



하이브리드 강섬유 보강 초고강도 콘크리트 보의 휨강도

양인환¹⁾ · 김경철^{1)*} · 조창빈²⁾

¹⁾군산대학교 토목공학과 ²⁾한국건설기술연구원 구조융합연구소

Flexural Strength of Hybrid Steel Fiber-Reinforced Ultra-High Strength Concrete Beams

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

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Kunsan National University, Kunsan, 573-701, Korea

²⁾Structural Engineering & Bridges Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 411-712, Korea

ABSTRACT This paper proposes a method for predicting flexural strength of hybrid steel fiber-reinforced ultra-high strength concrete beams. It includes an experimental test framework and associated numerical analyses. The experimental program includes flexural test results of hybrid steel fiber-reinforced ultra-high strength concrete beams with steel fiber content of 1.5% by volume. Tensile softening characteristics play an important role in the structural behavior of steel fiber-reinforced ultra high performance concrete. Tension softening modeling is carried out by using crack equation based on fictitious crack and inverse analysis in which load-crack mouth opening displacement relationship is considered. The comparison of moment-curvature curves of the numerical analysis results with the test results shows a reasonable agreement. Therefore, the numerical results confirms that good prediction of flexural behavior of steel fiber-reinforced ultra high strength concrete beams can be achieved by employing the proposed method.

Keywords : hybrid steel fiber, ultra-high strength concrete, tension softening, moment-curvature, flexural strength

1. 서 론

강섬유 보강 콘크리트는 콘크리트의 인성, 연성, 피로 및 충격에 대한 저항능력을 향상시킨다. 강섬유 보강 콘크리트는 초고강도의 발현, 인성의 증대 등을 통해 초고강도 콘크리트(UHSC: Ultra-High Strength Concrete)로 일컬어질 정도로 성능이 증대되고 있다¹⁻³⁾.

강섬유 보강 콘크리트는 콘크리트의 처짐 및 휨강도 특성을 향상시키고, 균열 이후 연성거동 특성을 향상시키는 것으로 알려진 바 있다⁴⁻⁶⁾. 그러나, 기존의 강섬유 보강 콘크리트 연구⁷⁻¹²⁾는 주로 단일섬유로 보강된 초고성능 콘크리트에 대해 수행되었으며, 두 가지의 서로 다른 섬유를 혼입한 하이브리드 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 구조거동 특성에 관한 연구는 상대적으로 미비한 실정이다. 우리나라 콘크리트 구조설계기준을 포함한 대부분의 해외 설계기준에도 설계기법이 제한적인 상황이다.¹³⁻¹⁴⁾

휨을 받는 강섬유보강 콘크리트 보의 처짐 및 휨강도

에 관한 연구가 수행되었다¹⁵⁻¹⁸⁾. 선행연구결과는 강섬유 보강 콘크리트 부재는 휨강도 및 전단강도를 향상시킬 뿐만 아니라, 특히 균열 이후 연성거동 특성을 향상시키는 것을 나타낸다. 기존의 선행 연구에서 제안된 강섬유 보강 콘크리트에 대한 대부분의 휨강도 평가기법은 압축강도 80 MPa 이내 수준의 강섬유보강 콘크리트를 대상으로 수행되었으며, 이 연구에서 대상으로 하고 있는 150 MPa 이상의 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 휨강도를 예측하는 데 한계가 있다. 또한, 강섬유보강 초고강도 콘크리트의 재료 및 구조부재 실험을 통한 특성 파악에 비해 재료모델링 및 구조거동 해석에 관한 연구는 상대적으로 미비한 실정이다.

따라서, 이 연구에서는 강섬유보강 초고강도 콘크리트의 압축 및 인장거동 모델링을 수행한 후 단면해석을 통해 휨 강도를 산정하기 위한 모멘트-곡률 해석기법을 제시하였다. 연구에서 적용한 강섬유보강 초고강도 콘크리트는 1.5% 부피비의 강섬유를 혼입하고 180 MPa 이상의 압축강도를 나타내는 복합건설재료이다. 먼저, 강섬유보강 초고강도 콘크리트 보를 제작하여 휨거동 특성실험을 수행하였다. 또한, 제안한 재료모델링을 이용한 모멘트-곡률 해석을 수행하여 보의 휨강도 예측을 수행하였다. 해

*Corresponding author E-mail : popping6069@naver.com

Received December 22, 2014, Revised January 21, 2015,

Accepted January 21, 2015

©2015 by Korea Concrete Institute

석결과와 실험결과와의 비교·분석을 수행하여 제안기법의 효용성을 고찰하였다.

2. 실험수행

2.1 재료특성

본 연구에서의 초고강도 콘크리트는 굵은 골재를 사용하지 않고 1.5% 부피비의 하이브리드 강섬유를 혼입해서 180 MPa 이상의 압축강도를 발현하고 인성을 크게 향상시킨 복합건설재료이다. UHSC 배합에는 잔골재로써 규사를 적용하였다. 길이가 19 mm인 강섬유를 부피비 기준 1.0%, 길이가 16 mm인 강섬유를 부피비 기준 0.5%로 혼입하여 전체 부피비 1.5%의 하이브리드 강섬유를 적용하였다. 섬유량이 과다할 경우, 배합시 섬유뭉침(fiber balling) 현상이 발생할 수 있어 기존의 연구는 0.5~2.0%를 주로 적용하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 최적의 섬유 혼입률로서, 1.5%를 적용하였다. 강섬유의 밀도는 $7,500 \text{ kg/m}^3$ 이고 항복강도는 2,500 MPa이다. Table 1에 UHSC의 배합비를 주요 시멘트에 대한 구성재료의 중량비로 나타내었다.

