

## UHPFRC 보 휨 거동에 대한 설계변수 변동의 영향

# The Effect of Variation of Design Parameters on the Flexural Behavior of UHPFRC Beams

양인환<sup>1</sup> · 김경철<sup>2</sup> · 박지훈<sup>3\*</sup>

In-Hwan Yang<sup>1</sup> · Kyung-Chul Kim<sup>2</sup> · Ji-Hun Park<sup>3\*</sup>

(Received June 7, 2018 / Revised June 14, 2018 / Accepted June 14, 2018)

This paper studies the bending behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) beams focused on the effect of variation in major material design parameters such as tensile strength, elastic modulus of UHPFRC, and rebar ratio. Analytical results show that the variation in the range of  $\pm 20\%$  in the tensile strength of UHPFRC causes the significant difference in  $\pm 8\text{--}9\%$  of bending strength compared to the reference condition. The variation of elastic modulus in UHPFRC rarely causes the effect on the bending strength of the UHPFRC section, whereas causes the difference in the slopes of moment-curvature curves, indicating different bending stiffness of UHPFRC sections. For the rebar with yield strength of 400MPa, the bending strength of SC12of is increased by 30, 67, and 99% when the rebar ratio is 1.0, 1.5, and 20%, respectively, compared to the rebar ratio of 0.5%. Therefore, it is observed that the variation of rebar ratio significantly affects the difference in bending strength of UHPFRC beams. However, as the compressive strength of UHPFRC becomes greater, the effect of rebar ratio on the increase of bending strength is decreased.

**키워드 :** 초고성능, 섬유보강 콘크리트, 휨 거동, 인장강도, 철근비

**Keywords :** Ultra-high-performance, Fiber-reinforced concrete, Flexural behavior, Tensile strength, Rebar ratio

## 1. 서론

강섬유 보강 콘크리트(fiber-reinforced concrete)는 콘크리트의 인성, 연성, 피로 및 충격에 대한 저항능력을 향상시킨다. 강섬유 보강 콘크리트는 초고강도의 발현, 인성의 증대 등을 통해 초고강도 콘크리트(ultra-high strength concrete, UHSC) 또는 초고성능 강섬유 보강 콘크리트(ultra-high performance fiber-reinforced concrete, UHPFRC)로 일컬어질 정도로 성능이 증대되고 있다 (Chan and Chu 2004; Yang et al. 2010a; Yang et al 2011a).

강섬유 보강 초고성능 콘크리트는 콘크리트의 처짐 및 휨강도 특성을 향상시키고, 균열 이후 연성거동 특성을 향상시키는 것으로 알려진 바 있다(Yang et al. 2010b; Yang et al. 2011b; Yuguang et al. 2008). UHPFRC의 적용 확대를 위해서는 재료특성 및 이에 따른 구조 거동 특성 규명이 필요하다. 또한, UHPFRC 구조물의

합리적인 설계를 수행하기 위해서는 설계기준 확립이 필요하지만, 우리나라의 콘크리트 구조설계기준을 포함한 대부분의 해외 설계 기준에도 설계기법이 제한적인 상황이다(ACI 2008; AFGC/SETRA 2002; Junichiro 2006; KCI 2012).

선행연구 결과는 강섬유 보강 콘크리트 부재는 휨강도 및 전단 강도를 향상시킬 뿐만 아니라, 특히 균열 이후 연성거동 특성을 향상시키는 것을 나타낸다. 기존 연구(Hillerborg et al. 1976; Kitsutaka 1997)에서 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 재료 및 구조부재 실험을 통한 특성 파악에 비해 재료 모델링 및 구조거동 해석에 관한 심도 있는 연구는 상대적으로 미비한 실정이다.

따라서 이 연구에서는 단면 해석기법을 이용하여 UHPFRC 휨 강도 설계 시 주요 설계변수가 휨강도에 미치는 영향을 연구하고자 하였다. 먼저 UHPFRC의 압축강도뿐만 아니라 인장강도를 반영한 단면 해석기법을 제시한 후, 이를 단면 해석에 적용하였다

\* Corresponding author E-mail: qwgcwe@naver.com

<sup>1,3</sup>군산대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk, 54150, Korea)

<sup>2</sup>(주)디엠엔지니어링 (DM Engineering Co., LTD., Seoul, 05288, Korea)

