



하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 압축거동

임우영¹⁾ · 홍성걸^{2)*}

¹⁾서울대학교 공학연구원 ²⁾서울대학교 건축학과

Compressive Behavior of Hybrid Steel Fiber Reinforced Ultra-High Performance Concrete

Woo-Young Lim¹⁾ and Sung-Gul Hong^{2)*}

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 Uniaxial compression tests for ultra-high performance hybrid steel fiber reinforced concrete (UHPC) were performed to evaluate the compressive behavior of UHPC. The UHPC for testing contains hybrid steel fibers with a predetermined ratio using a length of 19 mm and 16 mm straight typed steel fibers. Test parameter was determined as a fiber volume ratio to investigate the effect of fiber volume ratio on the strength and secant modulus of elasticity. Test results showed that the compressive strength and elastic modulus of UHPC increased with increasing the fiber volume ratio. Based on the test results, the compressive strength and modulus of elasticity equations were proposed as function of the compressive strength of unreinforced and fiber reinforced UHPC, respectively. The simplified equations for predicting the mechanical properties of the UHPC were a good agreement with the test data. The proposed equations are expected to be applied to the SFRC and UHPC with steel fibers.

Keywords : ultra-high performance concrete, steel fiber, stress-strain relationship, compressive strength, modulus of elasticity

1. 서 론

하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트(Hybrid steel fiber reinforced ultra-high performance concrete, 이하 UHPC)는 압축강도가 매우 높은 초고성능 시멘트 복합체(Ultra-high performance cementitious composites)에 길이가 서로 다른 강섬유를 혼합하여 압축강도뿐만 아니라 인장강도와 휨인성 등을 향상시킨 신개념 건설재료이다. 개발된 UHPC는 기존의 취성파괴를 보이는 일반 콘크리트와는 달리 최대 강도 도달 이후 파괴 시까지 우수한 연성능력을 보인다. 이 재료는 강섬유 혼입률에 따라 10 MPa 이상의 높은 인장강도를 보이며, 압축강도는 200 MPa 이상, 그리고 탄성계수는 40 GPa 이상 발현되는 것으로 알려져 있다.¹⁻³⁾ 이와 같이 강도와 인성 측면에서 탁월한 성능을 보이는 UHPC를 구조물에 효율적으로 사용하기 위해서는 재료의 특성을 명확히 규명할 필요가 있다. 현행 설계기준에서는 UHPC의 응력-변형률 관계와 탄성계수, 그리고 극한 변형률 등이 제

시되어 있지만, 이는 모두 특정 압축강도 특성값을 가진 UHPC를 대상으로 제시된 것으로서, 다양한 강도의 UHPC의 압축거동에 대한 압축특성으로 규정하기에는 한계가 있다.^{4,5)} 따라서, 100 MPa 이상인 다양한 압축강도를 가지는 UHPC의 압축거동 특성에 대한 연구가 필요하다.

강섬유 보강 콘크리트의 압축거동에 관한 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되었다. 콘크리트의 압축강도는 강섬유 부피비, 중량비, 강섬유의 형상 등 많은 변수들의 영향을 받는다. 압축강도가 35~100 MPa인 강섬유 보강 콘크리트에 대한 기존 연구들에 따르면, 강섬유 혼입률이 증가할수록 압축강도는 다소 증가하며, 이러한 현상은 강섬유 혼입률보다는 강섬유의 부피비와 형상비로 표현되는 섬유보강지수(Reinforcement Index, 이하 *RI*)가 압축강도 향상에 더 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났다.⁶⁻¹¹⁾ 여기서, 섬유보강지수(*RI*)는 $V_f(l_f/d_f)$ 로 정의되며, V_f 는 부피비로 표현된 강섬유 혼입률, l_f 와 d_f 는 각각 강섬유의 길이와 직경을 나타낸다. Kang et al.¹⁾은 압축강도가 48.3~235.1 MPa인 초고성능 시멘트 복합체(UHPCC)의 강섬유 혼입 효과에 대한 연구를 통해 강섬유보강에 따라 압축강도가 증가하며 특히, 섬유보강지수가 증가할수록 압축강도가 증가한다고 보고하였다. 그리고 압축강도는

*Corresponding author E-mail : sghong@snu.ac.kr

Received September 1, 2015, Revised November 17, 2015,

Accepted December 9, 2015

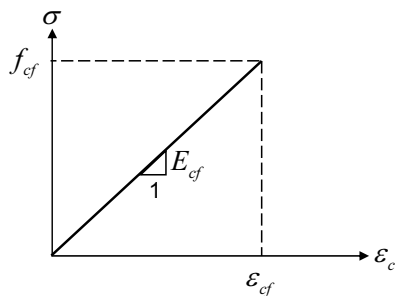
©2016 by Korea Concrete Institute

섬유보강지수에 대해 일정한 선형관계를 가진다고 하였으며 실험결과를 토대로 압축강도가 200 MPa 이상인 UHPC에 적용가능한 압축강도와 섬유보강지수와의 관계식을 도출하였다. 이후 Kang et al.²⁾은 UHPC의 압축응력-변형률 관계를 제시하였으며, 강섬유보강효과는 압축강도와 그 때의 극한변형률 및 탄성계수에 영향을 미친다고 하였다. 비록 국내 연구진들에 의해 압축강도가 200 MPa에 이르는 UHPC에 대한 연구가 수행되긴 했지만, 압축강도가 100 MPa 이상인 UHPC의 압축거동에 대한 연구는 상대적으로 미진한 실정이다. 게다가 UHPC에 대한 설계지침에 압축력을 받는 UHPC의 재료적 특성들이 제시되어 있지만, 실험연구를 통해 지침에서 제시하고 있는 설계지침이 검증된 바가 없다.

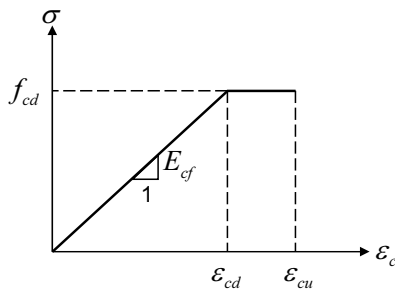
따라서, 이 연구에서는 하이브리드 강섬유가 혼입된 UHPC의 압축거동에 대한 실험연구를 통해 현행 설계기준에서 제시하고 있는 압축응력-변형률 관계의 적용가능성을 알아보고, 압축강도와 탄성계수 등 UHPC의 재료특성을 제시하고자 한다.

