

## 강섬유 혼입률에 따른 고강도 콘크리트의 휨 크리프 특성

임성훈<sup>1</sup>, 김동휘<sup>1</sup>, 윤현도<sup>2\*</sup>

# Effects of Steel Fiber Contents on Flexural Creep Behavior of High-Strength Concrete

Seong-Hoon Lim<sup>1</sup>, Dong-Hwi Kim<sup>1</sup>, Hyun-Do Yun<sup>2\*</sup>

**Abstract** : In this paper, the flexural creep behavior of hooked-end steel fiber reinforced high-strength concrete was evaluated to investigate the steel fiber content influence on long-term behavior of flexural members. An experimental program consisted of nine prismatic beam specimens with dimensions of 150 × 150 × 600mm reinforced with different contents of steel fiber (0, 0.75 and 1.5% at the volume fraction). To introduce flexural creep loading to notched prismatic beam specimens, a four-point bending test setup was used. The sustained load with 40% of the flexural strength was applied by means of a lever system and controlled by a load cell for 90 days. During sustained loading, crack mouth opening displacement (CMOD) was monitored. Conventional flexural test after creep tests were carried out to evaluate the residual capacity of each specimen. Test results showed that steel fiber content has a significant effect on the flexural creep behavior of high-strength concrete and long-term flexural load with 40% of flexural strength doesn't generate negative effects on the residual capacity of steel fiber reinforced high-strength concrete.

**Keywords**: flexural creep, hooked-end steel fiber, four-point bending test, high-strength concrete, crack opening

### 1. 서론

구조물의 대형화 및 초고층화에 따른 고강도 콘크리트의 수요가 증가하고 있다. 고강도 콘크리트는 높은 압축강도를 갖고 있지만, 균열, 휨 그리고 인장에 취약한 단점을 갖고 있다. 이를 보완하기 위해 콘크리트 타설시 강섬유를 혼입한 강섬유보강 콘크리트에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 이로 강섬유보강 콘크리트의 혼입에 대한 관련 정보의 영역이 증가하였다. 강섬유보강 콘크리트는 일반 콘크리트의 단점인 균열에 대한 내력저하를 보완할수 있고, 연성적 파괴, 휨 강도, 피로 저항성능을 향상시킨다. 이는 강섬유가 콘크리트 내에서 응력을 분배하여 균열을 분산시켜고, 손상을 최소화하여 균열을 제어 할 수 있기 때문이다. 섬유 혼입에 따른 변수는 주로 섬유 혼입률 및 섬유 형상비에 관한 연구가 대부분이다. 섬유 혼입률에 대한 연구의 경우, 낮은 혼입률은 가교작용을 통해 균열제어 능력이 미비하게 나타나는 경향을 보였으며, 높은 섬유 혼입률을 갖는 실험체의 경우 활발한 가교작용으로

균열제어 능력이 뚜렷하게 나타나지만 섬유몽침현상이 발생 하는 것으로 나타났다.(Koh et, al 2004) 섬유 몽침현상은 섬유의 높은 혼입률과 큰 형상비에 따라 발생 가능하여 실험체 단면에 분산되어 분포하지 못하여 비경제적이며 내력저하를 가져오는 단점을 가지고 있어 높은 혼입률에 따른 연구는 미비한 실정이다.

크리프 현상은 하중의 증가, 시간의 경과, 재료의 증가에 따라 변형을 일으키는 것으로 정의 할 수 있다. (Bernard ES et al., 2004) 섬유보강 콘크리트에 대한 장기적인 휨 크리프 성능에 대해서는 연구가 미비한 상태이므로, 압축 크리프 연구를 참고하였을 때 강섬유보강 콘크리트 (Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC)의 역학적 특성과 유사하게 일반 모르타르와 콘크리트를 비교 할 경우 SFRC는 크리프 변형을 억제 할 수 있다. (Mangat PS et al., 1986, Chern JC & Young CH et al., 1989) 그러나 본 연구의 주제인 휨 크리프 실험은 표준화된 평가방법이 없고 현재까지 완전히 연구되지 않은 비교적 새로운 주제이다.(Arango, S. E et al., 2012) 크리프에 대한 변형률의 증가는 뚜렷하게 나타나지 않으므로 크리프 실험 전 초기 균열을 통해 실험은 진행되는 연구가 있다. 인장 및 휨 크리프 실험 전 실험체에 인장력 및 휨 하중을 가해 초기 균열을 발생 시킨 후 크리프 실험을 진행하는 실험이 진행되었다.(Zhao, Di Prisco et al., 2012, Babafemi et al., 2015, Llano-Torre, Aitor, et al., 2015) 이는 온전히 크리프에 의한

<sup>1</sup>정희원, 충남대학교 건축공학과 석사과정

<sup>2</sup>정희원, 충남대학교 건축공학과 교수

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

Chungnam National University, Daejeon, 34134, Republic of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2020년 5월 31일까지 학회에 보내주시면 2020년 6월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

초기 변형을 알 수 없고 초기 균열에 의해 파단된 섬유가 모호해 질 수 있다.