(Graybeal 2006). 단면 해석은 적층해석기법을 반영하였으며, 단면 내 각층에서의 UHPFRC의 압축응력과 인장응력을 반영하도록 하였다. 설계 압축강도가 각각 120, 150 및 180MPa인 UHPFRC의 주요 재료특성 관련 설계변수로서 UHPFRC의 인장강도의 변동, 탄성계수의 변동 및 인장철근비의 변동이 UHPFRC의 휨강도에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

## 2. UHPFRC 단면의 휨강도 산정 기법

UHPFRC 부재의 모멘트-곡률 해석을 수행하기 위해 단면 해석 기법을 적용하였으며, 단면은 적층단면(multi-layer)으로 모델링 하였다. 적층단면을 적용한 단면 해석기법은 강섬유 보강 콘크리트 보의 휨 거동을 파악하는 데 있어서 해석기법의 간편성으로 인하여 선호되고 있다. 단면 해석기법 개념은 Yang et al.(2015)과 Song and Hwang(2004)이 강섬유 보강 콘크리트의 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. 1에 단면 내의 변형률과 응력 분포를 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.

$$\epsilon_{top} = c \phi \tag{1}$$

$$\epsilon_{bot} = (h - c)\phi \tag{2}$$

여기서,  $c$ 는 중립축 깊이,  $\phi$ 는 곡률,  $h$ 는 보의 단면높이이다. 변형률 분포를 결정할 후, 재료 모델링에서 획득한 UHPFRC 및 철근의 응력-변형률 관계로부터 각 층에서의 응력을 산정한다. 단면 내 각 층의 응력을 산정한 후 층에서의 단면력을 산정할 수 있다. 또한, 모든 층에서 단면력의 합은 힘의 평형상태를 만족해야 한다.

$$C_c + C_t + T_s = 0 \tag{3}$$

여기서,  $C_c$ ,  $C_t$  및  $T_s$ 는 각각 UHPFRC가 부담하는 압축력과

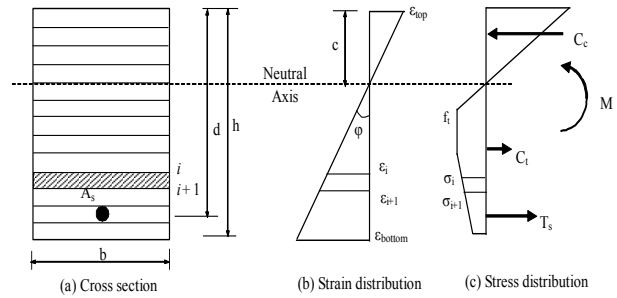


Fig. 1. Strain and stress distribution in the section

인장력, 철근이 부담하는 인장력이다. 식 (3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{A_c} f_c dA_c + \int_{A_s} f_s dA_s = 0 \tag{4}$$

여기서,  $f_c$ 는 콘크리트 응력이며,  $f_s$ 는 철근 응력이다.

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

$$M = \int_{A_c} f_c y dA_c + \int_{A_s} f_s y dA_s \tag{5}$$

## 3. 재료특성 설계변수의 휨거동에 대한 영향

휨강도 예측을 위하여 SUPER 콘크리트 구조설계지침(2016)에서 제안하고 있는 재료특성 규정값과 재료 모델링 기법을 적용하였다. 본 연구에서는 주요 재료특성 설계변수로서 UHPFRC의 인장강도의 변동, 탄성계수의 변동 및 인장철근비의 변동이 UHPFRC의 휨거동에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

### 3.1 UHPFRC의 인장강도 변동에 따른 휨강도 예측

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 폭 200mm, 유효깊이 230mm, 길이 3,300mm를 갖는 직사각형 단면 형상의 보 부재를 기준단면으로 설정하여 휨거동 예측을 수행하였다. 철근의 항복강도( $f_y$ )는 400MPa, 철근량은  $460mm^2$ 를 적용하였으며, 이때의 철근비는 1.0%이다. 해석변수인 UHPFRC의 인장강도는 설계기준강도 및 이의 변동성을 고려하기 위하여  $\pm 20\%$ 의 변동값을 적용하였다. Table 1에 해석변수의 변동값을 나타내었다. SC120의 경우에 설계기준 인장강도는 7.0MPa이고, 이를 고려한  $\pm 20\%$  변동값으로

