

## SHCC와 특수 보강근으로 보강된 철근콘크리트 보의 휨 성능 실험

현창진<sup>1</sup>, 서지석<sup>2</sup>, 김윤용<sup>3\*</sup>

# Flexural Experiments on Reinforced Concrete Beams Strengthened with SHCC and Special Reinforcements

Chang-Jin Hyun<sup>1</sup>, Ji-Seok Seo<sup>2</sup>, Yun-Yong Kim<sup>3\*</sup>

**Abstract:** In this paper, we evaluated the flexural performance of three types of reinforced concrete beams (SHCC-RB, SHCC-SB, SHCC-FRP) strengthened with ordinary steel rebar, very high strength (super strength) rebar, and FRP bars together with strain-hardening cement composite (SHCC). For this purpose, a series of beam specimens were manufactured and four-point load bending experiments were performed. As a result of the experiment, all specimens strengthened with SHCC exhibited tightly controlled flexural microcracks with the crack width of less than 100  $\mu\text{m}$ . This is mostly due to the material properties of SHCC showing tensile strain hardening properties with multiple microcracks under uniaxial tension. The specimen SHCC-FRP showed lower initial cracking moment and yield flexural strength than SHCC-RB, whereas the maximum flexural strength of SHCC-FRP was superior to that of SHCC-RB. This is because the tensile strength of FRP bars is higher than that of ordinary steel rebar. The initial cracking moment of the beam specimen SHCC-SB was similar to that of SHCC-RB, but the yield flexural strength and maximum flexural strength of SHCC-SB were evaluated to be the highest.

**Keywords:** SHCC, Very high strength rebar, FRP bars, Reinforced concrete beams, Flexural strengthening

## 1. 서론

철근콘크리트(Reinforced concrete, RC) 기술은 최초로 19세기에 적용되어 20세기에 들어 점차 활발해지기 시작하였다. 20세기에는 단순히 기반산업의 수요를 충족시키기 위한 신속한 구조물 증축에 초점을 맞췄던 것과 달리 21세기에는 기존 구조물의 효과적인 보수·보강을 통하여 구조물을 지속적으로 유지될 수 있는 것이 중요해졌다. 빈번한 작용하중으로 피로로 인한 급격한 노후화, 크게 증가한 교통량, 겨울철 도로 교량의 눈이나 얼음을 녹일 목적으로 사용되는 염화칼슘과 같은 용빙제의 사용, 그리고 콘크리트의 배합 시 사용된 혼화제에 의한 철근 부식의 주된 작용으로 철근콘크리트 구조물의 내구성이 저하될 가능성이 높다(Metha and Monteiro, 2009; Yoon et al., 2018). 콘크리트는 인장강도와 휨강도에 약하여 취성적인 성질을 가지고 있으며 건조, 수축과 같은 현상

에 의해 균열이 생기기 쉬운 단점을 가지고 있다. 경제성장을 지나 최근 국회 발표 자료에 따르면 2030년에는 우리나라 노후시설물의 비중이 전체 1·2종 시설물의 37%에 육박할 것으로 전망하고 있기 때문에 노후화 되는 구조물을 지속적이고 안전하게 사용하기 위한 적절한 대비책을 마련할 필요가 있다(Park et al., 2018).

이러한 구조물의 내구성 저하를 방지하기 위해 기존 콘크리트의 취약점을 보완한 고인성 시멘트 복합체 SHCC(Strain-Hardening Cementitious Composite)가 대두되었다. SHCC는 시멘트 복합체의 체적 대비 2% 이내의 합성섬유를 혼입한 복합체이다. SHCC는 인장하중에서 균열의 분산과 변형 경화현상이 발생하여 RC 구조체에 비해 상대적으로 휨, 인장, 압축 파괴 시 취성거동에 대해 안전하다(Li et al., 2001; Kim et al., 2004). 또한, 단일 균열에서 과도한 균열 확장을 방지하고 다수의 미세균열이 분포하는 연성거동 특성이 있어 균열 이후 내구성의 저하를 완화시킬 수 있으며 전단 연결재와 함께 사용할 경우 이러한 특성들이 함께 발휘되어 전단저항 성능이 향상된다(Choi et al., 2020; Kwon et al., 2018; Cho et al., 2012; Hyun et al., 2021; Qian et al., 2009).

현재 노후화, 대형화로 인하여 성능 저하된 철근콘크리트 구조물의 보강방법으로 단면증설법, 강판 보강법, FRP(Fiber Reinforced Polymers) 보강법, 초고강도 철근보강법이 많이

<sup>1</sup>정회원, 충남대학교, 토목공학과, 석사과정

<sup>2</sup>정회원, (재)한국건설생활환경시험연구원, 선임연구원

<sup>3</sup>정회원, 충남대학교, 토목공학과, 교수

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

Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34113, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2023년 4월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

사용되고 있다. 그 중 FRP 보강법은 보강면에 에폭시를 부착하는 공법이 주로 사용되고 있다. 그러나, 콘크리트와 에폭시의 열팽창계수의 차이로 인해 보강효과의 장기적인 유지관리의 어려움이 있으며 콘크리트와 보강재의 일체화에 의한 파괴가 아닌 보강재의 계면부착 파괴 또는 피복탈락에 의한 파괴가 주로 발생하여 보강효과가 다소 감소하는 문제가 있다. 또한, 경제성 및 시공성 측면에서 우수한 단면증설법도 많이 채용되고 있지만, 보강부위의 증설 두께가 두꺼워지고 복잡한 공정으로 인하여 구조 치수상의 제한이 요구되는 장소나 빠른 보강이 필요한 곳에는 적용하기 어려운 단점이 있다 (Prabhu et al., 2015).

