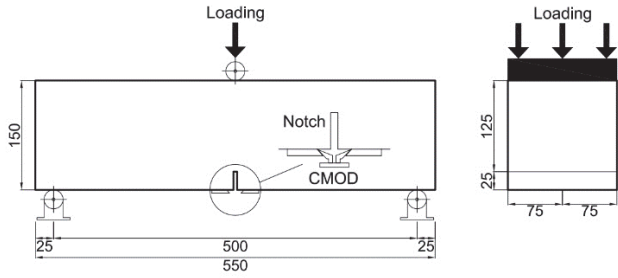
\*Corresponding author: wiseroad66@cnu.ac.kr

Department of Architectural Engineering, Chungnam National University 99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

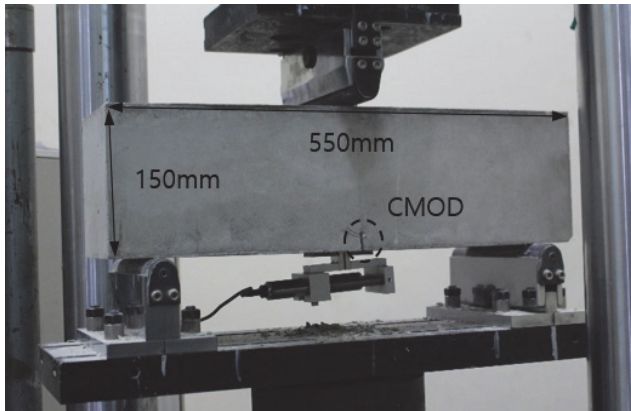
•본 논문에 대한 토의를 2021년 7월 31일까지 학회로 보내주시면 2021년 8월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

**Table 1** Mix proportion of high-strength concrete

W/B (%)	Air	S/a (%)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	G	SF
							0
55	4	45	185	336	797	956	19.63
							39.25
							58.88



(a) Dimension of specimen (unit: mm)



(b) Flexural test

**Fig. 1** Flexural test setup for SFRC specimens

재율(S/a) 45%로 설정하였다. 또한 콘크리트의 유동성 확보를 위해 고성능 감수제(superplasticizer)를 콘크리트의 체적비로 0.8% 혼입하였다. 강섬유의 형상비와 혼입률이 SFRC의 압축 및 휨 거동에 미치는 영향을 평가하고자 KS F 2403 (2019)에 준하여 지름 150 mm, 높이 300 mm의 원주형 시험체를 배합별로 3개씩 제작하였으며, EN 14651(2005)에서 제안하는 150×150 mm 크기의 각주형 시험체를 3개씩 제작하여 실험을 진행하였다. 실험체는 타설 후 강제 몰드에서 24시간 기건양생을 거친 뒤 20±1°C에서 24시간 양생하였다. 또한 중앙부 균열 유도를 위해 휨 실험체 중앙에 Fig. 1과 같이 너비 5mm 깊이 25mm의 노치를 설치하였다.

## 2.2 사용 재료

이 연구에서 사용된 재료로는 보통 포틀랜드 시멘트를 사

**Table 2** Mechanical properties of hooked-end steel fiber

Type	Length, $l_f$ (mm)	Diameter, $d_f$ (mm)	Aspect ratio ( $l_f/d_f$ )	Tensile strength (MPa)
NS64	35	0.55	64	1,100
NS67	60	0.90	67	1,200
NS80	60	0.75	80	1,100

용하였으며, 사용된 굵은 골재와 잔골재의 최대 치수는 각각 25mm와 5mm이다. 강섬유의 형상은 Parviz and Bayasi (1991)의 연구에 의해 성능이 가장 높게 나타났으며 국내에서 콘크리트 보강용으로 일반적으로 사용되고 있는 양단 후크형 강섬유를 사용하였으며, Table 2에 사용된 강섬유의 특성을 나타내었다.

## 2.3 실험 방법

압축실험은 SFRC의 최대강도 이후 후반거동을 확인하기 위하여 변위제어 방식으로 실시하였다. 기존 연구(Lim, et al., 2019)에 따르면 KS F 2405에서 규정하고 있는 하중재하속도 0.5MPa/s와 대등한 압축특성을 보이는 변위제어속도는 1mm/min으로 보고되고 있다. 따라서 압축실험시 해당 변위제어속도를 적용하였으며, 압축 실험은 2,000kN용량의 만능재료시험기를 사용해 실험을 실시하였다. 압축변형률 측정을 위해 중앙부 100mm구간에 컴프레소미터(compressormeter)를 설치하였으며, 2개의 선형변위계를 설치하여 변형률을 측정하였다. 휨 실험체 형상 및 치수는 Fig. 1(a)과 같고 Fig. 1(b)와 같이 200kN용량의 만능재료시험기를 사용하여 3점 가력하였다. 가력은 변위제어 방식으로 0.3mm/min의 속도로 재하하였다. Fig. 1(b)와 같이 휨 시험체 중앙 하부 노치에 선형변위계를 설치하여 균열선단 개구변위(Crack Mouth Opening Displacement, CMOD)를 측정하였다.