본 연구에서는 강섬유의 혼입 유무 및 혼입률이 SFRC의 역학적특성에 미치는 영향을 평가하고, 초기 균열없이 휨 크리프가 SFRC에 미치는 영향을 시간의 증가에 따라 변화하는 것을 평가하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 실험방법

### 2.1 실험 계획

본 연구에서는 Table 1과 같이 물-겉합재비 50%로 계획하였으며, 설계기준 압축강도 40 MPa급 콘크리트를 사용하여 강섬유보강 콘크리트의 역학적 특성 및 휨 크리프 성능을 평가 하였다. Table 2는 보통 포틀랜드 시멘트의 화학적 성분을 나타내었으며, 콘크리트의 유동성 및 시공성을 향상시키기 위해 고성능감수제를 혼입하였다. 또한 AC318-14 (2014)에서 콘크리트의 최소 전단보강근의 대체를 위한 SFRC의 최소 혼입률 0.75%를 기준으로 하였으며, 섬유 혼입률의 증가는 휨 성능을 향상시킬 수 있다.(Jang et al., 2016) 또한 섬유 혼입률, 형상비, 인장강도 순에 따라 SFRC의 최대 휨 응력에 영향을 준다고 미치므로 섬유 혼입률을 실험 변수로 설정하였다.(Jeong et al., 2018) 강섬유의 특징은 Table 3에 나타내었으며, Fig. 1에 강섬유의 형상을 나타내었다.

압축 크리프 실험의 경우 ASTM C 512에서 제안한 규정으로 크리프 실험을 진행하도록 규정하고 있지만, 섬유를 보강한 콘크리트에 대해서는 기준이 명확하지 않기 때문에 기존 문헌들 중 FRC의 크리프 거동을 효과적으로 평가한 문헌을 참고 하여 실험을 진행하였다.

휨 성능 평가 및 휨 크리프 실험의 경우 내·외부적인 영향을 최소화하기 위해 Fig. 2와 같이 강제몰드를 제작하였고, 실험체는 EN-14651에 준하여 150×150×550 mm 크기의 각주형 공시체를 각각 3개씩 제작하여 실험을 진행하였다. 실험체는 타설 후 강제 몰드에서 24시간 동안 기건 양생하였으며, 20±1°C 온도에서 수중양생하였다. 또한 휨 성능을 파악하기 위해 각주형 공시체 중앙 밑면에 너비 5 mm 및 깊이 25 mm의 노치(Notch)를 설치하였고, 철물 두 개를 붙여 선형변위계를 설치하였다.

### 2.2 실험 방법

#### 2.2.1 SFRC의 압축 및 휨 실험방법

SFRC의 압축거동 평가방법은 KS F 2405에 따라 Fig. 3 (a)와 같이 2,000 kN의 만능재료시험기에 원주형 공시체를 설치

**Table 1** Mix proportions of concrete

W/B (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )			
	W	C	S	G
50	180	360	767	970

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

**Table 2** Chemical composition of cement

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
21.75	5.43	3.08	60.22	3.06	0.96	0.13	2.36

**Table 3** Mechanical properties of steel fiber

Type	Diameter (mm)	Length (mm)	Aspect ratio (l/d)	Tensile strength (MPa)	V <sub>f</sub> (%)
Hooked	0.5	30	60	1,100	0
					0.75
					1.50



**Fig. 1** Shape and appearance of fibers used in the SFRC



**Fig. 2** Steel molds for flexural creep test specimens

하였으며, 0.5 MPa/s의 속도로 하중제어 방식으로 실험을 진행하였다. 압축변형 측정을 위해 컴프레소미터를 설치하며, 측면에 2개의 선형변위계(LVDT)를 사용하여 원주형 공시체

의 변형을 측정하였다.

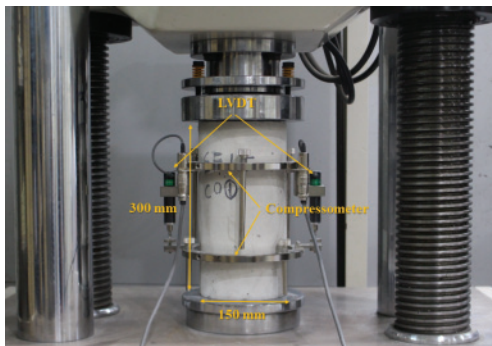
휨 실험은 휨 크리프 전과 후로 하여 Fig. 3 (b)에 나타난 바와 같이 설치하였고, 휨 거동 평가방법은 EN-14651에 준하여 200 kN의 만능재료시험기를 사용하여 경간 450 mm의 중앙점 가력방식으로 실험을 진행하였으며, 또한 변위제어방식으로 0.3 mm/min의 속도로 하였다. 또한 초기균열, CMOD 0.05 mm, CMOD 0.5 mm, CMOD 2.5 mm일 때 각주형 공시체의 정면을 촬영하여 균열의 확장을 기록하였다.

