



강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 재료특성 및 휨 거동 역학적 특성

김경철¹⁾ · 양인환^{1)*} · 조창빈²⁾

¹⁾군산대학교 토목공학과 ²⁾한국건설기술연구원 구조융합연구소

Material Properties and Structural Characteristics on Flexure of Steel Fiber-Reinforced Ultra-High-Performance Concrete

Kyoung-Chul Kim,¹⁾ In-Hwan Yang,^{1)*} and Chang-Bin Joh²⁾

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Kunsan National University, Kunsan, 54150, Rep. of Korea

²⁾Dept. of Structures & Bridges, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, 10223, Rep. of Korea

ABSTRACT This paper concerns the flexural behavior of steel fiber-reinforced ultra-high-performance concrete (UHPC) beams with compressive strength of 150 MPa. It presents experimental research results of hybrid steel fiber-reinforced UHPC beams with steel fiber content of 1.5% by volume and steel reinforcement ratio of less than 0.02. This study aims at investigating of compressive and tensile behavior of UHPC to perform a reasonable prediction for flexural capacity of UHPC beams. Tensile behavior modeling was performed using load-crack mouth opening displacement relationship obtained from bending test. The experimental results show that steel fiber-reinforced UHPC is in favor of cracking resistance and ductility of beams. The ductility indices range from 1.6 to 3.0, which means high ductility of hybrid steel fiber-reinforced UHPC. Test results and numerical analysis results for the moment-curvature relationship are compared. Though the numerical analysis results for the bending capacity of the UHPC beam without rebar is larger than test result, the overall comparative results show that the bending capacity of steel fiber-reinforced UHPC beams with compressive strength of 150 MPa can be predicted by using the established method in this paper.

Keywords : steel fibers, ultra-high performance concrete, flexural capacity, ductility index, crack

1. 서 론

일반 콘크리트는 인장강도와 휨강도가 낮고, 파괴 시 취성적인 성질을 나타낸다. 일반 콘크리트의 재료적인 단점을 보완하기 위해 섬유를 보강한 섬유보강콘크리트에 관한 많은 연구가 진행되고 있다.¹⁻⁴⁾ 특히, 강섬유를 보강한 강섬유 보강 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 콘크리트의 취성거동을 연성거동으로 유도하고,⁵⁻⁸⁾ 콘크리트의 인장 저항력을 증대시키며, 국부적인 균열의 생성과 성장을 억제하는 등 전반적으로 콘크리트의 역학적 성질을 개선시킨다.⁹⁻¹⁰⁾ 또한, 강섬유를 혼입한 강섬유 보강 콘크리트는 부재의 단면축소와 구조물의 자중감소를 유발한다.

기존 연구에서는 단일 섬유로 보강된 강섬유 보강 콘크리트에 관한 연구¹¹⁻¹⁵⁾가 주를 이루고 있으며, 두 가지

종류의 섬유를 혼입한 하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 구조거동 특성에 관한 연구¹⁶⁾는 상대적으로 미비한 실정이다.

콘크리트 구조물에 인장하중이 작용할 때 초기에는 미소균열(micro-crack)이 발생하고 미소균열이 거시균열(macro-crack)로 발전하여 파괴에 도달하게 된다. 길이가 서로 다른 종류의 하이브리드 섬유 적용 시에 단섬유는 초기의 미소균열 사이의 가교효과(bridging effect)에 유리하고, 장섬유는 거시균열 사이의 가교효과에 유리하다. 이와 같이 하이브리드 섬유는 미소균열과 거시균열에 통합적으로 대응하여 콘크리트의 인장강도를 증대시키고 균열 후의 거동을 개선하는 효과가 있다.

기존의 강섬유 보강 콘크리트에 대한 선행연구에서는 압축강도 80 MPa 이하의 강섬유 보강 콘크리트를 대상으로 수행되었으며, 강섬유 보강 콘크리트의 휨 거동 예측은 일반적인 강섬유 보강 콘크리트의 휨 성능 예측을 대상으로 하고 있다. 기존의 연구결과는 이 연구에서 대상으로 하고 있는 150 MPa 수준의 하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 휨 성능을 예측하는데 한계가 있다.^{7,10)} 또한, 하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트

*Corresponding author E-mail : ihyang@kunsan.ac.kr

Received September 1, 2015, Revised December 16, 2015,

Accepted January 26, 2016

©2016 by Korea Concrete Institute

의 재료 및 구조부재 실험을 통한 재료 특성 및 휨 거동 모델링에 관한 연구는 매우 미비한 상황이다.

따라서, 이 연구에서는 하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 압축거동 및 인장거동 모델링을 수행하고, 재료특성에 기반한 휨성능을 모델링하였다. 먼저, 하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트를 이용하여 압축거동 및 인장거동 실험을 수행한 후, 재료모델링을 제시하였다. 제시한 재료모델링을 이용하여 단면해석기법을 통한 초고성능 콘크리트 보의 휨성능 예측기법을 제시하였다. 휨성능 예측 모델링의 기법의 적합성을 확인하기 위해 압축강도 150 MPa 급의 하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트 보의 정적 재하 실험을 수행하여 휨 거동 특성을 파악하였다. 마지막으로, 강섬유 보강 초고성능 콘크리트 보의 휨강도 모델링에 의한 예측결과를 실험결과와 비교·분석하여 제안 모델링 기법의 효용성을 고찰하였다.

2. 재료특성

2.1 배합조건

강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 배합에 적용한 시멘트는 보통 포트랜드시멘트이며, 잔골재는 직경 0.5 mm 이하의 규사를 사용하였고, 굵은 골재는 사용하지 않았다. 섬유는 직선형상의 섬유를 사용하였으며, 길이가 19.5 mm 인 강섬유와 16.5 mm의 강섬유를 혼입하여 하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트를 제조하였다. 19.5 mm의 강섬유와 16.5 mm의 강섬유를 2:1로 혼입하였으며, 콘크리트 기준으로 1.5% 부피비의 강섬유량을 적용하였다.