2.2 실험방법 및 부재 제원

강섬유 보강 초고강도 콘크리트 보의 휨 거동 특성을 파악하기 위하여 직사각형 단면형상을 가진 보 부재를 제작하여 4점하중재하 휨실험을 수행하였다. 보의 단면은 Fig. 1과 같이 폭 200 mm, 높이 250 mm의 직사각형 단면이며, 보의 전체길이는 3,300 mm가 되도록 제작하였다. 실험부재의 변수는 휨철근 비, 순수 휨구간에서의 스테럽 배근 여부 및 콘크리트 타설방법이다. 휨철근이 없는 경우를 기준으로 휨철근비 0.02(2%) 이내에서 하이브리드 강섬유 보강 초고강도 콘크리트 보의 휨 강도 특성을

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

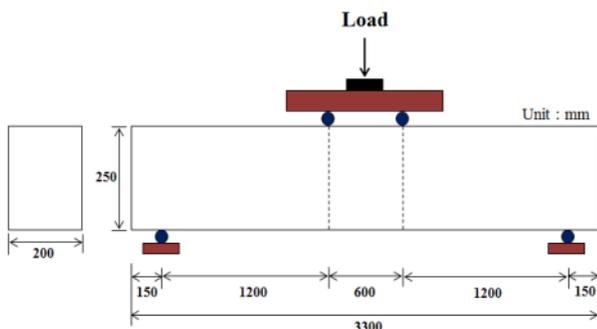


Fig. 1 Dimension of test setup

을 파악하고자 하였다. 이 연구에서는 철근량 변화에 따른 휨 거동 특성을 파악하고자 하였다. 일반콘크리트 구조물에 비해서 UHSC 구조물의 철근비는 작으므로, 철근비 0.02 이내로 실험 계획을 수립하였다. 각 부재의 명칭 및 상세 제원은 Table 2에 나타내었다. 보 부재의 휨 실험을 통한 하중-처짐 곡선으로부터 극한하중을 산정하였으며, 극한하중을 이용하여 휨강도를 산정하였다.

3. 재료모델링

강섬유 보강 초고강도 콘크리트를 이용한 구조물 설계가 이루어지기 위해서는 우선적으로 재료의 역학적 거동 특성을 명확히 모델링하여야 한다. 아울러 실제 거동을 정확히 묘사 가능한 구성 모델을 확립하는 것이 필요하다. 일반 콘크리트 보의 휨강도를 산정하기 위해서는 주로 콘크리트의 압축강도만을 고려하지만, 강섬유 보강 초고강도 콘크리트는 인장연화거동 특성을 나타내므로 압축과 인장에 대한 거동특성을 파악하고 적합한 구성모델을 정립하여야 한다.

3.1 압축거동 모델링

콘크리트의 매회 배치(batch)마다, 압축강도 실험용 원주형 공시체를 제작하였다. 보 부재에 사용한 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 압축강도 측정결과는 180~186 MPa를 나타내었다. 기존의 연구결과^{1,4,6)}는 강섬유 보강 초고강도 콘크리트가 보통강도 또는 고강도 콘크리트에 비해 응력-변형률 관계에서 극한변형률까지 거의 선형관계를 나타낸다. 평균탄성계수는 45,000~46,800 MPa를 나타낸다. 압축거동은 압축파괴가 일어나기까지 거의 선형거동을 나타내며, 압축강도에 도달했을 때의 극한변형률은 약 0.0035 (3500μ)~0.0045 (4500μ) 범위의 값을 나타낸다. 따라서, 콘크리트의 압축응력-변형률 관계를 Fig. 2와 같이 압축강도 $f_{cu} = 180 \text{ MPa}$, 탄성계수 $E_c = 45,000 \text{ MPa}$ 를 갖는

Table 2 Details of test beams

Beam	Compressive strength (MPa)	Test parameters			Method of placing
		Rebar ratio	stirrup spacing (mm)	Ratio	
H25-R1	182.9	2-D13	0.0059	-	End
H25-R2	186.2	3-D13	0.0089	-	End
H25-R2-C	182.9	3-D13	0.0089	-	Midspan
H25-R2-S	186.2	3-D13	0.0089	150	End
H25-R3	179.9	4-D13	0.0119	-	End
H25-R4	179.9	2-D16	0.0146	-	End
H25-R5	181.9	3-D13	0.0155	-	End
H25-R6	181.9	3-D13	0.0219	-	End