### 2.1.2 SFRC의 휨 크리프 실험장비 및 실험방법

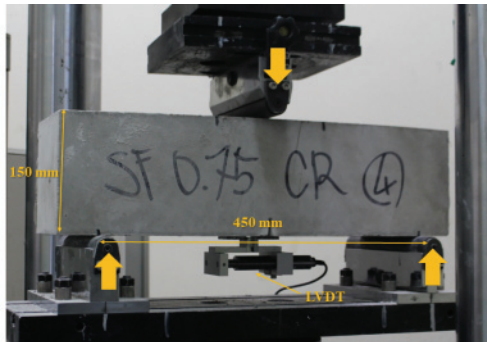
본 연구에서는 강섬유보강 콘크리트에 대한 휨 크리프의 저

항성능을 평가하고자 하였으며, 휨 크리프에 영향을 주는 요소에는 여러 가지 매개변수가 존재하므로 실험 변수를 제외하고 다른 요소를 최소화 하였다. 크리프 실험의 경우 온도와 습도에 의해 건조수축이 발생 할 수 있으므로 일정하게 온도 및 습도를 유지하기 위해 온도  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  및 습도  $50 \pm 5\%$ 의 항온 항습실을 만들었으며, 유지하여 크리프 실험을 진행하였다.

휨 크리프실험은 Fig. 4 (b)와 같이 사전에 노치를 준후 진행 하였으며, 틸팅이 가능한 지그(Jig)를 실험체와 같이 배합당 세 개씩 제작하였고 크기와 형태는 Fig. 4 (a)에 나타난 바와 같다. 휨 크리프 실험을 위해 논문을 참고하여 Fig. 5 (a)와 같

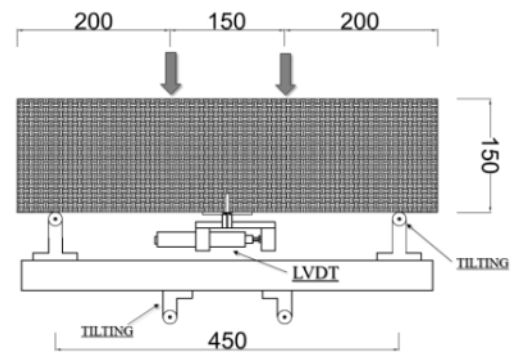


(a) Compressive test setup

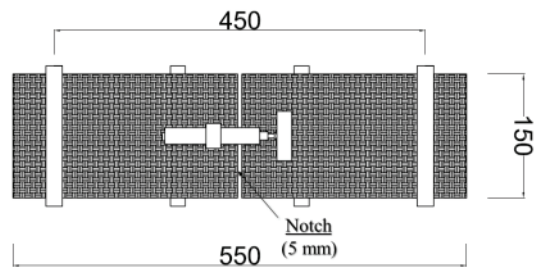


(b) Flexural test setup

**Fig. 3** Compressive test and flexural test setup for SFRC specimens

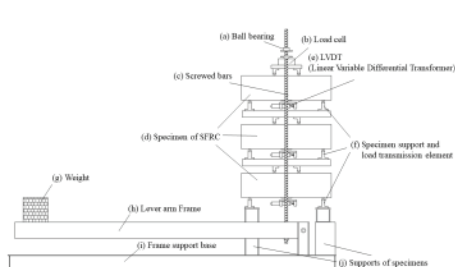


(a) Specimens of front



(b) Specimens of bottom

**Fig. 4** Shape and dimensions of test specimen for flexural creep test



(a) Scheme of the flexural creep frame



(b) Creep frames at the time test

**Fig. 5** Method of Flexural Creep

이 바닥면에 support frame을 설치한 후 상부에 arm frame을 설치하여 실험체에 하중을 전달하였으며, 실험체에서 일정한 하중을 전달하기 위해 직경 2 mm의 screwed bar를 설치하였고, 세 개의 실험체 상부에 load cell를 설치 하였다. (Arango et al. 2012 & Garcia-Taengua et al. 2014) Fig. 5 (b)에 나타낸바와 같이 TDS에 하중 및 변위 측정계를 연결하여 90일 동안 휨 강도의 40%의 하중을 지속적으로 휨 크리프에 대한 데이터를 측정하였다.