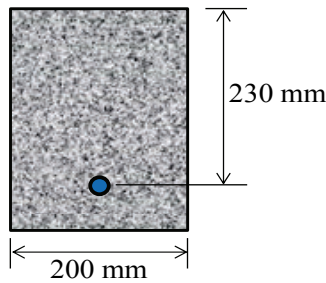


Fig. 2. Beam section dimension

Table 1. Analytical results at various tensile strength of UHPFRC

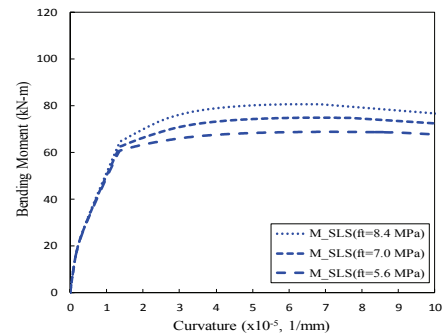
Mixtures	Tensile strength (MPa)	Bending strength		$\frac{M_{ULS}}{M_{SLS}}$	$\frac{M_{SLS, case}}{M_{SLS, Ref.}}$
		$M_{SLS}$ (kN-m)	$M_{ULS}$ (kN-m)		
SC120f	8.4	80.57	65.51	0.81	1.08
	7.0	74.87	61.36	0.82	1.00
	5.6	68.97	57.08	0.83	0.92
SC150f	10.8	90.92	73.17	0.80	1.08
	9.0	83.86	67.95	0.81	1.00
	7.2	76.50	62.58	0.82	0.91
SC180f	13.2	100.68	80.27	0.80	1.09
	11.0	92.36	74.17	0.80	1.00
	8.8	83.71	67.83	0.81	0.91

서 각각 8.4 및 5.6MPa를 적용하였다. SC150f의 경우에 설계기준 인장강도는 9.0MPa이고, 이를 고려한 ±20% 변동값으로서 각각 10.8 및 7.2MPa를 적용하였다. 또한, SC180f의 경우에 설계기준 인장강도는 11.0MPa이고, 이를 고려한 ±20% 변동값으로서 각각 13.2 및 8.8MPa를 적용하였다.

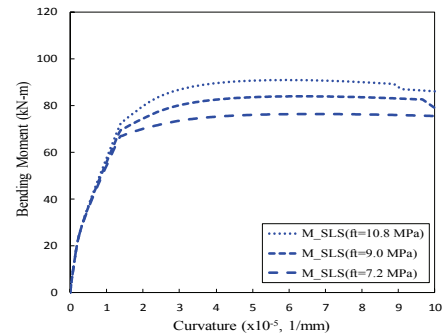
인장강도의 변동에 따른 휨모멘트-곡률 곡선 예측 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 휨강도 예측 결과를 정리하여 Table 1에 나타내었으며, SLS는 콘크리트와 철근의 재료계수를 적용하지 않았을 때의 예측 결과이고, ULS는 콘크리트와 철근의 재료계수를 적용했을 때의 예측 결과이다.

SC120f의 UHPFRC에서 기준 인장강도(7MPa)에 ±20%의 인장강도를 변수로 적용하여 휨강도를 예측한 결과는 기준 인장강도 대비 ±8%의 휨강도 변동영향을 나타낸다. SC150f 콘크리트는 기준 인장강도(9MPa) 대비 ±8~9% 수준의 휨강도 변동을 나타내고, SC180f 콘크리트는 기준 인장강도(11MPa) 대비 ±9% 수준의 휨강도 변동 결과를 나타낸다.

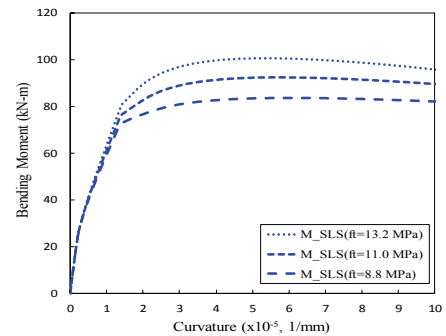
따라서 일반강도 및 고강도 콘크리트의 휨강도 예측과 달리 UHPFRC의 휨강도 예측 시에 UHPFRC의 인장강도는 주요 설계변



(a) SC120f



(b) SC150f



(c) SC180f

Fig. 3. Bending moment-curvature curve at various tensile strength of UHPFRC

수이며, 인장강도의 변동에 따라 휨강도 예측 수준에 큰 영향을 미치는 것으로 나타난다.

