

## 고강도 후크형 강섬유로 보강된 콘크리트의 압축 및 휨 성능

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

# Compressive and Flexural Properties of Concrete Reinforced with High-strength Hooked-end Steel Fibers

Qi-Wang<sup>1</sup>, Dong-Hwi Kim<sup>1</sup>, Hyun-Do Yun<sup>2\*</sup>, Seok-Joon Jang<sup>3</sup>, Sun-Woo Kim<sup>4</sup>

**Abstract:** This paper investigates the effect of high strength hooked-end steel fiber content and aspect ratio on the compressive and flexural performance of concrete. A total of ten mixtures were prepared and tested. Concretes with specific compressive strength of 30 MPa were reinforced with three different aspect ratios ( $l/d$ ) of steel fibers 64, 67, and 80 and three different percentages of steel fibers 0.25, 0.50, and 0.75% by volume of concrete. Tensile strengths of steel fibers with  $l/d$  of 64, 67, and 80 are 2,000, 2,400, and 2,100 MPa, respectively. The compressive and flexural properties of plain and steel fiber-reinforced concrete (SFRC) mixtures were evaluated and compared. The experimental results indicated that the incorporation of high-strength hooked-end steel fibers had significant effects on the compressive and flexural performance of concrete. With the increase of steel fiber content, compressive performances, such as Poisson's ratio and toughness, of concrete were improved. The steel fibers with the least  $l/d$  of 67 resulted in a larger enhancement of compressive performances. The residual flexural strength, that is, post-cracking flexural resistance and toughness, of concrete is mainly depended on the dosage and aspect ratio of steel fibers. The residual flexural strength at serviceability (SLS) and ultimate limit state (ULS) defined in fib Model Code 2010 (MC2010) is increased as the fiber content and aspect ratio increase.

**Keywords:** High strength steel fiber, Fiber content, Aspect ratio, Compressive strength, Flexural strength, Steel fiber reinforced concrete

## 1. 서 론

콘크리트는 다른 건설재료에 비하여 경제적이고 유지관리가 용이하면서도 압축강도와 내구성 면에서 우수하여 다양한 건축 및 토목구조물의 구성재료로 활용되고 있다. 그러나 낮은 인장강도와 취성적인 파괴특성은 해결해야할 과제이며 콘크리트가 건설재료로 활용되기 시작하면서부터 이러한 한계를 극복하기 위한 다양한 시도가 이루어져 왔다.

1950년대 후반부터 콘크리트에 강섬유를 혼입하여 콘크리트의 취성적인 특성을 개선하려는 연구가 진행되기 시작하였고 이후 강섬유 혼입에 따른 콘크리트의 취성적인 특성을 연성적인 거동으로 전환할 수 있으며 또한 인장강도를 증진시킬 수 있다는 많은 연구사례가 보고되고 있다 (Rossi, 1992; Yazici et al., 2007; Jang and Yun 2018, Abbass et al., 2018;

Chen et al., 2021). 이러한 연구결과에서 콘크리트의 배합조건, 강섬유의 형상비, 혼입률, 강도 및 형상 등이 강섬유 보강 콘크리트(Steel fiber-reinforced concrete, SFRC)의 역학적 특성을 지배한다고 보고하고 있다.

지난 70여년간 SFRC에 대한 연구결과는 ACI 318 및 MC2010(FIB model code, 2010)에서 각각 강섬유를 철근콘크리트 보의 최소전단보강근 대체사용 및 구조요소에서 보강철근을 대체할 수 있는 섬유보강콘크리트(Fiber-reinforced concrete, FRC) 성능기준을 제시함으로써 FRC의 일종인 SFRC의 구조적인 활용이 가능한 단계에 이르게 되었다. 특히 MC2010에서는 FRC를 잔여휨강도(Residual flexural strength)를 근거로 5개 등급으로 구분하여 섬유보강 콘크리트를 사용한 구조부재의 휨 및 전단설계시 각 등급에 따라 적용 모델을 다르게 제시하고 있다.

SFRC의 잔여휨강도는 콘크리트 배합 및 강섬유의 특성에 의해 지배되며 동일한 콘크리트 배합조건하에서 강섬유의 혼입률이 증가됨에 따라 잔여휨강도는 증가된다(Jang and Yun 2018). 따라서 높은 잔여휨강도를 확보하기 위하여 섬유혼입률을 증가시켜야 하지만 이는 SFRC의 경제성 및 시공성을 저해하는 요인이 된다 (Kim et al., 2021). SFRC의 시공성은 SFRC를 구조부재에 적용하는데 큰 장애물의 하나로 인식되

<sup>1</sup>정희원, 충남대학교 대학원 건축공학과 석사과정

<sup>2</sup>정희원, 충남대학교 건축공학과 교수

<sup>3</sup>정희원, 국토안전관리원, 건축물관리센터 차장

<sup>4</sup>정희원, 충남대학교 건설공학교육과 교수

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

Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2022년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2022년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

고 있다.

따라서 SFRC의 제조 및 시공성을 저해하지 않는 범위내에서 SFRC의 구조적인 성능, 특히 잔여휨강도를 향상시킬 수 있는 방안에 대한 모색이 요구된다. 이 연구에서는 설계기준 압축강도 30MPa급 콘크리트에서 인장강도 2,000 MPa급 고강도 강섬유의 혼입률 및 형상비에 따른 휨 및 압축성을 평가하고 각 배합조건에 따른 SFRC의 잔여휨강도 향상 효과에 대하여 평가하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험 계획 및 사용재료

이 연구목적은 설계기준 압축강도 30MPa인 보통강도 콘크리트에서 인장강도 2,000MPa급인 고강도 강섬유의 혼입률 및 형상비에 따른 압축 및 휨성능 평가이다. 이를 위하여 Table 1과 같은 배합조건의 콘크리트에 대하여 Table 2와 같이 형상비가 상이한 3종류의 강섬유를 0.25%, 0.50% 및 0.75% 혼입하는 9배합의 강섬유 보강 콘크리트와 강섬유가 혼입되지 않은 일반 콘크리트, 총 10개 배합의 콘크리트가 제조되었다. 이 논문에서 콘크리트 각 배합의 명칭은 사용된 섬유종류와 혼입률을 조합하여 표기한다. 따라서 HS-64-0.25에

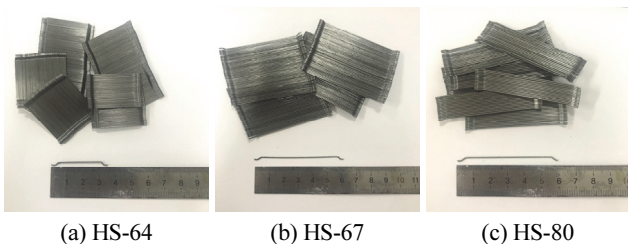
**Table 1** Mix proportion of concrete

W/C (%)	Air (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	S	G
55	4	45	129	235	557	669

W: Water, C: Cement, S: Sand, G: Gravel

**Table 2** Properties of hook-end steel fibers

Fiber Type	Diameter (mm)	Length (mm)	Aspect ratio ( $l/d$ )	Tensile strength (MPa)	$V_f$ (%)
HS-64	0.55	35	64	2000	0
HS-67	0.90	60	67	2400	0.25
HS-80	0.75	60	80	2100	0.75



**Fig. 1** Shape of hooked-end steel fiber

서 HS는 고강도 섬유, 64는 형상비, 0.25%는 섬유 혼입률을 의미한다.