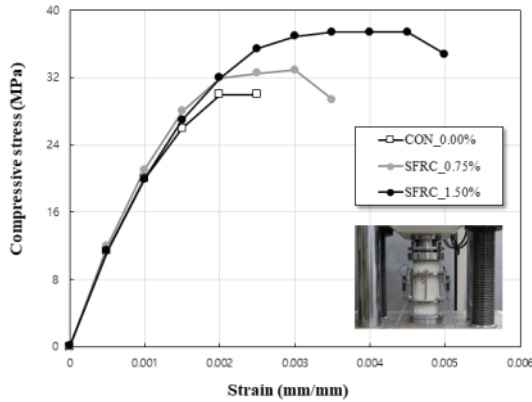


Fig. 6 Compressive curves of SFRC and concrete

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 SFRC의 압축 특성평가

강섬유 혼입률에 따른 SFRC의 압축특성에 대해서 실험을 진행하였고, 실험결과에 대한 그래프는 Fig. 6에 나타내었다. 강섬유 혼입에 따른 압축강도 평가 결과 강섬유를 1.50% 혼입한 실험체의 경우 일반 콘크리트와 비교 했을 때 약 7 MPa의 압축강도 차이를 보였고, 강섬유를 0.75% 혼입한 실험체와 비교했을 경우 5 MPa의 압축강도 차이가 나타났다. 또한 일반 콘크리트에서는 최대 압축용력을 보인 후 파단과파괴에 이르렀지만, 강섬유를 혼입한 실험체에서는 변형률이 증가한 후에 파괴에 이르렀으며, 강섬유 혼입률 1.50% 혼입한 실험체에서 뚜렷한 차이가 보여졌다. 이는 강섬유가 다수 분포된 SFRC\_1.50% 실험체에서 더 활발한 섬유의 가교작용으로 인해 압축강도 높게 나타났고, 연성적인 파괴가 보여졌다고 판단된다.

#### 3.2 SFRC의 휨 특성평가

##### 3.2.1 SFRC의 휨 응력 및 휨 거동 특성

강섬유보강 콘크리트의 휨 특성, 인성 및 크리프를 평가하기 위해 Fig. 4 (a) 및 (b)에 나타낸바와 같이 각주형 공시체 중앙 하부에 노치를 주고, 하부에 선형변위계 설치를 위해 철물을 부착하여 실험을 진행하였다. 휨 성능 평가 실험의 경우 휨 크리프 재하하중을 얻기 위해 선행된 실험이며, 휨 크리프 재하 전과 휨 크리프 재하 후의 휨 특성을 평가하였다. 또한 선형 구간 휨 응력 및 잔영 휨 응력을 평가하기 위해 식 (1) 과 (2)를

Table 4 Test results on flexural performance of SFRC mixtures before creep test

Mixture	$f_L$ (MPa)	$f_r$ (MPa)	$f_{R1}$ (MPa)	$f_{R3}$ (MPa)	$f_{R1}/f_{RL}$	$f_{R3}/f_{R1}$
CON_B4	6.19 (±1.66)	6.19 (±1.66)	-	-	-	-
SFRC_0.75_B4	6.93 (±1.71)	7.59 (±1.62)	6.29 (±1.93)	5.91 (±1.59)	0.90 (±0.11)	0.95 (±0.04)
SFRC_1.50_B4	9.66 (±1.15)	10.31 (±1.47)	9.58 (±1.11)	8.83 (±1.67)	0.99 (±0.01)	0.92 (±0.12)

$f_{R1}$ : CMOD가 0.5 mm의 휨 응력(N/mm<sup>2</sup>),  $f_{R3}$ : CMOD가 2.5 mm의 휨 응력(N/mm<sup>2</sup>)

Table 5 Test results on flexural performance of SFRC mixtures after creep test

Mixture	$f_L$ (MPa)	$f_r$ (MPa)	$f_{R1}$ (MPa)	$f_{R3}$ (MPa)	$f_{R1}/f_{RL}$	$f_{R3}/f_{R1}$
CON_AFT	5.65 (±0.23)	5.65 (±0.23)	-	-	-	-
SFRC_0.75_AFT	7.46 (±0.50)	7.57 (±0.49)	6.28 (±0.77)	4.30 (±0.75)	0.84 (±0.05)	0.68 (±0.04)
SFRC_1.50_AFT	9.58 (±0.69)	10.68 (±0.54)	9.66 (±0.70)	8.27 (±0.85)	1.00 (±0.00)	0.85 (±0.03)

$f_{R1}$ : CMOD가 0.5 mm의 휨 응력(N/mm<sup>2</sup>),  $f_{R3}$ : CMOD가 2.5 mm의 휨 응력(N/mm<sup>2</sup>)

산정하여 활용하였다.(Jeong et al. 2018)

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

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

여기서,  $f_L$ : 선형구간 휨 응력 (N/mm<sup>2</sup>)

$F_L$ : 선형 구간 휨 강도(N)

$L$ : 실험체 지간거리 (mm)

$b$ : 실험체의 너비 (mm)

$h_{sp}$ : 전체 단면 높이에서 노치 깊이를 제외한 높이(mm)