### 3.2 UHPFRC의 탄성계수 변동에 따른 휨강도 예측

3.1절의 수치 해석 경우와 동일한 단면 형상과 재료특성을 갖는 단면을 기준단면으로 설정하여 휨거동 예측을 수행하였다. 철근의 항복강도( $f_y$ )는 400MPa, 철근량은  $460mm^2$ 를 적용하였으며, 이 때의 철근비는 1.0%이다. SC120f, SC150f 및 SC180f 콘크리트의 기준 인장강도는 각각 7, 9 및 11MPa를 적용하였다. 해석변수인

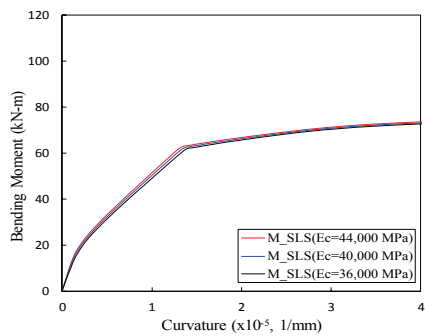
Table 2. Analytical results at various elastic modulus of UHPFRC

Mixture	Elastic modulus (MPa)	Bending strength		$\frac{M_{ULS}}{M_{SLS}}$
		$M_{SLS}$ (kN-m)	$M_{ULS}$ (kN-m)	
SC120f	44,000	75.21	61.60	0.82
	40,000	74.87	61.36	0.82
	36,000	74.44	61.06	0.82
SC150f	47,300	84.41	68.36	0.81
	43,000	83.86	67.95	0.81
	38,700	83.20	67.47	0.81
SC180f	49,500	93.09	75.52	0.81
	45,000	92.36	74.17	0.80
	40,500	91.54	73.57	0.80

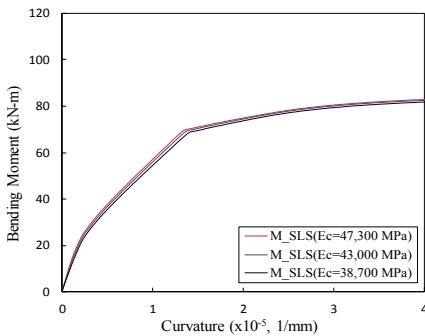
UHPFRC의 탄성계수의  $\pm 10\%$  변동값을 적용하였다. Table 2에 해석변수의 변동값을 나타내었다.

SC120f의 경우에 설계기준 탄성계수는 40,000MPa이고, 이에 대한  $\pm 10\%$  변동값으로서 각각 36,000 및 44,000MPa를 적용하였다. SC150f의 경우에 설계기준 탄성계수는 43,000MPa이고, 이에 대한  $\pm 10\%$  변동값으로서 각각 38,700 및 47,300MPa를 적용하였다. 또한, SC180f의 경우에 설계기준 인장강도는 45,000MPa이고, 이에 대한  $\pm 10\%$  변동값으로서 각각 40,500 및 49,500MPa를 적용하였다.

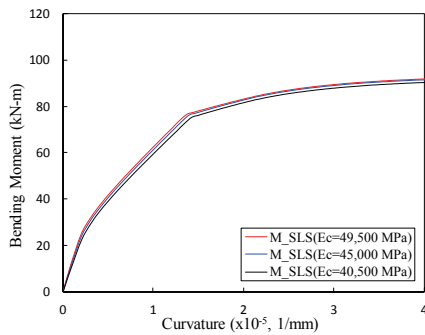
Fig. 4에 탄성계수 변동에 따른 휨모멘트-곡률 관계 예측 결과



(a) SC120f

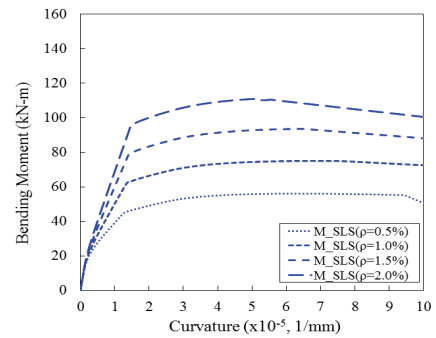


(b) SC150f

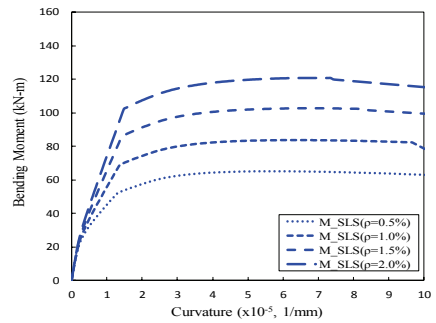


(c) SC180f

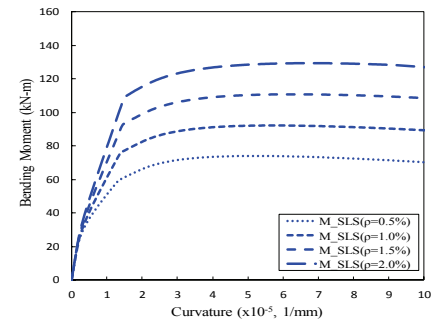
Fig. 4. Bending moment-curvature curve at various elastic modulus of UHPFRC