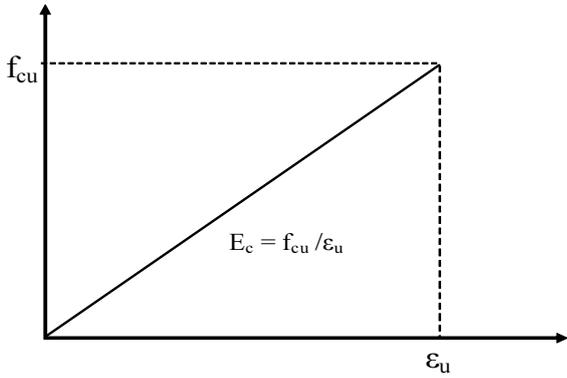


Fig. 2 Compressive stress-strain relationship

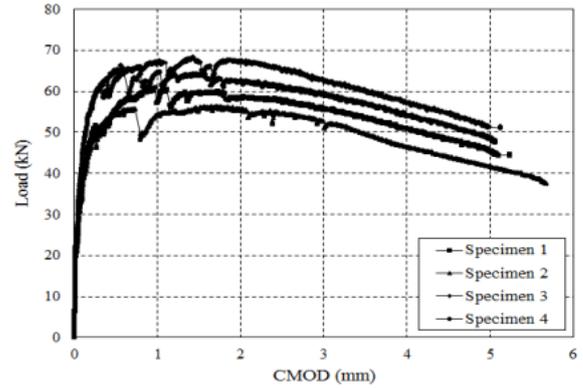


Fig. 4 Test results of load-CMOD curves

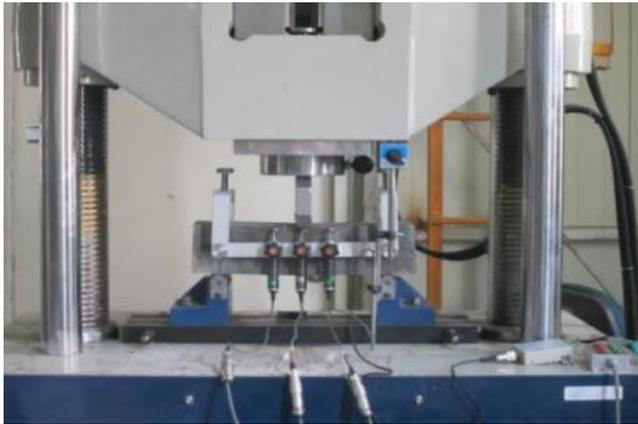


Fig. 3 Flexural tension test setup

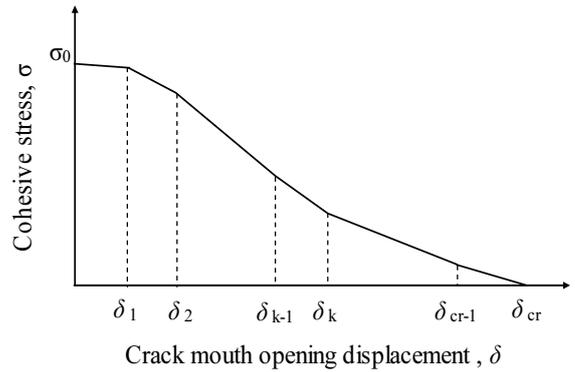


Fig. 5 Poly-linear tension-softening curve

선형관계의 응력-변형률 관계로 모델링하였다.

3.2 인장거동 모델링

콘크리트의 인장 특성을 측정하기 위한 대표적인 실험 방법으로는 직접인장실험 방법과 노치가 있는 보의 3점 재하 휨인장실험 방법 등이 있다. 일부 연구자는 직접인장실험을 통하여 인장 특성을 산정하고자 시도하였다. 그러나, 실험수행 중에 안정적인 하중조건을 유지하기가 힘들다. 반면에, 노치가 있는 보의 3점재하 휨인장실험은 RILEM¹⁹⁾, JCI²⁰⁾ 등의 표준 실험방법이며, 강섬유보강 콘크리트의 인성, 에너지 해방률과 같은 파괴역학 인자를 구하는데 용이한 실험방법으로 알려져 있다.

이 연구에서는 휨인장 거동을 파악하기 위하여 노치(notch)를 갖는 휨인장 실험용 시편을 제작하여 3점 하중 재하법에 의해 휨인장 실험을 수행하였다(Fig. 3). 휨인장 시편은 100 mm (가로) × 100 mm (세로) × 400 mm (길이)의 사각 프리즘 형상으로 제작하였다. 노치는 지간 중앙에 10 mm 깊이로 내었다. 클립 게이지를 설치하여 하중 재하 단계별로 노치의 균열개구변위(CMOD)를 측정하였으며, 이로부터 하중-CMOD 곡선을 획득하였다. 섬유보강 초고강도 콘크리트의 하중-CMOD 측정결과를 Fig. 4에 나타내었다.

AFGC²¹⁾는 노치를 낸 시편의 3점재하 휨인장 실험을 통해 측정된 하중-CMOD 관계를 이용하여 역해석(inverse analysis)을 수행한 후, 이로부터 인장응력-CMOD 관계를 산정할 것을 제안하고 있다. 따라서, 3점 휨인장 실험으로부터 측정된 하중-CMOD 관계를 이용하여 역해석을 수행한 후, 인장응력-CMOD 곡선을 산정하였다. 또한, 인장응력-CMOD 곡선을 사용하여 단면해석에 사용되는 인장응력-변형률 관계 곡선을 산정하였다.