$f_{Ri}$ : 잔여 휨 응력(N/mm<sup>2</sup>)

$F_j$ : 특정 CMOD에서의 휨 강도(N)

휨 응력 및 잔여 응력을 평가하는 방법은 하중-CMOD 관계에서 최대 휨 강도가 CMOD 0.05 mm를 기준으로 CMOD가 이후에 생기는 경우와 이전에 생기는 경우로 최대 휨 강도를 선형 구간 휨 강도를 계산 할 수 있다. 이에 따라 Table 4와 Table 5에서 강섬유보강 콘크리트의 휨 응력, 휨 거동 특성결과를 나타내었다. 휨 응력 평가결과에서는 강섬유를 혼입한 실험체에서 대체적으로 초기균열강도가 일반 콘크리트의 비하여 높게 나타났으며, 최대 휨 응력평가에서도 강섬유가 혼입된 실험체에서 휨 응력이 높게 나타났고, 혼입률이 증가할수록 휨 응력이 높게 나타났다. 휨 거동 측면에서는 강섬유가 혼입됨에 따라 초기균열이후 하중이 급격하게 빠지지 않았으며, 혼입률이 증가할수록 초기균열 이후 하중 증가에 따른 변형 경화 특성이 뚜렷하게 나타났다. 또한 휨 크리프 실험 전과 후를 비교했을 때, 휨 크리프 실험 후의 일반 콘크리트에서는 초기 균열강도가 낮게 나타났고, SFRC 실험체에서는 유사한 초기 균열강도가 보여졌다. 휨 크리프 실험 후 혼입률 0.75%의 실험체에서는 초기균열 이후 하중이 급격하게 감소하고,

혼입률 1.50%의 실험체에서는 CMOD 1.5 mm 이후에 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 휨 응력평가에서는 강섬유 혼입과 강섬유 혼입률의 증가는 초기 균열강도 및 최대 휨 응력의 증가를 가져온다. 혼입률 1.50%의 실험체에서는 일반 콘크리트보다 약 2배 이상의 휨 응력이 증가하였고, 초기 균열이후 및 후반부 휨 거동에서 우수한 거동이 나타났다. 이는 콘크리트 단면에 걸쳐 섬유가 다수 분포할수록 가교작용 범위가 넓어져 휨 크리프 실험과 관계없이 휨 응력평가에서 우수한 결과가 나타났다고 판단된다.

### 3.2.2 SFRC의 휨 인성평가

fib model code 2010에서는 EN-14651 휨 성능 평가를 근거로 하여 식 (3) 및 (4)를 만족하는 경우 강섬유가 인장보강근을 일부 대체하거나 전체를 대체할 수 있다고 제시하고 있다.

$$f_{R1}/f_L \geq 0.4 \quad (3)$$

$$f_{R3}/f_{R1} \geq 0.5 \quad (4)$$

여기서,  $f_{R1}$ : 잔여 휨 응력(N/mm<sup>2</sup>)으로 CMOD가 0.5 mm일 때의 휨 응력

$f_{R3}$ : 잔여 휨 응력(N/mm<sup>2</sup>)으로 CMOD가 2.5 mm 일때의 휨 응력

이에 따른 결과를 휨 크리프 실험 전 및 후로 하여 Table 4 및 Table 5에 나타내었다.  $f_{R1}$ 의 평가에서 혼입률 1.50%의 실험체가 혼입률 0.75%의 실험체보다 약 30% 이상 높게 나타났고, 휨 크리프 실험과 관계 없이 유사하게 나타났다.  $f_{R3}$ 의 평가에서는 혼입률 1.50%의 실험체가 혼입률 0.75% 실험체보다 33% 향상된 결과가 나타났고, 휨 크리프를 진행한 실험체에서는 혼입률 1.50%의 실험체에서 48% 이상 향상된 결과가 나타났다. 이는 실험체 내의 강섬유 분포률이 높은 혼입률 1.50%의 실험체가 휨 크리프에 대한 영향이 적게 나타나 휨 실험에도 큰 영향을 주

