



하이브리드 강섬유로 보강된 UHPC의 파괴거동

임우영¹⁾ · 홍성걸^{2)*}

¹⁾서울대학교 공학연구원 ²⁾서울대학교 건축학과

Fracture Behavior of UHPC Reinforced with Hybrid Steel Fibers

Woo-Young Lim¹⁾ and Sung-Gul Hong^{1)*}

¹⁾Institute of Engineering Research, Seoul National University, Seoul, 08826, Rep. of Korea

²⁾Dept. of Architecture & Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Rep. of Korea

ABSTRACT In this study, direct tension test for hybrid steel fiber reinforced ultra-high performance concrete (UHPC) containing two different steel fibers with a length of 16 and 19 mm was performed to investigate the fracture behavior of UHPC. Test results showed that crack strength and tensile strength, and fracture energy increased with increasing the fiber volume ratio. Based on the test results, the peak cohesive stress at the crack tip, tensile strength, and fracture energy depending on the fiber volume ratio were proposed. The proposed tensile strength of UHPC was suggested as a function of the fiber volume ratio and compressive strength. The peak cohesive stress at the crack tip and fracture energy were also proposed as a function of the tensile strength. The predicted values were relatively agree well with the test results. Thus, the proposed equations is expected to be applicable to UHPC with a compressive strength of 140~170 MPa and a fiber volume ratio of less than 2%.

Keywords : ultra-high performance concrete, fracture behavior, initial cracking strength, tensile strength, fracture energy

1. 서 론

하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트(Hybrid steel fiber reinforced ultra-high performance concrete, 이하 UHPC)는 서로 다른 두 종류의 강섬유를 혼입하여 만든 초고성능 콘크리트이며, 압축강도가 매우 높은 시멘트 복합체(cementitious composites)에 강섬유를 혼입하여 인장강도와 휨인성 등을 향상시킨 신개념 건설재료이다. 기존 연구에 따르면, UHPC의 재료특성은 강섬유 혼입률, 섬유보강지수, 강섬유의 형상 등 다양한 변수에 따라 그 성능이 달라지는 것으로 알려져 있다.^{1,2)} 강섬유가 혼입된 UHPC는 최대 압축강도가 200 MPa에 이르며, 탄성계수는 45~55 MPa, 그리고 인장강도는 10 MPa 이상의 값을 나타낸다. 기존의 일반강도 또는 고강도 강섬유 보강 콘크리트에 비해 인장성능을 향상시킨 UHPC가 건축물에 효율적으로 사용되기 위해서는 UHPC의 인장거동 특성이 규명될 필요가 있다.

UHPC에 대한 설계기준인 AGFC-SETRA³⁾와 초고성능

콘크리트 구조설계지침⁴⁾에 따르면, UHPC의 인장응력-변형률 곡선은 직접인장강도 시험방법으로 구하도록 권고하고 있지만, 기존의 많은 연구자들은 직접인장강도 시험방법보다는 휨인장 실험을 통해 UHPC의 인장강도를 구하고 있다. 현행 설계기준에서는 해석을 위한 인장응력-변형률 관계는 휨실험 결과를 역해석하여 구하고 있으며, 이 때 균열폭과 특성길이 등을 사용한다. 하지만, 이러한 방식은 다소 복잡한 단계를 거쳐야 하는 어려움이 있을 뿐만 아니라 휨실험을 통해 구한 인장응력은 직접인장실험을 통해 구한 인장응력과는 차이가 있다. 따라서 직접인장실험을 통해 UHPC의 인장강도를 평가하고, 보다 간편한 방법으로 UHPC의 인장강도를 예측할 수 있는 간편식의 제안이 필요한 실정이다.

이 연구에서는 직접인장강도 실험을 통해 UHPC의 파괴거동을 살펴보고, 강섬유 혼입률에 따른 UHPC의 초기 균열강도와 인장강도, 그리고 파괴에너지 등을 제안하고자 한다.

2. UHPC의 파괴거동

강섬유가 혼입되어 있는 강섬유 보강 콘크리트는 강섬유가 혼입되지 않은 무보강 콘크리트에 비해 연성적인 거동을 보인다. 실험결과에 의하면, 강섬유의 혼입률이

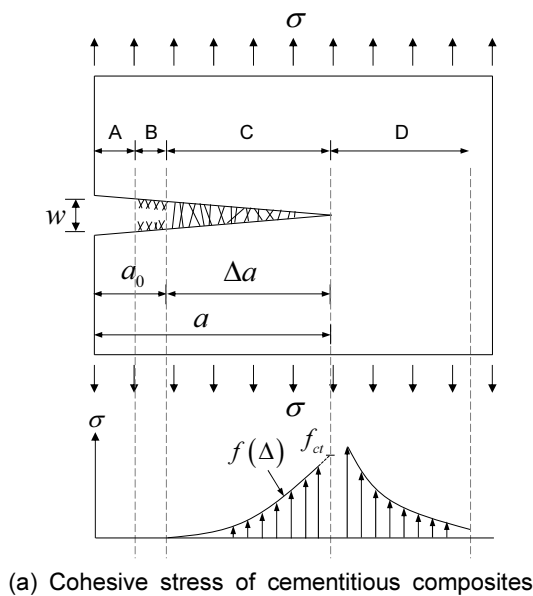
*Corresponding author E-mail : sghong@snu.ac.kr
 Received September 14, 2015, Revised December 15, 2015,
 Accepted December 17, 2015
 ©2016 by Korea Concrete Institute

증가할수록 강섬유 보강 콘크리트의 인장강도와 변형이 증가하는 것으로 나타났다.⁵⁻¹⁴⁾ 이러한 결과는 강섬유에 의한 가교효과(bridging effect)로 인해 발생하는 것으로 알려져 있다. 강섬유에 의해 발생하는 가교효과는 균열에서의 파괴거동으로 설명할 수 있다. Visalvanich와 Naaman¹⁵⁾에 의해 제안된 강섬유 보강 콘크리트에 대한 파괴모델은 강섬유 보강 콘크리트의 가교효과를 잘 설명해주고 있다. 하지만, 굵은골재가 포함되지 않은 UHPC에 대한 파괴모델은 아직 제시된 바가 없으며, 기존 모델에서 가정하고 있는 균열선단에서의 응집응력(cohesive stress)은 실험적으로 증명된 바가 없다. 따라서 압축강도가 140 MPa 이상이고, 서로 다른 두 종류의 강섬유가 혼합된 하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트에 대해 기존 강섬유 보강 콘크리트의 파괴모델의 적용 가능 여부를 알아보고, 이를 통해 UHPC의 파괴모델이 제시될 필요가 있다.

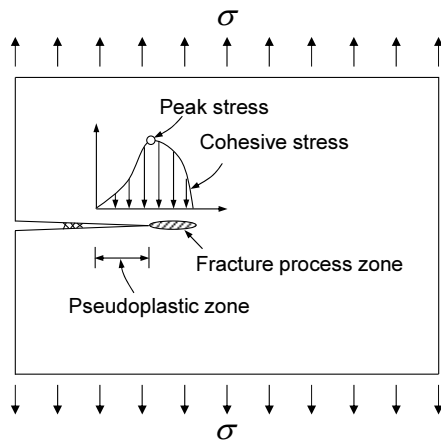
Fig. 1은 강섬유가 혼합된 UHPC의 균열 모델을 나타낸다. Fig. 1(a)는 균열이 충분히 발생했을 때의 균열모델을 보여준다. 이 때 UHPC의 균열은 총 4개의 구간으로 구분된다. A구간은 인위적으로 만든 노치길이를 나타낸