이 연구에서의 인장응력-CMOD 곡선은 Hillerborg²²⁾의 가상균열모델에 근거한 역해석을 통해 구하며, 곡선의 형상은 Fig. 5와 같이 다중의 선분으로 구성되는 다중 선형 인장연화곡선으로 표현한다.²³⁾ 가상균열모델에서 응집응력 σ 는 균열개구변위 δ 의 다중선형함수로 나타낸다. 하중-균열개구변위(CMOD) 측정값을 이용한 균열성장해석으로부터 다중 선형의 인장연화곡선을 산정하는 개념을 Fig. 6에 나타내었다. k 번째 단계에서 균열개구변위와 인장연화곡선의 기울기는 실험하중과 균열방정식에서 구한 하중의 최적화에 의해 결정한다. 균열선단에서 균열개구까지 균열변위가 단조증가한다고 가정할 때, 균열개구에서의 균열변위가 최대값을 갖는다. 각 해석 단계에서의 인장연화곡선의 직선의 기울기는 하중-CMOD 관계와 일치할 때까지 반복 수행된다. 현재 단계(k 번째 단계)에서 결정된 인장연화곡선은 다음 단계($k+1$ 번째 단계)의 구성 방정식에 사용된다. 따라서, 각 해석단계마다 모든

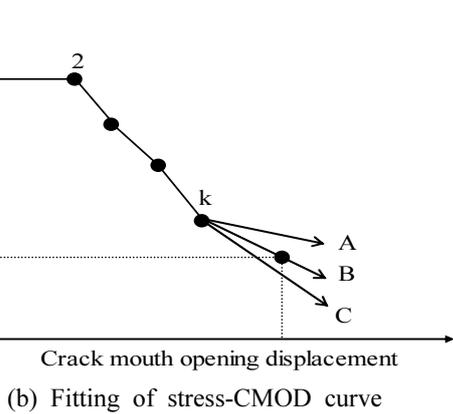
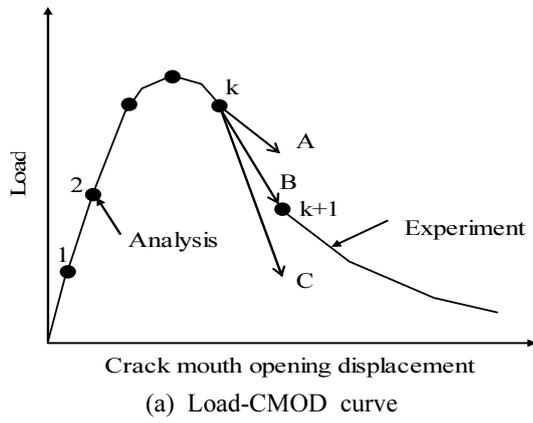


Fig. 6 Poly-linear inverse analysis

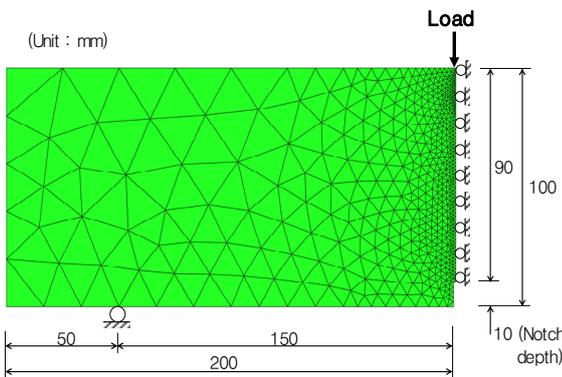


Fig. 7 Specimen modeling for inverse analysis

균열변위에 대한 구성방정식을 구성하여 최적의 인장연화곡선을 산정한다.

휨인장시편의 역해석을 위한 수치해석모델을 Fig. 7에 나타내었다. 수치해석모델은 1,076개의 삼각형 요소망으로 구성하였으며, 지간중앙을 중심으로 좌우대칭형상으로 모델링하였다. Fig. 8에 최고강도 콘크리트를 타설할 때 제작한 시편의 휨인장 실험으로부터 측정된 하중-CMOD 곡선에 대한 역해석 결과를 나타내었다. 역해석에 의한 인장강도 평균값은 11.7 MPa이다. 이러한 인장강도는 보통 콘크리트의 인장강도에 비해 매우 큰 값이다.

