

## 섬유 조합에 따른 초고성능 콘크리트의 인장거동

### Tensile Behavior of Ultra-High Performance Concrete According to Combination of Fibers

최 정 일<sup>1)</sup>                      고 경 택<sup>2)</sup>                      이 방 연<sup>3)\*</sup>  
Jung-Il Choi                      Kyung-Taek Koh                      Bang-Yeon Lee

#### Abstract

Ultra-High Strength Concrete(UHPC) has ultra-high material performance including high strength and high flowability. On the other hand it is less ductile than high ductile fiber reinforced cementitious composite. This study investigated the effect of combination of steel fiber and micro fiber on the tensile behavior of UHPC. Four types of UHPC containing combination of steel fiber, polyethylene(PE), polyvinyl alcohol(PVA), and basalt fiber were designed. And then uniaxial tension tests were performed to evaluate the tensile behavior of UHPC according to combination of fibers. And density was measured to evaluate whether micro fiber induces unintentional high pore or not. From the test results, it was exhibited that PE fiber with high strength is effective to improve the tensile behavior of UHPC and basalt fiber is effective to increase the cracking and tensile strength of UHPC. Furthermore, it was also verified that micro fiber does not make high pore.

Keywords : Cracking strength, Fiber combination, Tensile behavior, Tensile strain capacity, Tensile strength, UHPC

#### 1. 서 론

최근 범지구적으로 도시화와 더불어 자연재해의 크기 및 횟수가 증가함에 따라 전통적 건설재료인 보통 콘크리트의 성능을 개선한 초고성능 콘크리트(UHPC: Ultra-High Performance Concrete)에 대한 개발 및 관련 연구가 활발히 진행되고 있다(Buitelaar, 2004; Naaman and Wille, 2012; Rossi, 2008). 미국 연방도로국 보고서에 따르면 1997년 캐나다에서 처음으로 UHPC 교량이 건설된 이후 미국, 독일, 프랑스, 일본, 호주, 한국 등에서 90개 이상의 UHPC 교량이 건설되었고, 프랑스, 일본, 한국 등에서는 UHPC 사용에 관한 지침(Recommendation)이 발간되었다(KCI, 2012; Russel and Graybeal, 2013).

이와 같이 전세계적으로 UHPC에 관한 연구가 활발히 진행되고 구조물에 적용되는 이유는 UHPC가 갖는 우수한 재료특성 때문이다. Association Française de Génie Civil(AFGC)에 따르면 UHPC는 150 MPa 이상의 압축강도를 나타내고

섬유 혼입을 통해 취성적인 거동이 나타나지 않으며, 특별한 골재를 사용하면서 높은 결합재 함유량을 갖는 콘크리트로 정의되고 있다(AFGC, 2002). 또한 매우 낮은 물/결합재비를 갖고 최밀축전 이론에 근거한 배합설계와 고성능 감수제를 사용하여 우수한 유연학적 특성을 갖는다.

이러한 우수한 성능에도 불구하고 현재까지 개발된 UHPC는 시멘트, 물, 잔골재로 구성된 모르타르에 2% 이내의 합성 섬유를 혼입함으로써 일반적으로 일축 인장 하중 하에서 약 2% 이상의 변형 성능을 나타내는 HPRCC(High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite)(Kim, 2007; Lee et al., 2013; Li et al., 2001; Li, 2012)로 알려진 고연성 섬유 복합체에 비하여 인장 변형 성능이 떨어지는 한계점을 갖고 있다.

기존 연구에 따르면 직경 0.5 mm 이상의 매크로섬유와 직경 0.022 mm 이하의 마이크로섬유를 혼합하여 사용하는 경우 매크로섬유를 단독으로 사용한 경우에 비하여 콘크리트

1) 정회원, 전남대학교 건축학부 박사과정  
2) 정회원, 한국건설기술연구원, 구조융합연구소 연구위원  
3) 정회원, 전남대학교 건축학부 교수, 교신저자

\* Corresponding author : bylee@jnu.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2015년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2015년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Table 1 Properties of cement and zirconium

Material	Specific surface area [cm <sup>2</sup> /g]	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	Chemical composition (%)						
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>
Cement	3,413	3.15	21.01	6.40	3.12	61.33	3.02	2.3	-
Zirconium	80,000	2.10	96.00	0.25	0.12	0.38	0.1	-	3.0

의 인장성능이 향상되는 것으로 나타났다(Banthia et al. 2014; Russel and Graybeal, 2013). 이는 마이크로섬유가 매크로균열이 발생하는 것을 지연시켜 결과적으로 인장강도와 인성을 증가시키기 때문인 것으로 알려져 있다.