섬유량이 과다할 경우, 배합 시 섬유뭉침(fiber balling) 현상이 발생할 수 있다. 기존 연구에서는 0.5~2.0%를 주로 적용하고 있으며, 이 연구에서는 최적의 섬유 혼입률로서 1.5%를 적용하였다. 적용된 강섬유의 특성은 밀도 7,500 kg/m³, 항복강도 2,500 MPa이다. Table 1에 UHPC의 주요 시멘트에 대한 구성재료의 중량비로 배합비를 나타내었다.

2.2 압축거동 특성

원주형 공시체의 압축실험을 통하여 초고성능 콘크리트의 압축거동특성을 파악하였다. UHPC의 압축강도 측정결과는 142~159 MPa이고, 압축파괴에 도달했을 때의 극한변형률은 약 3400×10⁻⁶ m/m를 나타낸다(Fig. 2). 기존

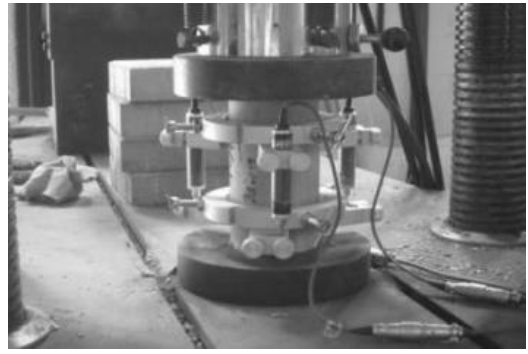


Fig. 1 Compressive strength test setup

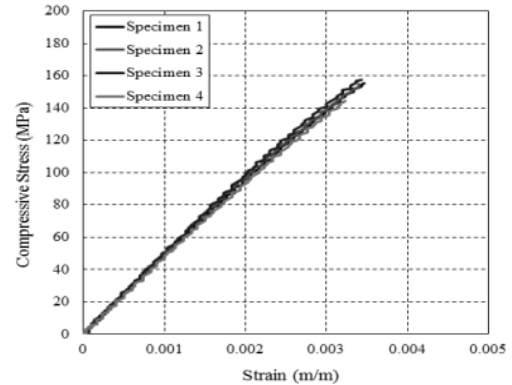


Fig. 2 Test results of Compressive stress-strain curves

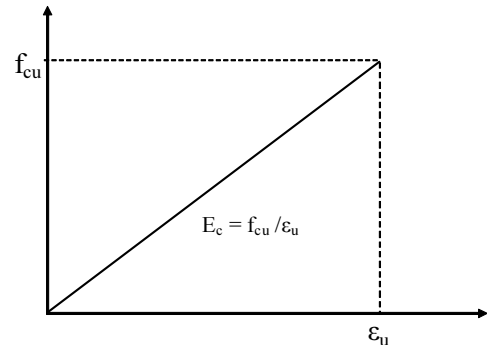


Fig. 3 Compressive stress-strain relationship

의 연구결과^{11,12)}는 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 응력-변형률 관계는 보통강도 콘크리트에 비해 극한변형률까지 거의 선형관계를 나타낸다. 이 연구에서의 초고성능 콘크리트의 압축거동 형태는 압축파괴가 발생하기 전까지 거의 선형거동을 나타낸다.

하이브리드 강섬유보강 초고성능 콘크리트의 압축응력-변형률 관계를 Fig. 3에 나타내었으며, 압축강도 $f_{cu} = 148.8$ MPa, 탄성계수 $E_c = 43,200$ MPa의 특성값을 갖는 선형관계로 모델링하였다.

2.3 역해석에 의한 인장거동 특성

UHPC의 인장응력-변형률 관계를 얻는 방법은 대표적으로 직접인장시험방법이 있다. 직접인장시험 시에 부재 축선을 따라 인장하중만을 재하하는데 많은 어려움과 오

Table 1 Mix proportion (weight ratio)

Water-binder ratio	Cement	Zirconium	Filler	Fine agg.	Water-reducing admixture
0.2	1.0	0.25	0.3	1.1	0.02

차를 내포할 가능성이 있다. 따라서, 본 연구에서는 노치를 갖는 프리즘 시편의 하중-CMOD 측정결과를 이용하여 인장응력-변형률 관계를 도출하는 방법을 제시하였다.

인장거동 특성을 측정하기 위하여 단면의 크기는 100×100 mm이고, 길이가 400 mm인 프리즘 형상의 휨인장 시편을 제작하였다.¹⁷⁾ 시편 하부에 노치(notch)를 내어 3점 하중 재하방법을 적용하여 실험을 수행하였다(Fig. 4). 노치는 지간 중앙에 10 mm 깊이로 내었으며, 균열 측정개이지를 통해 하중재하 단계별로 노치의 균열개구변위(CMOD)를 측정하였다.

Fig. 5에 측정된 하중-CMOD관계 곡선을 나타내었다. 노치를 갖는 프리즘 시편의 3점재하 휨인장 실험을 통해 측정된 하중-CMOD 관계를 이용하여 역해석(inverse analysis)¹⁸⁻¹⁹⁾을 수행한 후, 이로부터 인장응력-CMOD 관계를 산정하였다.