다. B구간은 균열이 충분히 진행되어 균열 저항 응력이 0이 된 구간을 나타낸다. 이 구간에서는 강섬유가 충분히 뽑혀져 나와 더 이상의 응력이 발생하지 않는 구간이다. C구간은 강섬유의 가교효과가 발생하는 구간을 의미한다. 이 구간에서는 시멘트 복합체의 균열이 충분히 발생하였으며 강섬유의 영향으로 인해 균열 저항응력이 발생하는 구간이다. 균열 저항응력은 균열이 균열 선단(crack tip)방향으로 진행될수록 서서히 증가한다. D구간은 파괴 진행영역(fracture process zone)을 나타낸다. 이 구간에서는 실제 육안으로는 관찰할 수 없는 미세균열이 발생하며, 균열 선단(crack tip)에서부터 균열 저항응력이 서서히 감소하게 된다. 균열 선단에서의 응력은 특이성(singularity)으로 인해 무한대의 응력상태를 나타낸다. 기존의 많은 연구자들은 균열 선단에서의 특이성을 해소하기 위해 다양한 응력상태를 제안하고 있다.¹⁶⁾ Dugdale은 균열 선단에서부터 파괴진행영역까지의 거리만큼 응력이 일정하다고 가정하였다.¹⁷⁾

매트릭스의 파괴가 충분히 발생하지 않고 미세균열이 발생하는 시점(초기균열 발생 시점)에서는 인장응력이 발생하기 전 균열면에서 응집응력(cohesive stress)이 발생하게 된다. 노치가 있는 실험체에 인장응력(σ)이 작용하게 되면 균열 초기 Fig. 1(b)와 같이 균열이 발생한 구간에서는 응집응력(cohesive stress)이 발생하게 된다. 응집응력은 의사소성구역(pseudoplastic zone)에서 발생하는 압축 응력이다. 여기서, 의사소성구역은 강섬유의 인장응력이 발생하기 전 시멘트 매트릭스의 파괴가 발생하게 되는 구간을 의미한다. 이 구간에서 발생하는 응집응력은 시멘트 복합체의 균열면에서 발생하는 응력이다. 이러한 응집응력은 균열선단쪽으로 갈수록 그 크기가 증가하며 균열선단에서 최대값을 나타내며, 균열선단으로부터 응집응력은 서서히 감소하게 된다. Barenblatt et al.¹⁸⁾에 따르면, 응집응력의 최대값이 존재하며, 응집응력이 최대값에 도달했을 때 균열이 시작된다고 하였다. 이러한 Barenblatt의 가정¹⁸⁾은 초기균열 발생시점을 결정하게 되며, 이를 이용하면 초기균열장도를 결정할 수 있다.



(a) Cohesive stress of cementitious composites



(b) Stress distribution at crack tip

Fig. 1 Crack model of fiber reinforced concrete¹⁵⁾

3. 실험 프로그램

3.1 재료특성

이 연구에서 사용된 하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트(이하 UHPC)는 굵은 골재를 사용하지 않고 길이가 19 mm와 16 mm인 강섬유를 혼합하여 160 MPa 이상의 높은 압축강도를 보인다. UHPC의 제작을 위해 보통 포틀랜드 시멘트가 사용되었으며, 반응성 분체로 분말도가 80,000 g/cm³인 지르코늄(Zirconium)을 사용하였다. 잔골재는 평균입경 0.5 mm 이하의 모래를 사용하였다. 물-결합재비는 0.2이며, 충분한 유동성을 확보하기 위해 폴리카르본산계 고성능 감수제를 사용하였다. 시멘트의 수

화반응을 활성화시키고 입자들 사이의 공극을 메워 조직을 치밀하게 만들기 위해 평균입径 2 μm 이고 SiO_2 의 함유율이 98% 이상이며, 밀도가 2.6 g/cm^3 인 충전재(Filler)가 사용되었다. Table 1은 시멘트에 대한 구성재료의 중량비로 나타낸 UHPC의 배합비를 보여준다.

UHPC 제작에 사용된 강섬유는 길이가 19 mm와 16 mm인 직선형 강섬유가 사용되었다. 강섬유의 항복강도는 2,500 MPa, 직경은 0.2 mm, 그리고 형상비(l_f/d_f)는 길이가 19 mm인 경우는 95, 16 mm인 경우는 80이다. 19 mm와 16 mm 길이의 강섬유는 각각 부피비 기준 1.0%와 0.5%로 혼입하여 전체 부피비가 0.5%에서 2.0%까지 적용하였다. 이 연구에서 사용된 UHPC의 목표 설계기준강도는 180 MPa이다.

3.2 실험체 제작과 실험방법

실험체는 초고성능 콘크리트 구조설계지침⁴⁾에 의해 직접인장실험 실험체로 제작되었다. Fig. 2(a)는 직접인장강

도용 노치 도입 공시체를 보여준다. 직접인장강도용 노치(notch) 도입 공시체의 실험구간의 길이는 150 mm, 폭은 75 mm이고 두께는 25 mm이다. 초고성능 콘크리트 구조설계지침⁴⁾에서는 직접인장 시편 중앙부의 균열을 유도하기 위해 중앙부 양쪽에 폭 2 mm, 깊이 12.5 mm의 노치를 도입하도록 규정하고 있다. 실험체는 48시간 동안 90°C 고온에서 증기양생 후 실험 때까지 상온에서 양생하였다. 콘크리트 경화가 끝난 후 콘크리트용 다이아몬드 칼을 사용하여 노치를 만들었다.

실험체의 변수는 강섬유 혼입률(V_f)과 초기균열 길이(a_0)이다. 강섬유 혼입률은 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%이고, 실험체 폭에 대한 노치길이 비($2a_0/b$)는 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 그리고 0.17이다. 여기서, 노치길이 비가 0.17인 실험체의 노치길이는 현행 초고성능 콘크리트 구조설계지침에서 제시하고 있는 인장강도 시편의 노치길이와 같다. 시편은 강섬유 혼입률에 따라 한꺼번에 제작되었으며, 각 시편당 3개씩 제작하였다. 따라서 실험에 사용된 시편의 총 개수는 90개이다.

Fig. 2(b)는 실험체 셋업을 보여준다. 변위제어 방식으로 100 kN 액츄에이터를 사용해 직접인장강도 실험을 수행하였다. 가력 속도는 0.3 mm/min이다. 최대 강도 이후 연화 거동(softening behavior)을 알아보기 위해 노치에는 균열개구변위(crack mouth opening displacement, 이하 CMOD)를 측정하기 위한 클립 게이지(clip gauge)가 설치되었으며, 분석에는 두 클립 게이지의 평균값을 사용하였다. UHPC의 인장변형률은 Fig. 2(a)와 같이 노치 바로 윗부분과 실험체 중앙부에 부착된 스트레인 게이지에 의해 측정되었다.

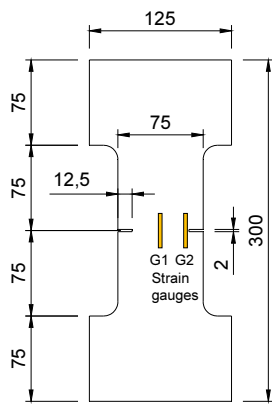
3.3 재료실험

이 연구에서 사용된 UHPC의 재료특성을 알아보기 위해 강섬유 혼입률별로 압축강도 실험을 수행하였다. 실험체는 지름 100 mm, 높이 200 mm의 원주형 공시체를 사용하여 각 배합당 5개씩 총 25개의 실험체가 제작되었다. 실험체는 2,000 kN 용량의 만능시험기(UTM)를 사용하여 변위제어 방법으로 0.3 mm/min 속도로 최종파괴 시까지 가력하였다. 실험체의 변형은 실험체 중앙부에 부착된 스트레인 게이지에 의해 측정되었다.

