

강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 인장 특성 실험 연구

An Experimental Study on Tensile Properties of Steel Fiber-Reinforced Ultra High Strength Concrete

양인환^{1*} · 박지훈² · 이재호³

In-Hwan Yang^{1*} · Ji-Hun Park² · Jae-Ho Lee³

(Received September 10, 2019 / Revised September 19, 2019 / Accepted September 19, 2019)

In this study, an experimental study on the tensile properties of steel fiber-reinforced ultra high strength concrete(UHSC) with a standard compressive strength of 180MPa was performed. Steel fibers with a volume ratio of 1% were mixed to prepare direct tensile strength specimens and prism specimens for the three-point bending test. The fabricated specimens were set up in the middle section of the specimen to induce cracks, and the test was carried out according to each evaluation method. First, the stress-strain curves were analyzed by performing direct tensile strength tests to investigate the behavior characteristics of concrete after cracking. In addition, the load-CMOD curve was obtained through the three-point bending test, and the inverse analysis was performed to evaluate the stress-strain curve. Tensile behavior characteristics of the direct tensile test and the three-point bending test of the indirect test were similar. In addition, the tensile stress-strain curve modeling presented in the SC structural design guidelines was performed, and the comparative analysis of the measured and predicted values was performed. When the material reduction factor of 1.0 was applied, the predicted value was similar to the measured value up to the strain of 0.02, but when the material reduction factor of 0.8 was applied, the predicted value was close to the lower limit of the measured value. In addition, when the strain was greater than 0.02, the predicted value by SC structural design guideline underestimated the measured value.

키워드 : 직접인장강도, 균열개구변위, 균열 후 거동, 변형을 경화

Keywords : Direct tensile strength, Crack mouth opening displacement, Post-cracking behavior, Strain hardening

1. 서론

초고층 빌딩 및 장대교량과 같은 대규모 콘크리트 구조물의 수요가 증가함에 따라 높은 강도와 내구성을 갖는 콘크리트의 개발 연구가 국내외에서 활발히 이루어지고 있다. 현재까지 연구된 여러 종류의 콘크리트 중 강섬유를 혼입한 초고강도 콘크리트(fiber-reinforced ultra high-strength concrete, UHSC)는 기존 콘크리트의 취약한 인장강도를 향상시키고 우수한 균열 후 거동을 나타내는 특징을 지니며, 기존 콘크리트를 보완할 차세대 재료로 우수한 성능을 보유하고 있다. 따라서, 강섬유 보강 UHSC의 인장 강도 및 인장강도에 도달한 이후의 균열 후 거동(post-cracking

behavior) 특성을 파악하는 것이 중요하다(Bae et al. 2015).

강섬유 보강 콘크리트의 거동 특성 및 평가를 위한 여러 연구가 진행되었다. Kang et al.(2010)는 강섬유를 혼입한 초고성능 콘크리트의 인장 파괴 특성에 관한 연구를 하였으며, Stephanie et al.(2010)은 휨을 받는 섬유보강 초고성능 콘크리트 보의 처짐 및 휨강도에 관한 연구를 수행하였다. 또한, Park and Lee(2017)은 초고성능 콘크리트의 인장강도 특성에 대하여 규명하였다. 그러나, 기존에 수행된 대부분의 강섬유 보강 콘크리트에 대한 재료 및 인장 거동에 관한 연구는 압축강도 100MPa 이내의 일반 강도 및 고강도 범주에 속하는 강섬유 보강 콘크리트를 대상으로 수행되었으며(Bing and Juanyu 2004), 이 연구에서 대상으로 하고 있

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

¹군산대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk, 54150, Korea)

²군산대학교 토목공학과 박사과정 (Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk, 54150, Korea)

³군산대학교 토목공학과 석사과정 (Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk, 54150, Korea)

는 100MPa 이상의 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 인장강도 특성을 파악하는 데 한계가 있다.