(a) SC120f



(b) SC150f



(c) SC180f

Fig. 5. Bending moment-curvature curve at various rebar ratio ( $f_y = 400\text{MPa}$ )

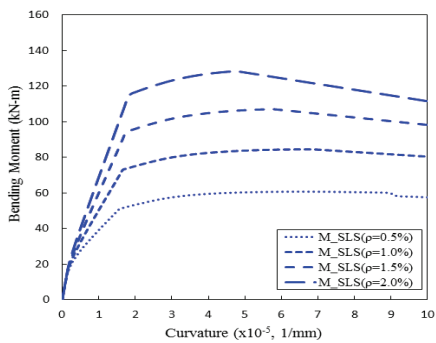
를 나타내었다. 휨모멘트-곡률 관계 예측 결과는 곡선의 기울기 즉, 휨강성의 차이를 나타내고, 휨강도는 뚜렷한 차이를 나타내지 않는다.

탄성계수 변동에 따른 휨강도 예측 결과를 정리하여 Table 2에 나타내었으며, SLS는 콘크리트와 철근의 재료계수를 적용하지 않았을 때의 예측 결과이고, ULS는 콘크리트와 철근의 재료계수를 적용했을 때의 예측 결과이다. SC120f, SC150f 및 SC180f UHPFRC의 탄성계수의 변동에 따른 휨강도 변화량은  $\pm 0.1\%$  수준으로 나타난다. 따라서 UHPFRC의 기준 탄성계수 대비 10% 수준의 탄성계수의 변동량은 휨강도에 뚜렷한 영향을 미치지 않는다는

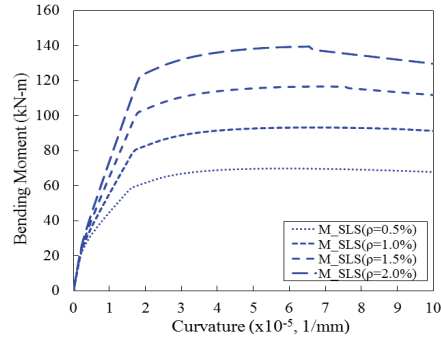
것을 나타낸다.

### 3.3 철근비 변동에 따른 휨강도 예측

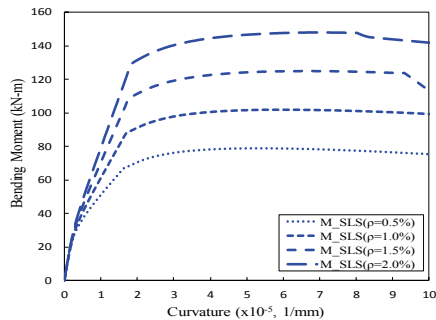
3.1절의 수치 해석 경우와 동일한 단면 형상을 기준단면으로 설정하여 휨거동 예측을 수행하였다. SC120f, SC150f 및 SC180f UHPFRC의 인장강도는 각각 7, 9 및 11MPa이고, 탄성계수는 40,000, 43,000 및 45,000MPa를 적용하였다. 철근의 항복강도 수준은 400, 500 및 600MPa로서 현재 국내에서 주로 사용되는 철근의 항복강도를 고려하였다.