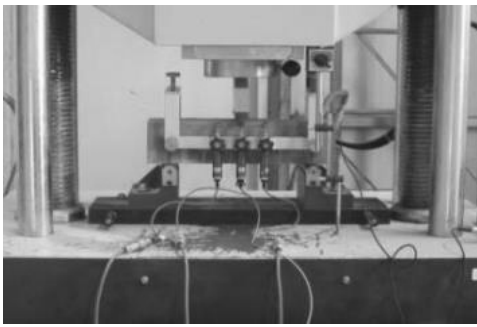


Fig. 4 Flexural tension test setup

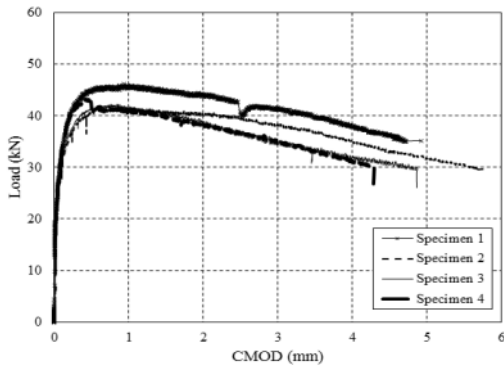


Fig. 5 Test results of load-CMOD curves

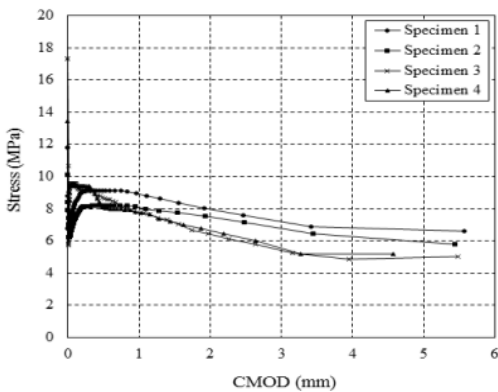


Fig. 6 Inverse analysis result

였다.

Fig. 6에 프리즘 시편의 휨인장 실험으로부터 측정된 하중-CMOD 곡선을 이용한 역해석 결과를 나타내었다. 역해석에 의한 인장강도는 8 MPa를 상회하며, 보통 콘크리트의 인장강도에 비해 큰 값을 나타내고 있다.

인장응력-CMOD 관계로부터 인장응력-변형률 관계를 식 (1)과 같이 나타내었다.

$$\epsilon = \frac{f_t}{E_{cm}} + \frac{w}{l_c} \quad (1)$$

여기서, f_t 는 인장강도, E_{cm} 는 탄성계수, w 는 균열개구변위, l_c 는 콘크리트의 특성길이로서 직사각형 또는 T형 단면에 대해 $l_c = 2/3h$ 의 관계를 갖는다.²⁰⁾ 또한, h 는 실험부재 단면의 전체높이를 나타낸다.

Fig. 7은 변형률 연화(strain-softening)를 고려한 인장거동 모델링을 나타낸다. 기존 설계기준²⁰⁻²¹⁾에는 각 응력-변형률 곡선 특성점에서의 변형률이 제시되어 있으며, 이는 Fig. 7의 인장거동 특성점으로 식 (2)~식 (5)로 정의된다. ϵ_{el} 는 초기균열이 발생하는 시점에서의 변형률을 나타내고, $\epsilon_{0.3}$ 은 균열폭의 크기가 0.3 mm일 때의 변형률을 의미하며, $\epsilon_{1\%}$ 는 균열폭이 휨인장 프리즘시편 단면높이의 1%에 해당하는 변형률을 나타낸다. 또한 ϵ_{lim} 은 인장응력이 0이 될 때의 극한변형률을 의미하며, f_{ctk} 와 $f_{ctf,1\%}$ 는 각각 $\epsilon_{0.3}$ 과 $\epsilon_{1\%}$ 에 대응하는 인장응력을 나타낸다. 본 연구에서는 하중-CMOD 측정값을 이용한 역해석 결과인 Fig. 6의 인장응력-CMOD 산정결과를 이용하여 변형률 특성점의 인장응력을 산출하였다.

$$\epsilon_{el} = \frac{f_{ctk,el}}{E_{cm}} \quad (2)$$

$$\epsilon_{peak} = \epsilon_{0.3} = \frac{w_{0.3}}{l_c} + \frac{f_{ctk,el}}{E_{cm}} \quad (3)$$

여기서, $w_{0.3} = 0.3 \text{ mm}$

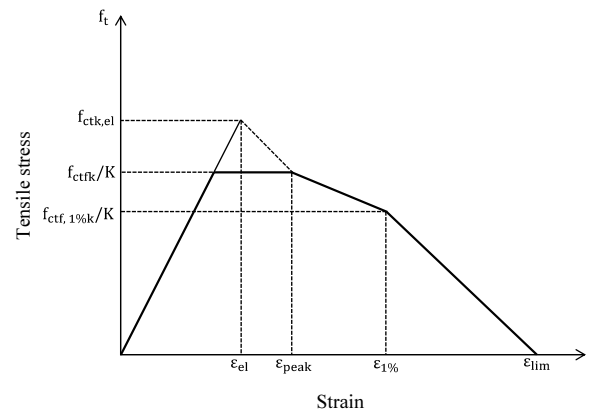


Fig. 7 Stress-strain relationship in AFGC Recommendations (AFGC 2013)

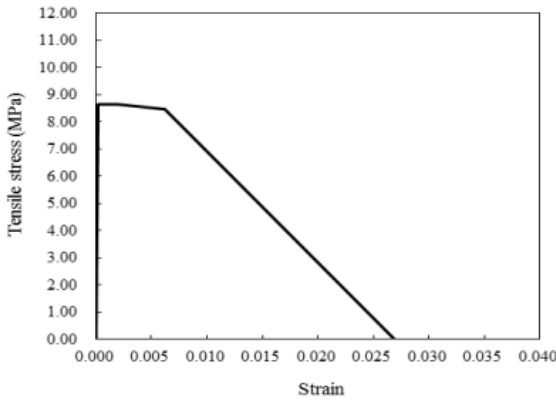


Fig. 8 Stress-strain relationship

$$\epsilon_{1\%} = \frac{w_{1\%}}{l_c} + \frac{f_{ctk,cl}}{E_{cm}} \quad (4)$$

여기서, $w_{1\%} = 0.01h$

$$\epsilon_{lim} = \frac{l_f}{4l_c} \quad (5)$$

위 식에서 인장강도 $f_{ctk,cl}$ 는 성인장강도, l_f 는 섬유 길이, K 는 강섬유보강 콘크리트의 타설방법에 따라 영향을 받는 섬유방향계수(fiber orientation coefficient)이며, 이 연구에서는 1.0을 적용하였다. Fig. 8에 콘크리트의 인장 응력-CMOD 곡선으로부터 산정한 인장응력-변형률 관계 곡선을 나타내었다.