콘크리트를 제조하기 위하여 사용된 시멘트는 국내산 1종 포틀랜드 시멘트가 사용되었으며, 자갈 및 모래로 갠자갈과 갠모래가 사용되었으며 굵은 골재는 입경 25mm 이하의 것을 사용하였다.

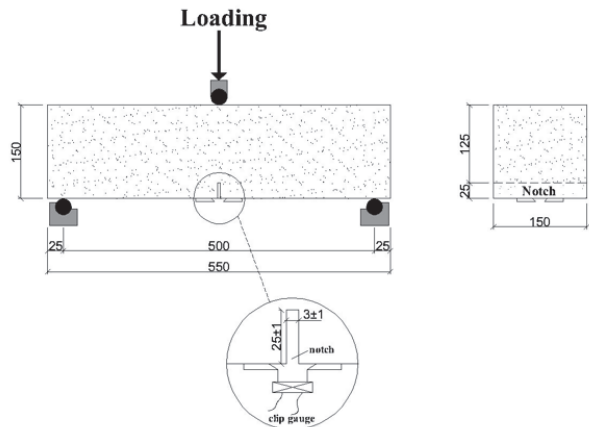
콘크리트 보강용 고강도 강섬유로 Fig.1과 같이 섬유의 양 단부에 갈고리가 설치된 후크형 강섬유가 사용되었고 Table 2에 제시된 바와 같이 각 섬유의 형상비는 64(HS-64), 67(HS-67) 및 80(HS-80)이며 인장강도는 2,000 ~ 2,400MPa 범위에 이른다.

### 2.2 시험체 제작 및 양생

일반 콘크리트와 SFRC는 100ℓ 용량인 2개의 수평 회전축 (Two horizontal shafts)을 갖는 콘크리트용 믹서를 사용하여 비빔하였다. 먼저 시멘트 및 골재 등 건재료를 투입후 1분간 비빔후 물을 투입하고 2분간 비빔후, 강섬유를 투입하고 다시 2분간 추가 비빔후 토출하여 시험체를 제작하였다.

실험변수에 따른 SFRC의 압축특성을 평가하기 위하여 KS F 2403(2014)에 준하여 지름 150mm 및 높이 300mm의 원주형 공시체를 배합별로 3개씩 제작하였다. 또한 휨성능을 평가하기 위하여 EN14651(2005)에 따라 150mm × 150mm × 550 mm 크기의 각주형 공시체를 배합별로 3개씩 제작하였다. 타설된 압축 및 휨 공시체는 강제 몰드에서 24시간 대기 양생하고, 이후 탈형하여 실험 일까지 20(± 1) °C 온도에서 수중 양생하였다.

압축시험 전 원주형 공시체의 콘크리트 타설면은 평탄하도록 연마하였고 휨 시험체는 EN-14651에서 규정하고 있는 바와 같이 각주형 공시체 중앙부 밑면에 너비 5 mm 및 깊이 25 mm의 노치(Notch)를 설치하였다(Fig. 2).



**Fig. 2** Experimental setup for prismatic specimens (unit :mm)

### 2.3 실험 방법

지름 150mm, 높이 300mm 원주형 공시체의 압축강도 시험은 2,000kN 용량의 만능시험기를 사용하고 KS F 2405에 준하여 하중제어(초당 0.5 MPa) 방식으로 재하하였다. 재하하중에 따른 공시체 중앙부 100mm 구간에서의 종 및 횡방향 변형률을 측정하기 위하여 컴프레소미터(Compressormeter)를 변형률 측정구간에 설치하였다.

각주형 공시체에 대한 휨 실험 방법은 200kN 용량의 MTS 만능재료 시험기를 사용하여 EN16451 및 RILEM TC-162-TDF(2002)에 준하여 실시하였다. 휨 공시체의 설치 상황은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 3점 가력되었으며 만능시험기 스트로크(Stroke)이 분당 0.3mm의 속도로 이동하도록 변위 제어하였다. 휨 공시체 중앙부에서 재하된 하중에 의한 균열 선단에서의 휨인장응력에 따른 중앙부 하부에 설치된 균열하단 개구변위(Crack mouth opening displacement, CMOD)를 측정하기 위하여 변위계를 설치하였다(Fig. 2).

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 압축성능

고강도 강섬유의 혼입률 및 형상비에 따른 30MPa급 콘크리트의 압축특성을 평가하기 위하여 각 배합 별로 제작된 3개

공시체의 재령 28일 시점에서 응력-변형률 관계, 압축인성, 압축강도, 탄성계수, 푸아송비, 압축강도시 변형률 등이 평가되었다. 각 배합 별로 이러한 평가항목에 대한 평균값 및 표준편차를 Table 3에 나타내었다.

강섬유가 혼입되지 않은 일반 콘크리트 공시체 3개의 재령 28일 평균 압축강도는 24.1MPa로 나타났으며 형상비 64 및 80인 강섬유를 0.25%에서 0.75%범위 혼입하더라도 강도 변화는 3% 내외로 크지 않은 것으로 나타났다. 반면 형상비 67인 강섬유로 보강된 SFRC의 압축강도는 일반 콘크리트의 압축강도에 비하여 4%에서 25%까지 높게 나타났다. Yazici 등의 연구(Yazici et al., 2007)에서 인장강도가 1,000~1,250MPa 범위이고 형상비 45, 65 및 80인 강섬유를 0.5%에서 1.5%범위 혼입시, SFRC의 압축강도는 일반 콘크리트의 압축강도에 비하여 4%에서 19%까지 향상되는 것으로 보고되고 있다. 섬유의 혼입률이 증가됨에 따라 SFRC의 압축강도는 다소 향상되는 경향을 보이고 있다고 결론 지을 수 있으며 이러한 경향은 콘크리트의 압축강도가 증가됨에 따라 다소 둔화되는 것으로 나타났다(Abbass et al., 2018). 그러나 보강된 강섬유의 형상비에 따른 SFRC의 압축강도에 대한 영향은 연구자에 따라 다소 상이한 결과를 보고하고 있다.