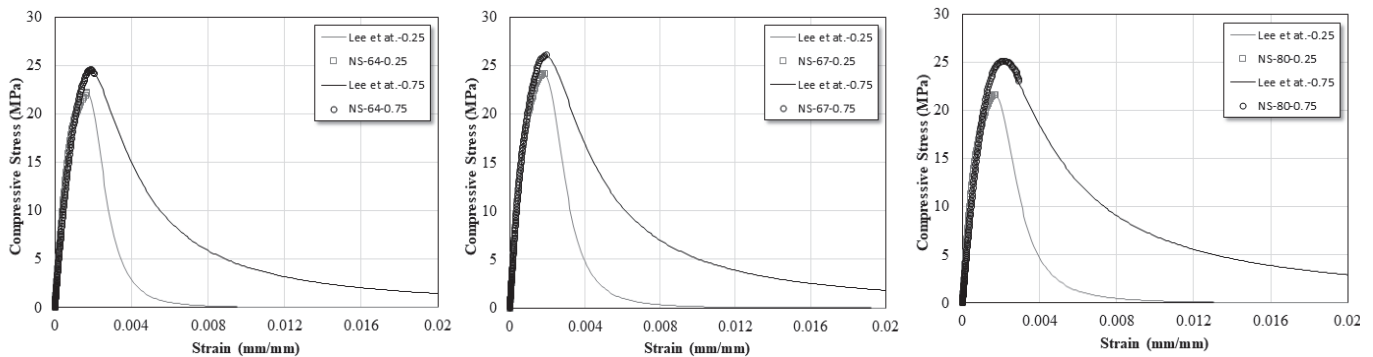
## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 압축 특성

강섬유의 형상비 및 혼입률에 따른 SFRC의 압축강도, 탄성계수, 푸아송비, 최대강도시 변형률을 Table 3에 정리하였다. 섬유 혼입에 따라 콘크리트의 압축강도( $f_{cu}$ )는 감소되는 경향을 보였으며 압축강도의 저하는 형상비에 따라 다소 차이를 보였다. 형상비 64 및 67, 80인 강섬유로 보강된 콘크리트에서 각각 13.9~20.6% 및 11.7~14.9%, 18.5~23.5% 강도 감소가 나타났다. 강섬유 혼입량에 따른 압축강도 평가 결과 섬유의 혼입량이 증가함에 따른 압축강도 감소율은 감소하는 것으로 나타났으나, 형상비 67인 강섬유를 보강한 SFRC에서 감소율이 가장 작게 나타났다. 강섬유 혼입에 따른 콘크리트의 탄성

**Table 3** Compressive properties of SFRC cylinders

Mixture	$f_{cu}$ (MPa)	$E_c$ (GPa)	$\nu$	$\epsilon_o$ ( $\mu$ )	$T_{c,3}$ (MPa · mm)	$T_{c,5}$ (MPa · mm)	$TR_{c,3}$	$TR_{c,3}$
CON	28.1 (±3.9)	27.0 (±1.0)	0.16 (±0.04)	1709.3 (±182.1)	-	-	-	-
NS-64-0.25	22.3 (±1.1)	25.0 (±0.6)	0.20 (±0.01)	1838.5 (±134.1)	0.06 (±0.00)	0.06 (±0.00)	0.31 (±0.03)	0.31 (±0.03)
NS-64-0.50	22.7 (±0.8)	22.9 (±0.7)	0.19 (±0.01)	1789.7 (±115.5)	0.09 (±0.01)	0.09 (±0.01)	0.43 (±0.02)	0.46 (±0.03)
NS-64-0.75	24.2 (±0.3)	22.7 (±0.5)	0.19 (±0.00)	2013.3 (±132.9)	0.12 (±0.00)	0.14 (±0.01)	0.56 (±0.03)	0.66 (±0.04)
NS-67-0.25	24.5 (±0.3)	27.4 (±1.1)	0.18 (±0.01)	1836.5 (±14.8)	0.07 (±0.00)	0.07 (±0.00)	0.31 (±0.00)	0.31 (±0.00)
NS-67-0.50	23.9 (±1.2)	26.8 (±0.9)	0.18 (±0.01)	1467.5 (±121.1)	0.08 (±0.01)	0.08 (±0.01)	0.37 (±0.03)	0.39 (±0.03)
NS-67-0.75	24.8 (±0.9)	26.9 (±0.6)	0.20 (±0.02)	1935.1 (±25.2)	0.13 (±0.00)	0.15 (±0.00)	0.56 (±0.00)	0.67 (±0.01)
NS-80-0.25	21.7 (±0.2)	25.6 (±1.2)	0.17 (±0.02)	1763.3 (±48.9)	0.06 (±0.00)	0.07 (±0.00)	0.33 (±0.01)	0.34 (±0.01)
NS-80-0.50	21.5 (±0.9)	22.3 (±0.3)	0.18 (±0.02)	2001.0 (±204.3)	0.10 (±0.01)	0.12 (±0.01)	0.52 (±0.04)	0.60 (±0.05)
NS-80-0.75	22.9 (±1.6)	22.2 (±0.2)	0.21 (±0.04)	1957.5 (±129.4)	0.13 (±0.01)	0.16 (±0.01)	0.62 (±0.01)	0.78 (±0.02)



**Fig. 2** Compressive stress-strain curves of SFRC cylinders

계수( $E_c$ )는 형상비 64 및 80인 강섬유의 보강시 7.4~23.5% 낮게 나타났다. 반면 형상비 67인 강섬유를 보강한 SFRC의 탄성계수는 섬유 보강되지 않은 콘크리트와 유사하게 나타났다. 푸아송비( $\nu$ )는 KS F 2438(2017)에서 제안하고 있는 식에 근거하여 평가하였으며, 평가결과 강섬유의 혼입율에 따라 6.25~31.2% 증가하는 것으로 나타났다. 형상비에 따른 차이는 명확하게 나타나고 있지 않으나 형상비 67 및 80에서 섬유의 혼입율이 증가됨에 따라 다소 증가되는 특성을 보였다. 최대강도 시 변형률( $\epsilon_o$ )은 섬유 혼입량이 증가됨에 따라 3.2~17.8% 증가되었으며 이는 섬유에 의한 균열 가교가 향상되어 최대강도 시 콘크리트의 변형률이 증가된 것으로 판단된다.