한편, 일반 콘크리트의 인장강도를 측정하기 위해서 4점 하중재하 인장강도시험과 쪼갬인장강도시험이 주로 사용되었다(Kang and Kim 2011). 그러나, 4점 하중재하 인장강도시험과 쪼갬인장시험을 통해 통상적인 강섬유 보강 콘크리트 및 UHSC의 균열 후 거동을 파악하는데 한계가 있다. Kang and Kim(2012)는 강섬유 보강 UHSC의 4점 하중재하 휨인장강도시험에서 하중재하 시 다수의 미세균열이 발생하기 때문에 변형이 경화되는 현상을 보여 인장거동 특성을 측정하는데 적절하지 않다고 하였다. 이에 대한 대안으로 AFGC/SETRA(2002) 및 SUPER Concrete 구조설계지침(KCI 2017)은 강섬유 보강 UHSC의 인장거동 특성을 파악하기 위해서 노치(notch)를 갖는 시편을 이용한 직접인장강도 실험과 3점 하중재하 휨 실험에 대한 관심이 증가하고 있는 추세이다(Park et al. 2014). 직접인장강도 실험을 수행하기 위해서는 하중의 편심 재하를 방지하기 위한 정밀한 지그가 필요하다. 반면에, 직접인장강도 실험에 비해 3점 하중재하 휨 실험은 간단하지만, 하중-균열개구변위 측정값을 이용하여 역해석을 추가로 수행하여야 한다(Yang et al. 2015).

따라서, 본 연구에서는 직접인장강도 실험과 3점 하중재하 휨 실험을 통하여 압축강도 180MPa 이상을 갖는 강섬유 보강 UHSC의 인장강도 특성을 파악하고 비교하였다. 먼저, 노치가 있는 박판 시편을 이용하여 직접인장강도 실험을 수행한 후 UHSC의 인장거동 특성을 파악하였다. 아울러, 노치가 있는 프리즘 시편을 이용하여 3점 하중재하 휨 실험을 수행한 후, 역해석을 통한 결과값을 도출하여 UHSC의 인장거동을 분석하였다. 또한, SC 구조설계지침에서 제시하고 있는 인장응력-변형률 관계 곡선을 기준으로 모델링하여 직접시험방법 및 간접시험방법과의 비교분석을 수행하였다.

2. UHSC 배합

본 연구에서는 콘크리트 부피비 1.0%의 강섬유로 혼입한 초고강도 콘크리트를 제작하였다. 배합에 사용된 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트이며, 반응성 분체로 지르코늄을 사용하였다. 또한, 사용된 잔골재 입도 0.5mm 이하의 모래를 사용하였다.

물-결합재비(W/B)는 0.18를 적용하였고, 낮은 물-결합재비에 의한 비빔 작업성을 확보하기 위하여 밀도 1.01g/cm³의 폴리카르본산계 고성능 감수제를 사용하였다. 또한, 초고성능 콘크리트에서 사용되는 충전재(filler)는 구성 입자들의 평균 크기가 약 4μm이며, SiO₂ 96% 이상, 밀도 2.60g/cm³의 재료를 사용하였다.

배합에 사용된 강섬유는 밀도 7,500kg/cm³이고, 인장강도는 2,500MPa이다. 사용된 강섬유의 종류는 직경 0.2mm이며, 길이는 19.5mm의 직선 형상을 갖는 강섬유를 적용하였다. 다음 Fig. 1에 배합에 사용된 강섬유를 나타내었고, Table 1에 배합표를 나타내었다.



Fig. 1. Shape of steel fiber

Table 1. Mix proportion

Mixture	fck (MPa)	W/B (%)	Unit weight(kg/m ³)				Contents of steel fiber(V _f)(%)	
			W	OPC	Zr	F.A		F
F10	180	0.18	178	783	196	862	235	1.0%±1.0%(19.5mm)

W: water, B: binder, OPC: ordinary portland cement, Zr: zirconium, FA: fine aggregate, F: filler

3. UHSC 재료 특성

3.1 압축강도 실험

UHSC의 압축강도를 측정하기 위하여 직경 100mm, 높이 200mm를 갖는 원주형 공시체를 제작하였다. 실험결과를 신뢰도를 향상하기 위하여 시편은 2회의 배치(batch)로 나뉘어 제작하였다. 시편은 타설 완료 후 초기 1일 동안 습윤양생을 하였으며, 72시간 동안 90±5℃ 조건에서 증기양생을 실시하였다.

양생 완료된 시편에 대해서 압축강도와 탄성계수를 측정하기 위하여 2,000kN 용량의 콘크리트 압축강도 강도 시험기를 사용하였다. 하중재하 전 공시체 원주방향으로 3개의 LVDT를 120° 간격으로 설치하였다. LVDT는 공시체 중앙 100mm구간에 설치하여 하중재하 시 변위를 측정하였다.