#### 3.1.1 압축응력-변형률 관계

Fig. 3은 강섬유의 형상비 별로 혼입률에 따른 원주형 공시

**Table 3** Test results on compressive properties of cylindrical specimens

Mixture	$f_{cm}$ (MPa)	$E_c$ (GPa)	$\nu$	$\epsilon_{co}$ ( $10^{-6}$ )	$T_{c,3}$ (MPa)	$T_{c,5}$ (MPa)	$TR_{c,3}$	$TR_{c,5}$
CON	24.08 (±1.5)	27.25 (±1.4)	0.13 (±0.01)	1336.54 (±133.65)	0.08 (±0.01)	0.09 (±0.01)	0.38 (±0.03)	0.41 (±0.03)
HS-64-0.25	24.3 (±0.4)	31.6 (±3.7)	0.20 (±0.02)	1445.67 (±229.33)	0.09 (±0.01)	0.10 (±0.01)	0.41 (±0.05)	0.44 (±0.06)
HS-64-0.50	21.8 (±0.9)	27.3 (±0.1)	0.18 (±0.01)	1481.49 (±489.66)	0.08 (±0.03)	0.09 (±0.03)	0.41 (±0.11)	0.45 (±0.14)
HS-64-0.75	24.5 (±1.3)	27.5 (±0.2)	0.21 (±0.02)	1703.36 (±210.10)	0.10 (±0.01)	0.11 (±0.02)	0.46 (±0.04)	0.51 (±0.05)
HS-67-0.25	25.1 (±2.0)	28.2 (±0.1)	0.18 (±0.03)	1541.10 (±263.70)	0.10 (±0.02)	0.11 (±0.02)	0.42 (±0.05)	0.46 (±0.07)
HS-67-0.50	27.3 (±1.0)	28.0 (±0.9)	0.21 (±0.01)	1726.20 (±107.45)	0.11 (±0.00)	0.12 (±0.00)	0.46 (±0.03)	0.51 (±0.03)
HS-67-0.75	30.2 (±1.5)	26.9 (±0.5)	0.19 (±0.01)	1969.23 (±141.83)	0.14 (±0.00)	0.15 (±0.00)	0.50 (±0.03)	1.60 (±0.02)
HS-80-0.25	23.0 (±1.3)	27.7 (±1.5)	0.17 (±0.00)	1431.73 (±262.07)	0.08 (±0.02)	0.09 (±0.02)	0.40 (±0.06)	0.40 (±0.07)
HS-80-0.50	24.6 (±0.7)	30.0 (±0.7)	0.19 (±0.01)	1504.09 (±133.41)	0.09 (±0.01)	0.10 (±0.01)	0.40 (±0.03)	0.46 (±0.04)
HS-80-0.75	24.9 (±0.7)	27.8 (±0.6)	0.20 (±0.02)	1921.15 (±255.29)	0.11 (±0.01)	0.13 (±0.02)	0.50 (±0.05)	0.57 (±0.07)

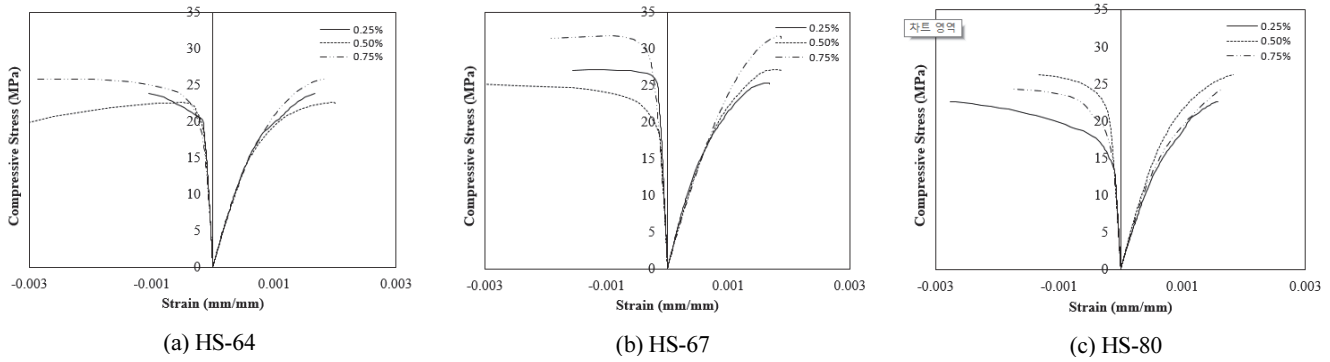


Fig. 3 Typical compressive stress-strain curves of SFRC cylindrical specimens

체의 전형적인 응력-변형률 관계곡선을 비교하여 나타낸 것이다. 공시체의 횡방향 및 종방향 변형률은 컴프레소미터를 이용하여 측정된 각 방향의 변형값을 근거로 평가되었다.

섬유의 혼입률이 증가됨에 따라 압축강도 발현시점까지의 종방향 변형률, 압축변형능력이 증가되는 경향을 보이고 있으며 이에 따라 횡방향 변형능력도 향상되는 결과를 보이고 있다. 특히 보강된 강섬유의 형상비 64 및 80에서 SFRC 공시체의 횡방향 구속능력은 유사하게 나타났으나 형상비 67인 강섬유로 보강된 SFRC의 횡방향 구속능력이 가장 우수하게 나타났다. 이러한 횡구속 효과에 따라 형상비 67인 강섬유로 보강된 콘크리트에서 형상비 64 및 80인 강섬유로 보강된 콘크리트에 비하여 높은 압축강도를 보였다. 형상비 65 및 80인 강섬유로 보강된 50~80 MPa인 고강도 콘크리트의 압축특성에 대한 기존 연구결과(Abbass et al. 2018)에서도 유사한 결과가 보고되고 있다.