이러한 보강 공법들의 단점을 개선할 목적으로, 본 연구에서는 SHCC를 사용함으로써 균열 저항성 및 박리·박락 방지 성능이 우수하고, 특수 보강근을 보강함으로써 보의 성능을 향상시킬 수 있는 보강공법을 제시하고 실용화를 위한 기초 자료를 확보하고자 한다. 이를 위하여 SHCC와 특수 보강근인 초고강도 철근(super strength rebar, SB)과 FRP 보강근(FRP bar)로 보강한 보를 제작하여 보강근 종류에 따른 휨 거동 특성 하중-변위 특성을 분석하였다.

## 2. 재료 및 실험

### 2.1 재료특성

#### 2.1.1 SHCC

본 연구에서 사용한 SHCC는 폴리비닐알콜(PVA) 섬유를 시멘트 부피의 약 2% 정도 혼입한 PVA-SHCC이다. 이 재료는 인장 변형이 발생할 때 다수의 미세균열이 발생하는 탁월한 균열분산능력과 균열폭이 100 $\mu$ m이하로 제어되는 우수한 균열제어 능력을 갖고 있다(Kim et al., 2004). 아울러 SHCC를 활용하여 기존 철근콘크리트 구조물을 국부적으로 또는 전단면을 감싸서 보수 및 보강하는 방법으로 극한 상황의 균열손상 제어를 통해 구조 성능의 향상, 특히 연성 증진하여 공용중의 균열폭 저감을 통하여 내구성을 증진시킬 수 있을 것으로 기대된다.

#### 2.1.2 초고강도 철근 (Super strength rebar)

초고강도 철근은 Table 1과 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 일반 강도철근에 비해 초고강도 철근의 항복강도가 2배 이상 크므로 일반강도철근을 보강 재료로 사용하였을 때보다 구조물의 고층화 및 대형화 추세에 적합하다고 할 수 있다. 또 일반강도 철근에 비해 적은 철근비로 배근할 수 있어 설계물량 저감에 대한 장점과 과밀배근을 해결하여 시공성을 향상시킬 수 있다. 또한, 일반 철근에 비해 강도가 높아 열화되어 성능이 저하된 구조물에 적용할 경우, 휨 성능이 향상될 것으로 기대된다.

Table 1 Properties of special reinforcements

Reinforcements	Yield strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
Super strength rebar	1,200	200
FRP bars	500	50

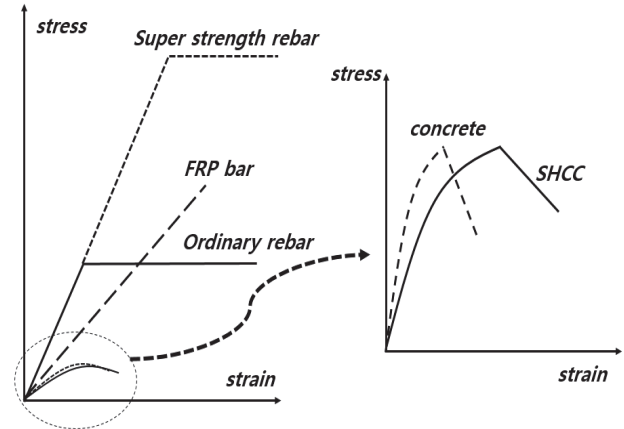


Fig. 1 Conceptual stress strain curves for concrete, ordinary rebar, super strength rebar and FRP bar

다. 그러나 초고강도 철근을 사용하는 경우, 사용하중 상태에서 철근콘크리트 구조물에 균열 폭이 크게 발생할 수 있으며, 동시에 과도한 처짐이 발생할 가능성이 있다. 또한 철근이 항복하기전 콘크리트가 파괴되는 취성적 거동이 발생할 우려가 있으므로 설계시 이러한 점이 반드시 고려되어야 한다.

#### 2.1.3 FRP 보강근

FRP는 경량화 등의 장점으로 철근 콘크리트구조 및 강구조 등의 보강으로 널리사용되고 있다. 최근에는 콘크리트의 보강으로 철근 대신 FRP 보강근을 사용하려는 연구가 진행되고 있다. FRP 보강근은 철근에 비하여 탄성계수와 연성이 낮은 단점은 있으나, 단위중량당 강도가 크고 비부식성, 비전기성, 비자기성, 높은 인장강도 등의 장점이 있어 부식성 환경에 철근 대체재로 활용이 가능하다. 이 연구에서 RC보의 보강 재료로 채택한 FRP 보강근의 특성은 Table 1과 Fig. 1에 나타낸 바와 같다.