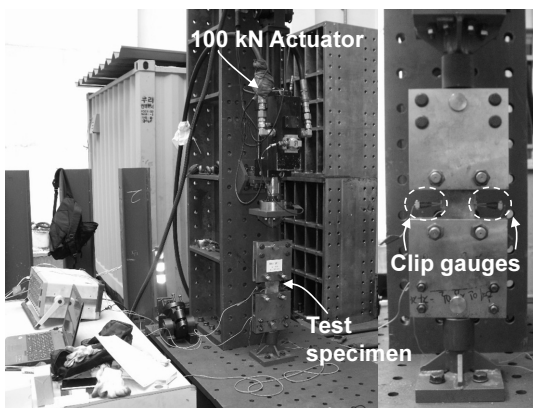
Table 2는 압축강도 실험결과를 보여준다. UHPC의 평균 최대압축강도는 강섬유 혼입률이 증가할수록 증가하였으며, 특히 강섬유 혼입률이 1.5%부터 강도의 증가가 뚜렷이 나타났다. 여기서, 실험체 C0-3, C1.5-1, C1.5-2, C2-2의 실험결과는 실험장비의 측정오류로 인해 다른 실험체와 큰 차이를 보여 분석에 사용되지 않았다. 탄성계수는 AFGC-SETRA³⁾에서 제시하고 있는 방법을 이용하여, 최대강도일 때의 변형률과 최대강도를 사용하여 구했다. UHPC의 탄성계수는 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 다소 증가하는 것으로 나타났다. 무보강 UHPC의 탄성계수는

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



(a) Details of the test specimen



(b) Test set up

Fig. 2 Details of the test specimen and test set up

Table 2 Summary of compression test results

Specimens	V_f (%)	RI	f_{cf} (MPa)	f_{cfm} (MPa)	E_{cf} (GPa)	E_{cfm} (GPa)
C0-1	0	0	151.3	139.3	43.0	42.2
C0-2			134.5		40.9	
C0-4			140.2		38.8	
C0-5			131.2		46.0	
C0.5-1	0.5	0.45	149.0	148.2	52.8	46.4
C0.5-2			157.0		43.7	
C0.5-3			135.5		39.2	
C0.5-4			149.2		46.2	
C0.5-5			150.5		50.0	
C1-1	1.0	0.9	156.7	146.1	45.1	44.4
C1-2			143.4		44.2	
C1-3			154.3		49.2	
C1-4			142.9		42.6	
C1-5			133.4		41.1	
C1.5-3	1.5	1.35	171.0	165.9	39.9	43.7
C1.5-4			175.0		46.8	
C1.5-5			151.6		44.4	
C2-1	2.0	1.8	177.3	170.6	53.3	53.9
C2-3			181.3		56.7	
C2-4			162.8		55.6	
C2-5			160.8		50.0	

Note: V_f is the fiber volume ratio; RI is the reinforcement index ($=V_f(l_f/d_f)$); l_f and d_f are length and diameter of steel fiber; f_{cf} and f_{cfm} are measured peak compressive stress and the mean value of peak stress; E_{cf} is the modulus of elasticity; E_{cfm} is the mean value of modulus of elasticity, respectively. In table 2, test data of C0-3, C1.5-1, C1.5-2, and C2-2 specimens were not included due to test error.

42.2 MPa이었으며, 강섬유가 혼입된 UHPC의 탄성계수는 강섬유 혼입률에 따라 약 43.7~53.9 MPa이었다.

4. 실험결과

4.1 인장강도-균열개구변위(CMOD) 관계

강섬유가 혼입된 UHPC의 인장거동을 알아보기 위해 인장응력-균열개구변위 관계를 구하였다. 초고성능 콘크리트 구조설계지침⁴⁾에서는 변형률 경화를 고려하여 Fig. 3과 같이 UHPC 인장거동을 제시하고 있다. 인장연화곡선은 인장응력(σ)과 균열폭(w)의 관계를 나타낸다. 일반적으로 강섬유로 보강된 UHPC는 일반 콘크리트와는 달리 인장강도에 도달한 뒤 균열폭이 증가함에 따라 그 값이 서서히 감소하여 최종적으로 하중이 0에 도달하게 된다. Fig. 3에서 균열폭 w_u 는 인장강도가 발현되는 순간의

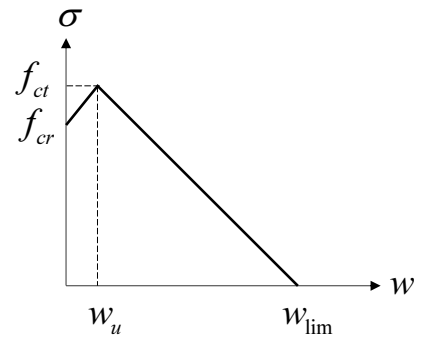
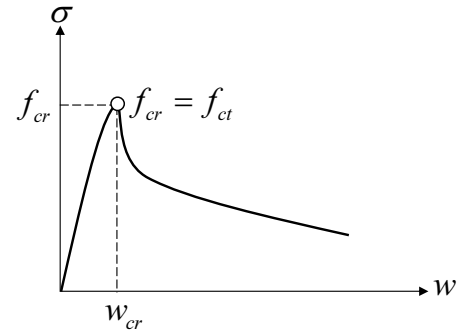
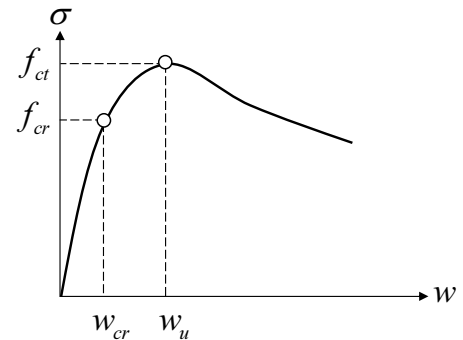


Fig. 3 Tensile stress-CMOD relationship



(a) Case I



(b) Case II

Fig. 4 Definition of first cracking strength

균열폭을, w_{lim} 은 인장응력이 더 이상 발현되지 않을 때의 균열폭을 의미한다. 초고성능 콘크리트 구조설계지침⁴⁾에서는 w_u 는 0.3 mm 그리고 w_{lim} 은 5.3 mm으로 제시하고 있다.

UHPC의 초기균열강도와 인장강도는 Fig. 4와 같이 정의하였다. 직접인장시험으로부터 구한 UHPC의 인장응력-변위 곡선은 크게 Case I과 II로 구분된다. Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이, 균열 발생 직후 하중의 감소가 뚜렷이 나타나는 경우, 하중 감소 전 강도를 초기균열 강도로 정의하였다. 이 경우 초기균열강도는 인장강도와 동일하다. 초기균열 강도를 정의하기에 명확하지 않은 경우, 즉 강섬유에 의해 변형경화 현상이 발생한 경우에는 Fig. 4(b)와 같이 초기균열 강도를 정의하였다. 이 연구에서는 초기균열강도를 노치에서 발생하는 응집응력(cohesive stress)의 최대값으로 정의하였다.

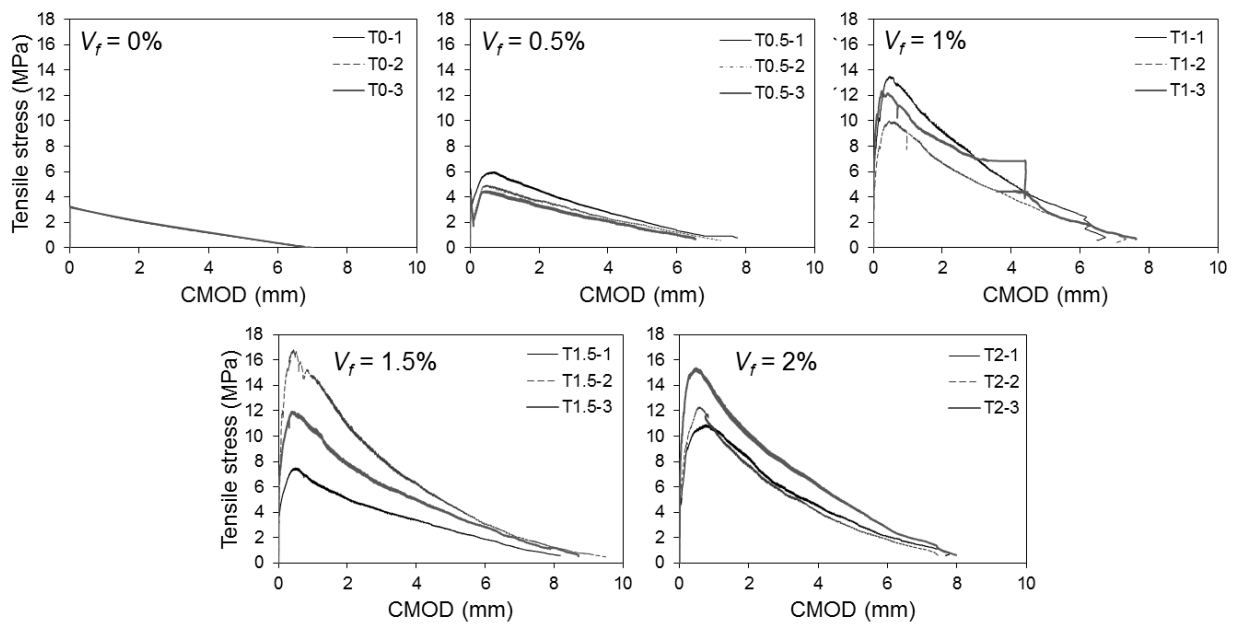


Fig. 5 Tensile stress-CMOD relationship of UHPC

Table 3 Summary of test results (mean value)