### 3.1.2 압축 인성

Fig. 4는 고강도 강섬유의 혼입률 및 형상비에 따른 SFRC의 압축하중하에서 에너지 흡수능력을 평가하기 위하여 활용한 압축 인성 및 인성지수를 정의하여 나타낸 것이다(Nataraja et al. 1999). Fig. 3에 나타난 바와 같이 압축시험시 하중제어 되어 압축강도 이후의 압축거동은 기존 연구로부터 SFRC의 응력-변형률 관계의 묘사에 적용 가능성이 입증된 해석모델(Jang and Yun, 2018)을 적용하여 평가하였다. 압축인성 및 인성지수에 대한 각 배합별 평가된 결과는 Table 3에 비교하여 나타내었으며, 압축강도 및 압축 변형능력이 우수하게 나타난 형상비 67인 강섬유가 보강된 SFRC의 인성지수( $TR_{c,3}$ )는 섬유 혼입률이 증가됨에 따라 일반 콘크리트 보다 10%에서 31%까지 높게 나타났다. 형상비가 64 및 80인 강섬유로 보강된 SFRC의 인성지수는 섬유 혼입률이 증가됨에 따라 일반 콘크리트에 비하여 각각 7.9%에서 21.0% 및 5.2%에서 31.6% 높게 나타났다. 고강도 강섬유의 혼입에 따라 콘크리트의 압축하중에 대한 에너지 흡수소산능력은 향상될 수 있으나 섬

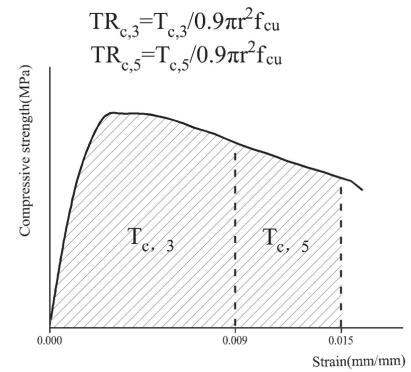


Fig. 4 Definition of compressive toughness

유의 형상비에 따른 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

### 3.1.3 탄성계수 및 푸아송비

각 배합별로 제작된 3개 원주형 공시체 각각에 대하여 압축 시험결과를 근거로 KS F2438에 준하여 탄성계수를 산정후 평균값 및 표준편차를 Table 3에 나타내었다. SFRC의 탄성계수는 강섬유 혼입률 및 형상비에 따른 압축강도 특성과 유사한 특성을 보였으며 콘크리트설계기준(KDS 14 20 10; 2021)에서 규정하고 있는 일반 콘크리트의 탄성계수 산정식에 의한 계산결과보다는 1.6%에서 28.3% 높게 나타났다.

Fig. 5는 형상비 80인 강섬유로 보강된 SFRC 원주형 공시체에 대한 압축시험결과로부터 KS F2438에 준하여 산정된 포아송비( $\nu$ )와 종방향 변형률( $\epsilon_v$ )의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 섬유의 혼입률이 0.25%, 0.50%, 0.75%로 증가됨에 따라 횡방향 변형률( $\epsilon_h$ )과 종방향 변형률의 비로 정의되는 포아송비가 증가되는 시점의 종방향 변형률이 각각 0.07%, 0.08%, 0.11%로 강섬유의 혼입률이 증가됨에 따라 증가되는 경향을 보였다. 이러한 결과로부터 강섬유의 혼입률은 콘크리트의 횡구속 능력을 향상시키는데 유효한 것으로 나타났다. 형상비 64 및 67인 강섬유로 보강된 SFRC 공시체에서도 유사한 경향을 보였다.

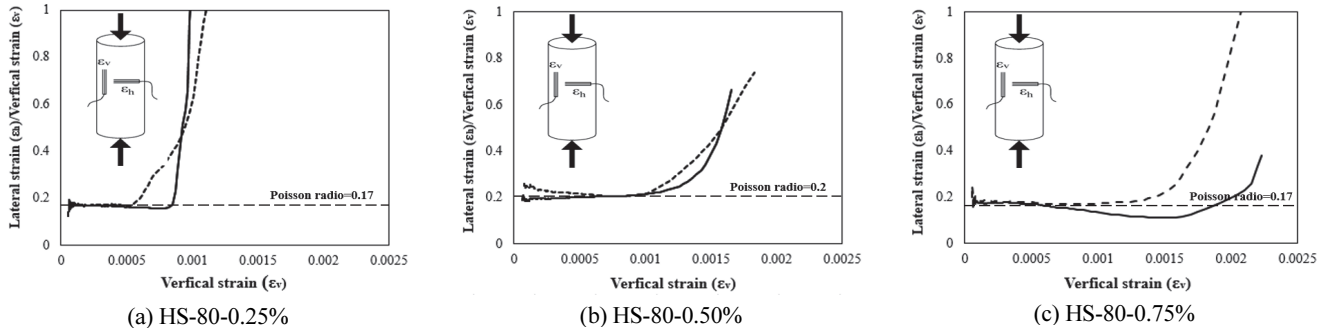


Fig. 5 Poisson's ratio-strain curves of cylindrical specimens incorporating steel fibers with aspect ratio of 80

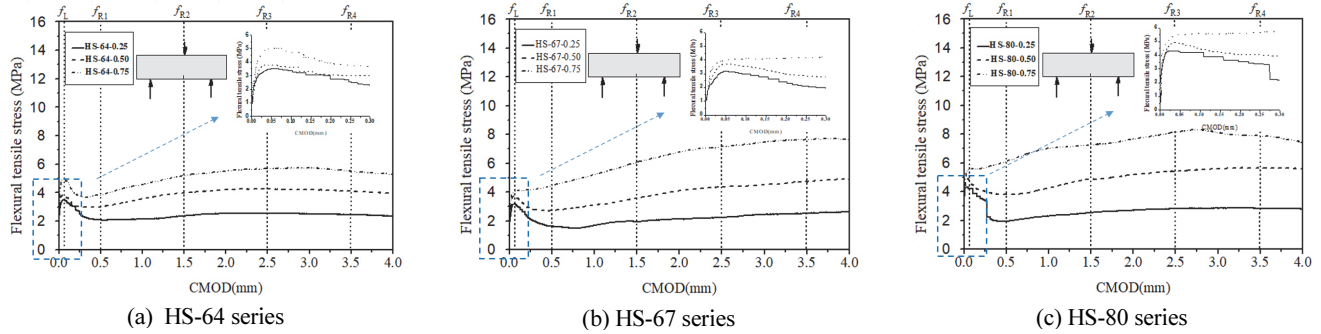


Fig. 6 Typical flexural stress-CMOD curves of SFRC prismatic specimens

### 3.2 휨 성능

#### 3.2.1 잔여 휨강도(Residual flexural strength)

Fig. 6은 강섬유 형상비별로 섬유 혼입률에 따른 3개 각주형 휨 공시체의 휨 실험결과에 대한 대표적인 균열전단의 휨응력과 균열하단 CMOD 관계를 비교하여 나타낸 것이다. Fig.6에서 비례한도 휨강도  $f_L$  (Limit of proportionality, LOP)은 EN14615 및 RILEM TC-162-TDS에서 규정된 바와 같이 CMOD가 0.05mm 이하인 초기구간에서 최대 휨강도로 식(1)과 같이 정의된다.

$$f_L = \frac{3F_L L}{2bh_{sp}^2} \quad (1)$$

여기서  $F_L$ 은 LOP에 상응하는 하중, L은 각주형 휨 공시체의 경간(500mm), b는 공시체의 폭(150mm),  $h_{sp}$ 는 공시체의 두께에서 노치 깊이를 제외한 값(125mm)이다.