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

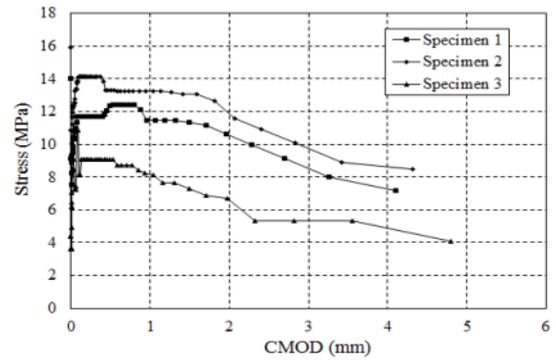


Fig. 8 Inverse analysis result

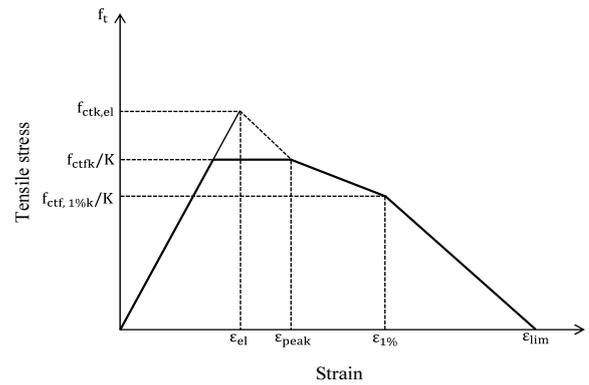


Fig. 9 Stress-strain relationship

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

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

Fig. 9는 변형률 연화(strain-softening) 또는 낮은 변형률경화(low strain-hardening)일 때, 인장거동 모델링을 나타낸 것이다. AFGC 설계기준에서는 각 응력-변형률 곡선 특성점에서의 변형률은 제시하고 있지만, 인장응력은 규정하고 않고 인장연화곡선에서의 인장응력을 반영할 것을 제안하고 있다. Fig. 9에서의 거동 특성점은 식 (2) - 식 (5)로 정의된다. ϵ_e 는 초기균열이 발생하는 시점에서의 변형률을 나타내고, $\epsilon_{0.3}$ 은 균열폭의 크기가 0.3 mm일 때의 변형률을 의미하며, $\epsilon_{1\%}$ 는 균열폭이 휨인장 프리즘 시편 단면높이의 1%에 해당하는 변형률을 나타낸다. 그리고 ϵ_{lim} 은 인장응력이 0이 될 때의 극한변형률을 의미하며, f_{dfk} 와 $f_{df,1\%}$ 는 각각 $\epsilon_{0.3}$ 과 $\epsilon_{1\%}$ 에 대응하는 인장응력을 나타낸다.

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

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

$$\epsilon_{1\%} = \frac{w_{1\%}}{l_c} + \frac{f_{dk,el}}{E_{cm}}, \text{ 여기서, } w_{1\%} = 0.01h \quad (4)$$

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

위 식에서 인장강도 $f_{dk,el}$ 는 특성 탄성인장강도, l_f 는 섬유 길이, K 는 섬유보강 초고강도 콘크리트의 타설방법에 따라 영향을 받는 섬유방향계수(fiber orientation coefficient)이다. Fig. 10에 콘크리트의 인장응력-CMOD 곡선으로부터 산정한 인장응력-변형률 관계 곡선을 나타내었다.

4. 보의 모멘트-곡률 해석

4.1 단면해석기법

부재의 모멘트-곡률 해석을 수행하기 위해 단면해석기법을 적용하였으며, 단면은 적층단면(multi-layer)으로 모델링하였다. 적층단면을 적용한 단면해석기법은 강섬유보강 콘크리트 보의 휨 거동을 파악하는데 있어서 해석기법의 간편성으로 인하여 선호되고 있다. 단면해석기법 개념은 Yang 등²⁾과 Yuguang 등²⁴⁾이 강섬유 보강 콘크리

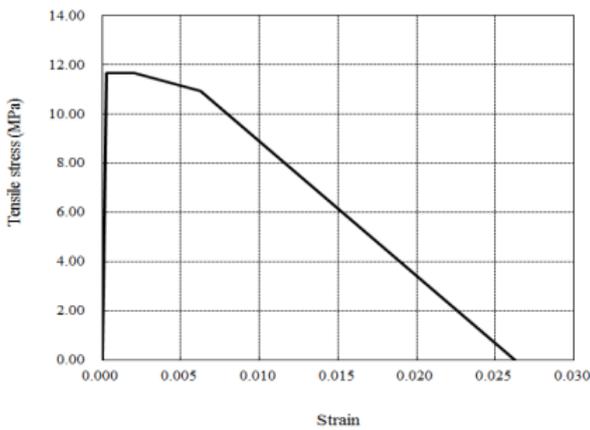


Fig. 10 Stress-Strain relationship

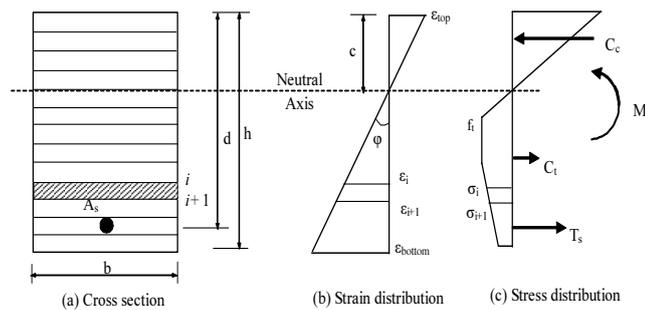


Fig. 11 Strain and stress distribution in the section

트의 구조성능평가를 위한 연구에 응용한 바 있다. 또한, 해석 목적상 부재 단면은 여러 개의 층(layer)으로 분할되며, 부재 단면에 걸쳐 변형률은 선형으로 분포한다고 가정하였다. Fig. 11에 단면의 변형률 및 응력분포 형태를 나타내었다. 단면 내의 변형률 분포 즉, 단면 상연 및 하연 변형은 곡률 및 중립축 깊이를 이용하여 결정할 수 있다. 곡률은 부재의 단위길이당 기울기의 변화이며, 이는 단면에서의 변형률 경사와 동일하다고 가정한다. 먼저, 해석단계마다 단면 내의 곡률을 가정한다. 또한, 가정한 곡률에 대해 중립축 위치를 가정하여 단면 내의 변형률 분포를 산정한다. 변형률 적합조건에 의한 보 단면 상연 및 하연의 변형률은 다음과 같다.