### 3.1.1 압축강도 후 변형 연화 거동 모델링

강섬유 보강 콘크리트의 압축강도 이후 변형 연화 거동을 확인하기 위해 (Lee et al. 2015)에서 제안한 식 (1)~(4)를 사용하였다.

$$\frac{f_c}{f'_c} = \frac{A(\epsilon_c/\epsilon_o)}{A - 1 + (\epsilon_c/\epsilon_o)} \quad (1)$$

$$A = B = \frac{1}{1 - \frac{f'_c}{\epsilon_o E_c}}, \epsilon_c/\epsilon_o \leq 1.0 \quad (2)$$

$$A = 1 + 0.723 \left( V_f \frac{l_f}{d_f} \right)^{-0.957}, \epsilon_c/\epsilon_o \geq 1.0 \quad (3)$$

$$B = \left( \frac{f'_c}{50} \right)^{0.064} \left[ 1 + 0.882 \left( V_f \frac{l_f}{d_f} \right)^{-0.882} \right], \epsilon_c/\epsilon_o \geq 1.0 \quad (4)$$

여기서, a와 b는 재료의 매개 변수를 의미하며  $V_f$ 는 섬유의 혼입률(%)이고,  $\epsilon_c$  및  $E_c$ 는 최대 변형률 및 콘크리트의 탄성계수이며,  $l_f$ 와  $d_f$ 는 각각 섬유의 길이와 지름을 나타낸다. Fig. 2는 실험결과와 추정결과를 비교하여 나타낸 것이다.

### 3.1.2 압축 인성 평가

SFRC 압축 시험체의 압축강도 이후 거동을 평가하기 위하여 변위제어 하였으나 실험장비 등의 문제로 압축강도 이후 거동에 대한 평가에 어려움이 있었다. 따라서 이 연구에서는 SFRC의 압축강도 이후 거동은 3.1.1절에서 기술된 모델을 활용하여 예측하고 이를 근거로 압축인성 및 인성지수를 산정

하였다. SFRC의 압축인성 및 지수는 JSCE-SF5(1984)에 준하여 식 (5) 및 (6)에 의해 산정하였다.

$$TR_{c,3} = \frac{T_{c,3}}{0.9\pi r^2 f_{cu}} \quad (5)$$

$$TR_{c,5} = \frac{T_{c,5}}{1.5\pi r^2 f_{cu}} \quad (6)$$

여기서,  $TR_{c,3}$  및  $TR_{c,5}$ 는 각각 변형률 0.009 및 0.015까지의 압축인성 지수를 의미하며,  $T_{c,3}$  및  $T_{c,5}$ 는 변형률 0.009 및 0.015까지의 압축인성(MPa·mm),  $\pi$ 는 원주율,  $r$ 은 공시체 직경의 반지름(mm),  $f_{cu}$ 는 압축강도(MPa)를 나타낸다. Table 3에 각 배합에 대한 압축인성 및 인성지수 평가 결과를 비교하여 나타내었다. SFRC의 압축인성 및 인성지수는 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 각각 85.7~133.3% 및 80.6~129.4% 증가되는 경향을 보였다. 섬유의 형상비가 증가됨에 따라 이러한 경향을 현저하게 나타냈다.

## 3.2 휨 특성

### 3.2.1 선형구간 휨 응력 및 최대 휨 응력

이 연구의 휨 성능평가는 EN 14651(2005)에 준하여 실시되었으며, 선형구간의 휨 응력 및 잔여 휨 응력을 각각 평가하

였다. 선형구간 휨 응력 및 잔여 휨 응력은 식(7) 및 (8)을 사용하여 산정하였다.

$$f_L = \frac{3F_L L}{2bh_{sp}^2} \quad (7)$$

$$f_{R,j} = \frac{3F_j L}{2bh_{sp}^2} \quad (8)$$

여기서,  $f_L$ 은 선형구간 휨 응력(N/mm<sup>2</sup>),  $F_L$ 은 CMOD 크기가 0.05 mm 이하 일 때의 최대하중(N),  $L$ 은 시험체 지간 거리 (mm),  $b$ 는 시험체의 너비(mm),  $h_{sp}$ 는 시험체 전체 단면 높이에서 노치 깊이를 제외한 높이(mm)를 나타낸다.  $f_{R,j}$ 는 CMOD가 각각 0.5, 1.5, 2.5, 3.5 mm 일 때의 잔여 휨 응력 (MPa),  $F_j$ (N)는 상기의 CMOD에서의 하중(N)을 의미한다. Table 4는 SFRC 배합별 선형구간 휨 응력 및 잔여 휨 응력의 계산 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 선형구간 휨 응력( $f_L$ )은 강섬유 혼입률에 따라 평균 5.5~29.7% 증가하는 것으로 나타났으며 이러한 경향은 형상비가 80인 경우 가장 현저하게 나타났다. 휨강도( $f_r$ )은 강섬유의 혼입률에 따라 평균 5.5~71.1% 증가되는 것으로 나타났으며 형상비 80인 강섬유로 보강된 SFRC에서 가장 현저하게 나타났다. 반면 형상비 64 및 67인 강섬유로 보강된 SFRC에서 선형구간 휨 응력 및 휨강도는 큰