Fig.6에서 잔여 휨강도  $F_{Rj}$  (Residual flexural strength)는 EN14651에서 규정된 바와 같이 CMOD가 0.5, 1.5, 2.5 및 3.5mm( $j = 1, 2, 3, 4$ )에서의 휨강도로 식(2)과 같이 정의된다.

$$f_{Rj} = \frac{3F_j L}{2bh_{sp}^2} \quad (2)$$

MC2010에서는 각 CMOD 값에 대한 잔여 휨강도가 실험

으로부터 얻은 값보다 작을 확률이 5% 이하가 되도록 하는 특성강도(Characteristic strength,  $f_{LK}$ ,  $f_{RK}$ )는 다음 식(3)으로부터 구할 수 있다. 여기서,  $\sigma$ 는 각 평균 잔여 휨강도( $f_L$ ,  $f_{Rj}$ )에 대한 표준편차이다.

$$\begin{cases} f_{LK} = f_L - 1.645\sigma \\ f_{RK} = f_{Rj} - 1.645\sigma \end{cases} \quad (3)$$

#### 3.2.2 FRC의 분류

MC2010에서는 FRC의 재료적 거동을 특성화하기 위하여 정의되는 사용한계상태(Serviceability limit state, SLS)에서 특성강도  $f_{RLK}$ 와 극한한계상태(Ultimate limit state, ULS)에서 특성강도  $f_{R3K}$ 을 근거로 FRC를 분류하고 있다. FRC의 분류는 두 개의 기호로 표현되며 첫 번째로  $f_{RLK}$  값을 표기하고 두 번째 기호로  $f_{R3K}/f_{RLK}$  비에 따라 a, b, c, d, e구분하여 표기된다. 이러한 MC2010에서 규정하고 있는 방법에 따라 이 연구에서 휨성능이 평가된 9개의 SFRC 배합의 균열발생 이후 거동을 근거로 분류하여 Table 4에 나타내었다.

Fig. 6으로부터 SFRC는 균열발생 이후 SLS 및 ULS에서도 일반 콘크리트와 상이하게 균열면을 가교하는 강섬유에 의해 휨 인장력을 부담하고 있다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유로 MC2010에서는 휨균열 발생 이후 SFRC의 잔여 휨성능을 고려하여 ULS에서 식(4)과 같은 조건을 충족하는 경우

**Table 4** Test results on flexural properties of prismatic specimens

Mixture	$f_L$ (MPa)	$f_{R1}$ (MPa)	$f_{R2}$ (MPa)	$f_{R3}$ (MPa)	$f_{R4}$ (MPa)	$f_{LK}$ (MPa)	$f_{R1K}$ (MPa)	$f_{R3K}$ (MPa)	$f_{R1K}/f_{LK}$	$f_{R3K}/f_{R1K}$ (Class)	$G_F$ (J/m <sup>2</sup> )
CON	3.8 (±0.1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HS-64-0.25	3.50 (±0.17)	2.05 (±0.06)	2.37 (±0.12)	2.55 (±0.03)	2.44 (±0.03)	3.22	1.95	2.50	0.72	1.28 (1.5d)	1345.71 (±20.47)
HS-64-0.50	3.80 (±0.07)	3.01 (±0.34)	3.98 (±0.38)	4.25 (±0.35)	4.10 (±0.23)	3.68	2.45	3.67	0.92	1.49 (2.0e)	2149.37 (±183.07)
HS-64-0.75	5.0 (±0.29)	3.85 (±0.17)	5.21 (±0.44)	5.67 (±0.48)	5.51 (±0.36)	4.52	3.57	4.88	0.98	1.37 (3.0e)	2838.29 (±207.55)
HS-67-0.25	3.63 (±0.45)	1.85 (±0.23)	1.94 (±0.01)	2.04 (±0.20)	2.21 (±0.32)	2.89	1.47	1.71	0.56	1.16 (1.0d)	1145.76 (±50.15)
HS-67-0.50	3.73 (±0.03)	2.71 (±0.02)	3.59 (±0.34)	4.36 (±0.17)	4.72 (±0.10)	3.68	2.68	4.08	0.90	1.52 (2.5e)	2160.90 (±56.27)
HS-67-0.75	3.98 (±0.17)	4.46 (±0.10)	6.07 (±0.19)	7.15 (±0.07)	7.66 (±0.06)	3.70	4.30	7.03	1.61	1.63 (4.0e)	3510.87 (±50.79)
HS-80-0.25	4.33 (±0.16)	1.94 (±0.04)	2.54 (±0.01)	2.82 (±0.04)	2.82 (±0.09)	4.07	1.87	2.75	0.61	1.47 (1.5e)	1465.53 (±8.89)
HS-80-0.50	4.46 (±0.45)	3.78 (±0.01)	4.72 (±0.16)	5.38 (±0.04)	5.29 (±0.35)	3.72	3.76	5.31	1.25	1.41 (3.0e)	2674.87 (±79.63)
HS-80-0.75	5.50 (±0.46)	6.13 (±0.03)	7.26 (±0.79)	8.13 (±0.82)	7.88 (±0.15)	4.74	6.08	6.78	1.25	1.12 (6.0d)	4071.82 (±226.63)

SFRC로 콘크리트에 작용되는 인장력에 저항하는 보강근을 부분적으로 대체할 수 있다고 규정하고 있다.

$$f_{R1K}/f_{LK} \geq 0.4 \quad (4a)$$

$$f_{R3K}/f_{R1K} \geq 0.5 \quad (4b)$$

Table 6에 나타난 바와 같이 형상비와 무관하게 인장강도 2,000MPa급의 고강도 강섬유를 0.25% (20kg/m<sup>3</sup>) 이상 혼입시 콘크리트의 취성적인 파괴를 방지하는 보강재로 대체가 가능한 수준으로 나타났다. 반면 인장강도 1200MPa급 보통강도 강섬유를 사용한 기존 연구 (Tiberti et al. 2017, Chen et al. 2021)에서는 이러한 조건을 충족하지 못하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 고강도 강섬유로 보강된 콘크리트는 ULS에서 잔여휨능을 개선하는 보통강도 강섬유에 비하여 유효하다는 결론을 얻을 수 있다.

### 3.2.3 비례한도 휨강도 ( $f_L$ )에 대한 영향

Fig. 6에 나타난 바와 같이 모든 배합의 휨 공시체에 대한 휨 응력-CMOD 곡선은 노치부분에서 휨 균열발생이전까지 CMOD가 증가됨에 따라 휨응력이 선형적으로 증가되는 특성을 보이고 있다.