2. 현행 설계기준

강섬유 보강 초고성능 콘크리트(UHPC)에 대한 국내외 설계기준에서는 압축강도 특성값(f_{cf})이 180 MPa인 UHPC



(a) Modulus of elasticity for design (AFGC-SETRA⁴⁾)



(b) Compressive strength and strain for design

Fig. 1 Constitutive law for design

Table 1 Design recommendations for UHPC in compression

Current Codes	f_{cd}	ϵ_{cd}	ϵ_{cu}	E_{cf}
AFGC-SETRA ⁴⁾	$\frac{\alpha_{cf} f_{cf}}{\gamma_c}$	$\frac{\alpha_{cf} f_{cf}}{E_{cf} \gamma_c}$	0.0027	50 GPa
K-UHPC ⁵⁾	$0.85 \phi_c f_{cf}$	$\frac{0.85 \phi_c f_{cf}}{E_{cf}}$	0.004	45 GPa

의 압축응력-변형률 관계와 탄성계수 등이 제시되어 있다. Fig. 1은 AFGC-SETRA⁴⁾와 초고성능 콘크리트 K-UHPC 구조설계지침⁵⁾(이하 K-UHPC)에서 제시하고 있는 UHPC의 압축응력-변형률 관계를 보여준다. 압축강도 특성값이 180 MPa인 UHPC는 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 설계압축강도(f_{cd})에 도달할 때까지 선형거동을 하며, 최대강도에 도달이후 극한변형률까지 일정한 강도를 나타낸다. Table 1은 현행 설계기준에서 제시하고 있는 UHPC의 압축설계 주요 특성치를 보여준다. AFGC-SETRA에서는 설계압축강도(f_{cd})를 $\alpha_{cf} f_{cf} / \gamma_c$ 로 규정하고 있다.⁴⁾ 여기서, α_{cf} 는 0.85, f_{cf} 는 최대 압축강도, 그리고 γ_c 는 안전율(=1.5)이다. 극한변형률(ϵ_{cu})은 압축강도 특성치가 150 MPa에서 250 MPa인 UHPC를 대상으로 최대압축강도뿐만 아니라 균열이후의 인장응력을 모두 고려하고 있으며, 설계를 위한 UHPC의 극한변형률을 0.0027로 제시하고 있다. UHPC의 탄성계수(E_{cf})는 Fig. 1(a)와 같은 방법으로 구할 수 있다. AFGC-SETRA에 따르면, 실험을 통해 구한 최대 압축강도(f_{cf})와 그 때의 변형률(ϵ_{cf})의 관계를 통해 탄성계수를 구할 수 있으며, 이러한 방식으로 구한 탄성계수는 Fig. 1(b)와 같이 압축력을 받는 UHPC의 설계 압축변형률을 구하는데 사용할 수 있다.⁴⁾ AFGC-SETRA에서 제시하고 있는 탄성계수의 제안값은 50 GPa이다.

K-UHPC에서는 휨모멘트 및 휨모멘트와 축압력을 동시에 받는 부재의 극한상태에서의 단면내력 검토를 위해 압축응력-변형률 관계를 제시하고 있다.⁵⁾ 설계압축강도는 충분한 실험을 통해 변동성이 비교적 잘 파악된 실험값들을 대상으로 결정된 재료저감계수($\phi_c=0.91$)를 사용하여 $0.85 \phi_c f_{cf}$ 를 사용한다. 이 기준에서는 탄성계수(E_{cf})는 45 GPa 그리고 극한변형률(ϵ_{cu})은 0.004로 제시하고 있다.

3. 실험 프로그램

3.1 사용재료

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

Table 2 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

자들 사이의 공극을 메워 조적을 치밀하게 만들기 위해 평균입경 10 μm 이고 SiO_2 의 함유율이 98% 이상이며, 밀도가 2.6 g/cm^3 인 충전재(Filler)가 사용되었다. Table 2는 시멘트에 대한 구성재료의 중량비로 나타난 UHPC의 배합비를 보여준다.

UHPC 제작에 사용된 강섬유는 길이가 19 mm와 16 mm인 직선형 강섬유가 각각 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. 길이가 서로 다른 강섬유는 전체 부피비에 대해 2 (19 mm) : 1 (16 mm)의 비율로 혼입하였으며, 강섬유 혼입률에 따른 UHPC의 압축거동을 알아보기 위해 전체 부피비는 0.5%에서 2.0%까지 적용되었다. 따라서 섬유보강지수는 $RI = V_f[(2/3)(19/0.2) + (1/3)(16/0.2)]$ 과 같이 구할 수 있다. 여기서, V_f 는 실험체에 혼입된 강섬유의 전체 부피비를 나타낸다.

3.2 실험방법

UHPC의 강섬유 혼입률에 따른 압축거동을 살펴보기 위해, 실험체는 지름 100 mm, 높이 200 mm의 크기의 원주형 공시체를 사용하여 각 배합당 5개씩 제작하였다. 실험은 ASTM C39에 따라 수행되었으며, 실험체는 2,000 kN 용량의 만능시험기(UTM)를 사용하여 변위제어 방법으로 0.3 mm/min 속도로 최종파괴 시까지 가력하였다. 실험체의 변형은 실험체 중앙부에 수직, 수평방향으로 부착된 스트레인 게이지에 의해 측정되었다.

실험체는 UHPC 타설 후 90°C 이상의 고온에서 48시간 증기양생 후 실험 시까지 60일 동안 상온에서 기건 양생하였다.

4. 실험 결과

4.1 응력-변형률 관계

Fig. 2는 강섬유 혼입률에 따른 UHPC의 응력-변형률 관계를 보여준다. 대부분의 실험체는 파괴모드에 따라 압축응력-변형률 곡선의 형태가 상이한 부분도 있지만 최대강도에 도달하기까지 선형거동을 하는 것으로 나타났다. 최대강도에 도달 직후 매우 취성적인 파괴형태를 보여주었다. 이 때문에 이 연구에서 사용된 실험방법으로는 최대강도 도달 이후의 응력-변형률 관계를 얻을 수 없었다. 기존 연구에 따르면, 평균 압축강도가 200 MPa 이상인 UHPC 역시 매우 유사한 거동을 보여주었으며, 이는 일축 압축하에서의 매우 높은 파괴에너지 때문인 것으로 판단된다.²⁾ 강섬유가 혼입된 UHPC의 압축응력-변형률 곡선은 대부분 직선형태를 나타냈지만, 일부 실험체의 경우 직선형태가 아닌 곡선형태로 나타났다. 이는 스트레인 게이지를 사용해서 측정된 압축 변형률의 오차 때문인 것으로 판단된다. 실험에서 구한 실험결과는 Table 3에 요약되어 있다.