## 2.2 실험체 제작

RC보의 열화된 단면을 수복하는 역할을 하는 SHCC를 제조하기 위하여 밀도 3.15 g/cm<sup>3</sup>의 보통 포틀랜드 시멘트와 플라이애시를 결합재로 사용하였으며, 밀도 2.63 g/cm<sup>3</sup>, 평균입경 0.2 mm인 규사를 골재로 사용하였다. 섬유는 A사의 PVA 섬유가 사용되었고 물리·화학적 특성은 Table 2와 같다. SHCC의 배합비는 Table 3과 같으며, 이렇게 제조된 SHCC의 인장강

**Table 2** Properties of reinforcing fibers

Ingredient	Density (g/mm <sup>3</sup> )	Length (mm)	Diameter ( $\mu$ m)	Surface Treatment	Melting Point (°C)	Thermal Decomposition (°C)	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation (%)	Alkali Resistance
Polyvinylalcohol (PVA)	1.3	12	39	Oiling Agent	170	263	1,700	29.4	3~113	High

**Table 3** Mixing proportion of SHCC

W/B (wt.%)	S/B (wt.%)	Slag/B (wt.%)	FA/B (wt.%)	HPMC/B (wt.%)	SP/B (wt.%)	PVA fibers (vol.%)
45	83	20	20	0.22	0.14	2

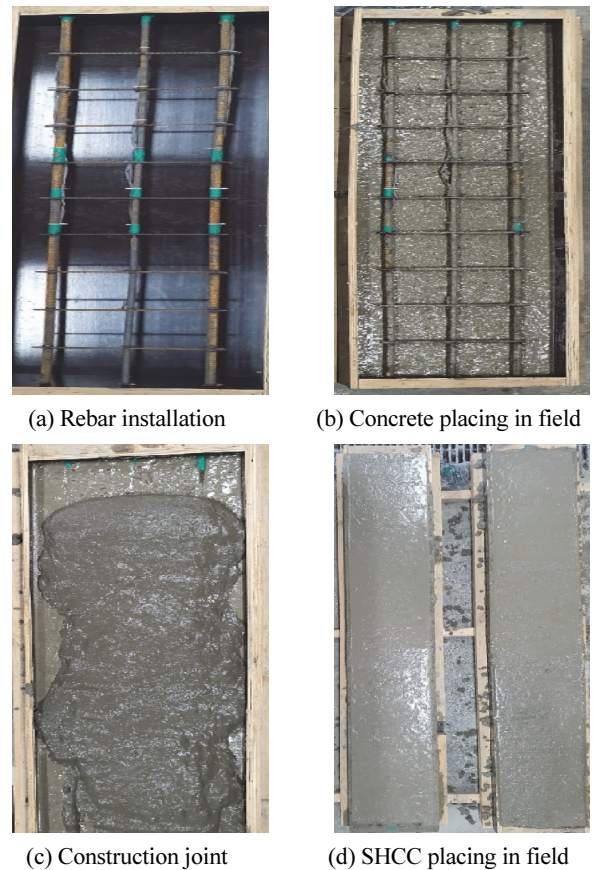
**Table 4** Specimens of Strengthened RC Beams

Specimen	Reinforcement materials	Main reinforcement	$f_{ck}$ (MPa)	$f_y$ (MPa)
RC-P	Plain	D13 (SD400)	35	400
SHCC-RB	SHCC + Reinforcing bar	D13 (SD400)	35	400
SHCC-SB	SHCC + super strength rebar	D10 (SD1200)	35	1200
SHCC-FRP	SHCC + FRP bar	D13	35	500

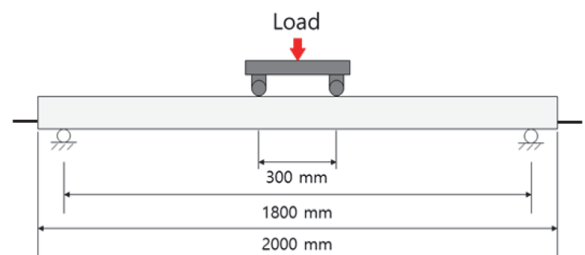
도는 3.7~4.2 MPa, 평균 압축강도는 35 MPa 이며, 1축 인장 하에서 극한 변형률은 3.0 % 이상이다.

SHCC와 특수 보강근인 초고강도 철근, FRP 보강근으로 보강된 RC보의 성능을 검증하기 위하여 Table 4와 같이 4개 변수의 실험체를 각각의 변수에 대하여 2개씩 제작하여 4점 휨 압축 실험을 수행하였다. SHCC와 특수 보강근으로 보강된 RC보와 기준 RC보(RC-P)의 성능을 검증하기 위하여 인장 피복부 SHCC 단면 교체와 보강된 특수 보강근의 종류를 변수로 설정하였다. Table 4에서 SHCC-RB는 일반 철근, SHCC-SB는 초고강도 철근, SHCC-FRP는 FRP 보강근으로 보강된 실험체를 각각 의미한다.

보강된 실험체의 제작 순서는 Fig. 2에 나타낸 바와 같다. 기준 실험체 RC-P와 동일한 RC보의 콘크리트 인장부를 표면으로부터 30 mm 까지 제거한 후, 치핑을 하여 보수보강을 하는 것이 현장에서 공정이다. 그러나 실험체 제작의 편이를 위하여 시격을 두고 콘크리트와 SHCC를 타설하여 시공이음을 형성하는 방법으로 보 실험체를 제작하였다. 실험체의 형상 및 치수는 Fig. 3과 같이 폭 및 두께 300 mm × 120 mm 단면에 길이 2,000 mm 이고 순경간은 1,800 mm 이다. 실험체의 단면 형상은 Fig. 4에 나타낸 바와 같다.