제작된 시편을 실험하여 얻은 결과를 Table 2에 나타내었다. 극한 압축강도일 때, UHSC의 변형률은 0.004 정도이며, 보통강도 콘크리트의 극한변형률인 0.003을 상회하고 있다. 또한, 각 배합의 압축강도는 203.3 및 198.5MPa 이상을 나타내었으며, 이는 설계압축강도를 상회하는 것으로 나타났다.

Table 2. Test result of compressive strength

Mixture	Steel fiber(v_f)(%)	Batch	f_{ck} (MPa)	E_c (MPa)	ϵ_{cu}
F10	1.0	1	203.3	52,403	0.00426
		2	198.5	52,312	0.00414

3.2 직접인장강도 실험

시편의 중앙단면에 노치를 갖는 시편을 사용하여 UHSC의 직접인장강도 실험을 수행하였다. 직접인장강도 시편은 콘크리트 타설 후 1일 동안 습윤양생을 하였으며, 이후 72시간 동안 90±5℃ 조건에서 증기양생을 실시하였다. 실험결과와 오차를 최소화하기 위하여 2회의 배치로 콘크리트 배합을 수행하고, 배치 별로 3개의 시편을 제작하여 직접인장강도 실험을 수행하였다.

Fig. 2의 (a)와 같이 시편 중앙 단면에 폭 2mm, 깊이 12.5mm의 노치를 두어 중앙 단면에서 균열 발생을 유도하였다. 직접인장강도 실험은 Fig. 2의 (b)와 같이 시편의 양단을 핀 지점(pin support)으로 하여 하중의 편심 재하를 방지하고자 하였다. 인장실험은 30ton 용량의 만능재료시험기(universal testing machine, UTM)로 진행하였다. 시편에 인장력을 가하는 동안 인장균열은 노치에 집중되어 발생하였으며, 클립게이지(clip gauge)를 이용하여 노치에서의 인장균열 즉, 균열개구변위(crack mouth opening displacement, CMOD)를 측정하였다. 이후 균열개구변위를 사용하여 인장변형률을 산정하였다.

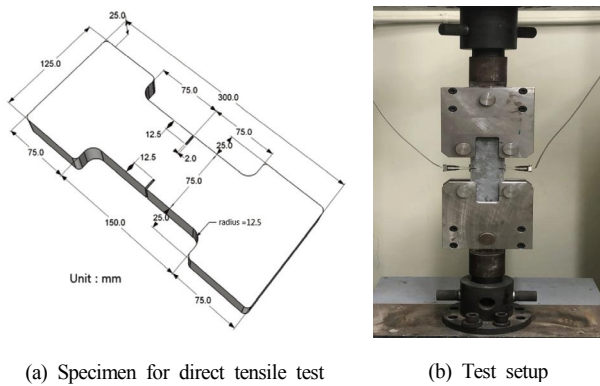
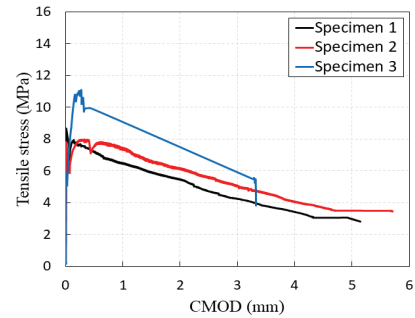
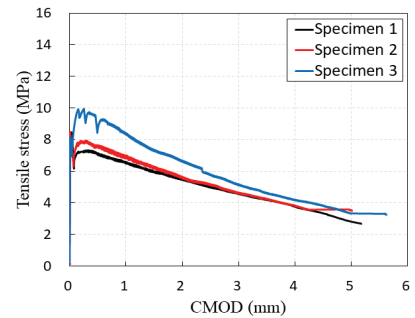


Fig. 2. Direct tensile strength test

Fig. 3~4에 각 배치별 시편의 인장응력-CMOD 관계 곡선과 인장응력-변형률 관계 곡선을 나타내었다. UHSC의 인장응력은 균열인장강도(cracking tensile strength) 도달 후에 최대인장강도까지 증가하는 현상을 나타낸다. 즉, 실험결과는 강섬유가 초기균열과 인장강도 사이 구간의 균열 후 거동과 더불어 변형률경화(strain