(a) SC120f

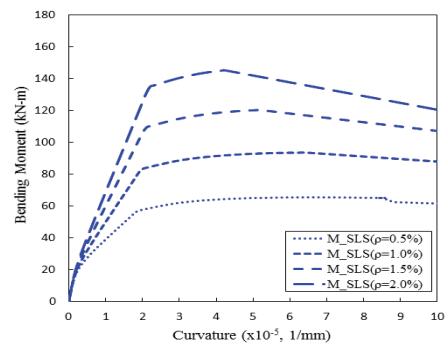


(b) SC150f

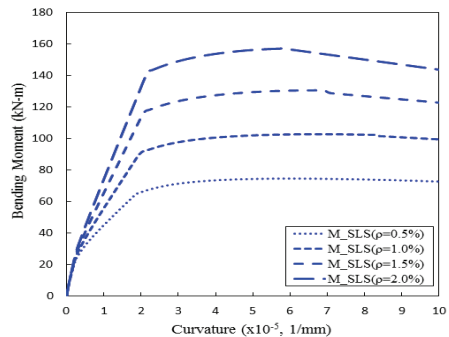


(c) SC180f

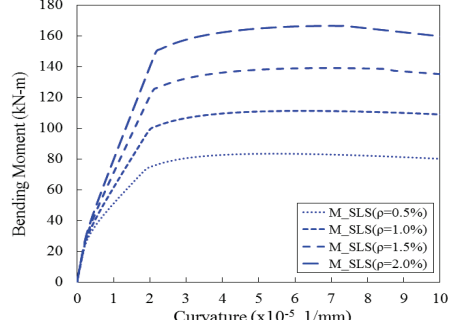
Fig. 6. Bending moment-curvature curve at various rebar ratio ( $f_y = 500\text{MPa}$ )



(a) SC120f



(b) SC150f



(c) SC180f

Fig. 7. Bending moment-curvature curve at various rebar ratio ( $f_y = 600\text{MPa}$ )

Table 3. Analytical results at various rebar ratio( $f_y=400\text{MPa}$ )

Mixtures	Yield strength of rebar(MPa)	Rebar ratio (%)	Bending strength		$\frac{M_{ULS}}{M_{SLS}}$	$\frac{M_{SLS\ case}}{M_{SLS\ Ref.}}$
			$M_{SLS}$ (kN-m)	$M_{ULS}$ (kN-m)		
SC120f	400	0.5	55.93	44.18	0.79	1.00
		1.0	74.87	61.36	0.82	1.34
		1.5	93.44	78.18	0.84	1.67
		2.0	111.30	94.48	0.85	1.99
SC150f	400	0.5	65.13	50.91	0.78	1.00
		1.0	83.86	67.95	0.81	1.29
		1.5	102.52	84.89	0.83	1.57
		2.0	120.93	101.55	0.84	1.86
SC180f	400	0.5	73.93	57.37	0.78	1.00
		1.0	92.36	74.17	0.80	1.25
		1.5	110.77	90.94	0.82	1.50
		2.0	129.17	107.69	0.83	1.75

Table 4. Analytical results at various rebar ratio( $f_y=500\text{MPa}$ )

Mixtures	Yield strength of rebar(MPa)	Rebar ratio (%)	Bending strength		$\frac{M_{ULS}}{M_{SLS}}$	$\frac{M_{SLS\ case}}{M_{SLS\ Ref.}}$
			$M_{SLS}$ (kN-m)	$M_{ULS}$ (kN-m)		
SC120f	500	0.5	60.76	48.56	0.80	1.00
		1.0	84.36	69.92	0.83	1.39
		1.5	107.11	90.61	0.85	1.76
		2.0	128.57	110.35	0.86	2.12
SC150f	500	0.5	69.91	55.25	0.79	1.00
		1.0	93.39	76.58	0.82	1.34
		1.5	116.63	97.61	0.84	1.67
		2.0	139.34	118.15	0.85	1.99
SC180f	500	0.5	78.66	61.66	0.78	1.00
		1.0	101.80	82.73	0.81	1.29
		1.5	124.92	103.76	0.83	1.59
		2.0	147.91	124.56	0.84	1.88

Table 5. Analytical results at various rebar ratio( $f_y=600\text{MPa}$ )

Mixtures	Yield strength of rebar(MPa)	Rebar ratio (%)	Bending strength		$\frac{M_{ULS}}{M_{SLS}}$	$\frac{M_{SLS\ case}}{M_{SLS\ Ref.}}$
			$M_{SLS}$ (kN-m)	$M_{ULS}$ (kN-m)		
SC120f	600	0.5	65.59	52.92	0.81	1.00
		1.0	93.72	78.39	0.84	1.43
		1.5	120.36	102.66	0.85	1.84
		2.0	145.29	125.42	0.86	2.22
SC150f	600	0.5	74.69	59.57	0.80	1.00
		1.0	102.89	85.16	0.83	1.38
		1.5	130.56	110.15	0.84	1.75
		2.0	157.14	134.32	0.85	2.10
SC180f	600	0.5	83.38	65.94	0.79	1.00
		1.0	111.22	91.26	0.82	1.33
		1.5	139.00	116.46	0.84	1.67
		2.0	166.35	141.15	0.85	2.00

인장지배 단면을 갖는 과소철근보로서, 철근비( $\rho$ )를 0.5, 1.0, 1.5 및 2.0%로 고려하여 힘 철근비를 설정하였다.