**Table 4** Flexural properties of SFRC prismatic specimens

Mixture	$f_L$ (MPa)	$f_r$ (MPa)	$f_{R1}$ (MPa)	$f_{R2}$ (MPa)	$f_{R3}$ (MPa)	$f_{R4}$ (MPa)	$f_{R1}/f_L$	$f_{R3}/f_{R1}$	$G_f$ (kN/m)
CON	3.7 (±0.4)	3.7 (±0.4)	-	-	-	-	-	-	-
NS-64-0.25	3.6 (±0.0)	3.6 (±0.0)	1.4 (±0.1)	1.6 (±0.1)	1.9 (±0.2)	1.7 (±0.2)	0.39 (±0.04)	1.34 (±0.01)	986.7 (±86.4)
NS-64-0.50	4.8 (±0.0)	4.8 (±0.0)	3.4 (±0.1)	3.6 (±0.4)	3.9 (±0.1)	3.8 (±0.1)	0.70 (±0.02)	1.16 (±0.08)	2117.9 (±33.7)
NS-64-0.75	4.5 (±0.2)	5.6 (±0.2)	4.3 (±0.1)	5.4 (±0.2)	5.6 (±0.2)	5.1 (±0.2)	0.97 (±0.03)	1.29 (±0.01)	2872.8 (±102.2)
NS-67-0.25	3.8 (±0.3)	3.8 (±0.3)	1.8 (±0.4)	2.2 (±0.5)	2.1 (±0.5)	1.9 (±0.5)	0.48 (±0.09)	1.15 (±0.00)	1210.3 (±279.3)
NS-67-0.50	4.4 (±0.1)	4.6 (±0.3)	2.8 (±0.5)	3.5 (±0.7)	4.1 (±0.6)	4.0 (±0.5)	0.63 (±0.09)	1.48 (±0.09)	2052.6 (±328.3)
NS-67-0.75	4.6 (±0.1)	5.1 (±0.5)	3.3 (±0.4)	4.5 (±0.6)	4.8 (±0.7)	4.7 (±0.8)	0.72 (±0.07)	1.43 (±0.06)	2460.2 (±331.3)
NS-80-0.25	4.3 (±0.1)	4.3 (±0.1)	2.0 (±0.2)	2.4 (±0.2)	2.3 (±0.2)	2.2 (±0.3)	0.47 (±0.06)	1.17 (±0.14)	1330.5 (±108.9)
NS-80-0.50	4.5 (±0.3)	5.0 (±0.1)	3.5 (±0.3)	4.3 (±0.4)	4.8 (±0.2)	4.9 (±0.2)	0.79 (±0.11)	1.37 (±0.07)	2504.8 (±103.5)
NS-80-0.75	5.3 (±0.5)	8.3 (±0.9)	5.8 (±0.6)	7.4 (±0.6)	8.1 (±0.8)	8.1 (±1.0)	1.11 (±0.02)	1.39 (±0.08)	4118.7 (±380.2)

차이를 보이지 않았지만 형상비 64인 강섬유를 보강한 SFRC 배합에서 다소 높게 나타났다. 이러한 결과를 근거로 강섬유의 혼입율과 형상비는 콘크리트의 휨 성능에 개선에 주요한 영향인자이며 동일한 강섬유의 혼입률 조건하에서 형상비 큰 강섬유의 보강시 콘크리트의 휨 성능 개선 효과가 우수하다는 결론을 얻을 수 있었다.

### 3.2.2 SFRC 휨 시험체의 하중-CMOD 특성

각 SFRC 배합에 대한 휨 성능 평가를 위하여 배합 당 3개의 휨 시험체를 제작하여 Fig. 1(b)과 같이 3점 휨 가력하여 Fig. 3과 같은 하중-CMOD 관계 곡선을 얻었다. 3개 휨 시험체의 하중-CMOD 관계에 대한 평균 곡선을 Fig. 3에 나타내었다. 모든 형상비를 갖는 강섬유가 0.25% 혼입된 SFRC 휨 시험체는 선형 구간 휨강도( $f_l$ ), 즉 균열강도 이후 약 50%의 급격한 강도를 보이며 CMOD 4mm까지 노치 면에서 강섬유의 가교작용으로 일정하게 강도를 유지하는 특성을 보였다. 다만 형상비가 증가됨에 따라 균열강도 이후 CMOD가 증가됨에 따라 미소한 강도 증가 현상을 보였다. 형상비 64 및 80인 강섬유 0.75% 혼입된 SFRC 배합에서는 선형 구간 휨강도 도달이후에도 강도 저하 없이 CMOD가 증가됨에 따라 휨 강도가 증가되는 변형경화 특성을 보였다. 모든 SFRC 배합에서 섬유 혼입률이 증가됨에 따라 선형 구간 휨강도 이후 강도저하는 저감되었으며 이러한 경향은 형상비가 증가됨에 따라 현저하게 나타났다.