Fig. 3(a)는 강섬유 혼입률에 따른 최대압축강도(f_{cf})와 평균값을 보여준다. UHPC의 평균 최대압축강도는 강섬유 혼입률이 증가할수록 다소 증가하였으며, 특히 강섬유 혼입률이 1.5%부터 강도의 증가가 뚜렷이 나타났다. Fig. 3(b)는 강섬유가 혼입되지 않은 실험체의 최대압축강도(f_{cd})에 대한 강섬유가 혼입된 실험체의 최대압축강도(f_{cf}) 비를 보여준다. 강섬유 혼입률이 1%일 때까지는 강도 비가 거의 일정하였으나 1.5%부터 최대강도 비는 증가하는 것으로 나타났다. 강섬유 혼입률이 1%일 때의 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도는 무보강 콘크리트에

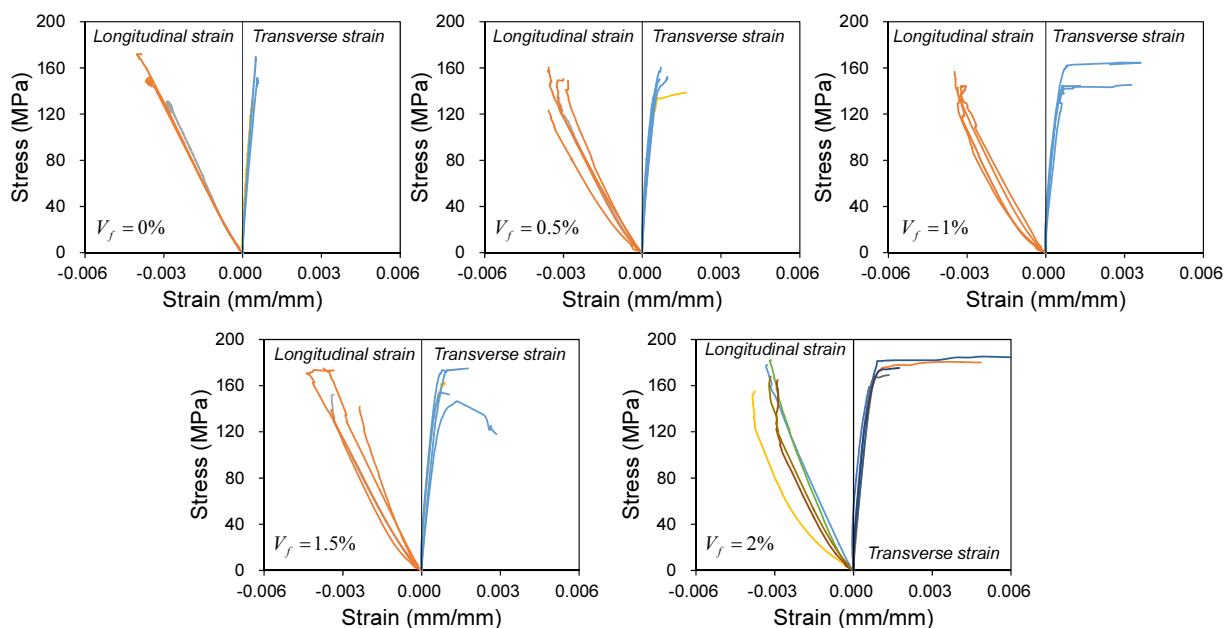


Fig. 2 Compressive stress-strain relationship

Table 3 Summary of test results

Name	V_f (%)	RI	f_{cf} (MPa)	f_{cfm} (MPa)	ϵ_{cf} (mm/mm)	ϵ_{cfm} (mm/mm)	ϵ_{tf} (mm/mm)	E_{cf} (GPa)	E_{cfm} (GPa)	f_{cf}/f_{c0}	f_{cf}/f_{c0} (Mean)	E_{cf}/E_{c0}	E_{cf}/E_{c0} (Mean)
C0-1	0	0	151.3	139.3	0.0035	0.0033	0.0006	43.0	42.2	1.02	1.00	1.02	1.00
C0-2			134.5		0.0033		-	40.9		0.97		0.97	
C0-4			140.2		0.0036		-	38.8		0.92		0.92	
C0-5			131.2		0.0029		0.0004	46.0		1.09		1.09	
C0.5-1	0.5	0.45	149.0	148.2	0.0028	0.0032	0.0009	52.8	46.4	1.02	1.06	1.25	1.10
C0.5-2			157.0		0.0036		0.0006	43.7		1.08		1.03	
C0.5-3			135.5		0.0035		0.0004	39.2		0.93		0.93	
C0.5-4			149.2		0.0032		0.0006	46.2		1.02		1.09	
C0.5-5	150.5	0.0030	0.0007	50.0	1.03	1.18							
C1-1	1.0	0.9	156.7	146.1	0.0035	0.0033	0.0007	45.1	44.4	1.07	1.05	1.07	1.05
C1-2			143.4		0.0032		0.0010	44.2		0.98		1.05	
C1-3			154.3		0.0031		0.0012	49.2		1.06		1.16	
C1-4			142.9		0.0034		0.0006	42.6		0.98		1.01	
C1-5	133.4	0.0032	0.0005	41.1	0.91	0.97							
C1.5-3	1.5	1.35	171.0	165.9	0.0043	0.0038	0.0007	39.9	43.7	1.17	1.08	0.94	1.04
C1.5-4			175.0		0.0037		0.0018	46.8		1.20		1.11	
C1.5-5			151.6		0.0034		0.0006	44.4		1.04		1.05	
C2-1	2.0	1.8	177.3	170.6	0.0033	0.0032	0.0015	53.3	53.9	1.22	1.17	1.26	1.28
C2-3			181.3		0.0032		0.0009	56.7		1.24		1.34	
C2-4			162.8		0.0029		0.0007	55.6		1.12		1.31	
C2-5			160.8		0.0032		0.0007	50.0		1.10		1.18	

Notes: 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 maximum stress and average maximum stress; ϵ_{cf} and ϵ_{cfm} are measured axial and transverse strain; ϵ_{cfm} is the average axial strain; E_{cf} is the modulus of elasticity; E_{cfm} is the average modulus of elasticity; f_{c0} and E_{c0} are the maximum compressive strength and the secant modulus of elasticity of the test specimens without steel fibers, respectively. Test results of C0-3, C1.5-1, C1.5-2, and C2-2 specimens were not included because of test error.