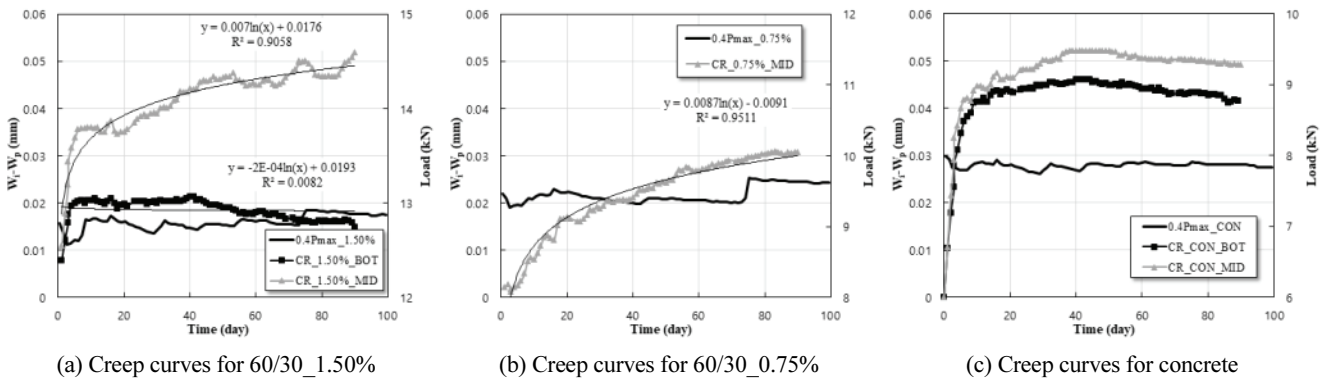


Fig. 7 Flexural creep curve

지 못하여 위 결과와 같은 차이가 나타났다고 판단된다. fib model code에서 제안하는 식 (3) 및 (4)에서 모두 만족하였는데, 이는 모든 실험체가 혼입률 0.75% 이상 섬유를 혼입하여 이와 같은 결과가 나타났다고 사료된다. 하지만 SFRC\_0.75\_AFT의 실험체에서  $f_{R3}/f_{R1}$ 의 평가 결과가 가장 낮게 나타났는데, 이는 실험체 내부에 휨 크리프에 대한 피로와 미세균열이 휨 실험 후 반부인 CMOD 2.5 mm에 발생하여  $f_{R3}$  값이 낮게 나타나  $f_{R3}/f_{R1}$ 이 낮은 결과값이 나타났다고 판단된다.

### 3.3 강섬유보강 콘크리트의 휨 크리프 성능 평가

#### 3.3.1 SFRC의 휨 응력 및 휨 거동 특성

본 연구에서는 강섬유보강 콘크리트의 90일 간의 휨 크리프에 대한 영향 및 거동을 확인하기 위해 식 (5) 및 (6) 과 같은 식을 산정하여 활용 하였다.

$$\varphi_c(j) = W_{ci}^{(j)} / W_{ci} \quad (5)$$

$$COR^{t_1-t_2} = (W_{ci}^{t_2} - W_{ci}^{t_1}) / (t_2 - t_1) \quad (6)$$

여기서,  $\varphi_c(j)$  : 크리프 계수

$W_{ci}$  : 초기 휨 크리프 하중으로 발생된 CMOD

$W_{ci}^{(j)}$  : 90일 동안 휨 크리프에 의해 발생된 CMOD

$COR^{t_1-t_2}$  : 시간에 따른 균열개구비

휨 크리프에 대한 주요 목표는 변수와 실험에 적용된 매개 변수 간의 관계를 정리하여 대부분의 크리프 매개변수에 통계적으로 유의미한 변수를 식별하는 것이다. 본 연구에서는 혼입률에 따른 휨 크리프 실험을 위해 같은 혼입률의 각주형 공시체를 상·중·하부에 위치 시켜 실험을 진행하였으며, 이에 대한 실험 결과를 Fig. 3 및 Table 6에 나타내었다. 실험결과 상부에 위치한 실험체 군에서는 낮은 변형률이 발생하였고, 혼입률 0.75%의 실험체에서 변형률이 시간에 따라 감소하는 추세가 보여졌다. 혼입률 1.50%의 실험체와 일반 콘크리트 실험체를 비교 했을 때, 초기 휨 크리프에 의한 CMOD의 차이는 크게 나타나지 않았지만, 90일 간 측정된 크리프 계수에서는 하부 및 중간부에서 각각 49% 및 19%의 크리프 저항성이 보였고, 상부에 위치한 실험체에서도 미비하지만 크리프 저항성이 나타났다. 또한 휨 크리프의 균열개구비 평가에서 초반인 0~14일 결과가 가장 두드러지게 나타났고, 혼입률 1.50%의 실험체와 일반 콘크리트 실험체를 비교했을 경우 하·중상부 각각 41%, 4% 및 8%로 휨 크리프에 의한 균열개구비가 감소하였고, 그 차이는 하부 실험체에서 뚜렷하게 나타났다. 그 외의 14~30일 및 30~90일 측정 평가에서는 미비하게

Table 6 Test results on flexural creep performance of SFRC specimens

Mixture	$W_{ci}$ (mm)	$\varphi_c$ H90	COR <sup>0-14</sup>	COR <sup>14-30</sup>	COR <sup>30-90</sup>	
			(10 <sup>-3</sup> mm/day)			
CR_CON	BOT	0.033	1.400	5.310	0.208	-0.026
	MID	0.028	1.883	5.131	0.333	0.008
	TOP	0.015	1.105	1.643	-0.359	-0.217
0.4Pmax _0.75%	BOT	0.013	1.442	1.810	-0.391	-0.264
	MID	0.010	2.072	0.988	0.401	0.186
	TOP	0.022	0.689	2.310	-0.370	-0.203
0.4Pmax _1.50%	BOT	0.024	0.905	3.125	-0.005	-0.065
	MID	0.034	1.531	4.929	0.240	0.133
	TOP	0.016	0.874	1.524	-0.339	-0.153