Specimens	V_f (%)	$2a_0/b$	P_{max} (kN)	f_{cr} (MPa)	f_{ct} (MPa)	$f_{ct,pred}$ (MPa)	$\frac{f_{ct}}{f_{ct,pred}}$	$\frac{f_{ct}}{f_{ct,pred}}$ Mean (S.D)	G_F (N/mm)	$G_{F,pred}$ (N/mm)	$\frac{G_F}{G_{F,pred}}$	$\frac{G_F}{G_{F,pred}}$ Mean (S.D)
T1V0	0	0.1	-	-	-	-	-	0.98 (0.15)	-	-	-	0.97 (0.07)
T2V0	0	0.2	5.6	3.0	3.0	2.6	1.15		10.6	10.3	1.02	
T3V0	0	0.3	5.2	2.8	2.8	2.6	1.07		10.4	9.7	1.05	
T4V0	0	0.4	5.1	2.7	2.7	2.6	1.05		9.5	9.5	1.00	
T5V0	0	0.5	3.9	2.1	2.1	2.6	0.80		6.7	7.5	0.89	
T6V0	0	0.17	4.1	2.2	2.2	2.6	0.84		6.9	7.8	0.88	
T1V0.5	0.5	0.1	-	-	-	-	-	1.20 (0.12)	-	-	-	1.02 (0.09)
T2V0.5	0.5	0.2	6.8	3.2	4.5	4.0	1.13		14.6	15.3	0.95	
T3V0.5	0.5	0.3	6.6	2.8	5.0	4.0	1.25		17.4	16.8	1.03	
T4V0.5	0.5	0.4	6.0	3.5	5.3	4.0	1.32		16.2	17.7	0.92	
T5V0.5	0.5	0.5	3.9	2.5	4.2	4.0	1.04		14.8	14.1	1.05	
T6V0.5	0.5	0.17	6.4	3.1	5.1	4.0	1.28		19.7	17.2	1.15	
T1V1	1	0.1	-	-	-	-	-	1.14 (0.18)	-	-	-	0.95 (0.14)
T2V1	1	0.2	-	-	-	-	-		-	-	-	
T3V1	1	0.3	11.1	6.8	8.5	8.9	1.35		26.1	27.6	0.94	
T4V1	1	0.4	10.2	7.2	9.1	8.9	0.96		22.6	29.5	0.77	
T5V1	1	0.5	10.3	8.7	11.0	8.9	1.02		37.1	35.5	1.05	
T6V1	1	0.17	15.0	8.0	12.0	8.9	1.24		41.1	38.6	1.07	
T1V1.5	1.5	0.1	15.6	5.8	9.9	10.9	0.85	0.96 (0.09)	41.4	32.2	1.28	1.18 (0.07)
T2V1.5	1.5	0.2	15.5	5.2	10.4	10.9	1.11		41.5	33.5	1.24	
T3V1.5	1.5	0.3	14.1	6.5	10.7	10.9	0.95		39.1	34.7	1.13	
T4V1.5	1.5	0.4	10.3	7.6	9.1	10.9	0.99		36.0	29.6	1.21	
T5V1.5	1.5	0.5	9.6	7.8	10.3	10.9	0.84		37.0	33.2	1.11	
T6V1.5	1.5	0.17	15.1	8.2	12.1	10.9	0.94		43.9	39.0	1.13	

Table 3 Summary of test results (mean value) (Continue)

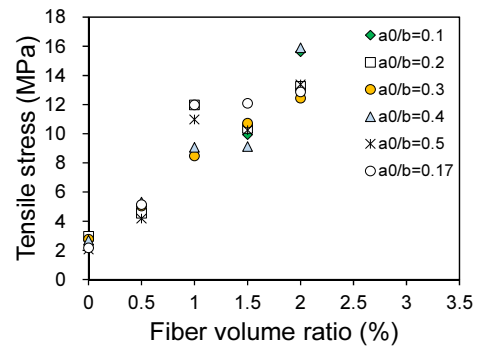
Specimens	V_f (%)	$2a_0/b$	P_{max} (kN)	f_{cr} (MPa)	f_{ct} (MPa)	$f_{ct, pred}$ (MPa)	$\frac{f_{ct}}{f_{ct, pred}}$	$\frac{f_{ct}}{f_{ct, pred}}$ Mean (S.D)	G_F (N/mm)	$G_{F, pred}$ (N/mm)	$\frac{G_F}{G_{F, pred}}$	$\frac{G_F}{G_{F, pred}}$ Mean (S.D)
T1V2	2	0.1	22.3	9.2	15.6	12.3	1.07	1.13 (0.12)	40.4	50.1	0.81	0.97 (0.09)
T2V2	2	0.2	19.9	9.6	13.3	12.3	1.05		42.1	42.6	0.99	
T3V2	2	0.3	16.3	9.8	12.4	12.3	1.08		40.9	40.1	1.02	
T4V2	2	0.4	17.9	11.3	15.9	12.3	1.01		49.3	50.9	0.97	
T5V2	2	0.5	12.6	9.8	13.4	12.3	1.29		42.2	43.0	0.98	
T6V2	2	0.17	16.1	10.0	12.9	12.3	1.09		43.9	41.4	1.06	

Note: V_f is fiber volume ratio; a_0 is a notch length; b is a width; P_{max} is measured maximum strength; f_{cr} and f_{ct} are the initial crack strength and tensile strength; $f_{ct, pred}$ is the predicted tensile strength; G_F is the fracture energy; and $G_{F, pred}$ is the predicted fraction energy, respectively.

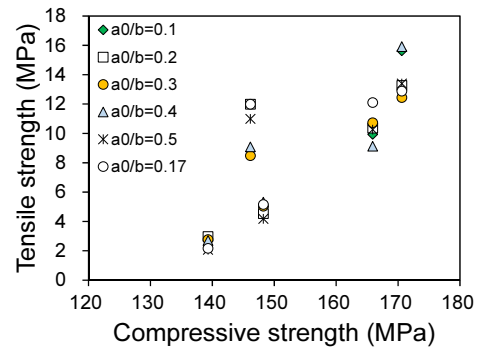
Fig. 5는 직접인장실험으로 구한 강섬유 혼입률이 1.5%이고, 노치가 도입된 실험체의 인장응력-균열개구변위 관계를 보여준다. 인장응력은 $P/(b-2a_0)$ 로 구하였으며, 균열개구변위는 노치에 설치된 클립게이지에 의해 측정되었다. 여기서, P 는 하중, b 는 실험체 폭, 그리고 a_0 는 노치 길이를 나타낸다. 실험결과, 강섬유 혼입률이 0%인 무보강 UHPC는 초기균열이 발생하는 시점이 명확하게 나타나지 않았으며, 균열 발생과 동시에 취성파괴가 발생하였다. 따라서 강섬유 혼입률이 0%인 UHPC의 균열강도는 인장강도와 동일하다고 가정해도 무방하다. 0.5%의 강섬유가 혼입된 경우, 초기 균열이 발생한 이후 급격한 하중 감소가 발생하였으며, 이후 하중이 다시 증가하는 현상이 발생하였다. 강섬유 혼입률이 1%이상인 실험체의 경우, 0.5%에서 발생한 현상은 발생하지 않았으며, 초기균열 발생이후에도 하중의 감소없이 하중이 계속 증가하는 경화현상이 발생하였다. 직접인장실험을 통해 구한 인장실험 결과는 Table 3에 요약되어있다.