### 3.2.3 SFRC의 잔여 휨 응력평가

잔여 휨 응력평가는 유럽모델기준(fib model code 2010, MC2010)을 근거로 하였다. MC2010에서는 EN 14651(2005)에 평가된 선형구간 휨 강도와 잔여 휨 강도비 값이 식(9) 및 (10)을 만족하는 경우, 구조부재의 취성적인 특성을 개선하기 위하여 보강되는 철근 또는 용접철망과 같은 보강근을 섬유 보강으로 대체할 수 있다고 제시하고 있다.

$$f_{R1}/f_L \geq 0.4 \quad (9)$$

$$f_{R3}/f_{R1} \geq 0.5 \quad (10)$$

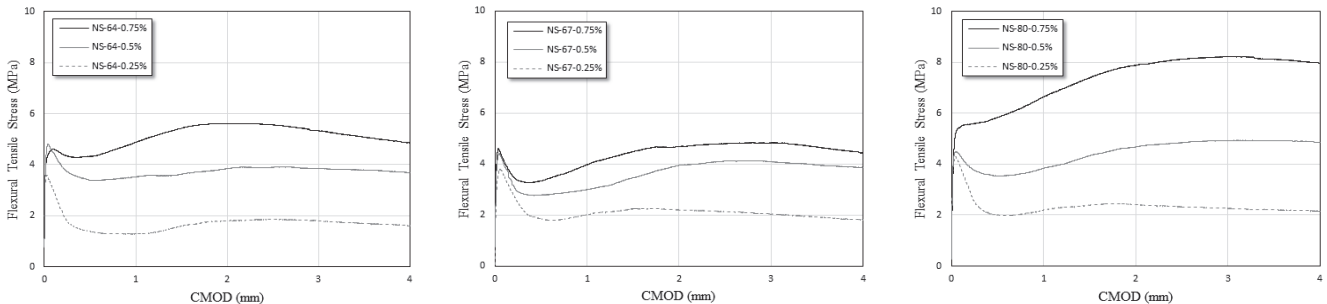


Fig. 3 Load-CMOD curves of SFRC mixtures

여기서,  $f_{R1}$  및  $f_{R3}$ 는 각각 사용한계상태(Serviceability limit state, SLS, CMOD = 0.5mm)와 극한한계상태(Ultimate limit state, ULS, CMOD = 2.5mm)에서의 잔여 휨 응력(MPa)을 나타낸다.

Table 4는 SFRC 각 배합을 사용하여 제작된 3개 휨 시험체에 대한 하중-CMOD 관계 곡선을 근거로 잔여 휨강도 산정결과에 대한 평균 및 표준편차를 비교하여 나타낸 것이다. 사용한계상태에서의 잔여 휨 강도  $f_{R1}$ 은 강섬유의 혼입률이 증가됨에 따라 증가되는 경향을 보이고 있으며 또한 동일한 섬유 혼입조건하에서 강섬유 형상비에 따라 다소 차이를 보이고 있다. 형상비 80인 강섬유 보강 시험체에서 형상비가 64 및 67인 섬유보강 시험체에 비하여 잔여 휨 강도 증진은 명확하게 나타났다. 극한한계상태에서의 평균 잔여 휨 강도  $f_{R3}$ 는 형상비 64, 67, 80인 강섬유를 0.25% 혼입한 경우, 1.9, 2.1 및 2.3MPa로 형상비가 증가됨에 따라 증가되는 경향을 보였다. 강섬유 혼입률 0.50%에서도 유사한 경향을 보이고 있으나 혼입률 0.75%인 경우, 형상비 67 및 64인 강섬유로 보강된 콘크리트에서는 상반된 결과를 보이고 있다. 이상의 결과를 근거로 섬유의 혼입률 및 형상비가 증가할수록 사용 및 극한한계상태에서 SFRC의 잔여 휨강도는 증가된다는 결론을 얻을 수 있었다.

Fig. 4는 섬유 혼입률에 따른 식(9) 및 (10)과 같이 정의되는

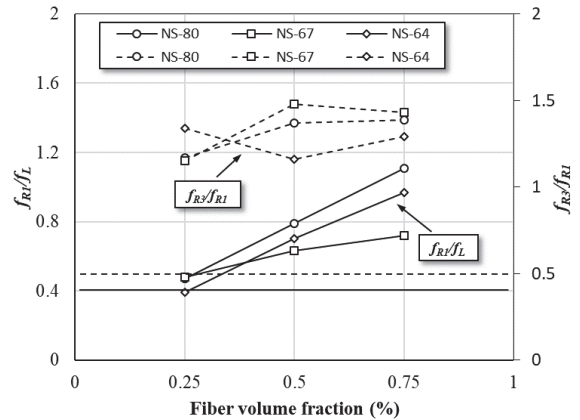


Fig. 4 Residual flexural tensile strength ratio of SFRC

잔여 휨강도 비를 배합조건 별로 실험결과를 근거로 산정하여 나타낸 것이다. 실험결과로부터 산정된  $f_{R1}$ 과  $f_L$ 의 비율은 0.39~1.11범위로 나타났으며, 형상비 64인 후크형 강섬유를 0.25% 혼입한 SFRC에서는 식(9)에서 정의되는 조건을 충족하지 못하는 것으로 나타났다. 반면 형상비 67 및 80인 강섬유 0.25% 혼입한 SFRC의 경우 각각 0.48 및 0.47로 식(9)에서 규정된 0.4를 초과하는 것으로 나타났다.  $f_{R1}$ 과  $f_L$  비율은 섬유 혼입률 및 형상비가 증가됨에 따라 증가되는 경향을 보이고 있으나 형상비 67인 SFRC 배합에서 0.5 및 0.75%에서 다른 두 배합에 비하여 낮게 나타나고 있다. 이는 Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 형상비 64 및 80인 SFRC 배합에 비하여 휨 균열 발생 후 상대적으로 강도저하가 크게 나타났기 때문이다.