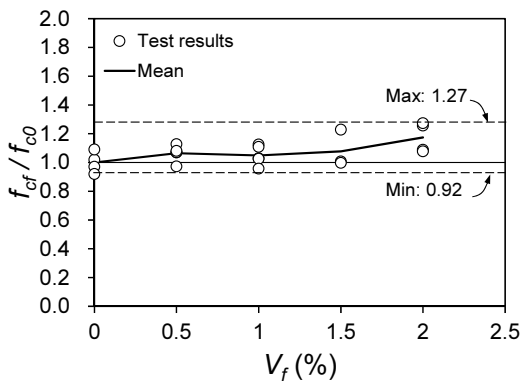


Fig. 3 Effect of fiber volume ratio on compressive strength

비해 평균 약 7% 그리고 2%일 때는 약 14% 정도 증가하였다. 각 실험체별 강도 비는 최소 0.92, 최대 1.27로 나타났으며, 모든 실험체에 대한 강도 비는 평균 1.07로 나타났다. 이러한 실험결과는 최대압축강도가 200 MPa 이상인 UHPC를 대상으로 수행된 연구결과와 비슷한 결과

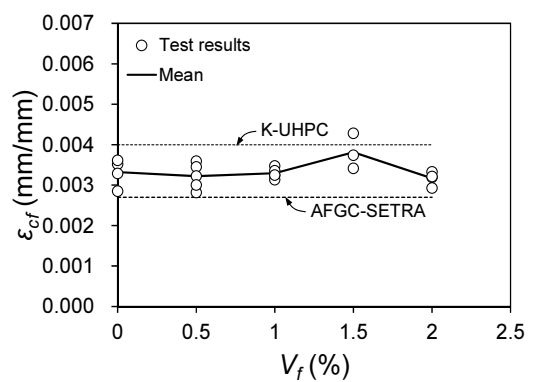


Fig. 4 Axial strain corresponding to maximum stress

를 보였다. Kang et al.²⁾의 연구에 따르면, 강섬유 혼입률이 1%인 UHPC의 최대압축강도는 강섬유가 혼입되지 않은 실험체와 거의 일치하는 경향을 보여주었으며, 강섬유 혼입률이 2%인 UHPC의 강도는 강섬유가 혼입되지 않은 실험체에 비해 약 6%의 강도 증가 효과가 있었다. UHPC

의 최대압축강도는 강섬유 혼입률에 따라 증가하는 경향을 보이나 강섬유 혼입률이 1%일 때까지는 강섬유의 효과가 거의 나타나지 않으며, 1.5%이상 혼입되었을 경우, 강도 증진 효과가 있는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 강섬유 혼입률에 따른 최대강도일 때의 축방향 변형률(ϵ_{cf})을 보여준다. 이 연구에서는 최대압축강도일 때 최종파괴가 발생하였으므로 최대강도일 때의 변형률은 극한변형률과 같다고 가정하였다. 최소 변형률은 0.0028(C0.5-1)이었으며, 최대 변형률은 0.0043(C1.5-3), 그리고 평균 변형률은 0.0032~0.0035로서 강섬유 혼입률에 따른 축방향 변형률은 거의 일정한 값을 보여주었다. 스트레인 게이지를 사용해서 구한 UHPC의 압축 변형률은 Table 1에서 나타낸 바와 같이 AFGC-SETRA⁴⁾와 K-UHPC⁵⁾에서 제시하고 있는 변형률 범위에 존재하는 것으로 나타났다. 여기서, AFGC-SETRA⁴⁾와 K-UHPC⁵⁾에서 제시하고 있는 극한변형률은 각각 0.0027과 0.004이다.

4.2 파괴모드

Fig. 5는 강섬유 혼입률이 2%일 때 UHPC의 전형적인 파괴모드를 보여준다. 강섬유가 혼입되지 않은 실험체의 경우, 최대 강도 도달 직후 큰 폭발음과 함께 매우 취성적인 파괴가 발생하였다. 강섬유 보강 콘크리트는 대부분 길이방향 균열뿐만 아니라 실험체 중심부에서 가로방향의 균열도 동시에 발생하였으며, 대체적으로 부재 길이방향으로 발생한 균열로 최종파괴되었다. 강섬유 혼입률의 증가에 따른 압축강도의 증가는 균열 면에서의 가교작용으로 인해 구속효과가 발생하여 생긴 것으로 판단되나, 기존 연구자들의 연구결과에서 보고된 바에 의하면 강섬유 혼입률에 따른 압축강도의 증가가 모든 연구결과에서 뚜렷이 나타나지 않는 바, 이 부분에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

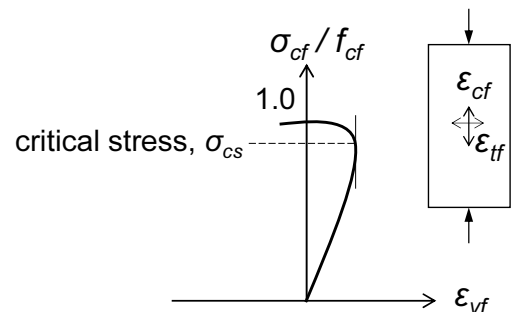


Fig. 5 Typical failure mode of UHPC ($V_f=2\%$)