**Fig. 2** Specimen preparation (SHCC Series)



**Fig. 3** Specimen geometry and loading plate

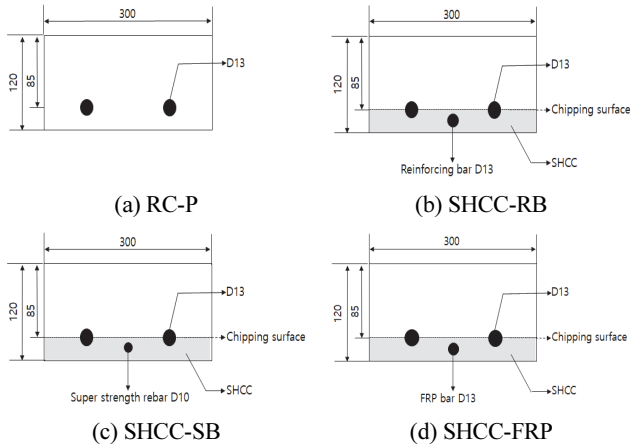


Fig. 4 Sectional view of specimens

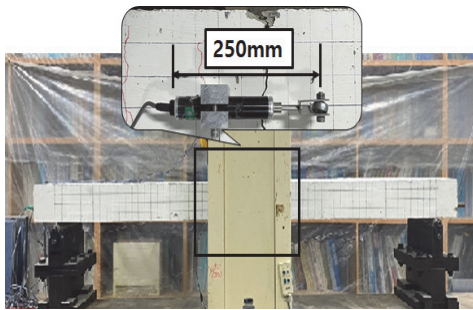


Fig. 5 Laboratory test setup

### 2.3 실험체의 재하 방법

최대 300 kN 용량의 UTM을 이용하여 Fig. 5와 같이 4점 하방식으로 재하 실험을 수행하였다. 실험체의 양 단부로부터 100 mm 위치에 회전단을 설치하여 순지간이 1,800 mm가 되도록 하였다. 2점 하중 가력점 사이의 거리는 300 mm로서, 이 영역에서 순수 휨이 작용하도록 하였다. 하중은 변위제어 방식으로 압축부 콘크리트가 파괴 될 때까지 하중을 가하였다. 실험체의 처짐 및 변형, 콘크리트의 압축연단 및 철근의 변형률을 계측하기 위하여 각각의 위치에 LVDT 및 콘크리트 변형률 게이지를 부착하였다. 콘크리트 타설 전 철근 변형률 게이지를 순지간의 중앙부에 부착하였다. 처짐은 변위계를 이용하여 직접 계측하였고, 곡률은 압축부에 위치한 콘크리트 변형률 게이지와 LVDT, 그리고 인장부의 주철근 변형률 게이지와 LVDT의 측정값을 이용하여 계산하였다.

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 휨 균열 해석 및 공식화

휨 재하실험 이후 실험체 중앙지간 부근에 발생한 휨 균열 패턴은 Fig. 6에 나타난 바와 같다.

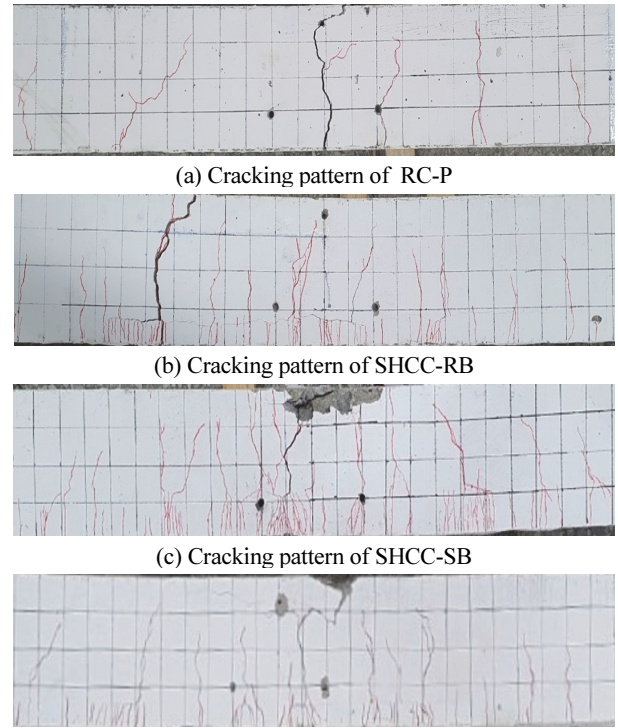


Fig. 6 Crack pattern at midspan zone

#### 3.1.1 실험체 RC-P

기준 실험체인 RC-P는 재하 하중 5.60 kN 일 때 중앙부의 인장부에서 초기균열이 발생하였다. 하중이 증가함에 따라서 휨균열이 상부로 진전하며 중립축이 상부로 이동하는 동시에 인장부의 균열 폭이 확대되어 처짐이 증가하였다. 최종 휨 파괴 시점에서 인장부에서 발생한 균열이 성장하여 상부까지 도달하였고, 최종적으로 압축연단 콘크리트가 파쇄되는 전형적인 RC보의 휨 파괴 형태를 나타내었다.

#### 3.1.2 실험체 SHCC-RB

실험체 SHCC-RB는 시격을 두어 콘크리트와 SHCC를 타설하였으며 기존 보강공법과 SHCC를 활용한 보강공법의 비교를 위해 제작한 실험체이다. 콘크리트 타설 후 인장하중을 받을 SHCC의 중앙 부근에 일반 철근을 추가 보강하였다. 초기균열은 재하 하중이 6.20 kN일 때, 중앙부 휨 인장면의 SHCC에서 발생하였고, 이후, 하중의 증가와 함께 보강 경계면에서 발생한 휨 균열이 발생된 이후에 균열의 폭이 더 이상 증가하지 않고, 발생된 균열의 주변으로 추가의 미세 균열이 발생하면서 하중이 증가되는 특성을 나타내었다. 최종파괴는 기준실험체와 동일하게 가력점 중앙부의 압축연단 콘크리트가 파쇄되는 휨 파괴 형태를 나타냈다.