차이가 나타났고, 혼입률 0.75%의 실험체에서는 전체적으로 차이가 미비하게 보여졌다. 결과적으로 상부 실험체에서의 결과의 차이는 위치에 따라 비교해야 하면 추가적인 보강 및 필요변수 이외의 차이값을 줄여 추가적인 실험 진행해야한다고 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에는 강섬유의 혼입률에 따른 SFRC의 역학적 특성 및 휨 크리프를 평가하기 위하여 실시하였으며, 휨 성능 및 휨 크리프 실험의 경우 EN-14651에 준하여 실시하였다. 본 연구의 실험결과 및 분석을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 압축강도 평가 결과 강섬유 혼입 여부에 따른 압축강도의 증가는 강섬유 혼입률 0.75% 및 1.50%의 실험체에서 모두 나타났으며, 혼입률 1.50%의 실험체에서 가장 두드러지게 나타났다. 또한 강섬유 혼입된 실험체의 경우 최대 휨 응력이후에도 연성적인 거동이 일부 나타났다.
- 2) 휨 특성 평가 결과에서는 강섬유를 혼입한 실험체에서 초기 휨 강도 및 휨 응력에서 우수한 결과가 나타났으며, 혼입률이 증가할수록 휨 응력도 높게 나타났다. 또한 fib model code에서 제시하는  $f_{R1}/f_L \geq 0.4$  및  $f_{R3}/f_{R1} \geq 0.5$ 의 기준이 강섬유 혼입률 0.75% 및 1.50%의 실험체가 모두 만족하는 결과가 보여졌고, 혼입률 1.50%의 실험체에서는 우수한 휨 인성이 나타났다.
- 3) 휨 크리프 실험 전후에 대한 휨 특성 평가 결과 일반 콘크리트는 초기균열강도가 휨 크리프 실험 후 감소하는 경향이

보인 반면, 강섬유가 혼입된 실험체에서는 차이가 보이지 않았다. 휨 인성 평가에서 CMOD 0.5 mm 일 때의 잔여 휨 응력 평가 결과는 큰 변화가 없었지만, CMOD 2.5 mm의 잔여 휨 응력에서는 모든 실험체에서 감소하는 결과가 나타났다. 이는 휨 크리프로 인한 실험체 내부 강섬유의 탈락 및 지속적인 인장력으로 인한 실험체 내부의 강섬유가 파괴되며 실험체 내부에 생성된 공극간의 미세 균열로 인해 후반 변형 구간에서 휨 내력이 감소한 것으로 판단된다. 추가적으로 건조수축에 의한 내력감소에 대한 결과도 추가 실험이 필요하다고 판단된다.

- 4) 휨 크리프에 대한 연구가 국내·외적으로 미비한 상황이므로 본 연구에서는 휨 크리프에 대한 실험을 진행하고 자 국외 논문을 참고하여 장비를 제작하였다. 휨 크리프의 실험 결과 상부에 위치한 실험체에서 시간이 지날수록 시간이 감소하는 경향이 나타났으며, 이는 실험체 하중 전달이 제대로 유지되지 않아 하중이 감소하여 변형률이 증가하지 않은 결과가 나타났다고 사료된다. 추가 실험을 통해 이와 같은 결과에 대해 보완하여 실험을 진행할 예정이다.
- 5) 초기 휨 크리프에 대한 CMOD의 값은 미비하지만, 혼입률 1.50%의 실험체가 일반 콘크리트에 비하여 크리프 저항성이 나타났고, 90일 간의 총 휨 크리프 영향에서도 하·중·상부 실험체 모두 저항하는 결과가 나타났다. 또한 14일, 30일, 90일의 시간에 따라 비교했을 때, 14일에서 가장 높은 CMOD값이 나타났고, 일반 콘크리트와 혼입률 1.50%의 실험체의 차이가 가장 두드러지게 나타났다. 따라서 강섬유보강에 따른 콘크리트의 휨 크리프 성능을 확인할 수 있지만, 실험 장비의 오차를 줄여 실험 결과의 정확성을 높이고 더 많은 변수에 따른 실험이 추가적으로 진행되어야 한다고 판단된다.

## 감사의 글

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

## References

1. Benard, E. S. (2004), Creep of cracked fibre reinforced shotcrete panels. In: Shotcrete: More Engineering Developments. Taylor & Francis Group, London, 47-57.