휨균열 발생이후 잔여 휨 응력비( $f_{R3}/f_{R1}$ )는 1.15~1.48로 나타났으며, 모든 SFRC 배합에서 식(10)의 조건을 충족하는 것으로 나타났다. 형상비 및 섬유 혼입률이 증가됨에 따라 균열이후 잔여 휨 응력비는 증가되는 경향을 보이고 있다. 다만 형상비 64인 강섬유가 0.25% 혼입된 SFRC 배합에서 사용한 계상태에서의 잔여 휨응력( $f_{R1}$ )이 상대적으로 낮게 나타나 잔여 휨 응력비가 높게 나타나는 현상을 보이고 있다.

### 3.2.4 SFRC의 파괴에너지 평가

SFRC의 하중-CMOD 관계 곡선을 근거로 평가되는 SFRC의 파괴에너지 평가 결과도 Table 4에 각 배합별로 비교하여 나타내었다. 파괴에너지의 평가는 일본콘크리트학회에서 제안하고 있는 식(11) 및 (12)을 활용하여 평가하였다.

$$G(f) = \frac{0.75 W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (11)$$

$$W_1 = 0.75 \left( \frac{S}{L} m_1 \right) g CMODc \quad (12)$$

여기서,  $G(f)$ 는 파괴에너지(kN/m),  $W_1$ 는 시험체의 자중과

가력에 의한 일의 양(kN/m),  $W_0$ 는 하중-CMOD 곡선의 면적(kN·m),  $L$ 은 시험체 전체길이(mm),  $m_1$ 은 시험체 중량(kg),  $g$ 는 중력가속도( $m/s^2$ ),  $CMODc$ 는 파괴시 CMOD(mm),  $A_{lig}$ 는 시험체 단면적( $mm^2$ )을 나타낸다. 재료가 파괴를 일으킬 때까지 흡수할 수 있는 에너지로 정의되며, Koksall(2012) 등에 의해서는 SFRC의 역학적 특성을 평가하기 위하여 파괴에너지가 활용되기 시작하였다.

Fig. 5는 강섬유의 형상비 및 혼입률에 따른 30MPa 급 콘크리트의 파괴시까지 흡수할 수 있는 평균 에너지를 비교하여 나타낸 것이다. Table 4 및 Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 강섬유 혼입률 0.25%에서 형상비 67 및 80 으로 증가됨에 따라 형상비 64에 비하여 에너지 소산능력은 평균 22.7% 및 34.8% 증가되는 것으로 나타났다. 섬유 혼입률 0.5% 및 0.75%인 경우, 형상비 64에 비하여 형상비 67에서 각각 3.1% 및 16.7% 낮은 에너지 소산능력을 보이고 있다. 섬유 형상비 80으로 증가됨에 따라 모든 섬유 혼입률에서 에너지 소산능력은 향상되었다. Fig. 5(b)와 같이 이러한 경향은 섬유 혼입률이 증가됨에 따라 현저하게 나타났다.

이상의 결과로부터 압축강도 30MPa급 콘크리트의 휨 파괴 에너지 소산능력은 섬유의 혼입률이 증가됨에 따라 개선된다는 결론을 얻을 수 있었다. 형상비 64 또는 67에서 형상비를 80으로 증가시키기에 따라 에너지 소산능력이 크게 향상된다는 것을 알 수 있었다.

### 3.3 단면내 섬유분포

강섬유를 혼입한 콘크리트에서 단면내 강섬유 분포는 SFRC의 휨 성능에 주요한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Kang et al., 2008). 이 연구에서는 섬유의 혼입률 및 형상비에 따른 단면내 섬유 분포를 정량적으로 평가하기 위하여 각 휨 시험체의 중앙부 단면을 절단하여 파괴 단면에 배열된 섬유 수를 육안으로 조사하였다.

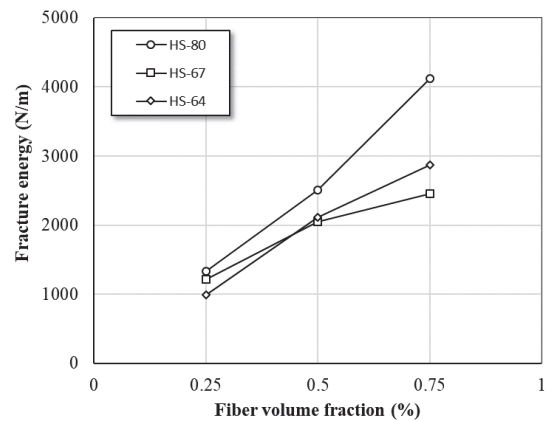
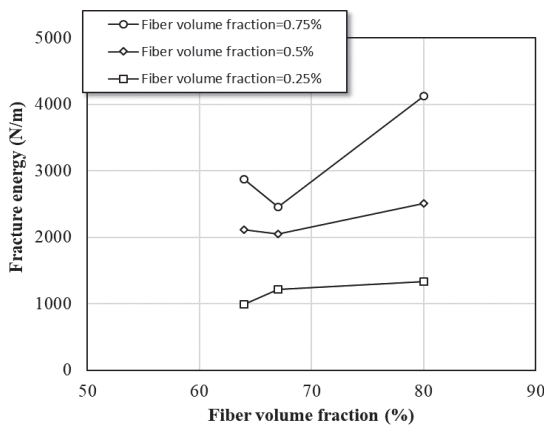