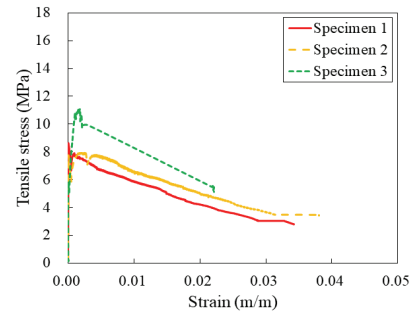


(a) 1 batch

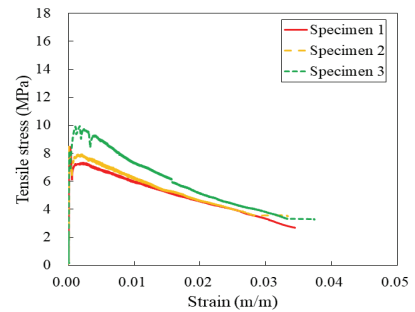


(b) 2 batch

Fig. 3. Direct tensile stress-CMOD curve



(a) 1 batch



(b) 2 batch

Fig. 4. Direct tensile stress-strain curve

hardening) 현상을 나타내는 것을 의미한다. 이러한 변형률경화 현상은 일반 콘크리트에서는 나타나지 않으며, 균열 후 거동 단계에서 균열 사이의 강섬유가 효과적으로 균열 진전을 제어하고 있는 것을 나타낸다. 최대인장강도 이후에 인장응력은 점진적으로 감소한다.

인장응력의 점진적인 감소는 일반 콘크리트에 비해 UHSC의 인성효과가 우수함을 나타낸다.

Table 3에 강섬유 혼입량에 따른 직접인장강도 실험결과를 나타내었다. 강섬유량(v_f)=1.0%의 균열인장강도는 7.8MPa이고 인장강도(tensile strength)는 9.1MPa를 나타낸다.

Table 3. Test result of direct tensile strength

Mixture	Steel fiber(v_f)(%)	Batch	Specimen	f_{cr} (MPa)	$f_{L,max}$ (MPa)
F10	1.0	1	1	8.6	8.6
			2	7.7	7.9
			3	5.8	11.1
			Mean	7.4	9.2
		2	1	8.2	8.4
			2	8.5	8.5
			3	8.1	9.9
			Mean	8.3	8.9
Mean of all specimens				7.8	9.1

3.3. 3점 하중재하 휨 실험

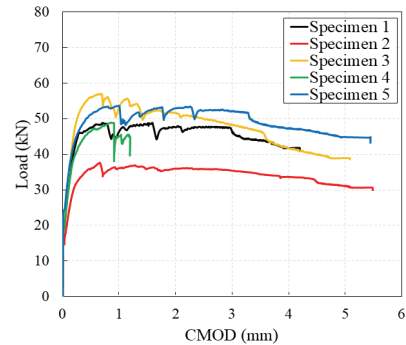
UHSC의 균열 후 인장거동 특성을 파악하기 위하여 노치가 있는 프리즘 시편을 제작하여 3점 하중재하 휨실험을 수행하였다. 프리즘 시편의 단면은 사각 단면 형상이고, 시편의 크기는 100mm(가로)×100mm(세로)×400mm(길이)이다. 시편은 콘크리트 타설 후 1일 동안 습윤양생을 하였으며, 72시간 동안 90±5°C 조건에서 증기양생을 실시하였다. 노치는 시편의 타설면을 기준으로 90° 회전하여 제작하였으며, 시편 중앙단면에 위치한 노치의 깊이는 10mm이고 폭은 3.44mm이다.

시편의 중앙 단면에서 하중을 재하하였으며, 시편의 순지간은 300mm이다. 하중은 변위제어방식으로 0.3mm/min 속도로 재하하였다. 프리즘 시편 하면의 노치 양쪽 끝에 5mm 용량의 균열계이치를 설치하여 Fig. 5에 나타난 바와 같이 노치의 균열개구변위를 측정하였다. 또한, 시편의 처짐을 측정하기 위해 용량 10mm의 LVDT 3개를 설치하였다. LVDT는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 지간 중앙 단면 및 지간 중앙 단면에서 좌·우로 각각 50mm 떨어진 곳에 위치한다.