3. 휨강도 예측

초고성능 콘크리트 부재의 휨성능을 예측하기 위하여 단면해석기법을 적용하였다. 단면해석을 수행하기 위하여 적층단면(multi-layer)기법을 적용하였으며, 부재 단면을 여러 개의 층(layer)으로 분할하였다.²²⁾ 부재 단면에 걸쳐 변형률은 선형으로 분포한다고 가정하였다(Fig. 9). 단면의 상연과 하연에서의 변형률은 곡률과 중립축 깊이를 이용하여 결정할 수 있다.²³⁾

먼저, 해석단계마다 단면 내의 변형률을 가정한다. 가정한 곡률에 대해 중립축 위치를 변화하여 단면 내의 변형률 분포를 산정한다. 변형률 적합조건에 의해 보 단면 상연 및 하연의 변형률은 각각 다음과 같이 계산한다.

$$\epsilon_{top} = c \phi \quad (6)$$

$$\epsilon_{bot} = (h - c) \phi \quad (7)$$

여기서, c 는 중립축 깊이, ϕ 는 곡률, h 는 보의 단면 높이를 나타낸다. 변형률 분포를 결정한 후, 재료모델링에서 획득한 초고성능 콘크리트 및 철근의 응력-변형률 관계

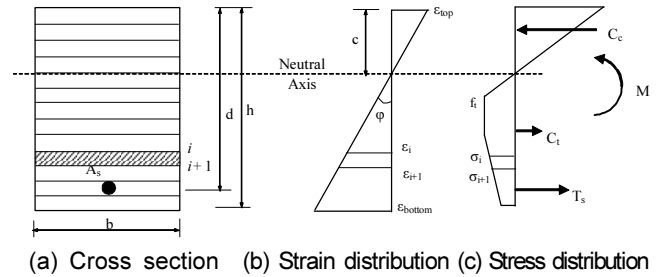


Fig. 9 Strain and stress distribution in the section

로부터 각 층에서의 응력을 산정한다. 각 단면 층의 응력을 산정한 후 층에서의 단면력을 산정할 수 있으며, 모든 층에서 단면력의 합은 평형상태를 만족해야 한다.

$$C_c + C_t + T_s = 0 \quad (8)$$

여기서, C_c , C_t 및 T_s 는 각각 콘크리트가 부담하는 압축력, 콘크리트가 부담하는 인장력 및 철근이 부담하는 인장력이다. 식 (8)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{A_c} \sigma_c dA_c + \int_{A_s} \sigma_s dA_s = 0 \quad (9)$$

평형상태를 만족시키는 단면 내 응력 분포에 근거하여 단면 내 휨모멘트를 계산할 수 있다.

$$M = \int_{A_c} \sigma_c y dA_c + \int_{A_s} \sigma_s y dA_s \quad (10)$$

여기서, σ_c 는 콘크리트 응력, σ_s 는 철근 응력, y 는 중립축에서 단면 내 각 층(layer)까지의 거리이다.

4. 휨거동 실험 및 수치해석

4.1 실험부재 계획

하이브리드 강섬유보강 UHPC의 재료특성 모델링 및 휨거동 모델링의 적합성을 확인하기 위하여 직사각형 단면을 갖는 4개의 하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트 보 부재를 제작하였다(Table 2). 보 부재의 폭=200 mm, 높이=250 mm이고, 보의 전체 길이는 3,300 mm이다.

Table 2 Details of test beams

Beam	Beam width (mm)	Beam height (mm)	Rebar	
			No.	Ratio
F15-NS-R0	200	250	-	-
F15-NS-R2	200	250	2-D13	0.006
F15-NS-R3	200	250	3-D13	0.009
F15-NS-R4	200	250	4-D13	0.012

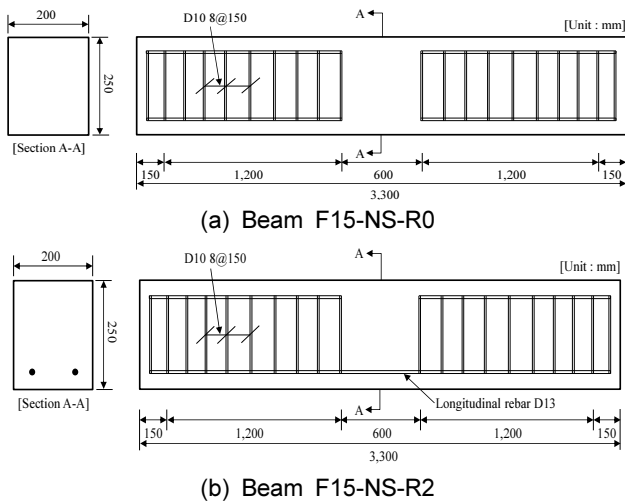


Fig. 10 Dimension of test beam

부재 중앙단면을 기준으로 순수 휨 구간영역을 600 mm로 설정하였고, 단면에서 하단 휨철근의 순피복 두께는 30 mm로 계획하였다.

0.012 이내의 철근비 조건에서 초고성능 콘크리트 보의 휨 거동 특성을 파악하고자 하였다. 또한, 실험부재의 순수 휨 구간 영역을 제외한 좌·우 구간에는 D10 철근을 이용한 스테럽을 150 mm 간격으로 배근하여 전단파괴를 방지하였다.