Table 6에 나타난 바와 같이 CMOD가 0.05mm 범위에서 최대 휨강도  $f_L$ 은 HS-64 배합에서 강섬유 혼입률이 0.25%에서 0.50% 및 0.75%로 증가됨에 따라 8.5% 및 14.8% 증가되었다.

HS-67 배합의 경우, 2.7% 및 9.6% 향상되었으며 HS-80 배합에서는 3% 및 27% 향상되었다.

이상과 같이 고강도 강섬유의 혼입률이 증가됨에 따라  $f_L$ 은 증가되는 경향을 보이고 있으며 섬유의 형상비 64 및 67에 비하여 형상비 80인 강섬유에서 크게 향상되는 경향을 보였다. 보통강도 강섬유로 보강된 SFRC에서도 유사한 경향을 보이고 있는 것으로 보고되고 있다 (Chen et al 2021).

### 3.2.4 잔여 휨강도 ( $f_{Rj}$ )에 대한 영향

휨 균열발생 후 및 균열이 진전됨에 따라 Fig. 6에 나타난 바와 같이 SFRC 휨 공시체의 휨응력-CMOD 관계 곡선에서 CMOD가 증가됨에 따라 응력이 저하되는 특성을 보인다. 그러나 강섬유의 형상비 및 혼입률에 따라 균열 이후 휨거동은 다소 상이하게 나타났다. 섬유의 혼입률이 증가됨에 따라 균열발생 이후 휨강도저하는 다소 둔화되는 특성을 보이고 있으며 이러한 특성은 섬유의 형상비가 증가됨에 따라 현저하게 나타났다.

특히, 형상비 67 및 80인 강섬유가 0.75% 보강된 SFRC에서는 균열발생이후에도 강도저하 없이 오히려 CMOD 증가됨에 따라 강도가 증가되는 변형경화(Strain-hardening) 특성을 보였다. 이는 상대적으로 섬유의 길이가 증가됨에 따라 균열면의 가교력이 향상되어 콘크리트 내부에 작용되는 인장응력을 효율적으로 재분배하였기 때문인 것으로 판단된다. 이외의 모든 배합의 SFRC 휨 공시체는 균열 이후 다소의 강도 저하를 보인다.

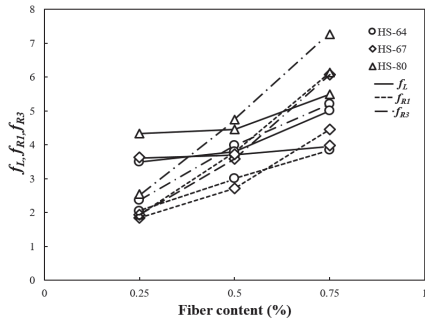


Fig. 7 Fiber content effect on residual flexural strength

이후 CMOD가 증가됨에 따라 강도가 증가되는 변형경화 특성을 보였다. 다만 섬유혼입을 및 형상비에 따라 변형경화가 시작되는 시점의 CMOD 값은 다소 상이하게 나타났다.

Table 6에 나타난 바와 같이 SLS에서 휨강도  $f_{RI}$ 은 HS-64 배합에서 섬유 혼입률이 0.25%에서 0.50% 및 0.75%로 증가됨에 따라 46.8% 및 87.8% 향상되었으며 HS-67 배합에서 각각 46.5% 및 141% 향상되었다. 또한 HS-80 배합에서는 각각 94.8% 및 216% 증가되었다. 이상과 같은 결과로부터  $f_{RI}$ 은 섬유의 혼입률 및 형상비에 따라 현저하게 증가된다는 결론을 얻을 수 있었다.

HS-64 배합에서 섬유 혼입률을 0.25%에서 0.50% 및 0.75%로 증가시킴에 따라 ULS에서의 휨강도로 정의되는  $f_{RS}$ 은 각각 66.6% 및 122% 향상되었다. 또한 HS-67 및 80 배합에서는 각각 114% 및 250%, 91% 및 188% 증가되었다. 이상과 같이 섬유 혼입률이 증가됨에 따라 ULS에서의 휨강도도 크게 증가되는 경향을 보이고 있다. 그러나 형상비 64인 경우와 비교하여 상대적으로 형상비 67 및 80에서는 큰 차이를 보이지는 않았다. 강섬유 혼입률에 따른 SLS에서의 휨강도  $f_{RI}$  증가분에 비하여 ULS에서의 휨강도  $f_{RS}$  증가분이 다소 높게 나타났다. 이러한 결과를 근거로 SFRC에서 섬유 혼입률의 증가에 따라 SLS의 잔여휨강도에 비하여 상대적으로 ULS 잔여휨강도가 더 크게 향상된다는 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 7은 섬유 혼입률 및 형상비에 따른 각 배합별 3개 휨 공시체에 대한 평균 비례한도 휨강도  $f_L$ , SLS에서의 휨강도  $f_{RI}$  및 ULS에서의 휨강도  $f_{RS}$ 에 대한 실험결과를 비교하여 나타낸 것이다. SFRC의 휨거동을 특성화할 수 있는 전술한 3개의 휨강도는 섬유 혼입률이 증가됨에 따라 모두 향상되는 특성을 보이고 있으나 상대적으로  $f_L$ 은 섬유 혼입률 및 형상비에 따른 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

### 3.2.5 에너지 파괴에 대한 영향

고강도 강섬유의 혼입률 및 형상비에 따른 SFRC의 파괴 에너지를 평가하기 위하여 각 배합 조건별로 실시된 휨 시험결과를 근거로 RILEM TC 50-FMC(1985)에 준하여 산정 평가되었다. 이 기준에서 시험편 중앙 하부에 노치를 설치한 휨 공

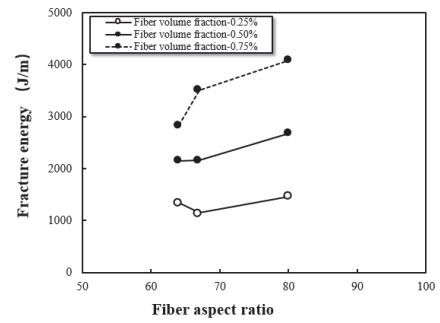


Fig. 8 Fiber aspect ratio effect on fracture energy

시체에 대한 파괴 에너지는 노치에서 시작되는 단일한 균열면을 형성하기 위하여 소산된 에너지 양으로 정의하고 있다. 공시체 중앙부 단면에서 노치에 의해 단면이 결손 부분을 제외한 공시체의 단면적(Ligament area)으로 총 소산된 에너지를 나눈 값으로 다음 식(5)을 이용하여 구할 수 있다.

$$G_F = \frac{W_0}{b(h - a_o)} \quad (5)$$

여기서,  $W_0$ 는 하중-CMOD 곡선에 의해 둘러싸인 면적,  $b$ ,  $h$ 와  $a_o$ 는 각각 공시체의 폭(150mm), 전체 깊이(150mm) 및 노치의 깊이(25mm)를 의미한다.