4.2 인장강도

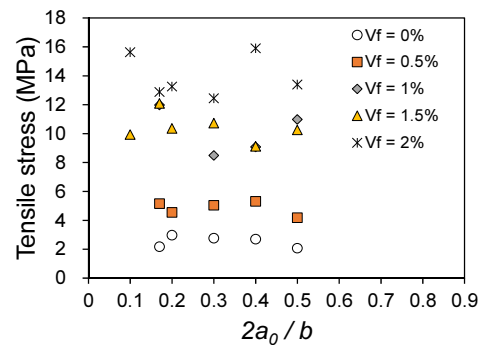
Fig. 6은 UHPC의 인장강도에 대한 강섬유 혼입률과 압축강도의 영향을 보여준다. 인장강도는 강섬유 혼입률과 압축강도가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 6(a)는 강섬유 혼입률에 따른 인장강도를 보여준다. 강섬유 혼입률이 0.5%일 때의 인장강도는 강섬유가 혼입되지 않은 무보강 콘크리트의 인장강도와 유사하게 나타났다. 강섬유가 1% 이상 혼입될 경우 그 값이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 1.5%의 강섬유가 혼입된 UHPC의 인장강도는 1%가 혼입된 실험체의 강도와 유사하게 나타났다. 강섬유 혼입률이 2%일 때의 인장강도는 1%대의 강섬유가 혼입됐을 경우보다 다소 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 6(b)는 압축강도에 따른 인장강도를 보여



(a) Effect of fiber volume ratio



(b) Effect of compressive strength



(c) Effect of $2a_0/b$

Fig. 6 Effect of test parameters on tensile strength

준다. 압축강도가 증가할수록 인장강도는 증가하는 것으로 나타났다. 실험결과, 강섬유 혼입률이 1%일 때의 압축강도가 0.5%일 때의 압축강도보다 다소 작게 나타났음에도 불구하고 인장강도는 훨씬 크게 나타났다. 따라서 압축강도는 강섬유가 혼입된 UHPC의 인장강도에 영향을 끼치는 것으로 판단된다. Fig. 6(c)는 초기균열 길이에 따른 인장강도의 변화를 보여준다. 인장강도는 초기균열 길이에 따라 차이를 보였으며, 이는 노치 바로 윗부분에서의 강섬유의 분포의 영향으로 판단된다. 특히, 강섬유 혼입률이 1.5%일 때, UHPC의 인장강도는 현행 기준에서 제시하고 있는 것과 같이 초기균열 길이가 12.5 mm ($2a_0/b=0.17$)일 때 가장 크게 나타났다. 하지만, 전체적으로 노치길이 비는 인장강도에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 판단된다. 이는 노치를 제외한 실험체 폭($b-2a_0$)이 초기균열 발생 이후 점진적으로 균열이 진전될 만큼 크지 않아 초기균열 발생 이후 매우 빠른 속도로 실험체 폭에 해당하는 길이만큼 균열이 진전되었기 때문이다.

실험결과, 강섬유가 혼입되지 않은 무보강 UHPC의 평균 인장강도는 약 3.3 MPa였다. 0.5%의 강섬유가 혼입된 UHPC는 강섬유가 혼입되지 않은 무보강 UHPC에 비해 약 50%정도 강도 증진 효과가 있었으며, 1~2%의 강섬유가 혼입된 경우, 무보강 UHPC의 인장강도에 대한 강섬유 보강 UHPC의 인장강도 비는 3.6~3.9정도로 나타났다. 강섬유가 1% 이상 보강될 경우 개발된 UHPC의 인장강도는 높은 강도 증진 효과를 보여주었다.

직접인장실험을 통해 구한 총 90개의 실험결과를 이용하여, 이 연구에서는 식(1), 식(2)와 같이 UHPC의 인장강도를 제안한다.

$$f_{ct_pred} = 2.4(1 + V_f) \frac{f_{cf}^{2/3}}{25} \text{ for } V_f \leq 0.5\% \quad (1)$$

$$f_{ct_pred} = 2(3 + V_f) \frac{f_{cf}^{2/3}}{25} \text{ for } V_f > 0.5\% \quad (2)$$

여기서, f_{cf} 는 UHPC의 압축강도이다. Fig. 6에서 나타난 바와 같이 UHPC의 인장강도는 0.5% 이하일 때와 1% 이상일 때 강도의 차이가 확연하게 드러나므로 제안된 UHPC의 인장강도는 강섬유 혼입률 0.5%를 기준으로 구분하였다. 그리고 Fig. 6(b)에서 보이는 바와 같이 UHPC의 인장강도는 압축강도에 대해 비선형적으로 증가하므로 이 연구에서는 압축강도의 2/3승에 비례한다고 가정하였다. 제안된 인장강도식은 강섬유 혼입률과 압축강도의 함수이다.

Figs. 7(a)와 7(b)는 식(1)과 식(2)에 의해 예측된 인장강도(f_{ct_pred})에 대한 실험을 통해 구한 인장강도 평균값(f_{ct})의 비를 강섬유 혼입률과 압축강도에 대해 나타낸 것이다. 예측된 인장강도(f_{ct_pred})는 강섬유 혼입률이 0%와 0.5%일 때는 식(1)을 사용하였으며, 1%, 1.5%, 그리고 2%일 때는 식(2)를 사용하여 구하였다. 강섬유 혼입률에 따른

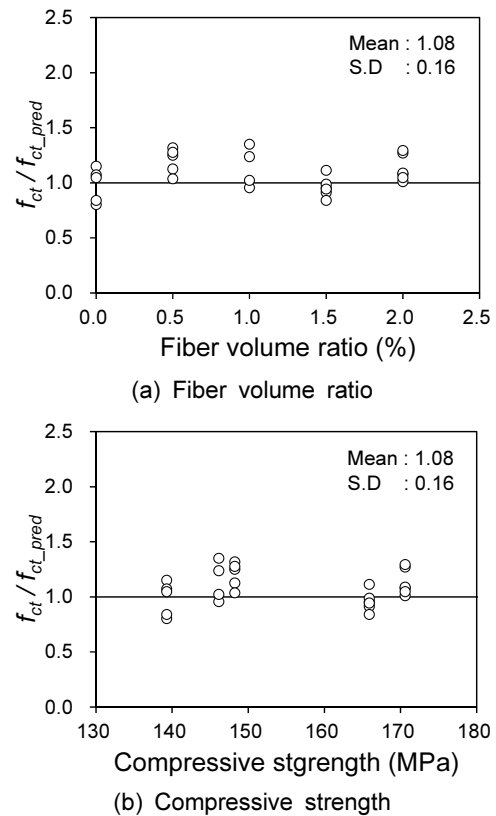


Fig. 7 Comparison of predicted tensile strength with test data

예측된 인장강도에 대한 실험값의 비(f_{ct}/f_{ct_pred})는 평균값이 1.08, 표준편차가 0.16으로 제안된 UHPC의 인장강도 예측식은 실험값을 대체로 잘 예측하는 것으로 나타났다.

4.3 파괴에너지

Fig. 8은 강섬유 혼입률과 인장강도에 따른 UHPC의 파괴에너지를 보여준다. 여기서, 파괴에너지는 균열이 발생하는데 필요한 에너지를 의미한다. 기존 연구에 따르면, 섬유보강 콘크리트의 파괴에너지는 강섬유의 혼입률이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. Hillerborg et al.¹⁹⁾에 의해 제안된 가상 균열 모델(fictitious crack model)에 따르면, 파괴에너지는 다음 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$G_F = \int_0^{w_c} \sigma(w) dw \quad (3)$$

여기서, w 는 균열폭이며, w_c 는 실험종료 시의 균열폭, 그리고 σ 는 인장응력을 나타낸다.