대표적으로 휨철근을 배근하지 않은 F15-NS-R0 부재와, 휨철근비가 0.006인 F15-NS-R2 부재의 단면형상을 Fig. 10에 나타내었다.

4.2 실험방법

Fig. 11과 같이 지점과 지점 사이의 거리를 3,000 mm로 하여 4점 재하방법으로 휨거동 실험을 수행하였다. 가력보를 액추에이터와 실험부재 사이에 설치하였으며, 가력보의 지점 간격 즉, 가력점 사이의 600 mm 구간에서 순수 휨(pure bending)이 작용하도록 계획하였다. 또한, 수직하중은 변위제어 방식으로 1.5 mm/min 속도로 하중을 재하하였다(Fig. 11).

실험자료 측정을 위한 계측센서는 콘크리트변형률 게이지, 철근변형률 게이지, 처짐 측정용 LVDT 및 로드셀 등 4가지로 구성하였다. 콘크리트 변형률 게이지를 지간

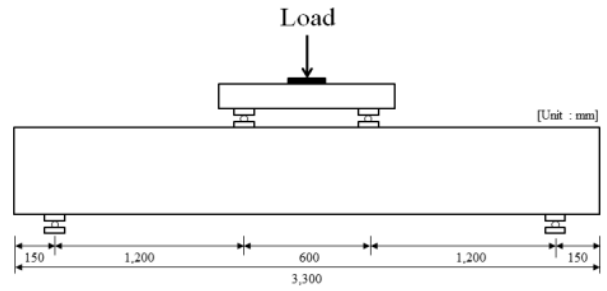


Fig. 11 Test setup

중앙위치에서 단면 높이에 따라 부착하여 단면 내 중방향 변형률을 측정하였다. 또한, 철근변형률 게이지를 순수 휨 구간의 철근에 부착하여 철근변형률을 측정하였다. 또한, 부재의 순수 휨 구간 영역에서 하중이 가력될 때의 처짐을 측정하기 위하여 변위계(LVDT)를 지간 중앙에 설치하여 부재에 발생하는 처짐을 측정하였다.

4.3 휨거동 특성

초기 균열 단계에서 균열 사이의 간격은 순수 휨 구간 영역에서 미세균열(micro crack)이 관찰되었다. 이후 하중이 증가됨에 따라 균열과 균열 사이에 새로운 미세균열이 발생한다. 균열 형상은 순수 휨 구간의 부재 하연에서 최초로 발생하여 상연 방향으로 진전되는 전형적인 휨 균열양상을 나타낸다. 다수의 미세균열중 특정 균열폭이 급격하게 증가하여 주 균열(major crack) 상태로 진전된다. 대표적으로 부재 F15-NS-R3의 균열 및 파괴양상을 Fig. 12에 나타내었다.

Table 3에 초기균열하중과 최대하중 실험결과를 나타내었고, Fig. 13에 각 부재별 하중-처짐 관계 곡선을 나타내었다. 초기균열하중은 하중-처짐 곡선에서 초기 선형구간 종점에서의 하중값과 처짐을 산정하였고, 극한하중은 하중-처짐 곡선에서 최대하중으로 산정하였다.

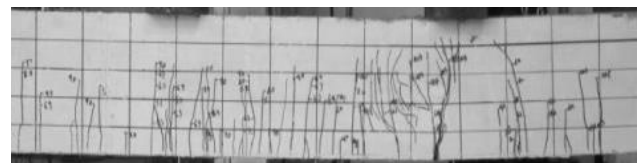


Fig. 12 Crack pattern (F15-NS-R3)

Table 3 Test result of cracking and ultimate load

Beam	Initial cracking			Yield state			Ultimate state			Ductility index
	P_{cr} (kN)	M_{cr} (kN-m)	Δ_{cr} (mm)	P_y (kN)	M_y (kN-m)	Δ_y (mm)	P_u (kN)	M_u (kN-m)	Δ_u (mm)	$\frac{\Delta_u}{\Delta_y}$
F15-NS-R0	37.8	22.7	2.6	-	-	-	44.7	26.8	5.2	2.0
F15-NS-R2	30.0	18.0	1.5	71.7	43.0	11.0	76.0	45.6	17.9	1.6
F15-NS-R3	48.4	29.0	2.6	111.3	66.8	20.2	118.6	71.2	34.6	1.7
F15-NS-R4	44.1	26.5	3.8	108.2	64.9	13.4	139.9	83.9	39.5	3.0

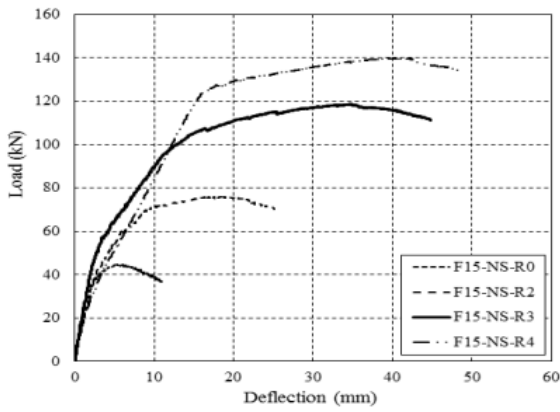


Fig. 13 Load-deflection curves

휨철근이 없는 부재 F15-NS-R0의 초기균열 하중은 37.8 kN이고, 극한하중은 44.7 kN이다. 이러한 실험결과는 휨철근이 없음에도 불구하고, 부재 F15-NS-R0는 초기 균열 후에도 지속적으로 하중에 저항하고 있음을 나타낸다. 또한, 철근이 없는 일반콘크리트 보는 극한하중 도달 후에 취성 거동을 나타내는 반면에, 초고성능 콘크리트 보의 하중-처짐 곡선은 극한하중 도달 이후에도 완만히 감소하고 있다. 이는 일반 콘크리트와 달리 UHPC는 강섬유가 균열 발생 후 균열면에서 지속적으로 가교역할 (crack-bridging effect)을 하여 균열성장을 억제하기 때문이다. 이 연구에서는 초기 균열 발생이후 최대하중까지의 하중부담능력은 강섬유 가교역할로 인해 급격한 균열의 확대를 억제하였다고 판단된다.