Fig. 5 The effects of steel fibers properties on fracture energy of SFRC

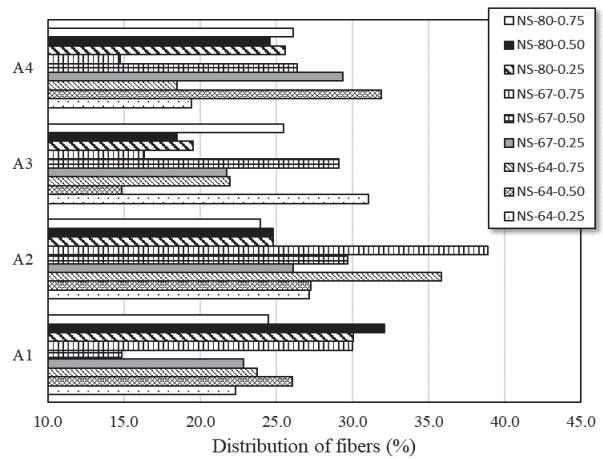
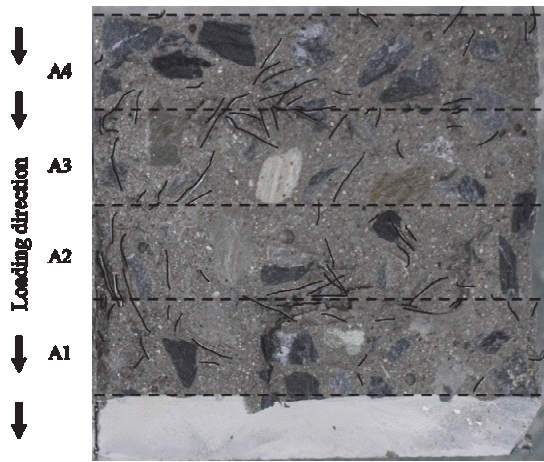


Fig. 6 Distribution of fibers in the cross-section of prismatic specimens

Fig. 6(a)은 휨 시험체에 대한 휨 실험 후 시험체 중앙부의 파단 단면을 나타낸 것으로 Fig. 6(a)과 같이 단면을 4등분하여 각 구간에 위치한 섬유수를 조사하여 단면내 섬유의 분산 상태를 평가하였다. Fig. 6(b)은 각 SFRC 배합별로 3개 씩 제작된 휨 시험체 각각에 대하여 전체 파단면에 배열된 총 섬유수로 각 구간에 배열된 섬유수를 나눈 백분율의 평균값을 각 배합별로 비교하여 나타낸 것이다.

Fig. 6(b)에 나타난 바와 같이 형상비 및 섬유 혼입률에 따라 섬유의 배열 상태는 큰 차이를 보이고 있지는 않으나 대체로 시험체의 하부 A<sub>1</sub> 및 A<sub>2</sub> 구간에 섬유가 집중되어 배치된 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 후크형 강섬유의 형상비(64, 67 및 80) 및 혼입률(0.25, 0.5 및 0.75%)이 30MPa급 콘크리트의 압축 및 휨 특성에 미치는 영향에 대해 실험적으로 평가하였다. 균열 발생 이후 잔여 휨 인장성능은 MC2010(2010)에 준하여 평가되었다. SFRC에 대한 압축 및 휨 시험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 압축강도 시험 결과, 섬유가 혼입되지 않은 보통 콘크리트의 압축강도에 비하여 SFRC의 압축강도는 저하되는 경향을 보였지만, SFRC에서 섬유 혼입률이 증가될수록 압축강도는 증가하였다. 또한 형상비가 증가될수록 압축강도는 감소되는 경향을 보였다.
- 2) 강섬유 혼입에 따른 콘크리트의 탄성계수, 압축강도시 변형률, 푸아송비 모두 증가하는 것으로 나타났다. 강섬유 혼입에 따라 압축 인성 및 인성지수는 향상되어 콘크리트 취성적인 특성이 개선되는 것으로 나타났다.
- 3) 강섬유 혼입율이 증가됨에 따라 SFRC의 휨응력-CMOD

관계 곡선에서 균열 발생후 휨응력 저하는 감소되는 경향을 보였으며 이러한 경향은 섬유의 형상비가 증가됨에 따라 현저하게 나타났다.

- 4) 강섬유 혼입에 따라 콘크리트의 선형구간에서 휨강도( $f_L$ )는 증가되는 경향을 보였다. 동일한 섬유 혼입률을 갖는 형상비 64 및 67인 SFRC의  $f_L$ 은 4.1~8.9% 범위의 차이를 보였으나 다른 배합에 비하여 형상비 80 SFRC에서  $f_L$ 은 8.6~62.7% 증가되었다.
- 5) 강섬유 혼입율 및 형상비가 증가됨에 따라 MC2010에서 규정하는 잔류 휨 인장 응력비는 증가되었다. 형상비 80인 강섬유가 0.75% 혼입된 경우 사용후상태에서의 잔류 휨 인장응력과 선형구간에서의 휨응력 비( $f_{R1}/f_L$ )는 1.11, 균열이후 잔류 휨 인장 응력비( $f_{R3}/f_{R1}$ )는 1.39로 형상비 64인 경우에 비하여 각각 14.4% 및 7.7% 향상되었다.