2. Mangat, P. S., Motamedi, M. (1986), Compression creep behaviour of steel fibre reinforced cement composites. *Mater Struct* 19(113), 361-369.
3. Chern, J. C., Young, C. H. (1989), Compressive creep and shrinkage of steel fibre reinforced concrete. *Int J Cem Lightweight Concr* 11(4), 205-214.
4. Arango, S. E., et al. (2012), A test method to characterize flexural creep behaviour of pre-cracked FRC specimens, *Experimental mechanics* 52(8), 1067-1078.
5. Zhao, Guanyu, Marco Di Prisco, and Lucie Vandewalle (2012), Experimental research on uni-axial tensile creep behaviour of pre-cracked steel fibre reinforced concrete, 8th RILEM international symposium on fibre reinforced concrete: challenges and opportunities.
6. Banafemi, Adewumi John, and William Peter Boshoff (2015), Tensile creep of macro-synthetic fibre reinforced concrete (MSFRC) under uni-axial tensile loading, *Cement and Concrete Composites* 55, 62-69.
7. ACI Commitee 318 (2014), Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary, American Concrete Institute.
8. Seok Joon Jang and Hyun Do Yun, et al. (2016), Effects of Curing Age and Fiber Volume Fraction on Flexural Behavior of High-Strength Steel Fiber-Reinforced Concrete, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 16(4), 15-21.
9. Gwon Young Jeong, et al. (2018), Effects of Steel Fiber Strength and Aspect Ratio on Mechanical Properties of High-Strength Concrete, *Korea Concrete Institute*, 30(2), 197-205.
10. Shariff, Mohammad Najeeb, et al. (2019), Analysis of the ASTM C512 Spring-Loaded CREEP Frame.” *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(10), 04019234.
11. Korea Standards Association. “KS F 2405. Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete.” *Korean Standards Association* (in Korean) (2010).
12. EN-14651. (2005). Test method for metallic fibered concrete-Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual).
13. Garcia-Taengua, E., Arango, S., Mati-Vargas, J. R. & Serna, P. (2014), Flexural creep of steel fiber reinforced concrete in the cracked state. *Construction and Building Materials*, 65, 321-329.
14. Fib Model Code for Concrete Structures 2010 (2013), Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 74-150.
15. Llano-Torre, Aitor, et al. (1993), Compilation and study of a database of tests and results on flexural creep behavior of fibre reinforced concrete specimens, *FIB Symposium Proceedings. Leeds*, 2015.
16. Bishop, A. W. (1993), Mechanical Properties of Concrete. Illinois: Portland Cement Association. No. CM-92.
17. Lim, Dong-Gyun, et al. (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.
18. Chae, Young-Suk, and Ghi-Ho Tae (2012), Tension Creep Model of Recycled PET Polymer Concrete with Flexural Loading, *Journal of the Korean Society of Safety*, 27(5), 117-125.
19. Moon, Hyung-Jae, et al. (2018), Suggestion of the Prediction

Model for Material Properties and Creep of 60 ~ 80MPa Grade High Strength Concrete, *The Korea Institute of Building Construction* 18(6), 517-525.

Received : 03/19/2020

Revised : 03/30/2020

Accepted : 04/23/2020

20. Koh, K. T., S. T., Park, J. J., and Ryu, G. S. (2004), A Study on the Improvement of Workability of High Strength Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites. *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 8(3), 141-148.(in Korean)

---

**요 지 :** 이 논문에서는 섬유 혼입량에 따른 휨부재의 장기거동에 대한 영향을 평가하기 위하여 후크형 강섬유로 보강된 고강도 콘크리트의 휨 크리프 거동에 대한 평가가 이루어졌다. 실험은 150 x 150 x 600mm 크기를 갖는 섬유 혼입량(0, 0.75 및 1.5%)을 변수로 하는 6개의 휨 시험체를 대상으로 하였다. 노치를 갖는 휨 시험체에 휨 크리프 하중을 도입하기 위하여 4점 가력 휨 시험장치가 활용되었다. 휨강도의 40%인 크리프 재하하중은 레버 장치를 활용하여 도입되었고 90일 동안 도입된 하중은 로드셀에 의해 제어되었다. 크리프 하중의 도입시, 시험체 중앙부에 설치된 노치의 균열개구변위(CMOD)가 측정되었다. 크리프 시험후 각 시험체 대한 휨시험을 실시하여 각 시험체의 잔여강도를 평가하였다. 이상과 같은 실험결과로부터 섬유 혼입량은 고강도 콘크리트의 휨 크리프 거동에 주요한 영향을 끼치고 휨강도의 40% 범위내의 지속하중은 섬유보강된 고강도 콘크리트의 잔여강도에 부정적인 영향을 끼치지 않았다.

**핵심용어 :** 휨 크리프, 후크형 강섬유, 4점 가력, 고강도 콘크리트, 균열개구

---