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

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

변형률 분포를 결정한 후, 재료모델링에서 획득한 강섬유보강 콘크리트 및 철근의 응력-변형률 관계로 부터 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 단면내 응력 분포에 근거하여 단면력, 즉 휨모멘트를 계산할 수 있다.

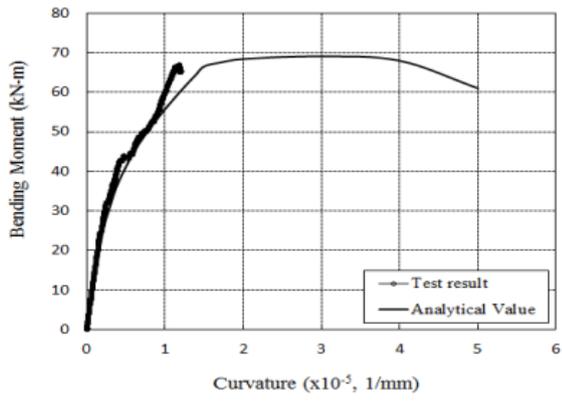
$$M = \int_{A_c} \sigma_c y dA_c + \int_{A_s} \sigma_s y dA_s \quad (10)$$

여기서, σ_c 는 콘크리트 응력이며, σ_s 는 철근 응력이다.

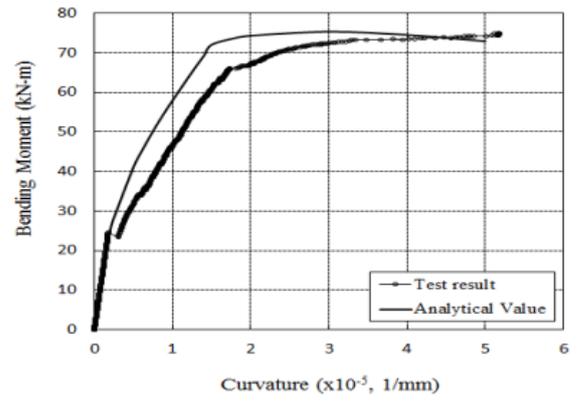
4.2 해석결과

이 연구에서는 UHSC의 해석기법의 적정성을 파악하기 위하여 UHSC의 실험결과와 해석결과를 비교 분석하였다. 해석시 UHSC의 압축강도는 180 MPa, 탄성계수는 45,000 MPa, 철근의 항복강도는 400 MPa이다.

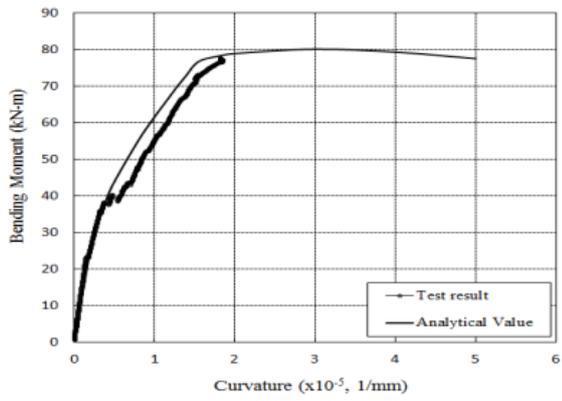
부재별 모멘트-곡률 관계 실험결과와 제안기법에 의한 모멘트-곡률 해석결과를 Fig. 12에 나타내었다. 실험에서의 곡률은 부재 표면에서 측정된 콘크리트 변형률에 의