#### 감사의 글

본 논문은 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었습니다.

#### References

1. Yoo, D. Y., Yoon, Y. S., & Banthia, N. (2015). Flexural response of steel-fiber-reinforced concrete beams: Effects of strength, fiber content, and strain-rate. *Cement and Concrete Composites*, 64, 84-92.
2. Almusallam, T., Ibrahim, S. M., Al-Salloum, Y., Abadel, A., & Abbas, H. (2016). Analytical and experimental investigations on the fracture behavior of hybrid fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 74, 201-217.
3. Lee, J. H. (2017). Influence of concrete strength combined with fiber content in the residual flexural strengths of fiber reinforced concrete. *Composite Structures*, 168, 216-225.

4. Chang, G. I., WK, P., & CW, M. (1993). Flexural fatigue behavior of steel fiber reinforced concrete structures.
5. Oh, Y. H., Nam, Y. G., & Kim, J. H. (2007). Strength and Ductility of Steel Fiber Reinforced Composite Beams without Shear Reinforcements. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 19(1), 103-111.
6. Kal, K. W., Kim, K. S., Lee, D. H., Hwang, J. H., & Oh, Y. H. (2010). Experimental Study on Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams. *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, 14(3), 160-170.
7. Kim, M. H., Min, K. H., Yoo, D. Y., & Yoon, Y. S. (2011). Strengthening effect of CFRP sheets and steel fibers for enhancing the impact resistance of RC beams. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, 11(5), 41-48.
8. Jeong, G. Y., Jang, S. J., Kim, Y. C., & Yun, H. D. (2018). Effects of steel fiber strength and aspect ratio on mechanical properties of high-strength concrete. *J. Korea Conc. Inst*, 30, 197-206.
9. Koh, K. T., Kang, S. T., Park, J. J., & Ryu, G. S. (2004). A Study on the Improvement of Workability of High Strength Steed Fiber Reinforced Cementitious Composites. *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, 8(3), 141-148.
10. Soroushian, P., & Bayasi, Z. (1991). Fiber type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete. *Materials Journal*, 88(2), 129-134.
11. Lim, D. G., Jang, S. J., Jeong, G. Y., Youn, D., & Yun, H. D. (2019). Effects of Steel Fiber Properties on Compressive and Flexural Toughness of Steel Fiber-Reinforced Concrete. *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, 23(3), 43-50.
12. Lee, J. H. (2017). Influence of concrete strength combined with fiber content in the residual flexural strengths of fiber reinforced concrete. *Composite Structures*, 168, 216-225.
13. Nataraja, M. C., Dhang, N., & Gupta, A. P. (1999). Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression. *Cement and concrete composites*, 21(5-6), 383-390.
14. Koksai, F., Sahin, Y., & Sahin, M. (2012). Effect of Steel Fiber Tensile Strength on Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concretes. *Special Publication*, 289, 1-15.
15. Kang, S. T., Kim, S. W., Park, J. J., & Koh, G. T. (2008). The Effect of Steel Fiber on the Compressive Strength of the High Strength Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites. *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, 12(3), 101-109.
16. KS F 2403 (2014), Standard Test Method of Making and Curing Concrete Specimens, Korean Standards Association (in Korean).
17. EN 14651 (2005) Test Method for Metallic Fibered Concrete - Measuring the Flexural Tensile Strength (limit of proportionality (LOP), residual).
18. KS F 2405 (2010), Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete, Korean Standards Association (in Korean).
19. ASTM C 469 (2002) Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.
20. JSCE-SF5 (1984), Method of Tests for Compressive Strength and Compressive Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete, Japan Society of Civil Engineers.
21. Code, M. (2010). *Fib model code for concrete structures 2010*. Document Competence Center Siegmars Kästl eK, Germany.

Received : 02/09/2021  
 Revised : 03/29/2021  
 Accepted : 06/21/2021

---

**요 지 :** 이 연구는 후크형 강섬유의 체적비 및 형상비에 따른 콘크리트 설계기준강도 30MPa를 갖는 콘크리트의 역학적 특성, 휨 및 압축거동에 미치는 영향에 대하여 분석한다. 실험에서 형상비가 상이한 3종류의 섬유가 사용되었다. 섬유의 형상비는 64, 67, 80이며 섬유의 보강량은 체적비 0.25%, 0.50% 및 0.75%가 선정되었다. 강섬유 보강 콘크리트의 휨거동은 하중-균열폭 곡선, 휨강도 및 휨인성이 평가되었다. 압축거동은 압축응력-변형을 관계 곡선, 압축강도 및 인성 등이 평가되었다. 실험결과로부터 강섬유 보강 콘크리트의 휨강도, 휨인성 및 파괴에너지는 강섬유 혼입량이 증가됨에 따라 향상되는 것으로 나타났다. 그러나 형상 64와 67인 강섬유로 보강된 콘크리트의 역학적 특성은 큰 차이를 보이지 않았다. 이 연구에서 검토된 강섬유 보강 콘크리트의 각 배합에 대한 유럽기준(MC2010)에 의한 산정된 휨 잔여강도는 기준에서 인장철근 또는 보강 매쉬를 대체할 수 있는 한계기준을 모두 충족하는 것으로 나타났다.

**핵심용어 :** 강섬유보강 콘크리트, 후크형 강섬유, 형상비, 체적비, 휨, 압축

---