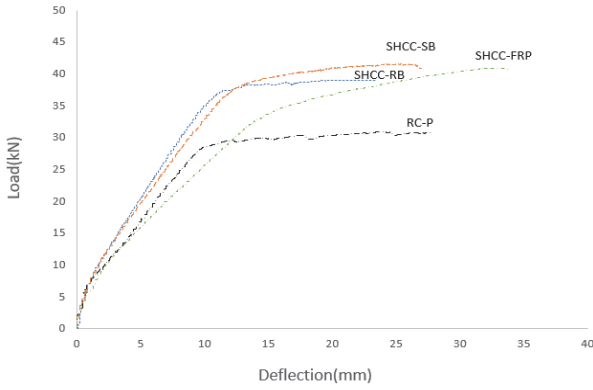


Fig. 7 Typical load-deflection relations at midspan

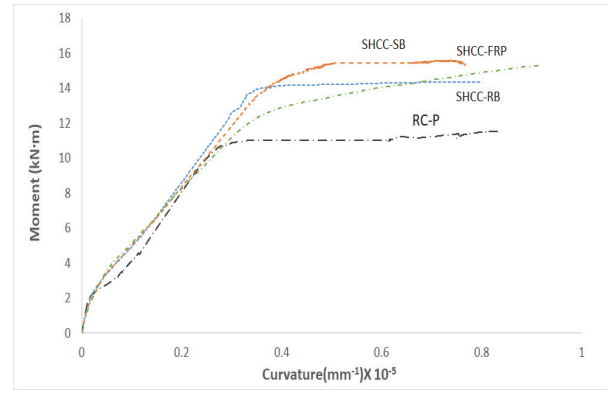


Fig. 8 Typical Moment-Curvature relations at midspan

### 3.1.3 실험체 SHCC-SB

실험체 SHCC-SB는 시격을 두어 콘크리트와 SHCC를 타설하였으며 기존 보강공법과 SHCC를 활용한 보강공법의 비교를 위해 제작한 실험체이다. 콘크리트 타설 후 인장하중을 받을 SHCC의 중앙 부근에 초고강도 철근을 추가 보강하였다. 재하 하중이 6.10 kN일 때에 초기균열이 중앙부 인장연단에서 발생하였다. SHCC-RB와 유사하게 휨 균열의 폭이 더 이상 증가하지 않고, 발생된 균열의 주변으로 추가의 미세 균열이 발생하면서 하중이 증가되는 특성을 나타내었다. 최종 파괴는 기존실험체와 마찬가지로 가력점 중앙부 콘크리트의 압축연단이 파쇄되는 휨 파괴의 형태를 나타냈다.

### 3.1.4 실험체 SHCC-FRP

실험체 SHCC-FRP는 시격을 두어 콘크리트와 SHCC를 타설하였으며 기존 보강공법과 SHCC를 활용한 보강공법의 비교를 위해 제작한 실험체이다. 콘크리트 타설 후 인장하중을 받을 SHCC의 중앙 부근에 FRP를 추가 보강하였다. 초기균열은 재하 하중이 5.81 kN일 때 중앙부 보강면에서 발생하였다. SHCC-FRP도 SHCC-RB, SHCC-SB와 유사하게 휨 균열의 폭이 더 이상 증가하지 않고, 발생된 균열의 주변으로 추가의 미세 균열이 발생하면서 하중이 증가되었다. 이와 같이 SHCC로 보강된 모든 실험체가 다수의 미세 균열이 발생하면서 하중이 증가하는 특성을 보이는 이유는 균열 폭이 100 μm

이하로 제어되는 SHCC의 재료적 특성에 기인하는 것으로 판단된다. SHCC-FRP의 파괴도 다른 실험체와 마찬가지로 RC 보의 전형적인 휨 파괴의 형태를 나타냈다.

## 3.2 실험체의 하중-변위 관계 비교

Fig. 7과 Fig. 8 및 Table 5와 Table 6은 실험체 지간의 중앙에서 측정된 하중-처짐 및 휨모멘트-곡률 관계와 각 실험체에 대한 실험 결과를 비교 정리한 것이다.

### 3.2.1 초기균열하중 특성

Table 5에 보인 바와 같이 SHCC와 보강근으로 보강한 실험체인 SHCC-RB, SHCC-SB, SHCC-FRP 실험체의 초기균열 발생 하중은 각각 6.20 kN, 6.10 kN, 5.81 kN으로 측정되어

Table 5 Test results of each specimen

Specimen	Concrete crack			Reinforcement yielding			Maximum load	
	Load (kN)	Displacement (mm)	Stiffness (kN/mm)	Load (kN)	Displacement (mm)	Stiffness (kN/mm)	Load (kN)	Displacement (mm)
RC-P	5.60	0.78	7.18	28.62	10.35	2.76	30.92	23.70
SHCC-RB	6.20	0.84	7.38	37.03	11.19	3.30	39.01	23.48
SHCC-SB	6.10	0.84	7.26	37.92	12.66	2.99	41.60	20.73
SHCC-FRP	5.81	0.80	7.25	33.88	15.21	2.22	40.94	32.40