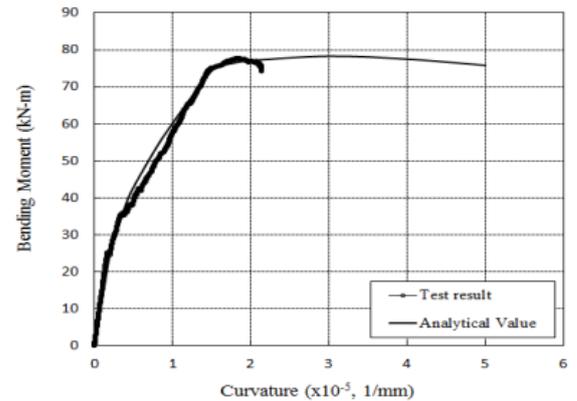
(a) H25-R1



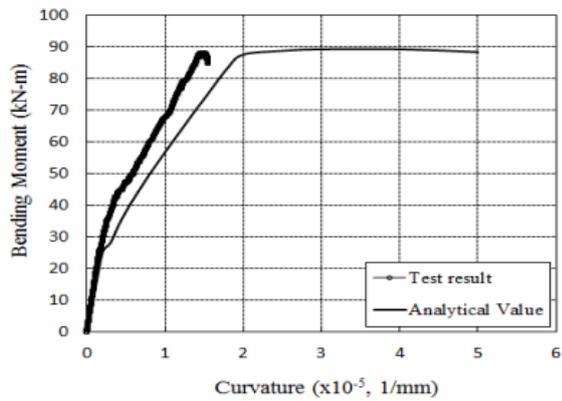
(b) H25-R2



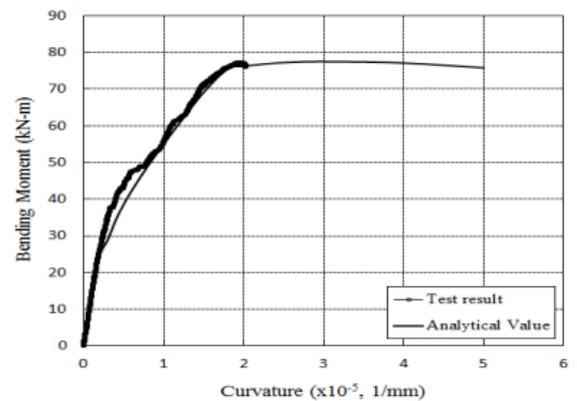
(c) H25-R2-C



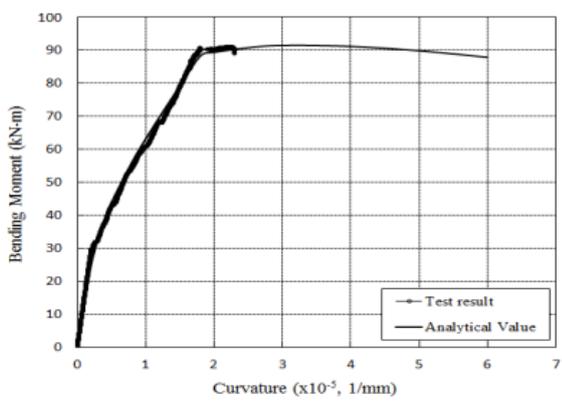
(d) H25-R2-S



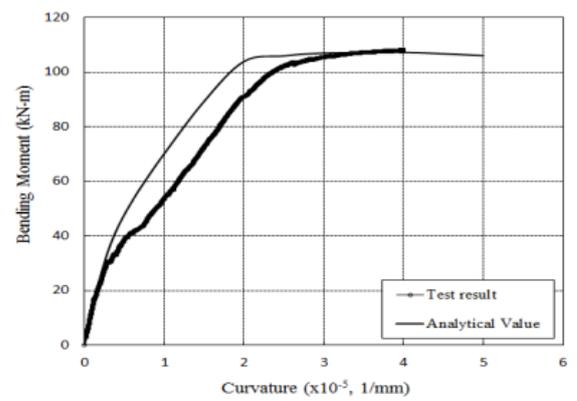
(e) H25-R3



(f) H25-R4



(g) H25-R5



(h) H25-R6

Fig. 12 Comparison of test result and analytical value

Table 3 Test and analytical results

Member	Test result (M_{test})	Analytical result (M_{cal})	$\frac{M_{cal}}{M_{test}}$
H25-R1	66.9	76.2	1.14
H25-R2	78.8	86.2	1.09
H25-R2-C	80.0	86.2	1.08
H25-R2-S	77.8	86.2	1.11
H25-R3	88.3	108.3	1.23
H25-R4	77.2	91.8	1.19
H25-R5	91.0	97.9	1.08
H25-R6	108.1	109.4	1.01
Mean			1.12

해 산정하였다. 부재의 초기균열 이후 콘크리트 변형률 계이는 균열에 의해 손상을 받으며, 이로 인해 인장변형률은 최대하중 단계까지 측정할 수 없다. 따라서, 실험 곡률은 신뢰할만한 구간까지만 한정하여 나타내었다.

모멘트-곡률 곡선은 초기에 선형구간을 나타내며, 이는 초기균열이 발생하기 전의 구간이다. 초기균열 발생 이후 곡선의 강성은 감소하나, 휨모멘트는 지속적으로 증가한다. 일반 콘크리트 보 부재는 초기균열 이후의 하중증가에 따라 이미 발생한 균열의 폭이 급격히 증가하는 특성을 갖는다. 반면에, 강섬유 보강 초고강도 콘크리트 보는 초기균열 발생이후 최대하중 단계까지 균열 폭이 급격하게 증가하는 대신에 새로운 미세 균열이 추가로 발생한다. 이는 초기균열 발생후 하이브리드 강섬유가 균열성장을 억제하기 때문이며, 이는 보의 급격한 단면 강성 감소를 제어하는 효과를 가져온다. 따라서, 실험 시의 초기균열 이후 균열이 점진적으로 발생하는 양상은 모멘트-곡률 해석결과에서 초기선형 구간 이후 최대 모멘트 도달 때까지 모멘트가 지속적으로 증가하는 현상과 상응한다.