MC2010에서 FRC의 극한한계상태에 대한 CMOD를 2.5mm로 규정하고 있으므로 이 연구에서는 SFRC 각 배합에 대한 파괴 에너지는 휨응력-CMOD 관계곡선에서 CMOD 2.5mm까지 소산된 에너지를 기준으로 평가하였다. 이러한 평가결과는 Table 6에 제시한 바와 같다. Table 6으로부터 강섬유 혼입률이 증가됨에 따라 노치가 형성된 중앙부 단면에서 진행된 균열면에 의한 소산 에너지는 증가되는 경향을 보이고 있다. HS-64 강섬유 0.25% 혼입된 배합에서 강섬유 혼입률을 0.50% 및 0.75% 증가함에 따라 59.7% 및 110.9% 향상되었다. 또한 HS-67 섬유 보강된 콘크리트에 있어서도 88.6% 및 206.5%, HS-80 섬유가 혼입된 경우에 82.5% 및 177.8% ULS까지 소산된 에너지량은 증가되는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 강섬유의 형상비에 따른 노치가 형성된 균열면에서 소산된 파괴 에너지량을 비교하여 나타낸 것이다. 섬유 혼입률 0.25%를 제외하고 모든 배합조건하에서 섬유의 형상비가 증가됨에 따라 소산된 파괴 에너지는 증가되는 경향을 보이고 있으며 이는 섬유의 길이가 긴 섬유의 균열면 가교능력이 큰 변형시까지 유효하기 때문인 것으로 평가된다.

이 연구에서 실험변수로 선정된 섬유 혼입률 및 형상비는 콘크리트의 균열 발생면에서 소산되는 파괴 에너지 소산능력 향상에 주요한 영향 요인이되며 섬유 혼입률 및 형상비가 증가될수록 유효한 것으로 결론 지을 수 있다.

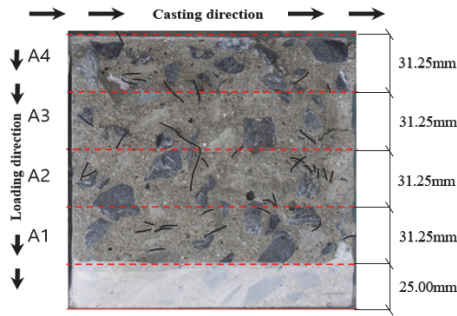


Fig. 9 Division of fracture surface

### 3.2.6 강섬유 분산

SFRC 각 배합별로 제작된 각 휨 공시체의 파단면에서 강섬유의 분포상태를 평가하기 위하여 파단면의 양면에 돌출된 섬유 수를 조사하였다.

강섬유의 분산도를 평가한 방법은 휨 시험 후 공시체를 파괴시까지 가력하여 두 개로 분리하고 단면을 Fig. 9와 같이 파단면을 노치에 의해 결손부분을 제외하고 A1, A2, A3 및 A4, 두께 31.25mm인 4개 부분의 나누고 각 구획된 단면에 포함된 강섬유의 개수를 조사하였다. 또한 단면에서 타설방향과 가력 방향을 표기하였으며 섬유의 분산에 따른 휨성능에 대한 영향을 평가하기 위하여 가력방향에 직각으로 단면을 구획하였다.

Table 5는 각 SFRC 배합별로 제작된 3개 휨 공시체의 파단면을 대상으로 각 구획된 단면에서 조사된 강섬유 수, 전체 단면에서 각 층의 섬유 분포비 및 밀도에 대한 평균값을 비교하여 나타낸 것이다.

예상할 수 있는 바와 같이 섬유의 혼입률이 증가됨에 따라 각 구획된 부분에 분포된 섬유수는 증가되는 경향을 보이고 있다. 이러한 파단면에서의 섬유 분포수 증가가 섬유의 혼입률이 증가됨에 따라 휨성능을 개선할 수 있었던 요인으로 판단된다. 또한 각 구획된 부분별 섬유의 분포비를 근거로 보면 상대적으로 작은 형상비 64 및 67인 강섬유는 모든 혼입률에서 각 층에 고르게 분포된 것으로 나타났다. 그러나 형상비 80인 강섬유가 보강된 SFRC 파단면에서는 섬유 혼입률 0.50%인 경우를 제외하고 타설방향의 단부에 섬유가 균집되어 상대적으로 공시체 중앙부에서 적은 수의 섬유가 분포된 것으로 나타났다.

이러한 결과를 근거로 볼 때, 섬유의 혼입률이 증가됨에 따라 단면에 고르게 분포된 섬유의 수는 증가되지만 섬유의 형상비가 큰 경우, 형상비가 작은 강섬유로 보강된 경우에 비하여 콘크리트 내 불균등한 섬유 분포 특성을 보이는 것으로 결론지을 수 있다.

## 4. 결 론

이 연구는 2000MPa급 고강도 후크형 강섬유의 혼입률 및 형상비에 따른 30MPa급 보통강도 콘크리트의 압축 및 휨 성

Table 5 Number of fibers distributed on fracture surface

Mixture	Distance from the top (mm)	No. of fibers		% of fibers	Density fbers/cm <sup>2</sup>
		Mean	CV (%)		
HS-64-0.25	A1	9.33	24.12	0.22	0.20
	A2	13.00	37.68	0.31	0.28
	A3	10.33	48.84	0.25	0.22
	A4	9.50	22.82	0.23	0.20
HS-64-0.50	A1	16.00	46.27	0.22	0.34
	A2	20.50	17.66	0.28	0.44
	A3	18.33	37.74	0.25	0.39
	A4	17.83	22.27	0.25	0.38
HS-64-0.75	A1	25.50	22.97	0.31	0.54
	A2	17.00	38.12	0.21	0.36
	A3	19.67	34.29	0.24	0.42
	A4	20.00	26.08	0.24	0.43
HS-67-0.25	A1	4.67	48.23	0.27	0.10
	A2	4.67	46.29	0.27	0.10
	A3	3.50	69.40	0.20	0.07
	A4	4.50	53.98	0.26	0.10
HS-67-0.50	A1	8.50	39.90	0.23	0.18
	A2	10.33	20.91	0.27	0.22
	A3	8.67	39.75	0.23	0.18
	A4	10.17	46.31	0.27	0.22
HS-67-0.75	A1	11.83	41.89	0.20	0.25
	A2	13.33	31.70	0.23	0.28
	A3	17.50	43.03	0.30	0.37
	A4	16.33	45.10	0.28	0.35
HS-80-0.25	A1	4.17	23.60	0.21	0.09
	A2	7.17	28.48	0.36	0.15
	A3	6.00	42.16	0.30	0.13
	A4	2.67	56.46	0.13	0.06
HS-80-0.50	A1	15.25	21.67	0.27	0.33
	A2	13.00	28.78	0.23	0.28
	A3	13.50	15.42	0.24	0.29
	A4	14.50	8.90	0.26	0.31
HS-80-0.75	A1	20.00	47.33	0.33	0.43
	A2	17.17	39.92	0.28	0.37
	A3	9.33	35.64	0.15	0.20
	A4	14.33	18.55	0.24	0.31