부재 F15-NS-R2, F15-NS-R3 및 F15-NS-R4의 극한 휨 모멘트는 각각 45.6, 71.2 및 83.9 kN-m로서, 휨철근량증가에 따라 극한 휨모멘트가 증가하고 있다.

4.4 하중-변형률 특성

대표적으로 F15-NS-R3 부재의 콘크리트 변형률 계이지와 철근변형률 계이지에서 측정된 변형률을 토대로 하중-변형률 관계를 Fig. 14에 나타내었다. 그림에서 C는 콘크리트변형률 계이지를 나타내며, S는 철근변형률 계이지를 나타낸다.

하중-변형률 곡선에서 음수의 변형률은 압축변형률을 나타내고, 양수의 변형률은 인장변형률을 나타낸다. 하중이 증가함에 따라 C1과 C2의 경우 압축변형률이 증가되는 경향을 나타낸다. C4의 위치는 단면의 도심과 일치하므로 초기에 변형률 값은 0에 가까운 값을 나타내며, 이후, 중립축 위치가 단면 상연으로 이동함에 따라 인장영역으로 전환되어 인장변형률을 나타낸다. C5는 단면의 하연 부근에 위치한다. 초기선형구간 이후 비선형구간으로 나타낸다. 이는 단면 하연에서 다수의 휨 균열 발생과 함께 비선형적인 인장변형률의 증가 때문이다.

또한, 철근의 항복변형률은 2100×10^{-6} m/m로서, 철근변형률은 극한하중에 도달하기 전 항복변형률에 도달한 것

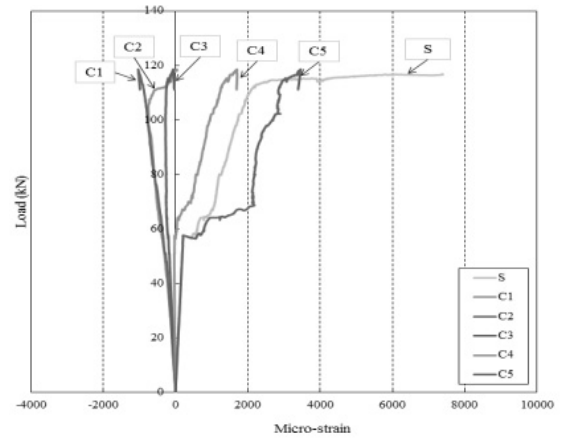


Fig. 14 Load-strain curve (F15-NS-R3)

으로 나타난다. 극한하중에 도달하였을 때, 철근의 변형률은 6480×10^{-6} m/m이다.

4.5 연성 지수

콘크리트 구조물의 연성은 연성지수(ductility index)로 나타낼 수 있으며, 변형 특성 중에서 구조물의 처짐, 회전각 또는 곡률을 바탕으로 표현할 수 있다. 일반 콘크리트와 달리 UHPC는 초기균열 이후부터 변형을 연화에 따른 연성능력을 나타낸다. 이 연구에서는 식 (11)과 같이 부재의 항복상태 및 극한상태에서의 처짐에 근거하여 실험부재의 연성지수를 계산하였으며, 이를 Table 3에 나타내었다. 부재의 최대하중 상태를 극한상태로 고려하였다.

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (11)$$

여기서, μ : 부재의 연성지수

Δ_u : 부재의 극한하중(최대하중)에서의 처짐

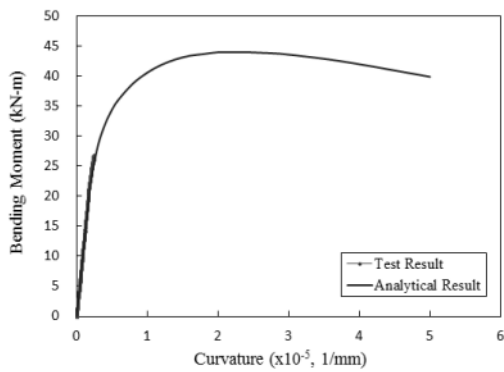
Δ_y : 부재의 항복하중에서의 처짐

철근이 배근되지 않은 부재 F15-NS-R0의 연성지수는 철근의 항복하중에서의 처짐 대신에 초기균열하중에서의 처짐을 이용하여 계산하였다. 부재 F15-NS-R0의 연성지수는 2.0으로서, 무근의 일반콘크리트와 달리 UHPC의 연성이 큰 것을 나타낸다. 철근이 없는 UHPC 휨 부재의 큰 연성능력은 UHPC가 균열 후 거동에서 매우 효율적으로 연성 능력 증진에 기여할 수 있음을 나타낸다.

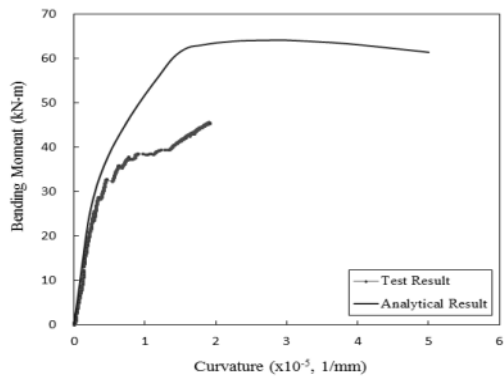
F15-NS-R2 ($\rho=0.006$), F15-NS-R3 ($\rho=0.009$) 및 F15-NS-R4 ($\rho=0.012$)의 연성지수는 각각 1.6, 1.7 및 3.0이다.