각 부재별 최대모멘트 실험값과 해석값을 Table 3에 나타내었다. 부재의 최대 모멘트 측정값에 대한 모멘트-곡률 수치해석에 의한 최대모멘트 계산값의 비는 1.01~1.23를 나타내고 있으며, 평균값은 1.12로 나타난다. 해석값은 전반적으로 휨모멘트 강도를 합리적으로 예측하고 있으나, 과다평가하는 것으로 나타난다. 이 연구에서는 초고강도 콘크리트의 하중-CMOD 측정결과를 토대로 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 압축 및 인장모델링을 수행하였으며, 이를 이용하여 보 부재의 모멘트-곡률 해석을 수행하였다. 이때, 보 부재에서의 강섬유 배열은 재료 특성 실험시 타설된 콘크리트의 강섬유 배열보다 교란될 가능성이 크며, 이때, 재료특성 실험에 의한 인장강도는 보 부재의 인장강도 보다 크게 나타난다. 이러한 재료 특성 실험 시의 하이브리드 강섬유 배열과 보 부재의 하이브리드 강섬유 배열 차이에 의해 해석값은 실제 휨강도를 다소 과다평가하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구에서는 하이브리드 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 인장연화거동을 고려한 재료모델링 및 이를 적용한 보 부재 단면의 모멘트-곡률 해석기법을 제시하였다.

- 1) 하중-CMOD 측정결과를 이용하여 가상균열모델에 근거한 역해석을 통해 다중선형곡선 형상의 인장연화곡선을 산정하는 기법을 제시하였다.
- 2) 역해석에 의한 인장연화곡선에서 강섬유 보강 콘크리트의 인장강도는 11.7 MPa를 나타내고 있으며, 이는 일반 콘크리트의 인장강도 보다 큰 값을 나타낸다.
- 3) 강섬유 보강 초고강도 콘크리트 보는 초기균열 발생이후 최대하중 단계까지 하이브리드 강섬유가 균열성장을 억제하며, 이는 보의 급격한 단면강성 감소를 제어하는 효과를 가져온다.
- 4) 초기균열 이후 균열이 점진적으로 발생하는 양상은 모멘트-곡률 해석 곡선에서 최대모멘트 도달 때까지 휨 강도가 지속적으로 증가하는 현상과 상응하는 것으로 나타났다.
- 5) 제안해석기법에 의한 예측결과와 실험값의 비교결과, 모멘트-곡률의 실험값과 해석값의 비는 1.01~1.23을 나타내므로 해석결과는 휨강도를 합리적으로 예측할 수 있는 것을 나타낸다.

감사의 글

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

References

1. Yang, I. H., Joh, C. B., Kang, S. T., and Kim, B. S., "An Experimental Study on Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced Ultra High Performance Concrete", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.21, No.6, 2009, pp. 737-744.
2. Yang, I. H. and Joh, C. B., "Moment-Curvature Analysis of Steel Fiber-Reinforced Ultra High Performance Concrete Beams with Tension Softening Behavior", *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol.24, No.3, 2011, pp. 237-248.
3. Yang, I. H., Joh, C. B., and Kim, B. S., "An Experimental Study on Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced Ultra High Performance Concrete Prestressed Girders", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.22, No.6, 2010, pp. 777-786.
4. 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.
5. 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.
 6. 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.
 7. 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*, pp. 105-122, Osaka, 2002.
 8. 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.
 9. 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*, Kassel, Germany, 2008, pp. 639-646.
 10. 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.
 11. 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.
 12. 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.
 13. American Concrete Institute, “Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete”, ACI 544.4R-88, ACI Manual of Concrete Practice, Detroit, 1988.
 14. Federal Highway Administration, *Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete*, 2006, pp. 23-49.
 15. 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*, 1981, Vol.78, No.5, 1981, pp. 395-405.
 16. Alsayed, S. H., “Flexural Deflection of Reinforced Fibrous Concrete Beams”, *ACI Structural Journal*, Vol.90, No.1, 1993, pp. 72-76.
 17. 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.
 18. 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.
 19. 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.
 20. Japan Concrete Institute (JCI) *Method of test for fracture energy of concrete by use of notched beam*, JCI-S-002-2003.
 21. Association Française du Génie Civil (AFGC) *Bétons fibrés à ultra-hautes performances*. Association Française du Génie Civil, 2013, France.
 22. 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.
 23. Kitsutaka, Y. “Fracture Parameters by Polylinear Tension-softening Analysis”, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol.123, No.5. 1997, pp. 444-450.
 24. 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.

요약 이 논문에서는 하이브리드 강섬유로 보강된 콘크리트의 부재의 휨강도를 예측하기 위한 수치해석기법을 제시하였다. 이를 위해 휨을 받는 하이브리드 강섬유 보강 콘크리트 실험과 수치해석연구를 수행하였다. 부피비 1.5%의 하이브리드 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 휨거동 특성 실험을 수행하였다. 강섬유보강 콘크리트의 인장연화특성은 구조적 거동에 매우 중요한 역할을 하며, 하이브리드 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 하중-균열개구변위 실험결과를 반영하여 가상균열모델에 근거한 역해석에 의해 인장연화모델링을 수행하였다. 제안기법에 의한 콘크리트 보의 모멘트-곡률 수치해석결과를 실험결과와 비교하였으며, 수치해석결과와 실험결과는 전반적으로 잘 일치하고 있다. 따라서, 제안기법에 의해 강섬유 보강 초고강도 콘크리트 보의 휨강도를 합리적으로 예측할 수 있다고 판단된다.

핵심용어 : 하이브리드 강섬유, 초고강도 콘크리트, 인장연화, 모멘트-곡률, 휨강도