가상 균열 모델에서는 응력-CMOD 곡선은 실험체의 크기와는 무관한 재료 물성치로 가정한다. 따라서 응력-CMOD 곡선의 형태와 재료의 인장 강도, 그리고 파괴에너지가 결정되면 응력-CMOD 곡선을 구할 수 있다. UHPC의 파

파괴에너지는 인장응력-CMOD 곡선의 내부 면적으로 계산되었다. UHPC의 파괴에너지는 Fig. 8(a)에서 보이는 바와 같이 강섬유 혼입률이 증가할수록 증가하였으며, 거의 선형의 관계를 나타냈다. Fig. 8(b)는 인장강도에 따른 파괴에너지를 보여준다. UHPC의 파괴에너지는 인장강도가 증가할수록 증가하였다. 파괴에너지는 강섬유 혼입률이 0%에서 1%까지 강섬유 혼입률에 따라 비례하여 증가하다가 1.5%이상일때부터 그 증가폭이 감소하는 것으로 나타났다.

결과적으로, 하이브리드 강섬유가 혼입된 UHPC의 파괴에너지는 강섬유 혼입률과 인장강도에 비례하는 것으로 나타났다. 실험결과를 바탕으로, 이 연구에서는 UHPC의 파괴에너지를 예측하기 위해 경험적인 방법을 사용하

여 다음 식(4)와 같은 간단식을 제안한다.

$$G_{F_pred} = 3.2f_{dt} \quad (4)$$

여기서, f_{dt} 는 직접인장실험에서 구한 UHPC의 인장강도이다.

Fig. 9는 식(4)에서 구한 파괴에너지 예측값에 대한 실험값의 비를 강섬유 혼입률에 따라 나타낸 것이다. 비교를 위해 인장강도는 실험값을 사용하였다. 비교결과, 제안된 파괴에너지 식은 UHPC의 파괴에너지를 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다.

4.4 특성길이

특성길이(characteristic length, l_{ch})는 재료의 성질과 인장강도, 그리고 파괴에너지의 관계를 나타내며, Hillerborg et al.¹⁹⁾에 의해 제안된 가상균열이론(fictitious crack model)에서 제시되었다. 이 값은 파괴진행영역(fracture process zone)의 길이에 비례한다. 파괴진행영역은 균열 선단에서의 응력이 비선형적으로 발생하는 구간을 의미하며, 재료가 취성적일수록 그 값은 작아진다. 재료의 특성길이는 다음 식(5)와 같이 정의된다.

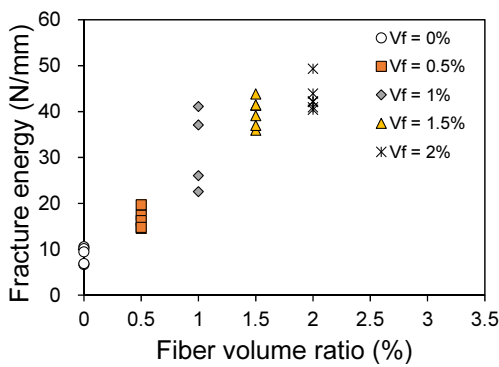
$$l_{ch} = \frac{E_{cf}G_F}{f_{dt}^2} \quad (5)$$

여기서, E_{cf} 는 UHPC의 탄성계수, G_F 는 직접인장강도 실험으로 구한 파괴에너지, f_{dt} 는 인장강도이다.

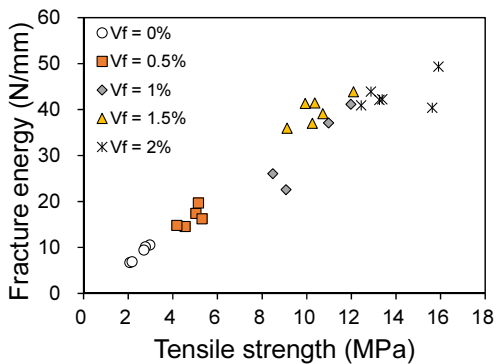
초고성능 콘크리트 구조설계지침⁴⁾에서 제시하고 있는 특성길이를 평가하기 위해 노치길이가 12.5 mm인 T6계열 실험체를 대상으로 강섬유 혼입률이 1%, 1.5%, 그리고 2%인 실험체의 특성길이를 조사하였다.

Table 4는 식(5)를 사용하여 계산된 UHPC의 특성길이를 강섬유 혼입률별로 나타낸 것이다. Table 4에 나타낸 인장강도와 파괴에너지는 노치길이가 비가 0.17인, 즉 노치길이가 12.5 mm인 T6계열 실험체의 실험값이며, 탄성계수는 압축강도 실험에서 구한 값이다. 여기서, 인장을 받는 UHPC의 탄성계수는 압축을 받는 UHPC의 탄성계수와 동일하다고 가정하였다.

UHPC의 특성길이는 강섬유 혼입률의 영향을 받는 것으로 나타났다. 강섬유 혼입률이 증가할수록 특성길이는



(a) Effect of fiber volume ratio



(b) Effect of tensile strength

Fig. 8 Effect of fiber volume ratio on fracture energy

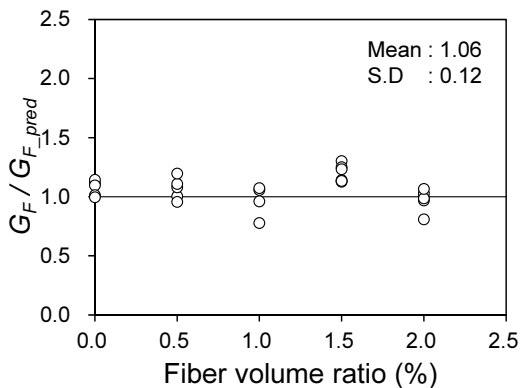


Fig. 9 Comparison of predicted fracture energy with test data

Table 4 Characteristic length

Specimens	V_f (%)	f_{dt} (MPa)	E_{cf} (GPa)	G_F (N/mm)	l_{ch} (mm)
T6V1	1	12.0	44.4	41.1	12,673
T6V1.5	1.5	12.1	43.7	43.9	13,103
T6V2	2	12.9	53.9	43.9	14,219

증가하였으며, 이는 강섬유 혼입률이 증가할수록 UHPC의 연성이 증가하는 것을 의미한다. 강섬유 혼입률이 1%, 1.5%, 그리고 2%일 때의 특성길이는 $1.3 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^4$ mm로 나타났다. 이러한 결과는 강섬유 혼입률이 1% 이상일 때의 인장강도와 탄성계수, 그리고 파괴에너지가 유사하게 나타났기 때문으로 판단된다. 초고성능 콘크리트 구조 설계지침⁴⁾에서 제시하고 있는 특성길이는 1.1×10^4 mm이며, 이 값은 실험값에 비해 다소 보수적으로 판단하고 있다.

4.5 균열선단에서의 응집응력

실험결과에서도 언급한 바와 같이 1% 이상의 강섬유가 혼입된 경우, Fig. 5에 나타낸 바와 같이 UHPC는 탄성구간까지는 선형거동을 하며, 이후 변형률 경화현상으로 인해 하중의 급격한 감소없이 비선형거동을 하게 된다.

Fig. 10은 노치 길이가 12.5 mm인 UHPC의 인장응력-변형률 관계를 강섬유 혼입률에 따라 나타낸 것이다. 변형률은 노치 바로 윗부분에 부착된 스트레인 게이지(G1)에 의해 측정되었으며, (Fig. 2(a) 참조) 균열선단에서의 응집응력(cohesive stress)을 구하기 위해 압축응력에 도달하기 전까지의 압축변형률까지 나타냈다.

Fig. 10에서 보이는 바와 같이 하중이 증가할수록 응집응력은 점점 증가하였으며, 최대 응집응력을 지나서는 서서히 감소하였다. 미세균열의 균열폭이 점점 증가하여 시멘트 매트릭스가 파괴된 후, 균열 선단에서는 인장응력이 발생하게 되며, 인장응력은 최대인장강도에 도달한 이후 실험종료 시까지 서서히 감소하였다. 하지만, 강섬유가 혼입되지 않은 UHPC의 경우 최대응집응력에 도달한 이후의 변형률은 측정되지 않았다. 실험결과, 균열 선단에서의 응집응력은 강섬유 혼입률과 압축강도, 그리고

인장강도가 증가할수록 증가하였다. 최대강도일 때의 변형률은 0.004 이하의 값을 보여주었으며, 최종 파괴 시 변형률은 실험체에 따라 0.02에서 최대 0.088까지 나타났다.