4.6 휨성능 예측결과

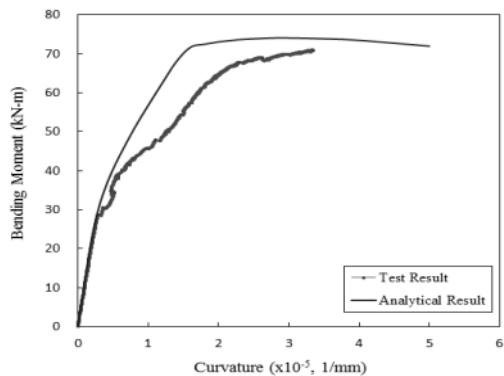
보 부재 실험에서의 모멘트-곡률 관계 측정결과와 단면해석기법에 의한 모멘트-해석결과를 비교하여 Fig. 15



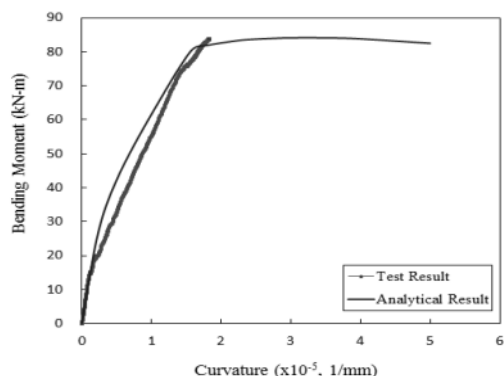
(a) F15-NS-R0



(b) F15-NS-R2



(c) F15-NS-R3



(d) F15-NS-R4

Fig. 15 Load-deflection curves

에 나타내었다. 곡률 측정결과는 콘크리트 변형률 측정값을 이용하여 산정하였다. 콘크리트 변형률 계이지는 균열에 의해 손상을 받으므로 곡률 측정결과는 신뢰할

Table 4 Test and analytical results

Beam	Test result (M_{test})	Analytical result (M_{cal})	$\frac{M_{cal}}{M_{test}}$
F15-NS-R0	26.8	44.0	1.64
F15-NS-R2	45.6	64.1	1.40
F15-NS-R3	71.2	74.1	1.04
F15-NS-R4	83.9	84.1	1.00
Mean			1.27

만한 단계까지의 변형률 측정값을 이용하여 나타내었다. 특히, 부재 F15-NS-R0는 철근이 없는 부재로서 주균열에 의해 콘크리트 변형률 계이지가 초기 단계에서 손상되어 일부만 나타내었다.

Fig. 15에서의 UHPC의 휨성능 모델링에 의한 휨강도 예측결과와 실험결과를 비교 분석하였다. 각 부재별 극한모멘트 실험값과 해석값을 Table 4에 나타내었다. 부재의 극한모멘트 측정값에 대한 수치해석에 의한 극한모멘트 계산값의 비는 1.00~1.64를 나타내고 있으며, 평균값은 1.27로 나타난다.

보 F15-NS-R0와 F15-NS-R2의 예측결과는 휨성능을 과다평가하고 있다. 보 F15-NS-R0는 휨철근이 없는 부재이고, 보 F15-NS-R2는 실험 부재중에서 휨철근량이 제일 작은 부재이다. 보 F15-NS-R0와 F15-NS-R2는 보 F15-NS-R3와 F15-NS-R4에 비해 철근량이 작아 상대적으로 강섬유의 휨강도 기여분이 크게 나타날 수 있다.

이 연구에서는 하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 압축거동과 인장거동 모델링을 수행하였으며, 이를 이용하여 부재의 휨성능을 예측하였다. 보 부재를 위한 초고성능 콘크리트타설 시의 강섬유 배열은 재료특성 실험 시편의 초고성능 콘크리트의 강섬유 배열보다 교란될 가능성이 크며, 이러한 강섬유 배열 차이에 의해 부재의 재료강도는 재료모델링에 사용된 강도 특성값보다 작게 나타날 수 있다. 따라서 이러한 재료특성 실험 시편의 하이브리드 강섬유 배열과 부재의 하이브리드 강섬유 배열 차이에 의해 휨성능 예측값은 실험결과를 과다평가하고 있는 것으로 판단된다. 본 연구에서의 휨성능 해석 기법에 철근의 인장증강효과 모델링을 반영하지는 않았다. 휨실험 부재에는 실제적으로 인장증강효과가 발생하였으리라고 판단된다. 부재의 크기 효과에 따른 강섬유 배열 특성 또는 교란 및 철근의 인장증강효과에 대한 추후 연구가 필요하다고 판단된다.