Table 6 Test results of each specimen

Specimens	$M_y$ (kN·m)	$M_{cr}$ (kN·m)	$\phi_y$ (mm <sup>-1</sup> )	$\phi_{cr}$ (mm <sup>-1</sup> )	$EI_c^*$ (kN·m <sup>3</sup> )
RC-P	10.73	2.10	$2.98 \times 10^{-6}$	$1.69 \times 10^{-7}$	30.70
SHCC-RB	13.88	2.33	$3.46 \times 10^{-6}$	$2.25 \times 10^{-7}$	35.70
SHCC-SB	14.22	2.29	$3.85 \times 10^{-6}$	$2.63 \times 10^{-7}$	33.25
SHCC-FRP	12.71	2.18	$3.52 \times 10^{-6}$	$2.33 \times 10^{-7}$	32.04

\* Equivalent stiffness after first crack  $EI_c = (M_y - M_{cr}) / (\phi_y - \phi_{cr})$

기준 실험체 RC-P의 5.60 kN 보다 1.03배 ~ 1.11배 범위로 증가한 것을 알 수 있다. 이는 높은 연성을 갖는 SHCC와 보강근이 인장 영역에서 함께 저항하면서 균열 발생 하중이 증가한 것으로 판단된다.

### 3.2.2 항복강도 및 최대강도 특성

Table 5와 Fig. 7로부터 RC-P를 기준으로 SHCC-RB, SHCC-SB, SHCC-FRP의 항복 휨모멘트강도는 각각 1.29배, 1.32배, 1.18배로 증가하였다. 한편, 최대 휨모멘트강도의 내력 증가비는 각각 1.26배, 1.35배, 1.32배로 나타났다. SHCC-RB의 항복 휨모멘트강도가 SHCC-FRP에 비하여 더 높은 이유는 FRP의 낮은 탄성계수 때문인 것으로 사료되며, SHCC-FRP의 최대 휨모멘트강도의 내력 증가비가 SHCC-RB에 비하여 더 큰 이유는 FRP의 인장강도가 더 크기 때문으로 판단된다. 항복 및 최대 휨모멘트강도 측면에서 가장 크게 증진한 실험체는 SHCC-SB로 나타났다. 이는 초고강도 철근의 탄성계수와 높은 항복강도 등의 재료적 특성에 기인하는 것으로 판단된다.

### 3.2.3 초기균열이후 등가강성 특성

초기균열이후 균열단면에서의 강성을 평가하기 위하여 등가강성 개념을 도입하였으며, 실험체에서 측정된 값을 이용하여 다음 식 (1)에 의해 산정하였다.

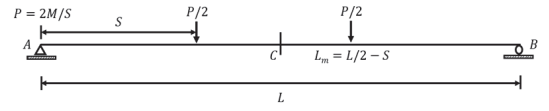
$$EI_e = \frac{(M_y - M_{cr})}{(\phi_y - \phi_{cr})} \quad (1)$$

여기서,  $M_y$ 는 항복 모멘트,  $M_{cr}$ 은 초기균열 모멘트,  $\phi_y$ 는 항복 곡률,  $\phi_{cr}$ 은 초기균열 곡률이다.

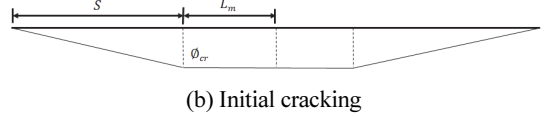
Table 6에 제시한 등가강성은 실험에 의하여 측정된 휨모멘트-곡률 관계(Fig. 8)에서 식(1)의 계산에 필요한 값을 찾아 계산하여 얻은 값이다. Table 6의 등가강성을 비교해 보면, SHCC와 철근 또는 초고강도 철근으로 보강한 실험체 SHCC-RB와 SHCC-SB의 등가강성은 각각 35.70 kN·m<sup>2</sup>와 33.25 kN·m<sup>2</sup>으로 측정되어 기준실험체 RC-P의 30.70 kN·m<sup>2</sup>에 비하여 8~16% 증가한 것을 알 수 있다. 이는 SHCC와 보강 철근이 초기균열이 발생한 이후에 철근콘크리트 보의 강성을 향상시켰기 때문으로 판단된다. 한편, SHCC와 FRP 보강근으로 보강된 SHCC-FRP의 등가강성은 32.04 kN·m<sup>2</sup>로서 RC-P에 비하여 약간 증가한 값으로 측정되었는데, 이는 FRP 보강근의 탄성계수가 철근에 비하여 상대적으로 낮기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.2.4 하중-변위 관계 해석 결과의 비교

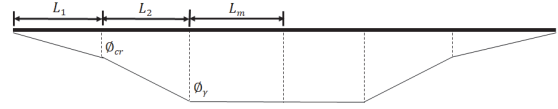
콘크리트, SHCC, 일반 철근, 초고강도 철근, FRP 보강근의 응력-변형률 관계를 갖고서 층상화 단면해석을 하면 휨모멘트-



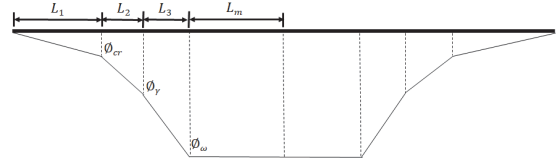
(a) Four-point bending load



(b) Initial cracking



(c) Initial yielding of tensile bar



(d) Ultimate load

Fig. 9 Idealized bending curvature distributions (adopted from Kim et al., 2014)