Fig. 5~7에 철근의 항복강도 수준이 400, 500 및 600MPa일 때 철근비의 변동에 따른 힘모멘트-곡률 관계 예측 결과를 나타내었다.

Table 3~5에 철근의 항복강도 수준별 철근비의 변동에 따른 휨강도 예측 결과를 나타내었다. 이때, SLS는 재료계수를 적용하지 않았을 때의 휨강도 예측 결과이고, ULS는 재료계수를 적용하였을 때의 휨강도 예측 결과이다.

철근의 항복강도가 400MPa인 경우, SC120f의 철근비가 0.5%일 때의 휨강도 대비 철근비가 1.0, 1.5 및 2.0%일 때의 휨강도는 각각 30, 67 및 99%만큼 증가하였다. SC150f의 철근비가 0.5%일 때의 휨강도 대비 철근비가 1.0, 1.5 및 2.0%일 때의 휨강도는 각각 29, 57 및 86%만큼 증가하고, SC180f의 철근비가 0.5%일 때의 휨강도 대비 철근비가 1.0, 1.5 및 2.0%일 때의 휨강도는 각각 25, 50 및 70%만큼 증가하였다.

따라서 철근비 변동에 따른 해석 결과는 철근비 변동에 따라 UHPFRC의 휨강도가 큰 영향을 받음을 나타낸다. 또한, 콘크리트 설계기준 압축강도가 클수록 철근비 증가에 따른 휨강도 증가율은 더 작음을 나타낸다.

철근의 항복강도가 500MPa인 경우, SC120f의 철근비가 0.5%일 때의 휨강도 대비 철근비가 1.0, 1.5 및 2.0%일 때의 휨강도는 각각 39, 76 및 112%만큼 증가하였다. SC150f의 철근비가 0.5%일 때의 휨강도 대비 철근비가 1.0, 1.5 및 2.0%일 때의 휨강도는 각각 34, 67 및 99%만큼 증가하고, SC180f의 철근비가 0.5%일 때의 휨강도 대비 철근비가 1.0, 1.5 및 2.0%일 때의 휨강도는 각각 29, 59 및 88%만큼 증가하였다.

철근의 항복강도가 600MPa인 경우, SC120f의 철근비가 0.5%일 때의 휨강도 대비 철근비가 1.0, 1.5 및 2.0%일 때의 휨강도는 각각 43, 84 및 122% 증가하였다. SC150f의 철근비가 0.5%일 때의 휨강도 대비 철근비가 1.0, 1.5 및 2.0%일 때의 휨강도는 각각 38, 75 및 110% 증가하고, SC180f의 철근비가 0.5%일 때의 휨강도 대비 철근비가 1.0, 1.5 및 2.0%일 때의 휨강도는 각각 33, 67 및 100% 증가하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 설계기준 압축강도가 각각 120, 150 및 180MPa인 UHPFRC의 주요 재료특성 관련 설계변수로서 UHPFRC의 인장강도의 변동, 탄성계수의 변동 및 인장철근비의 변동이 UHPFRC

의 휨강도에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

SC120f, SC150f 및 SC180f UHPFRC의 인장강도 변동량이  $\pm 20\%$  일 때 휨강도 예측 결과는  $\pm 8\sim 9\%$  수준의 휨강도 변동을 나타낸다. 수치 해석 결과는 UHPFRC의 인장강도의 변동이 휨강도 예측 수준에 큰 영향을 미치는 것을 나타낸다. 따라서 일반강도 및 고강도 콘크리트의 휨강도 예측과 달리 UHPFRC의 휨강도 예측 시에 UHPFRC의 인장강도는 매우 주요한 설계로 고려되어야 한다.

탄성계수 변동에 따른 힘모멘트-곡률 곡선 예측 결과는 곡선의 기울기 즉, 휨강성의 차이를 나타내고, 휨강도는 뚜렷한 차이를 나타내지 않는다. 따라서 SC120f, SC150f 및 SC180f UHPFRC의 기준 탄성계수 대비 10% 수준의 탄성계수 변동에 따른 휨강도 변화량은 뚜렷하지 않음을 나타낸다.