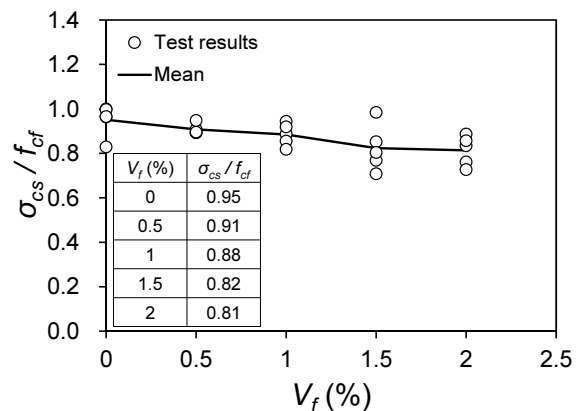
4.3 체적변형

압축력이 재하되는 콘크리트의 경우, 압축응력은 변형률이 증가할수록 최대압축강도의 약 75~90% 수준까지 선형으로 증가한다. 선형거동을 하여 특정지점에 도달한 이후 부재의 체적변화로 인해 변형률은 점차 감소하게 된다. 이 때 압축강도는 서서히 증가하여 최대압축강도에 도달하게 된다. 이 때 체적변형률이 증가하다 다시 감소할 때의 응력을 임계강도(critical stress, σ_{cs})라 하며, 이에 대한 정의는 Fig. 6(a)에 나타나있다. 여기서, 체적변형률(ϵ_v)은 $\epsilon_{vf} = \epsilon_{cf} + 2\epsilon_{tf} + 2\epsilon_{cf}\epsilon_{tf} + \epsilon_{tf}^2 + \epsilon_{cf}\epsilon_{tf}^2$ 로 계산되며, 길이방향과 가로방향으로 부착된 스트레인게이지 값을 사용해 구하였다.

Fig. 6(b)는 강섬유 혼입률에 따른 최대압축강도에 대한 임계강도의 비(σ_{cs}/f_{cf})를 보여준다. 측정결과, 강섬유 혼입률이 증가할수록 최대압축강도에 대한 임계응력의 비는 감소하는 것으로 나타났다. 강섬유가 혼입되지 않은 경우 임계강도는 최대강도의 95% 수준이었으며, 2%의 강섬유가 혼입된 경우, 임계강도는 최대강도의 81% 수준으로 나타났다. 강섬유 혼입률이 증가할수록 최대압축강도에 대한 임계응력의 비가 감소하는 이유는 UHPC의 초기 균열이 발생한 이후 강섬유의 가교효과로 인해 압축강도가 다소 증가하였기 때문으로 판단된다.



(a) Definition of critical strength



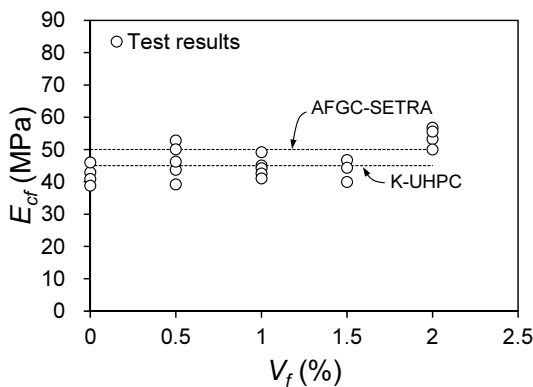
(b) Ratio of critical strength to maximum compressive strength

Fig. 6 Volumetric deformation

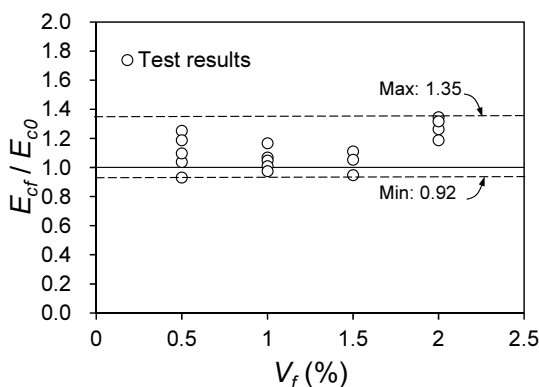
4.4 탄성계수

UHPC의 탄성계수는 현행 설계기준에 따라 Fig. 2에서 제시된 바와 같이 응력-변형률 관계의 원점에서부터 최대강도를 연결하는 직선의 기울기로 구하였다. Fig. 7(a)는 강섬유 혼입률에 따른 UHPC의 탄성계수를 보여준다. 강섬유가 혼입된 UHPC의 탄성계수는 무보강 UHPC의 탄성계수에 비해 큰 값을 나타냈으며, 특히, 강섬유 혼입률이 1.5%에서 2%로 증가할 때 탄성계수의 증가가 뚜렷이 나타났다. 이러한 결과는 UHPC의 압축 변형률은 거의 유사하게 나타난 반면, 최대강도가 강섬유 혼입률의 증가에 따라 증가하였기 때문으로 판단된다. 강섬유가 혼입되지 않은 실험체의 탄성계수(E_{c0})의 평균값은 42.3 GPa이었으며 강섬유가 혼입된 UHPC의 탄성계수는 평균 43.7~53 GPa로 나타났다.

Fig. 7(b)는 강섬유가 보강되지 않은 UHPC의 탄성계수(E_{c0})에 대한 강섬유 보강 UHPC의 탄성계수(E_{cf})의 비를 보여준다. 여기서, E_{c0} 는 강섬유가 보강되지 않은 5개의 실험체에서 구한 탄성계수의 평균값으로 정의하였다. 강섬유가 혼입되지 않은 무보강 UHPC의 평균 탄성계수에 대한 강섬유가 혼입된 UHPC의 탄성계수의 비는 최소 0.92에서 최대 1.35로 나타났으며, 모든 실험결과에 대한 탄성계수 비의 평균값은 1.10으로 나타났다.



(a) Modulus of elasticity of UHPC



(b) Ratio of E_{cf}/E_{c0}

Fig. 7 Effect of fiber volume ratio on the modulus of elasticity

전술한 바와 같이 현행 설계기준에서는 모두 특정강도의 UHPC에 대한 탄성계수를 제안하고 있다. AFGC-SETRA⁴⁾에서는 압축강도 특성치가 180 MPa인 UHPC의 탄성계수를 50 GPa로 제안하고 있으며, K-UHPC⁵⁾에서는 1.5%의 강섬유가 혼입된 UHPC의 탄성계수를 45 GPa로 제시하고 있다. Fig. 7(a)에서 보이는 바와 같이 현행 기준에서 제시하고 있는 탄성계수는 실험값에 비해 다소 과대평가되는 것으로 나타났다. 하지만 강섬유 혼입률이 2%일 경우, 실험에서 구한 탄성계수는 기준에서 제시하고 있는 탄성계수 값을 초과하였다. 따라서 현행 기준에서 제시하고 있는 탄성계수는 수정될 필요가 있다.