곡률 관계를 구할 수 있다(Kim et al., 2014). 이 관계로부터 초기 균열 발생 시의 휨 곡률  $\phi_{cr}$ , 인장철근 최초 항복 시의 휨 곡률  $\phi_y$ , 그리고 극한하중에 도달할 때의 휨 곡률  $\phi_u$  등을 얻을 수 있다. 또한 Fig. 9의 (a)~(d)에 나타난 바와 같이 (a) 단순보에 4점 휨 재하를 하면, (b) 초기 균열이 발생한 경우, (c) 인장철근이 최초 항복한 경우, 그리고 (d) 극한하중에 도달한 경우에서의 휨 곡률 분포를 각각 가정할 수 있다. 이렇게 가정된 단계별 휨 곡률 분포로부터 보의 A점 처짐각  $\theta_A$ 와 지간 중앙 C점에서의 연직방향 처짐  $\Delta_C$ 는 식 (2)~(7)을 이용하여 구할 수 있다.

at cracking;

$$\theta_A = \phi_{cr} \left( \frac{1}{2} S + L_m \right) \quad (2)$$

$$\Delta_C = \frac{1}{2} \theta_A L - \phi_{cr} \left[ \frac{1}{2} S L_m + \frac{1}{6} S^2 + \frac{1}{2} L_m^2 \right] \quad (3)$$

at yielding;

$$\theta_A = \frac{1}{2} \phi_{cr} L_1 + \frac{1}{2} (\phi_{cr} + \phi_y) L_2 + \phi_y L_m \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta_C = & \frac{1}{2} \theta_A L - \frac{1}{2} \phi_{cr} L_1 (L_m + L_2 + \frac{1}{3} L_1) \\ & - \phi_{cr} L_2 (L_m + \frac{1}{2} L_2) \\ & - \frac{1}{2} (\phi_y - \phi_{cr}) L_2 (L_m + \frac{1}{3} L_2) \\ & - \phi_y L_m (\frac{1}{2} L_m) \end{aligned} \quad (5)$$

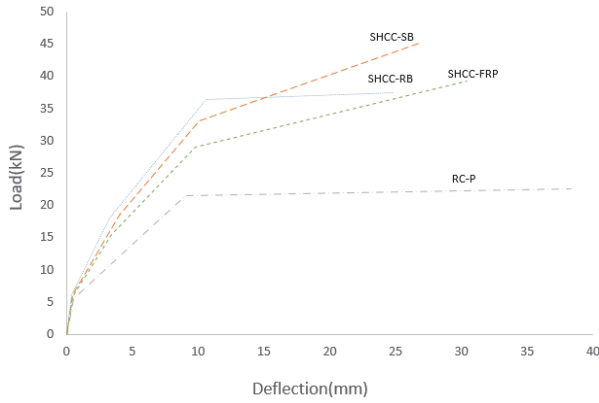


Fig. 10 Predicted Load-deflection curves at midspan

at ultimate;

$$\theta_A = \frac{1}{2}\phi_{cr}L_1 + \frac{1}{2}(\phi_{cr} + \phi_y)L_2 + \frac{1}{2}(\phi_y + \phi_u)L_3 + \phi_u L_m \quad (6)$$

$$\Delta_c = \frac{1}{2}\theta_A L - \frac{1}{2}\phi_{cr}L_1(L_m + L_3 + L_2 + \frac{1}{3}L_1) - \phi_{cr}L_2(L_m + L_3 + \frac{1}{2}L_2) - \frac{1}{2}(\phi_y - \phi_{cr})L_2(L_m + L_3 + \frac{1}{3}L_2) - \phi_y L_3(L_m + \frac{1}{2}L_3) - \frac{1}{2}(\phi_u - \phi_y)L_3(L_m + \frac{1}{3}L_3) - \phi_u L_m(\frac{1}{2}L_m) \quad (7)$$

식 (2)~(7)을 이용하여 비선형 단면 해석으로 구한 중앙점 하중-변위 관계를 나타내면 Fig. 10과 같다. 계산 결과와 재하 실험 결과를 비교해 보면 대체로 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한, 극한 내력을 비교해 보면, SHCC-RB, SHCC-SB, SHCC-FRP의 실험값이 계산에 의한 예측값의 1.04배, 0.92배, 1.04배로 나타나 SHCC와 보강근을 이용하여 보강한 실험체의 거동을 매우 근사하게 예측하고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 철근콘크리트 보의 휨 성능을 개선하기 위하여 SHCC와 특수 보강근으로 보강한 보의 거동 특성을 실험 연구하였으며, 그 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 열화된 RC 보의 일부 단면을 SHCC로 교체하면, 기존의 시멘트 기반 보수재료를 단면 수복에 활용한 공법에 비하여 다수의 미세한 휨 균열을 발생시키고, 균열의 폭을 낮은 수준으로 제어할 수 있어 보의 내구성을 증진시키는 효과가 있을 것으로 판단된다.

2. SHCC와 FRP 보강근으로 보강한 RC 보의 일반 철근으로 보강한 RC 보에 비하여 초기균열하중과 항복 휨모멘트강도가 낮은 것으로 나타났다. 이는 FRP 보강근의 탄성계수가 상대적으로 낮은 이유에 기인한 것으로 사료된다. 한편, FRP 보강근으로 보강한 RC 보의 최대 휨모멘트강도는 일반 철근으로 보강한 RC 보에 비하여 우수하게 나타났는데, 이는 FRP보강근의 인장강도가 일반 철근보다 더 높기 때문인 것으로 판단된다. 최대 휨 내하력의 증진을 목적으로 부식성 환경에 있는 RC 보의 보강을 계획할 때에는 SHCC와 FRP 보강근을 사용하는 것이 효과적인 것으로 판단한다.