능이 평가되었으며 이러한 실험적 연구로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 고강도 강섬유의 혼입한 섬유보강 콘크리트의 압축강도 및 탄성계수는 강섬유를 혼입하지 않은 일반 콘크리트와 큰 차이를 보이지 않았다. 또한, SFRC에서도 강섬유의 혼입률 및 형상비는 압축강도 및 탄성계수에 영향이 없는 것으로 나타



났다. 그러나 강섬유는 압축강도 이후 거동에 주요한 영향을 끼치고 있으며 특히 섬유 혼입률이 증가됨에 따라 콘크리트의 횡방향 구속 능력 및 압축 인성이 크게 개선되었다.

- 2) SFRC에서 섬유 혼입률 및 형상비는 초기 휨거동의 특성값인 비례한도 휨강도( $f_L$ )에 영향을 끼치고 있는 것으로 나타났으며 특히 형상비 64(HS-64) 및 80 (HS-80)인 강섬유가 0.5% 이상 혼입될 경우  $f_L$ 은 섬유 혼입률의 증가에 따라 증가되는 것으로 나타났다.
- 3) 섬유 혼입률 및 형상비는 SFRC의 휨균열 발생이 거동에 주요한 영향을 끼치고 있으며 섬유 혼입률 및 형상비가 증가됨에 따라 SLS 및 ULS에서의 잔여 휨강도( $f_{R1}, f_{R3}$ ) 및 균열면에서의 에너지 소산능력이 크게 개선되었다.
- 4) 형상비 64, 67 및 80인 고강도 강섬유 0.25%(20kg/m<sup>3</sup>) 이상 SFRC는 MC2010에서 규정하고 있는 콘크리트의 취성적인 파괴를 방지하기 위하여 사용되는 보강재의 일부를 대체조건을 충족하였다. 따라서 이 연구에서 사용된 고강도 후크형 강섬유 0.25% 이상 혼입시 철근콘크리트 구조부재의 보강상세에 대한 완화 가능성이 확인되었다.
- 5) 형상비 64 및 67인 강섬유 0.25% 혼입시 MC2010에 따른 FRC 분류상 1.0~1.5d, 0.5% 이상 혼입시 2~4e로 평가되었으며 형상비 80인 SFRC의 경우, 0.25% 및 0.50% 혼입시 각각 1.5e, 3.0e로 평가되었으나 0.75% 혼입시 6d로 평가되었다.

## 감사의 글

한국연구재단 지역대학 우수연구자 지원사업에 의한 연구성과의 일부입니다(NRF-2016R1D1A3B02008179).

## References

1. Rossi, P. (1992), Mechanical behaviour of metal-fibre reinforced concretes. *Cement and Concrete Composites*, 14(1), 3-16.
2. 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.

3. 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.
4. Abbass, W., Khan, M. I., and Mourad, S. (2018), Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete. *Construction and Building Materials*, 168, 556-569.
5. Chen, G., Gao, D., Zhu, H., Yuan, J. S., Xiao, X., and Wang, W. (2021), Effects of novel multiple hooked-end steel fibres on flexural tensile behaviour of notched concrete beams with various strength grades. *Structures*, 33, 3644-3654.
6. Kim, D. H., Jang, S. J., Kim, S. W., Park, W. S., and Yun, H. D. (2021), Effect of hooked-end steel fiber volume fraction and aspect Ratio on flexural and compressive properties of concrete. *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, 25(3), 40-47.
7. Nataraja, M. C., Dhang, N., and Gupta, A. P. (1999), Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression. *Cement and Concrete Composites*, 21(5-6), 383-390.
8. Tiberti, G., Trabucchi, I., AlHamaydeh, M., Minelli, F., and Plizzari, G. (2017), Crack control in concrete members reinforced by conventional rebars and steel fibers. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 246(1), 012008.
9. FIB, in: fib Model Code for concrete structures 2010, International Federation for structural concrete (fib), Lausanne, 2013, <http://doi.org/10.1002/9783433604090>.
10. KS F 2403 (2014), Standard Test Method of Making and Curing Concrete Specimens, Korean Standards Association (in Korean).
11. European Committee for Standardization (2005), EN 14651 test method for metallic fibered concrete—Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual), Brussels, Belgium.
12. Vandewalle, L., Nemegeer, D., Balazs, L., Barr, B., Barros, J., Bartos, P., and Walraven, J. (2003), RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete'-sigma-epsilon-design method-Final Recommendation. *Materials and Structures*, 36(262), 560-567.
13. RILEM Committee on Fracture Mechanics of Concrete-Test Methods (RILEM 50-FMC). 16 Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend test 17 on notched beams. *Mater Struct*, 18, 285290, (1985).

Received : 10/30/2021

Revised : 12/01/2021

Accepted : 12/07/2021

**요 지 :** 이 논문은 고강도 후크형 강섬유 보강량과 형상비에 따른 콘크리트의 압축 및 휨 성능에 미치는 영향에 대하여 다룬다. 이를 위하여 총 10개 콘크리트 배합이 계획되었다. 설계기준강도 30 MPa인 콘크리트에 형상비(1/d)가 64, 67, 80인 강섬유를 0.25%, 0.50%, 0.75% 혼입하여 강섬유 보강콘크리트가 제조되었다. 형상비 64, 67, 80인 강섬유의 인장강도는 각각 2,000, 2,400, 2,100 MPa이다. 시험 결과로부터 고강도 후크형 강섬유의 혼입량은 콘크리트의 압축 및 휨 성능에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 강섬유 혼입량이 증가함에 따라 푸아송비 및 압축인성은 향상되었으나 콘크리트의 압축강도 및 탄성계수에 큰 변화를 보이지 않았다. 강섬유 보강 콘크리트의 균열발생 후 휨거동의 특성을 나타내는 잔여 휨강도 및 노치에서 시작된 균열면에서 에너지 소산능력은 강섬유의 혼입률 및 형상비에 따라 크게 좌우되었다. 특히 MC2010에서 정의된 사용 및 극한 상태한계에서의 잔여 휨강도는 강섬유 혼입량과 형상비가 증가함에 따라 증가되었다.

**핵심용어 :** 고강도 강섬유, 섬유 보강량, 형상비, 압축강도, 휨강도, 섬유보강 콘크리트