5. 결과 분석

5.1 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도

Table 4는 기존연구에서 제시된 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도 제안식을 보여준다. 기존 모델에서 제시된 강섬유가 혼입된 콘크리트의 압축강도는 강섬유가 혼입되지 않은 무보강 콘크리트의 압축강도에 강섬유 혼입률 또는 섬유보강지수(RI)를 더한 값으로 제안되었다. 제안된 압축강도 모델의 비교를 위해 Table 4에 나타낸 바와 같이 Fanella et al.,⁶⁾ Ezeldin et al.,⁷⁾ Nataraja et al.,⁸⁾ Song et al.,⁹⁾ Yazici et al.,¹⁰⁾ Kang et al.^{1,2)} 등 기존 연구자들에 의해 제안된 압축강도 식을 사용하였다. 분석을 위해 사용된 실험체는 총 146개이며, 강섬유 혼입률(V_f)은 0~5%, 섬유보강지수(RI)는 0~3.25, 압축강도(f_{cf})는 29.4~235.1 MPa, 그리고 탄성계수(E_{cf})는 27.6~56.7 GPa이다. 기존 연구자들에 의해 수행된 실험결과는 Table 5에 나타나있다.

Fig. 8(a)는 기존 실험결과를 이용해 강섬유 혼입률에 따른 무보강 콘크리트 압축강도에 대한 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도 비(f_{cf}/f_{c0})를 보여준다. 기존 실험체의 압축강도 비는 모두 0.96~1.48에 존재하였고, 강섬유 혼입률의 증가에 따른 압축강도의 증가는 뚜렷이 나타나지

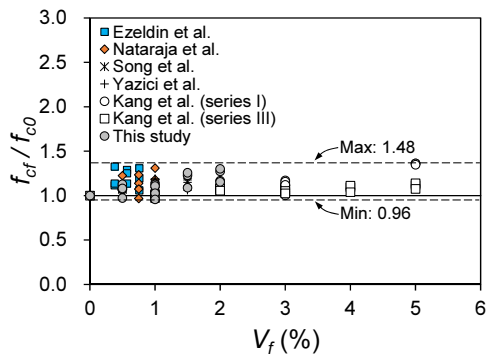
Table 4 Existing compressive strength equations

Authors	Compressive strength equations
Fanella et al. ⁶⁾	$f_{cf} = f_{c0} + 1.9(RI)$
Ezeldin et al. ⁷⁾	$f_{cf} = f_{c0} + 3.51(RI^*)$
Nataraja et al. ⁸⁾	$f_{cf} = f_{c0} + 2.1604(RI^*)$
Song et al. ⁹⁾	$f_{cf} = 85 + 15.12V_f - 4.71V_f^2$
Yazici et al. ¹⁰⁾	$f_{cf} = 50.4869 + 0.0434(l_f/d_f) + 1.9667V_f$
Kang et al. ^{1,2)}	$f_{cf} = f_{c0} + 7.8(RI)$

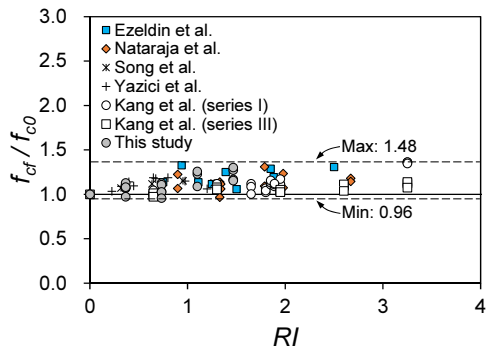
Notes: f_{cf} is the maximum compressive strength of fiber reinforced concrete; f_{c0} is the compressive strength of concrete without steel fibers; RI is the reinforcement index ($V_f(l_f/d_f)$); RI^* is the reinforcement index by weight; V_f is the fiber volume ratio; and l_f and d_f are a length and a diameter of the steel fiber, respectively.

Table 5 Test results in previous researches

Authors	No. of specimens	V_f (%)	RI	f_{cf} (MPa)	E_{cf} (GPa)
Ezeldin et al. ⁷⁾	10	0~0.76	0~2.5	35.9 ~47.9	30.7 ~40.5
Nataraja et al. ⁸⁾	14	0~1	0~2.67	29.4 ~49.2	-
Song et al. ⁹⁾	5	0~2	0~1.27	85 ~98	-
Hsu et al. ¹¹⁾	19	0.5~1	0.3~0.6	62.9 ~88	27.6 ~29.4
Yazici et al. ¹⁰⁾	10	0~1.5	0~1.2	49.1 ~58.3	-
Kang et al. ¹⁾ (series I)	27	0~5	0~3.25	79.5 ~112.9	-
Kang et al. ¹⁾ (series II)	18	0~3	0~1.95	48.3 ~126.3	-
Kang et al. ¹⁾ (series III)	18	0~5	0~3.25	201.1 ~235.1	-
This study	25	0~2	0~1.47	131.2 ~181.3	38.8 ~56.7
Total	121	0~5	0~3.25	29.4 ~235.1	27.6 ~56.7



(a) Effect of fiber volume ratio



(b) Effect of reinforcement index

Fig. 8 Effect of steel fiber on compressive strength

않았다. 그리고 기존 실험값 중 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도가 무보강 콘크리트의 압축강도에 비해 48% 이상 증가하는 경우는 발견되지 않았다.