3. SHCC와 초고강도 철근으로 보강한 RC 보의 일반 철근으로 보강한 RC 보와 초기균열하중은 유사하였으나, 항복 휨모멘트강도 및 최대 휨모멘트강도 측면에서는 초고강도 철근으로 보강한 RC 보가 가장 우수한 것으로 평가되었다. 특히, 상대적으로 작은 단면적의 철근이 보강되어도 효과적으로 휨 내하력 증진 보강 효과를 얻을 수 있다. 작은 단면적의 추가 배근으로 보강 효과를 얻고자 할 때에는 SHCC와 초고강도 철근을 활용하는 것이 효과적이며, 균열 폭 제어 능력을 갖고 있는 SHCC를 단면 수복에 적용하므로 부식성 환경의 보강에도 활용이 가능할 것으로 판단한다.

#### 감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2020R1A2C1101465).

#### References

1. Metha, P. K., and Monteiro, P. M. (2009), Concrete-Structure, properties, and materials, 2nd edition, prentice Hall, New-Jersey, 113-171.
2. Yoon, Y. S., Kim, T. H., Kwon, S. J. (2020). Evaluation of Chloride Diffusion Behavior and Analysis of Probabilistic Service Life in Long Term Aged GGBFS Concrete. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 24(3), 47-56. (in Korean).
3. Yoon, Y. S., Ryu, H. S., Lim, H. S., Koh, K. T., Kim, J. S., and Kwon, S. J. (2018), Effect of grout conditions and tendon location on corrosion pattern in PS tendon in grout. *Construction and Building Materials*, 186, 1005-1015. (in Korean).
4. Park, J. S., Park, K. T., Park, H. B., and Kim, B. C. (2018). Concrete Repair and Rehabilitation Code and Post-reinforcement Evaluation Technology. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 30(4), 21-26. (in Korean).

5. Li, V. C., Wang, S., and Wu, C. (2001). Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC). *ACI Materials Journal*, 98(6), 483-492.
6. Kim, Y. Y., Fischer, G., Lim, Y. M., and Li, V. C. (2004). Mechanical performance of sprayed engineered cementitious composite using wet-mix shotcreting process for repair applications. *ACI Materials Journal*, 101(1), 42-49.
7. Choi, J. I., Lee, B. Y., and Kim, Y. Y. (2020). Material Strength and Deformation Performance of Highly Ductile High-Strength Cement Composite. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 24(1), 51-58. (in Korean).
8. Kwon, K. S., Bang, J. W., and Kim, Y. Y. (2018). Flexural Performance of Multi-layered Fiber-reinforced Cement Composites with Diverse Interface Shape. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 30(4), 429-435. (in Korean).
9. Cho, C. G., Kim, Y. Y., Feo, L., and Hui, D. (2012). Cyclic responses of reinforced concrete composite columns strengthened in the plastic hinge region by HPFRC mortar. *Composite Structures*, 94(7), 2246-2253.
10. Hyun, J. H., Bang, J. W., Lee, B. Y., and Kim, Y. Y. (2021). Effects of the Replacement Length of Concrete with ECC on the Cyclic Behavior of Reinforced Concrete Columns. *Materials*, 14(13), 3542.
11. Qian, S., Lepech, M. D., Kim, Y. Y., and Li, V. C. (2009). Introduction of Transition Zone Design for Bridge Deck Link Slabs Using Ductile Concrete. *ACI Structural Journal*, 106(1).
12. Prabhu, G. G., Sundararaja, M. C., and Kim, Y. Y. (2015). Compressive behavior of circular CFST columns externally reinforced using CFRP composites. *Thin-Walled Structures*, 87, 139-148.
13. Kim, Y. Y., Lee, B. Y., Bang, J. W., Han, B. C., Feo, L., & Cho, C. G. (2014). Flexural performance of reinforced concrete beams strengthened with strain-hardening cementitious composite and high strength reinforcing steel bar. *Composites Part B: Engineering*, 56, 512-519.

Received : 11/13/2022  
 Revised : 12/09/2022  
 Accepted : 12/13/2022

---

**요 지 :** 이 논문에서는 고인성 시멘트 복합체 SHCC와 함께 일반 철근, 초고강도 철근, FRP 보강근으로 보강된 3종류의 철근콘크리트 보 (SHCC-RB, SHCC-SB, SHCC-FRP)의 휨 성능을 평가하기 위하여 보 실험체를 제작하고, 4점 재하 휨 실험을 수행하였다. 실험 결과, SHCC로 보강된 모든 실험체가 다수의 미세 균열이 발생하면서 휨 균열 폭이 100  $\mu\text{m}$  이하로 제어되는 특성을 나타내었다. 이는 1축 인장 하에서 인장변형경화 특성을 보이며, 다중 미세균열 특성을 보이는 SHCC의 재료적 성질에 기인하는 것으로 판단된다. 실험체 SHCC-FRP는 실험체 SHCC-RB에 비하여 초기균열하중과 항복 휨모멘트강도가 낮은 반면, SHCC-FRP의 최대 휨모멘트강도는 SHCC-RB에 비하여 우수하게 나타났다. 이는 FRP 보강근의 인장강도가 일반 철근에 비하여 더 높기 때문이다. 보 실험체 SHCC-SB의 초기균열 하중은 SHCC-RB와 유사하였으나, 항복 휨모멘트강도 및 최대 휨모멘트강도 측면에서는 SHCC-SB가 가장 우수한 것으로 평가되었다. SHCC와 초고강도 철근을 RC보의 보강에 활용하면 작은 단면적의 추가 배근으로도 효과적인 보강이 가능할 수 것으로 판단된다.

**핵심용어 :** SHCC, 초고강도 철근, FRP 보강근, RC보, 휨 보강

---