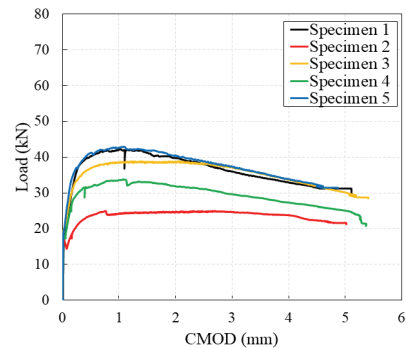


Fig. 5. Three-point bending test

SUPER Concrete 구조설계지침(KCI 2017)에서는 직접인장강도 실험을 기본적인 시험방법으로 제시하고 있으나, 노치를 갖는 프리즘 시편의 3점 하중재하를 통한 균열개구변위 시험결과를 이용하여 역해석 결과를 바탕으로 인장응력-CMOD 관계를 구하는 방법도 제안하고 있다. 노치를 갖는 프리즘 시편의 하중-CMOD 측정값을 이용하여 역해석(inverse analysis)을 수행한 후 인장응력-CMOD 곡선을 산정할 수 있다. 따라서, Fig. 6~7에 프리즘 시

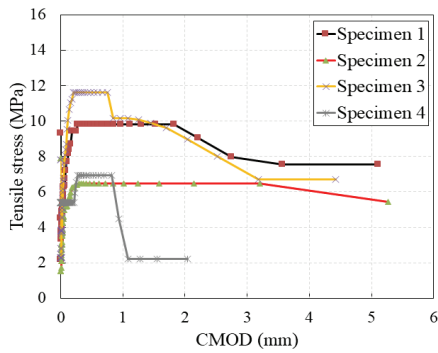


(a) 1 batch

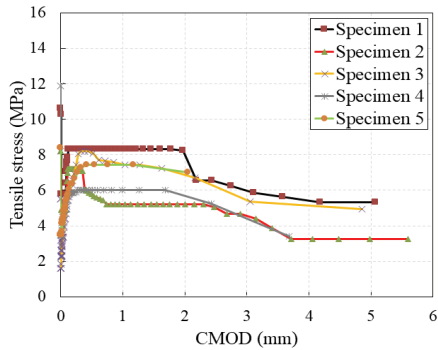


(b) 2 batch

Fig. 6. Load-CMOD curve



(a) 1 batch



(b) 2 batch

Fig. 7. Tensile stress-CMOD curve

Table 4. Tensile strength inverse analysis results

Mixture	Steel fiber (v_f)(%)	Bacth	Specimen	Maximum loading of CMOD test(kN)	Tensile strength (inverse analysis)(MPa)
F10	1.0	1	1	48.8	9.8
			2	37.7	6.5
			3	57.0	11.6
			4	48.9	6.9
			5	53.6	-
			Mean	49.2	8.7
		2	1	42.1	8.3
			2	25.1	7.2
			3	38.8	8.2
			4	33.9	8.2
			5	42.9	7.4
Mean	36.6	7.9			
Mean of all specimens				42.9	8.3

편의 하중-CMOD 곡선과 위의 측정값을 사용하여 역해석으로부터 구한 인장응력-CMOD관계곡선을 나타내었다.

Table 4에 프리즘 시편의 3점 하중재하 실험결과를 이용하여 역해석으로부터 구한 인장강도를 나타내었다. 직접인장강도 실험에 의한 인장강도는 9.1MPa인 반면에, 3점 하중재하 실험결과에 의한 인장강도는 8.3MPa를 나타낸다. 따라서, 본 연구에서의 직접 인장강도 실험에 의한 인장강도와 3점 하중재하 실험에 의한 인장 강도는 거의 유사한 결과를 나타낸다.

4. UHSC의 인장응력-변형을 곡선 모델링

UHSC를 이용한 구조물 설계가 이루어지기 위해서는 우선적으로 재료의 역학적 거동 특성을 명확히 규명하여야 하며, 일반 콘크리트와 비교할 때 가장 큰 특징은 구조적으로 유효한 인장강도 및 인장거동이다. 따라서 UHSC를 활용한 적절한 설계가 되기 위해서는 특히 UHSC의 인장거동의 특성을 나타내는 구성모델의 확립이 매우 중요하다.

UHSC의 가장 큰 장점 중의 하나는 인장강도의 향상과 높은 인성을 들 수 있다. UHSC의 직접인장강도는 10MPa 이상을 나타내고, 변형을 경화거동을 보여 높은 연성과 인성을 나타낸다.