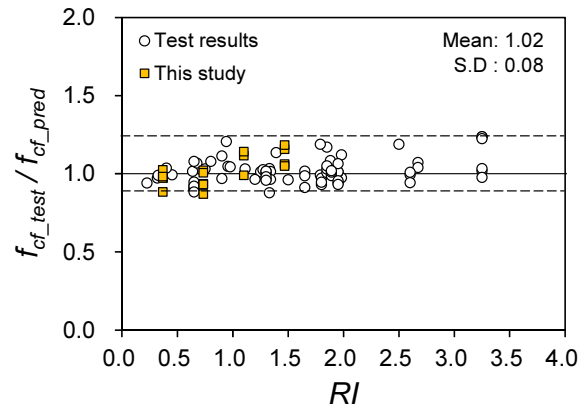


Fig. 9 Comparison of predicted strength with test data

Table 6 Ratio of test results to predicted compressive strength (f_{cf}/f_{cf_pred})

Authors	Fanella's Eq.	Kang's Eq.	Proposed
	Mean (S.D)	Mean (S.D)	Mean (S.D)
Ezeldin et al. ⁷⁾	1.11 (0.08)	0.92 (0.09)	1.09 (0.09)
Nataraja et al. ⁸⁾	1.04 (0.07)	0.83 (0.08)	1.03 (0.08)
Song et al. ⁹⁾	1.10 (0.03)	1.04 (0.02)	1.02 (0.03)
Yazici et al. ¹⁰⁾	1.10 (0.05)	1.02 (0.06)	1.02 (0.05)
Kang et al. ¹⁾	1.06 (0.07)	0.97 (0.04)	1.00 (0.08)
This study (Eq.(1))	1.11 (0.10)	1.07 (0.08)	1.02 (0.09)
Total	1.08 (0.08)	0.97 (0.09)	1.03 (0.08)

Note: f_{cf} is the maximum compressive strength obtained from the tests and f_{cf_pred} is the predicted compressive strength.

Table 4에서 제시하고 있는 압축강도 제안식의 경우, 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도(f_{cf})는 무보강 콘크리트의 압축강도(f_{c0})보다 크며, 섬유보강지수(RI)가 증가할수록 증가하는 것을 나타내고 있다. 이러한 제안식은 섬유보강지수에 대한 범위가 제시되어 있지 않기 때문에, 섬유보강지수가 증가하면 예측된 압축강도는 반드시 증가하게 된다. 하지만, Fig. 8(b)에서 보이는 바와 같이, 일부 실험체에서 섬유보강지수의 증가에 따른 압축강도의 증가가 나타나긴 하지만 실험체 전체로 보았을 때 섬유보강지수의 증가에 따른 압축강도의 증가는 명확하게 나타나진 않는다. 이러한 연구결과를 바탕으로 이 연구에서는 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도를 평균값을 사용하여 다음 식(1)과 같이 제안한다.

$$f_{cf_pred} = 1.1f_{c0} \quad (1)$$

여기서, f_{c0} 는 강섬유가 혼입되지 않은 무보강 UHPC의 압축강도이다.

Fig. 9는 식(1)에서 제안된 강섬유 보강 압축강도와 기존 실험값을 비교한 것이다. 제안된 압축강도에 대한 실험값은 평균 1.02, 표준편차 0.08로 실험값과 잘 일치하

는 것으로 나타났다. Table 6은 제안된 강도식과 기존 제안식과의 비교를 나타낸다. 비교를 위해 Table 4의 제안식 중 강섬유 혼입률을 부피비로 표현한 Fanella 식⁶⁾과 Kang 식^{1,2)}을 사용하였다. Fanella et al.⁶⁾와 Kang et al.^{1,2)}에 의해 제안된 강섬유 보강 압축강도는 각각 평균 1.08, 0.97, 표준편차는 0.08, 0.09로 나타났다. 따라서 제안된 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도는 강섬유 혼입률과 섬유보강지수와는 상관없이 압축강도가 29.4~235.1 MPa인 강섬유 보강 콘크리트에 대해 적용가능할 것으로 판단된다.

5.2 탄성계수

기존 연구에 따르면, 강섬유 보강 콘크리트의 탄성계수는 강섬유 부피비 또는 중량비로 나타낸 섬유보강지수에 따라 달라지며, 무보강 콘크리트의 탄성계수에 섬유보강지수(R_f)를 더한 값으로 제안되었다. Ezeldin et al.⁷⁾과 Nataraja et al.⁸⁾은 압축강도가 50 MPa 이하인 강섬유 보강 콘크리트의 탄성계수를 $E_{cf} = E_{c0} + 3105(R_f)$ 와 같이 제안하였으며, Kang et al.²⁾은 압축강도가 200 MPa 이상인 강섬유 보강 UHPC의 탄성계수를 $E_{cf} = E_{c0} + 1139(R_f)$ 와 같이 제안하였다. 이러한 연구결과는 섬유보강지수의 증가에 따라 강섬유 보강 콘크리트의 탄성계수가 증가한다는 것을 의미한다. 하지만, Fig. 10에서 볼 수 있듯이, 강섬유 보강 콘크리트의 탄성계수는 압축강도(f_{cf})의 증

가에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 연구결과를 바탕으로 강섬유 보강 콘크리트의 탄성계수를 다음 식(2)와 같이 압축강도의 함수로 제안한다.

$$E_{cf-pred} = 13000(f_{cf})^{1/4} \quad (2)$$

제안된 강섬유 보강 콘크리트의 탄성계수는 Fig. 10에 나타나있다. 기존 연구결과와의 비교를 위해 압축강도가 35.9~47.9 MPa, 201~235 MPa인 강섬유 보강 콘크리트와 UHPC를 대상으로 실험연구를 수행한 Ezeldin et al.⁷⁾과 Kang et al.²⁾의 실험결과를 사용하였다. 비록 이 연구에서 사용된 UHPC의 탄성계수의 편차가 기존 실험결과에 비해 다소 크게 나타났지만, 제안된 탄성계수는 실험결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. Fig. 10에서 이 연구에서 사용된 실험체의 탄성계수의 편차가 다른 실험체에 비해 다소 나타난 것은, 실험체의 극한 변형률은 강섬유 혼입률과 상관없이 거의 유사하게 나타난 반면, 최대강도가 강섬유 혼입률에 따라 차이가 낮기 때문으로 판단된다. Table 7은 기존 연구에서 제안된 탄성계수와 실험값을 상호비교한 것이다. 이 연구에서 제안된 탄성계수는 실험값에 대해 평균 1.01, 표준편차 0.07을 나타냈으며, 실험값을 비교적 잘 예측하였다.