6. 결 론

이 연구에서는 하이브리드 강섬유보강 초고성능 콘크리트의 압축거동과 인장거동 모델링을 토대로 휨 거동 특성을 파악하기 위한 실험 및 수치해석 연구를 수행하였으며, 주요 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 휨성능 예측에 활용하기 위해 재료의 압축거동과 인장거동특성 실험을 수행하였으며, 이를 토대로 휨성능 예측기법을 제시하였다.
- 2) 하이브리드 강섬유보강 초고성능 콘크리트의 휨 거동은 초기균열에서 극한하중단계까지 균열억제 거동을 나타내며, 극한하중 이후의 단계에서도 연성 파괴 거동을 나타낸다.
- 3) 연구에서 제시한 하이브리드 강섬유보강 초고성능 콘크리트는 휨부재의 균열가교작용에 효과적이라고 판단된다.
- 4) 낮은 철근비에서도 연성지수는 1.6~3.0을 나타낸다. 이는 하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트가 우수한 연성거동을 나타내는 것을 의미한다.
- 5) 수치해석에 의한 휨성능 예측결과는 실험결과와 전반적으로 잘 일치하고 있다. 다만, 철근이 없거나 철근비가 낮은 경우의 예측결과는 실험값을 과다평가 하였다. 이는 재료특성실험 시편의 강섬유 배열과 부재에서의 강섬유 배열 차이 때문이라고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구A02)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Ashour, S. A., and Waff, F. F. "Flexural Behavior of High-strength Fiber Reinforced Concrete Beams", *ACI Structural Journal*, Vol.90, No.3, 1993, pp.279-287.
2. Oh, B. H., "Flexural Analysis of Reinforced Concrete Beams Containing Steel fibers", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.118, No.10, 1992, pp.2812-2863.
3. Swamy, R. N., and Al-Ta'an, S. A., "Deformation and Ultimate Strength in Flexure of Reinforced Concrete Beams made with Steel fiber Concrete", *ACI Structural Journal*, Vol.78, No.5, 1981, pp.395-405.
4. Li, V. C., and Fischer, G., "Reinforced ECC - An Evolution from Materials to Structures", *Proceedings of the 1st fib congress - Concrete Structures in the 21st Century*, Osaka, 2002, pp.105-122.
5. Chunxiang, Q., and Patnaikuni, I., "Properties of High-Strength Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams in Bending", *Cement & Concrete Composites*, Vol.21, 1999, pp.73-81.
6. Kooiman, A. G., "Modelling the Post-Cracking Behavior of Steel Fibre Reinforced Concrete for Structural Design Purposes", *HERON*, Vol.45, No.4, 2000, pp.275-307.
7. Alsayed, S. H., "Flexural Deflection of Reinforced Fibrous Concrete Beams", *ACI Structural Journal*, Vol.90, No.1, 1993, pp.72-76.
8. Manfred, T., and Jens, G., "Bending Design of Steel-Strengthened UHPC", *Proceedings of 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, 2008, pp.523-532.
9. Kang, S. T., Kim, Y. Y., Lee, B. Y., and Kim, J. K., "Fiber Orientation Impacts on the Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced High Strength Concrete", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.20, No.6, 2008, pp.731-739.
10. Yuguang, Y., Walraven, J., and Uiji, J. D., "Study on Bending Behavior of an UHPC Overlay on a Steel Orthotropic Deck", *Proceedings of 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, 2008, pp.639-646.
11. Yang, I. H., Joh, C., and Kim, B. S., "Structural Behavior of Ultra High Performance Concrete Beams Subjected to Bending", *Engineering Structures*, Vol.32, No.11, November, 2010, pp.3478-3487.
12. Yang, I. H., Joh, C. B., and Kim, B. S., "Flexural Strength of Large Scale Ultra High Performance Concrete Prestressed T-Beams", *Canadian Journal of Civil Engineers*, Vol.38, No.11, 2011, pp.1185-1195.
13. Si-Larbi, A., Ferrier, E., and Hamelin, P., "Flexural Behavior of Ultra High Performance Concrete Reinforced with Short Fibers and CFRP Rebars", *Proceedings of 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, 2008, pp.661-672.
14. American Concrete Institute, "Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete", ACI 544.4R-88, ACI Manual of Concrete Practice, Detroit, 1988.
15. Federal Highway Administration, Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete, 2006, pp.23-49.
16. Yang, I. H., Kim, K. C., and Joh, C. B., "Structural Behavior of Hybrid Steel Fiber-Reinforced Ultra High Performance Concrete Beams Subjected to Bending", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.26, No.6, 2014, pp.771-778.
17. RILEM TC 162-TDF, "Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete; Bending Test-Final Recommendation", *Materials and Structures*, Vol.35, No.253, 2002, pp.579-582.
18. Hillerborg, A., Modeer, M., and Petersson, P. E., "Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements", *Cement and Concrete Research*, Vol.6, No.6, 1976, pp.773-782.
19. Kitsutaka, Y., "Fracture Parameters by Polylinear Tension-softening Analysis", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol.123, No.5. 1997, pp.444-450.
20. Association Française du Génie Civil (AFGC) *Bétons fibrés à ultra-hautes performances*. Association Française du Génie Civil, 2013, France.
21. DAfStB, *State-of-the-art Report on Ultra High Performance Concrete - Concrete Technology and Design, draft 3*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton/German Association for Reinforced

- Concrete, Berlin, Germany, 2003.
22. Yuguang, Y., Walraven, J., and Uji, J. D., "Study on Bending Behavior of an UHPC Overlay on a Steel Orthotropic Deck", *Proceedings of 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Germany, 2008, pp.639-646.
23. Yang, I. H., Kim, K. C., and Joh, C. B., "Flexural Strength of Hybrid Steel Fiber-Reinforced Ultra-High Strength Concrete Beams", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.27, No.3, 2015, pp.280-287.

요 약 이 논문에서는 강섬유 보강 초고성능 콘크리트(UHPC)의 부재의 휨거동을 특성을 파악하고자 하였다. 하이브리드 강섬유보강 초고성능 콘크리트의 압축강도는 150 MPa이다. 부피비 1.5%의 하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 휨거동 특성 실험을 수행하였다. 강섬유보강 콘크리트의 압축 및 인장거동 재료 특성은 구조거동 예측을 위해 매우 중요하다. 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 하중-균열개구변위 측정결과를 이용하여 인장거동 특성을 파악하였다. 실험결과는 하이브리드 강섬유 보강 UHPC는 균열제어에 유리한 것을 나타낸다. 또한, 강섬유 보강 UHPC 보의 연성지수는 1.6~3.0을 나타내어 연성거동에 효과적임을 나타낸다. 모멘트-곡률 관계 측정결과와 해석결과를 비교하였다. 휨철근을 배근하지 않은 UHPC 보에 대한 휨강도 예측 결과는 측정 휨강도를 다소 과다평가하고 있다. 전반적으로 본 연구에서 제시한 강섬유 보강 초고성능 콘크리트 재료 및 휨 거동 모델링 제안기법에 의해 압축강도 150 MPa 급의 강섬유 보강 콘크리트 보의 합리적인 휨성능 예측이 가능하다.

핵심용어 : 강섬유, 초고성능 콘크리트, 휨성능, 연성지수, 곡률