균열선단에서의 응력변화를 사용해서 균열이 집중될 때의 최대응집응력(f_{ch})을 다음 식(6)과 같이 인장강도의 함수로 제시한다.

$$f_{ch} = 0.715f_{ct} \quad (6)$$

여기서, f_{ct} 는 직접인장강도 실험을 통해 구한 실험값이다.

Fig. 11은 현행 설계지침⁴⁾에서 제시하고 있는 UHPC의 초기균열강도와 이 연구에서 제시하고 있는 균열선단에서의 최대응집응력을 상호비교한 것이다. 현행 설계지침에서는 탄성구간이 끝나는 지점과 비선형구간이 시작하는 지점을 기준으로 직선으로 연결한 뒤 교점에서 초기균열 강도를 결정한다.⁴⁾ Fig. 11에서 보이는 바와 같이, 이 연구에서 제안하는 방법으로 구한 UHPC의 최대응집응력은 강섬유 혼입률이 증가할수록 증가하였으나, 기존 연구에서 제시하고 있는 초기균열강도는 강섬유 혼입률에 상관없이 거의 일정한 값을 나타냈다. 이러한 결과가 나타난 이유는 현행 설계지침에서 제시하고 있는 초기균열강도는 실험체에 최초로 균열이 발생하는 시점의 강도를 나타낸 것으로써 섬유 혼입률과는 상관없이 시멘트 매트릭스의 강도에 영향을 받기 때문이다. 따라서 식(6)과 같이 제안된 UHPC 균열선단에서의 최대응집응력은 시멘트 매트릭스의 파괴가 발생한 이후 변형경화가 발생하는 시점의 응력으로 정의될 수 있다.

강섬유가 혼입된 UHPC의 인장강도는 Fig. 8(a)와 (b)에서 보이는 바와 같이, 강섬유 혼입률과 압축강도가 증가할수록 증가하므로, 이 연구에서 제안하고 있는 인장

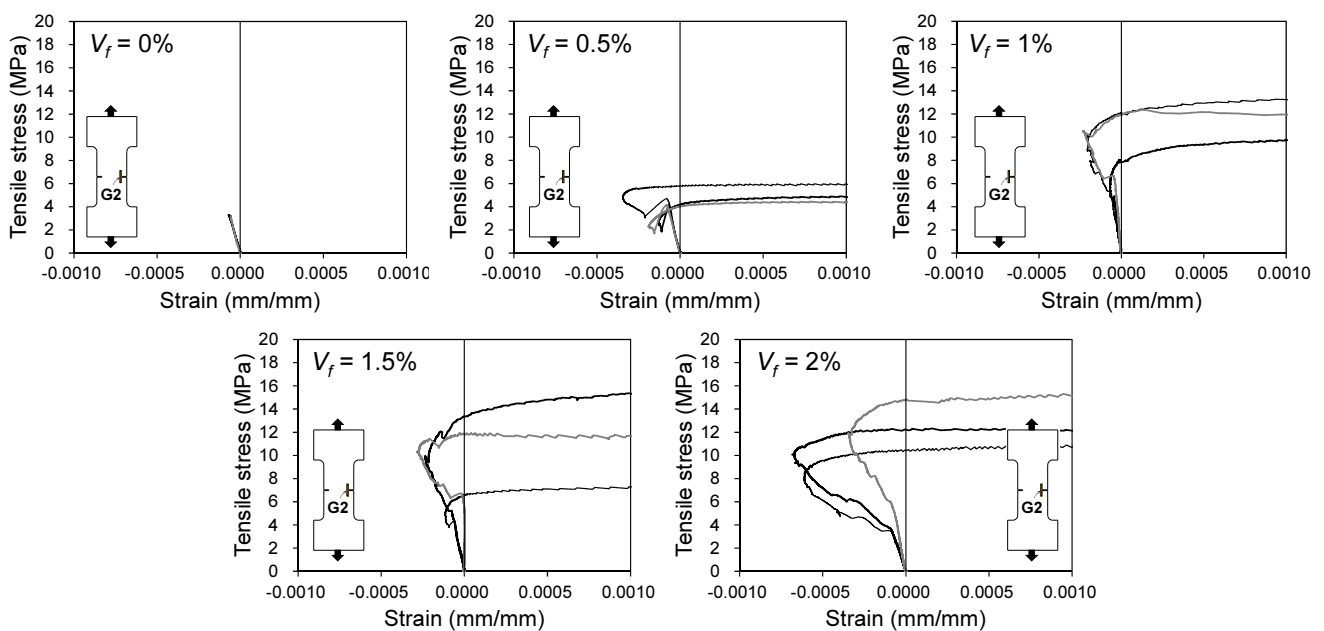


Fig. 10 Cohesive stress at the pseudoplastic zone of UHPC

강도 예측식(식(1), 식(2))을 사용하여 다음 식(7), (8)과 같이 UHPC의 변형경화 시 균열선단에서의 최대응집응력을 제안한다.

$$f_{cr_pred} = 1.716(1 + V_f) \frac{f_{cf}^{2/3}}{25} \text{ for } V_f \leq 0.5\% \quad (7)$$

$$f_{cr_pred} = 1.43(3 + V_f) \frac{f_{cf}^{2/3}}{25} \text{ for } V_f > 0.5\% \quad (8)$$

변형경화 시 균열선단에서의 최대응집응력은 강섬유 혼입률 0.5%를 기준으로 구분되었으며, 제안된 식(7)과 식(8)은 강섬유 혼입률과 압축강도의 함수로 표현되었다.

Fig. 12는 식(6)으로부터 구한 균열선단에서의 최대응집응력과 식(7)과 식(8)에서 구한 값을 상호비교한 것이다. 식(6)으로부터 구한 최대응집응력 간편식은 실험값과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 예측된 최대응집응력에 대한 실험값의 비는 평균 1.02, 표준편차 0.14로 나타났다. 이 연구에서 제시하고 있는 UHPC의 인장강도 예측식을 이용해서 구한 최대응집응력 예측식(식(7)과 (8))

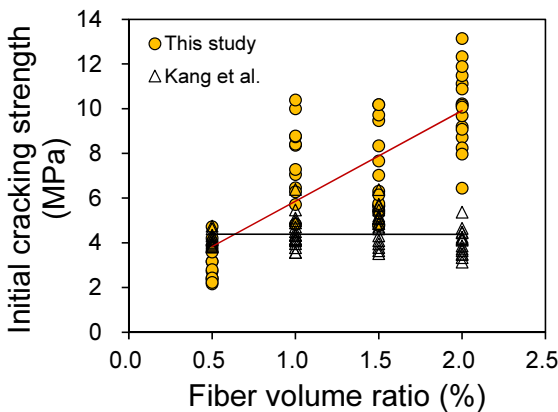


Fig. 11 Comparison between initial cracking strength and peak cohesive stress of UHPC

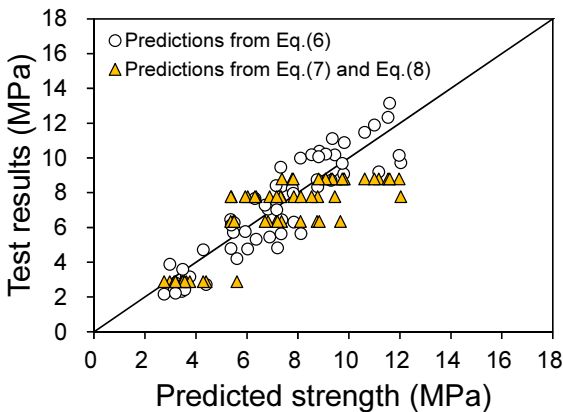


Fig. 12 Comparison between the peak cohesive strengths obtained from the test (Eq. (6)) and those from predicted tensile strengths (Eqs. (7) and (8)).

역시 Fig. 12에 나타난 바와 같이 실험값을 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다.