우리나라는 SUPER Concrete 구조설계지침(KCI 2017)에서 UHPC의 설계기준을 제시하고 있다. 현재까지 전세계적으로 UHPC를 이용한 구조물 설계에 가장 일반적으로 사용되고 있는 설계기준 또는 지침으로는 프랑스의 SETRA-AFGC 설계기준 (AFGC/SETRA 2002)과 일본의 초고강도 섬유보강 콘크리트의 설계·시공지침(안)(JSCE 2006)이 있다. 이 외에도 독일 DAfStB의 UHPC 설계기준(안)(DAfStB 2004), 호주의 UHPC를 이용한 프리스트레스 콘크리트 보에 대한 설계 가이드라인(Gowripalan and Gilbert 2000) 등이 있다.

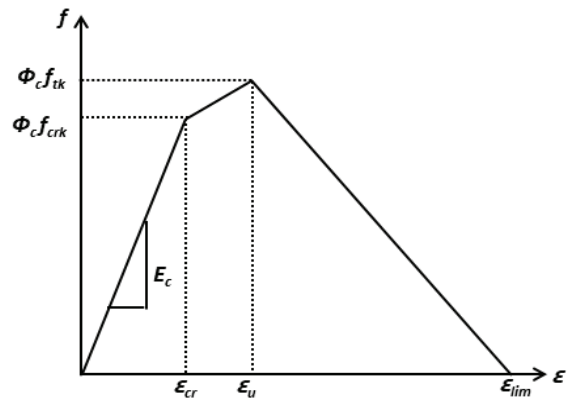


Fig. 8. Tensile stress-strain modeling curve (SUPER Concrete structural design guidelines)

UHPC의 인장강도 검토에 있어서 직접인장강도 실험을 통해 인장연화곡선을 구하지 않을 경우, SUPER Concrete 구조설계지침(KCI 2017)의 인장응력-변형률 관계는 Fig. 8에 나타난 곡선을 이용할 수 있다. 이는 등가검장 길이(L_{eq})를 이용하여 인장응력-변형률 관계 곡선을 모델링하는 기법이다. 또한, 인장거동에 대한 재료저감계수(ϕ_c)를 0.80을 제시하고 있다. 등가검장 길이를 구하는 수식은 다음과 같고, 각각에 해당되는 거동 특성점의 수식은 다음과 같다.

$$\varepsilon_{cr} = \frac{\phi_c f_{crk}}{E_c} \quad (1)$$

$$\varepsilon_u = \varepsilon_{cr} + \left(\frac{W_u}{L_{eq}} \right) \quad (2)$$

이때, 등가검장 길이를 구하는 관계식은 다음과 같다.

$$L_{eq} / h_{beam} = 0.8 \left\{ 1 - 1 / (1.05 + 6h_{beam} / l_{ch})^4 \right\} \quad (3)$$

여기서, l_{ch} : 특성길이($= G_F E_c / f_{tk}^2 = 1.01 \times 10^4 \text{mm}$)

G_F : 파괴에너지(= 37.9MPa)

E_c : 탄성계수

f_{tk} : 인장강도

f_{td} : 설계인장강도($f_{td} = \phi_s f_{tk}$)

f_{crk} : 균열발생강도 기준값

f_{crd} : 설계균열발생강도($f_{crd} = \phi_s f_{crk}$)

ϕ_c = 재료저감계수(=0.80)

$$\varepsilon_{lim} = \varepsilon_{cr} + \frac{W_{lim}}{L_{eq}} \quad (4)$$

Fig. 9에 프리즘 시편 휨 실험결과와 역해석 결과를 식 (1)~(4)를 사용하여 산정한 인장응력-변형률 모델링 곡선과 직접인장강도 실험결과를 식 (1)~(4)를 사용하여 산정한 인장응력-변형률 모델링 곡선을 나타내었다. 두 시험 방법에 의한 인장응력-변형률 모델링 곡선은 유사하게 나타났으며, 이 결과를 토대로 간접시험 방법의 결과값이 신뢰성 있는 자료로 사용되기에 적합하다고 판단 된다.