6. 결 론

이 연구에서는 강섬유 혼입률에 따른 UHPC의 압축실험을 통해 압축거동을 살펴보았다. 실험연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 이 연구에서 사용된 강섬유 보강 UHPC는 최종 파괴 시까지 선형거동을 하는 것으로 나타났으며, 최대 압축강도에 도달 직후 발생하는 취성과파괴로 인해 최대강도 이후의 거동을 살펴볼 수가 없었다. 이러한 현상은 강섬유 혼입률과는 상관없이 모든 실험체에서 발생하였으며, UHPC의 매우 높은 파괴에너지 때문인 것으로 판단된다.
- 2) 강섬유 혼입률이 증가할수록 UHPC의 압축강도는 대체로 증가하는 경향을 보였다. 강섬유 혼입률이 1%일 때까지는 강도의 변화가 크지 않았으나, 1.5%를 이상인 경우, 압축강도의 증가가 뚜렷이 나타났다.
- 3) 강섬유 혼입률에 따른 UHPC의 극한변형률은 0.0032~0.0035로서 거의 일정한 값을 보여주었다. AFGC-SETRA에서 제시하고 있는 극한변형률은 실험값에 대해 보수적인 값을 제시하고 있으며, K-UHPC은 다소 과대평가하는 것으로 나타났다.
- 4) 강섬유 보강 UHPC의 탄성계수는 강섬유 혼입률의 증가에 따라 다소 증가하는 경향을 보였으며, 강섬유의 보강으로 인해 탄성계수는 약 10% 정도 증가하는 것으로 나타났다.

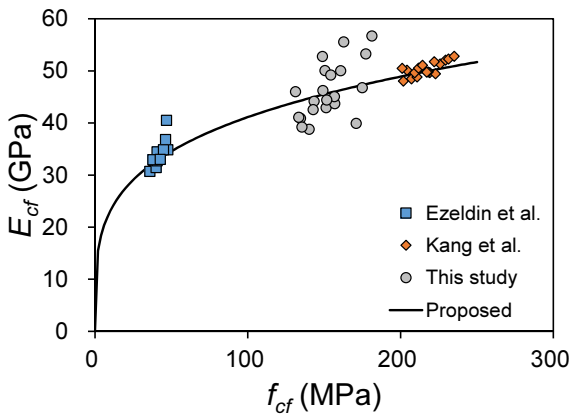


Fig. 10 Modulus of elasticity

Table 7 Ratio of test results to predicted modulus of elasticity ($E_{cf}/E_{cf-pred}$)

Authors	Ezeldin's Eq.	Kang's Eq.	Proposed
	Mean (S.D)	Mean (S.D)	Mean (S.D)
Ezeldin et al. ⁷⁾	0.98 (0.05)	1.06 (0.07)	1.02 (0.07)
Kang et al. ²⁾	0.90 (0.05)	0.99 (0.02)	1.00 (0.02)
This study	1.05 (0.11)	1.09 (0.11)	1.01 (0.10)
Total	0.98 (0.10)	1.05 (0.09)	1.01 (0.07)

Note: E_{cf} is the modulus of elasticity obtained from the tests and $E_{cf-pred}$ is the predicted modulus of elasticity.

- 5) 기존 실험 연구결과를 바탕으로 무보강 콘크리트의 압축강도에 대한 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도를 분석한 결과, 강섬유 혼입으로 인해 압축강도는 약 10% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 이 연구에서는 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도를 무보강 콘크리트의 압축강도의 함수로 표현하였다.
- 6) 강섬유 보강 UHPC의 탄성계수는 압축강도의 영향을 받는 것으로 나타났다. 이 연구에서는 압축강도의 함수로 탄성계수가 제안되었으며, 제안된 탄성계수는 강섬유 보강 콘크리트에 적용가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

1. Kang, S. T., Park, J. J., Ryu, G. S., and Kim, S. W., "The Effect of Steel-Fiber Reinforcement on the Compressive Strength of Ultra High Performance Cementitious Composites (UHPC)", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.14, No.5, 2010, pp.110-118.
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. 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.
4. Association Française du Génie Civil (AFGC) *Bétons fibrés à ultra-hautes performances*. Association Française du Génie Civil, 2013, France.
5. Korea Concrete Institute, *Design Recommendations for Ultra-High Performance Concrete K-UHPC*, KCI-M-12-003, Korea, 2012 (in Korean).
6. Fanella, D. A., and Naaman, A. E., "Stress-Strain Properties of Fiber Reinforced Mortar in Compression", *ACI Journal*, Vol.82, No.4, 1985, pp.475-483.
7. Ezeldin, S., and Balaguru, P. N., "Normal- and High-strength Fiber-Reinforced Concrete Under Compression", *ACI Material Journal*, Vol.94, No.4, 1997, pp.286-290.
8. Nataraja, M. C., Dhang, N., and Gupta, A. P., "Stress-Strain Curve for Steel-Fiber Reinforced Concrete Under Compression", *Cement & Concrete Composites*, Vol.21, 1999, pp.383-390.
9. Song, P. S., and Hwang, S., "Mechanical Properties of High-Strength Steel Fiber-Reinforced Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol.18, 2004, pp.669-673.
10. Yazici, S., Inan, G., and Tabak, V., "Effect of Aspect Ratio and Volume Fraction of Steel Fiber on the Mechanical Properties of SFRC", *Construction and Building Materials*, Vol.21, 2007, pp.1250-1253.
11. Hsu, L. S., and Hsu, C. T., "Stress-Strain Behavior of Steel-Fiber High-Strength Concrete Under Compression", *ACI Structural Journal*, Vol.91, No.4, 1994, pp.448-457.

요약 이 연구에서는 강섬유 혼입률에 따른 초고성능 강섬유 보강 콘크리트(UHPC)의 압축거동에 관한 연구를 수행하였으며, 실험결과를 바탕으로 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도와 탄성계수를 제안하였다. 지름 100 mm, 높이 200 mm의 원주형 공시체에는 0, 0.5, 1.0, 1.5, 그리고 2%의 강섬유가 혼입되었다. 실험에 사용된 UHPC는 굵은골재를 사용하지 않았으며, 16 mm와 19 mm의 강섬유가 일정비율로 혼입된 하이브리드 강섬유가 사용되었다. 실험결과, UHPC의 압축강도와 탄성계수는 강섬유 혼입률에 따라 증가하는 경향을 보였다. 실험결과를 바탕으로 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도와 탄성계수가 제안되었다. 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도는 무보강 콘크리트의 압축강도의 함수로 제안되었으며, 탄성계수는 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도의 함수로 제안하였다. 기존 실험값과 비교한 결과 제안된 압축강도와 탄성계수는 실험값을 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났으며, 압축강도가 35~235 MPa인 강섬유 보강 콘크리트에 적용가능 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 초고성능 콘크리트, 강섬유, 응력-변형률 관계, 압축강도, 탄성계수