따라서 이 연구에서 제안된 식(6)~식(8)은 압축강도가 140~170 MPa이고, 강섬유 혼입률이 2% 이하인 UHPC의 균열선단에서의 최대응집응력을 평가하는데 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구에서는 하이브리드 강섬유가 혼입된 UHPC의 파괴거동 특성을 알아보고자 총 90개의 노치도입 시편을 대상으로 직접인장실험을 수행하였다. 실험연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 강섬유 혼입률이 0%인 무보강 UHPC의 경우, 초기 균열이 발생하는 시점이 명확하게 나타나지 않았으며, 균열 발생과 동시에 취성파괴가 발생하였다. 0.5%의 강섬유가 혼입된 경우, 초기 균열이 발생한 이후 급격한 강도 감소가 발생하였으며, 이후 강도가 다시 증가하는 현상이 발생하였다. 강섬유 혼입률이 1%이상인 실험체의 경우, 초기균열 발생이후에도 강도가 계속 증가하는 경화현상이 발생하였다. 실험결과, UHPC의 인장강도는 강섬유 혼입률이 증가할수록 증가하였으며, 압축강도가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 하이브리드 강섬유가 혼입된 UHPC의 인장강도를 구하기 위해 강섬유 혼입률과 압축강도의 함수로 표현된 예측식이 제안되었다. 제안된 인장강도 예측식은 강섬유 혼입률이 0.5% 이하일 때와 1% 이상일 때를 구분하여 제시되었다. 제안된 식을 이용하여 구한 UHPC의 인장강도는 실험값을 대체로 잘 예측하는 것으로 나타났다.
- 3) 하이브리드 강섬유가 혼입된 UHPC의 파괴에너지는 강섬유 혼입률과 인장강도에 비례해서 증가하였다. 실험결과를 바탕으로, 이 연구에서는 UHPC의 파괴에너지를 예측하기 위해 경험적인 방법을 사용하여 인장강도의 함수로 표현된 간단식을 제안하였다. 제안된 파괴에너지 식은 UHPC의 파괴에너지를 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다.
- 4) 강섬유가 혼입된 UHPC의 특성길이는 강섬유 혼입률의 영향을 받는 것으로 나타났다. 현행 설계기준에서 제시하고 있는 특성길이는 실험값에 비해 다소 보수적으로 평가하고 있으므로 현행 설계지침에서 제시하고 있는 특정값을 사용하기보다는 실험결과를 사용하여 계산된 특성길이를 사용하는 것이 합리적이라 판단된다.
- 5) 강섬유가 혼입된 UHPC의 균열모델이 제안되었다. 제안된 균열모델은 총 4단계의 파괴모드로 구성되어 있으며, 이를 통해 강섬유 혼입에 따른 가교효과

를 설명하였다. 가정된 균열선단에서의 응력변화는 실험을 통해 증명되었다. 균열선단에서의 응력분포를 바탕으로 강섬유가 혼입된 UHPC의 균열선단에서의 최대응집응력을 구하였다.

- 6) 이 연구에서는 초기균열이 발생한 이후 변형경화 현상이 시작되는 지점의 강도를 나타내는 균열선단에서의 최대응집응력을 구하기 위해 인장강도의 함수로 표현된 간편식이 제안되었다. 제안된 간편식은 균열선단에서의 응력을 가정한 기존의 이론적인 배경을 바탕으로 결정되었으며, 실험값과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

이 연구에서는 하이브리드 강섬유가 혼입된 UHPC의 직접인정실험을 통해 얻은 결과를 사용하여 변형경과 시 균열선단에서의 최대응집응력, 인장강도, 파괴에너지, 그리고 특성길이 등이 제안되었다. 제안된 예측식들은 압축강도가 140~170 MPa이고, 강섬유 혼입률이 2% 이하인 UHPC에 적용가능 할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

1. Kang, S. T., "Comparison of Flexural Tensile Strength according to the Presence of Notch and Fiber Content in Ultra High Performance Cementitious Composites", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.24, No.5, 2012, pp.525-533.
2. Kang, S. T., and Ryu G. S., "The Effect of Steel-Fiber Contents on the Compressive Stress-Strain Relation of Ultra High Performance Cementitious Composites (UHPC)", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.23, No.1, 2011, pp.67-75.
3. Association Française du Génie Civil (AFGC) *Bétons fibrés à ultra-hautes performances*. Association Française du Génie Civil, France, 2013, p.357.
4. Korea Concrete Institute, *Design Recommendations for Ultra-High Performance Concrete K-UHPC*, KCI-M-12-003, Korea, 2012, p.66.
5. Swamy, R. N., Mangat, P. S., and Rao, C. V. S. K., "The Mechanics of Fiber Reinforcement of Cement Matrices," *An International Symposium: Fiber Reinforced Concrete*, American Concrete Institute, Detroit, USA, 1974, pp.1-28.
6. Song, P. S. and Hwang, S., "Mechanical Properties of High-Strength Steel Fiber-Reinforced Concrete," *Construction and Building Materials*, Vol.18, Issue 9, 2004, pp.669-673.
7. Jeng, F., Lin, M. L., and Yuan, S. C., "Performance of Toughness Indices for Steel Fiber Reinforced Shotcrete", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.17, 2002, pp.69-82.
8. Wafa, F. F. and Ashour, S. A., "Mechanical Properties of High-Strength Fiber Reinforced Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol.89, No.5, 1992, pp.449-455.
9. Chun, H. M. and Kim, Y. I., "Strength Characteristics and Toughness of Steel Fiber-Reinforced High-Strength Concrete", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol.24, No.2, 2004, pp.455-458.
10. Yoon, E. S. and Park, S. B., "An Experimental Study on the Mechanical Properties and Long-Term Deformations of High-Strength Steel Fiber Reinforced Concrete," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.26, No.2A, 2006, pp.401-409.
11. Oh, Y. H., "Evaluation of Flexural Strength for Normal and High Strength Concrete with Hooked Steel Fibers", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.20, No.4, 2008, pp.531-539.
12. Park, S. H., Kim D. J., Ryu, G. S., and Koh, K. T., "Tensile Behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete", *Cement & Concrete Composites* 34, 2012, pp.172-184.
13. Olivito, R. S., and Zuccarello, F. A., "An Experimental Study on the Tensile Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete", *Composites: Part B*, 41, 2010, pp.246-255.
14. Hassan, A. M. T., Jones, S. W., and Mahmud, G. H., "Experimental Test Methods to Determine the Uniaxial Tensile and Compressive Behaviour of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPC)", *Construction and Building Materials*, 37, 2012, pp.874-882.
15. Visalvanich K., and Naaman, A. E., "Fracture Model for Fiber Reinforced Concrete", *ACI Journal*, Vol.80, No.2, 1983, pp.128-138.
16. Bažant, Z. P., and Planas, J., *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 1998, p.616.
17. Dugdale, D. S., "Yielding of Steel Sheets Containing Slits," *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol.8, 1960, pp.100-104.
18. Barenblatt, G. I., "The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture", *Advances in Applied Mechanics*, Academic Press, New York, 1962, Vol.7, pp.55-129.
19. Hillerborg, A., J 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.

요약 이 연구에서는 노치 도입 인장시편을 사용하여 직접인장강도 실험을 통해 UHPC의 파괴거동을 살펴보고, 강섬유 혼입률에 따른 UHPC의 초기균열강도와 인장강도를 제안하였다. 실험결과 UHPC와 초기균열강도와 인장강도, 그리고 파괴에너지 등은 강섬유 혼입률이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 균열선단에서의 응집응력은 Barenblatt의 가정을 사용하여 결정되었으며, 이를 토대로 변형경화 현상이 발생하는 강섬유 혼입률이 1% 이상인 UHPC의 최대응집응력을 예측할 수 있는 간편식을 제안하였다. 인장강도는 강섬유 혼입률과 압축강도의 함수로 제안되었으며, 파괴에너지는 인장강도의 함수로 제안되었다. 제안된 간편식들은 실험값과 비교적 잘 일치하였으며, 향후 압축강도가 140~170 MPa이고, 강섬유 혼입률이 2% 이하인 UHPC에 적용가능 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 초고성능 콘크리트, 파괴거동, 초기균열강도, 인장강도, 파괴에너지