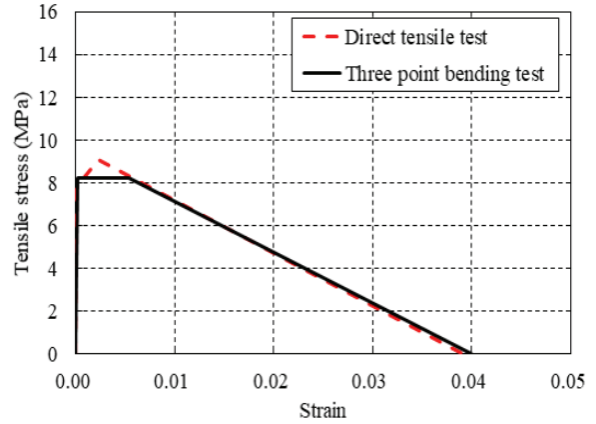
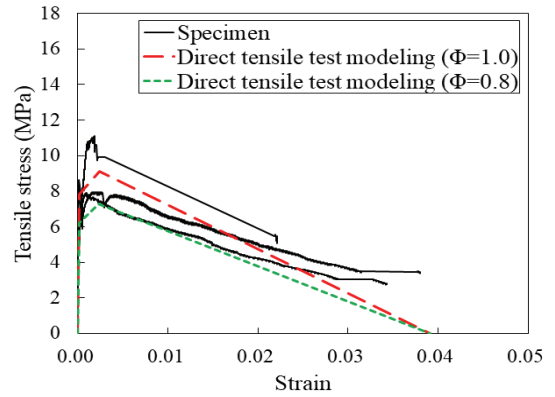
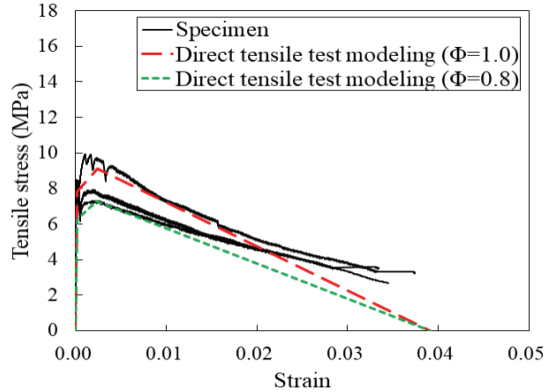


Fig. 9. Comparison of tensile stress-strain modeling curves for concrete



(a) 1 batch



(b) 2 batch

Fig. 10. Comparison of tensile stress-strain and modeling

한편, 직접인장강도 실험으로부터 측정된 인장응력-변형률 관계 곡선과 설계기준 제안식에서 재료감소계수(ϕ_c)가 각각 0.8과

1.0을 사용하여 산정한 인장응력-변형률 모델링 곡선을 Fig. 10에 나타내었다. 재료감소계수가 1.0일 때 변형률이 약 0.02일 때까지 설계기준에 의한 모델링 곡선은 측정 인장응력-변형률 곡선과 거의 유사하게 나타난다. 하지만 변형률이 0.02를 초과하는 구간에서 설계기준에 의한 인장응력 예측값은 측정 인장응력을 과소평가하는 것으로 나타난다. 재료감소계수가 0.8일 때 변형률이 약 0.02 일 때까지 설계기준에 의한 모델링 곡선은 측정 인장응력-변형률 곡선의 최소 곡선(lower curve)에 근접한다. 반면에, 변형률이 0.02를 초과하는 구간에서 설계기준에 의한 인장응력 예측값은 측정 인장응력을 과소평가하는 것으로 나타난다. 또한, 설계 코드 모델링 곡선의 최대 변형률(ϵ_{lim})은 측정 변형률보다 매우 작게 나타난다.

5. 결론

본 연구에서는 압축강도 180MPa 수준의 강섬유를 혼입한 초고강도 콘크리트의 인장강도실험을 통해 거동 특성을 분석하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

1. 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 인장응력은 균열인장강도 도달 후에 최대인장강도까지 증가하는 현상을 나타낸다. 즉, 강섬유가 초기균열과 인장강도 사이 구간의 균열 후 거동과 더불어 변형률 경화 현상을 나타내는 것을 의미하며, 균열 후 거동 단계에서 균열 사이의 강섬유가 효과적으로 균열 전을 제어하고 있는 것을 나타낸다.
2. 최대인장강도 이후에 인장응력은 점진적으로 감소한다. 인장응력의 점진적인 감소는 일반 콘크리트에 비해 강섬유 보강의 인성효과가 우수함을 나타낸다.
3. 직접인장강도 실험에 의한 인장강도는 9.1MPa인 반면에, 3점 하중재하 실험결과에 의한 인장강도는 8.3MPa를 나타낸다. 따라서, 본 연구에서의 직접인장강도 실험에 의한 인장강도와 3점 하중재하 실험에 의한 인장강도는 거의 유사한 결과를 나타낸다.
4. 재료감소계수가 1.0일 때, 변형률이 약 0.02일 때까지 모델링 곡선은 측정 인장응력-변형률 곡선과 거의 유사하게 나타난다. 하지만 변형률이 0.02를 초과하는 구간에서 설계기준에 의한 인장응력 예측값은 측정 인장응력을 과소평가하는 것으로 나타난다. 반면, 재료감소계수가 0.8일 때, 변형률이 약 0.02까지의 모델링 곡선은 측정 인장응력-변형률 곡선의 최

소 곡선에 근접하고, 변형률이 0.02를 초과하는 구간에서 인장응력 예측값은 측정 인장응력을 과소평가하는 것으로 나타난다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 환경정책 기반공공기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2016000700003).