한편, 철근항복강도가 400MPa인 경우, 철근비가 0.5%일 때에 비해 철근비가 1.0, 1.5 및 2.0%일 때 SC120f의 휨강도는 각각 30, 67 및 99%만큼 증가하였다. 또한, 철근비가 0.5%일 때에 비해 철근비가 1.0, 1.5 및 2.0%일 때 SC150f의 휨강도는 각각 29, 57 및 86%만큼 증가하고, SC180f의 휨강도는 각각 25, 50 및 70%만큼 증가하였다. 따라서 철근비 변동에 따라 UHPFRC의 휨강도는 큰 영향을 받음을 나타내고, 콘크리트 설계기준 압축강도가 클수록 철근비 증가에 따른 휨강도 증가율은 더 작음을 나타낸다.

## 감사의 글

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

## References

- ACI Committee 318. (2008). Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-08) and Commentary, American Concrete Institute.
- AFGC/SETRA. (2002). Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes, Interim Recommendations, Bagneux, France.
- Chan, Y.W., Chu, S.H. (2004). Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete, *Cement and Concrete Research*, **34(7)**, 1167-1172.
- Graybeal, B.A. (2006). Material Property Characterization of Ultra High Performance Concrete, FHWA-HRT-06-103, 1-176.
- Hillerborg, A., Modeer, M., Petersson, P.E. (1976). Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement and Concrete Research*, **6(6)**, 773-782.
- Junichiro, N. (2006). Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures(Draft), Japan Society of Civil Engineers.
- KCI. (2012). Specifications for Structural Concrete, Korea Concrete Institute.
- Kitsutaka, Y. (1997). Fracture parameters by polylinear tension-softening analysis, *Journal of Engineering Mechanics*, **123(5)**, 444-450.
- Song, P.S., Hwang, S. (2004). Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, **18(9)**, 669-673.
- Yang, I.H., Joh, C.B., Kim, B.S. (2010a). Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending, *Engineering Structures*, **32(11)**, 3478-3487.
- Yang, I.H., Joh, C.B., Kim, B.S. (2010b). An experimental study on flexural behavior of steel fiber reinforced ultra high performance concrete prestressed girders, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **22(6)**, 777-786 [in Korean].
- Yang, I.H., Joh, C.B., Kim, B.S. (2011a). 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*, **24(3)**, 237-248 [in Korean].
- Yang, I.H., Joh, C.B., Kim, B.S. (2011b). Flexural strength of large scale ultra high performance concrete prestressed T-beams, *Canadian Journal of Civil Engineering*, **38(11)**, 1185-1195.
- Yang, I.H., Kim, K.C., Joh, C.B. (2015). Flexural strength of hybrid steel fiber-reinforced ultra-high strength concrete beams, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **27(3)**, 280-287 [in Korean].
- Yuguang, Y., Walraven, J., Uji, J.D. (2008). "Study on bending behavior of an UHPC overlay on a steel orthotropic deck," *Proceedings of 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, 639-646.

#### UHPFRC 보 힘 거동에 대한 설계변수 변동의 영향

이 연구에서는 UHPFRC의 주요 재료특성관련 설계변수로서 UHPFRC의 인장강도의 변동, 탄성계수의 변동 및 인장철근비의 변동이 UHPFRC의 휨강도에 미치는 영향을 해석적으로 파악하고자 하였다. UHPFRC의 인장강도 변동량이  $\pm 20\%$ 일 때 휨강도 예측 결과는  $\pm 8\sim 9\%$  수준의 휨강도 변동을 나타낸다. 수치 해석 결과는 UHPFRC의 인장강도의 변동이 휨강도 예측 수준에 큰 영향을 미치는 것을 나타낸다. 탄성계수 변동에 따른 휨모멘트-곡률 곡선 예측 결과는 곡선의 기울기, 즉 휨강성의 차이를 나타내고, 휨강도는 뚜렷한 차이를 나타내지 않는다. 한편, 철근항복강도가 400MPa인 경우, 철근비가 0.5%일 때에 비해 철근비가 1.0, 1.5 및 2.0%일 때 SC120f의 휨강도는 각각 30, 67 및 99%만큼 증가한다. 또한, 철근비가 0.5%일 때에 비해 철근비가 1.0, 1.5 및 2.0%일 때 SC150f의 휨강도는 각각 29, 57 및 86%만큼 증가하고, SC180f의 휨강도는 각각 25, 50 및 70%만큼 증가하였다. 따라서 철근비 변동에 따라 UHPFRC의 휨강도는 큰 영향을 받음을 나타내고, 콘크리트 설계기준 압축강도가 클수록 철근비 증가에 따른 휨강도 증가율은 더 작음을 나타낸다.