References

- AFGC/SETRA. (2002). Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes, Recommendations provisoires.
- Bae, B.I., Choi, H.K., Choi, C.S. (2015). Correlation between tensile strength and compressive strength of ultra high strength concrete reinforced with steel fiber, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **27(3)**, 253-263 [in Korean].
- Bing, C., Juanyu, L. (2004). Effect of aggregate on the fracture behavior of high strength concrete, *Construction and Building Materials*, **18(8)**, 585-590.
- DafStb. (2004). Ultra High Performance Concrete (UHPC), International Symposium on Ultra High Performance Concrete.
- Gowripalan, N., Gilbert, R.I. (2000). Design Guidelines for RPC Prestressed Concrete Beams, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales.
- JSCE. (2006). Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures (Draft), Research of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Japan Society of Civil Engineers, 9.
- Kang, S.T., Lee, Y., Park, Y.D., Kim, J.K. (2010). Tensile fracture properties of an ultra high performance fiber reinforced concrete(UHPFRC) with steel fiber, *Composite Structures*, **92(1)**, 61-71.
- Kang, S.T., Kim, J.K. (2011). The relation between fiber orientation and tensile behavior in an ultra high performance fiber reinforced cementitious composites(UHPFRCC), *Cement and Concrete Research*, **41(10)**, 1001-1014.

- Kang, S.T., Kim, J.K. (2012). Numerical simulation of the variation of fiber orientation distribution during flow molding of ultra high performance cementitious composites(UHPCC), *Cement and Concrete Composites*, **34(2)**, 208–217.
- KCI. (2017). SUPER Concrete Structural Design Guidelines, Construction & Transportation Research Planning Report [in Korean].
- Park, J.W., Lee, G.C. (2017). Effect of compressive strength and curing condition on the direct tensile strength properties of ultra high performance concrete, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, **17(2)**, 175–81 [in Korean].
- Park, K.Y., Lee, J.S., Kim, W., Kim, D.J., Lee, G.Y. (2014). Tension stiffening effect of RC tension members reinforced with amorphous steel fibers, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **26(5)**, 581–589 [in Korean].
- Stephanie, J.B., Jean, F.L., Tony, P., Steve, G.M., Marios, N.S. (2010). Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength, *Materials and Structures*, **43(7)**, 1009–1023.
- 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].

강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 인장 특성 실험 연구

본 연구에서는 기준압축강도 180MPa의 강섬유 보강 초고강도 콘크리트(UHSC)의 인장 특성에 관한 실험 연구를 수행하였다. 부피비 1%의 강섬유를 혼입하여 직접인장강도 시편과 3점 하중재하 힘 실험을 위한 프리즘 시편을 제작하였다. 제작된 시편은 균열 유도를 위하여 시편 중앙에 노치를 설정하였으며, 각 평가방법에 따라 실험을 수행하였다. 우선, 콘크리트의 균열 후 거동 특성을 파악하기 위하여 직접인장강도 실험을 수행하여 응력-변형률 곡선을 분석하였으며, 3점 하중재하 힘 실험을 통하여 하중-CMOD 곡선을 얻고, 역해석을 수행하여 응력-변형률 곡선을 분석하였다. 직접인장강도 실험과 3점 하중재하 힘 실험의 인장거동 특성은 유사하게 나타났다. 또한, SC 구조설계지침에서 제시하고 있는 인장응력-변형률 곡선 모델링을 수행하고, 측정값과 예측값의 비교분석을 수행하였다. 재료감소계수가 1.0일 때, 변형률이 0.02일 때까지 예측값은 측정값과 유사하게 나타나지만, 재료감소계수가 0.8일 때, 예측값은 측정값의 최소값에 근접한다. 또한, 변형률이 0.02를 초과하는 구간에서는 SC 구조설계지침에 의한 예측값이 측정값을 과소평가한다.