UHPC에 주로 사용되는 섬유는 직경 0.2 mm의 직선형 강섬유이기 때문에 전술한 매크로섬유와 마이크로섬유 혼입에 의한 인장성능 향상 효과는 다소 차이가 있을 것으로 판단되지만, 현재까지 UHPC에 매크로섬유와 마이크로섬유를 혼입한 연구는 미흡한 실정이다(Russel and Graybeal, 2013; Koh et al., 2013).

다양한 UHPC 중에서 한국에서 개발된 K-UHPC는 압축강도 200 MPa를 나타내면서 직경 0.2 mm의 강섬유를 길이에 따라 단독 또는 하이브리드 형태로 부피비 2 %를 사용하여 직접 인장강도 12.0 MPa ~ 19.1 MPa, 인장 변형 성능 0.3 % ~ 0.79 %의 성능 및 슬럼프 플로 600 mm 이상의 고유동성을 나타낸다(Koh et al. 2013).

이 연구에서는 K-UHPC의 인장 변형 성능을 향상시키기 위한 기초연구로서 강섬유와 강섬유 이외의 마이크로섬유의 조합이 UHPC의 인장거동에 미치는 영향을 실험적으로 조사하고자 한다.

## 2. 재료 및 실험 방법

### 2.1 사용 재료 및 배합

#### 2.1.1 결합재

1종 보통포틀랜드시멘트와 지르코늄 실리카가 결합재로 사용되었다. 이 연구에서 사용한 지르코늄 실리카는 실리카 폼과 화학성분은 유사하지만 분말도 80,000 cm<sup>2</sup>/g 정도이며, 공극 충전 효과와 포졸란 반응을 통하여 재료의 밀도를 향상시켜 강도를 증진시키고, 동시에 경화 전에는 입자 충전밀도를 증가시키면서 다른 입자들 사이에서 윤활작용을 하여 유동성을 향상시키기 위해 사용되었다(Koh et al. 2013). Table 1은 시멘트와 지르코늄 실리카의 물성을 나타낸다.

#### 2.1.2 충전재

충전재는 SiO<sub>2</sub> 성분이 99 % 이상인 재료로서 밀도는 2.60 g/cm<sup>3</sup>이며, 크기는 시멘트와 지르코늄 실리카의 중간 정도인 평균 입경 2.2 μm의 크기를 갖고 있다. 충전재를 사용한 이유는 결합재로서의 역할보다 시멘트와 지르코늄 실리카 사이를 채우는 역할을 통해 충전밀도를 증가시켜 유동성을 향상시키고 경화 후에는 UHPC를 밀실하게 함으로써 강도 증진 및 내구성을 향상시키기 위해서이다.

#### 2.1.3 골재

골재는 UHPC의 수축량을 줄이고 결합재의 양을 줄이기 위해 밀도 2.62 g/cm<sup>3</sup>이고 평균 입경이 0.5 mm이하인 규사를 사용하였으며, 굵은 골재는 사용하지 않았다.

#### 2.1.4 혼화제

혼화제로는 팽창제, 수축저감제, 고성능감수제, 소포제가 사용되었다. 팽창제와 수축저감제는 결합재 비율이 높은 UHPC의 자기수축을 저감하기 위해 사용하였으며, 유동성을 확보하기 위하여 밀도가 1.01 g/cm<sup>3</sup>이고 고형분이 30 %인 폴리 카르본산계 고유동/고강도 콘크리트용 제품을 사용하였다. 또한 혼합과정에서 생길 수 있는 큰 기포를 제거하기 위하여 소포제를 소량 첨가하였다.

#### 2.1.5 섬유

이 연구에서 사용한 섬유는 강섬유, 폴리에틸렌(PE)섬유, 폴리비닐알코올(PVA)섬유, 현무암(Basalt)섬유이며, 각 섬유의 물성은 Table 2와 같다. 강섬유를 포함하여 모든 섬유는

Table 2 Properties of fibers

Type of fiber	Diameter [μm]	Length [mm]	Tensile strength [MPa]	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	Elastic modulus [GPa]
Steel	200	16.3, 19.5	2,500	7.8	200
PE	12	18	2,700	0.97	6
PVA	40	12	1,100	1.3	41
Basalt	12	12	2,100	2.65	100

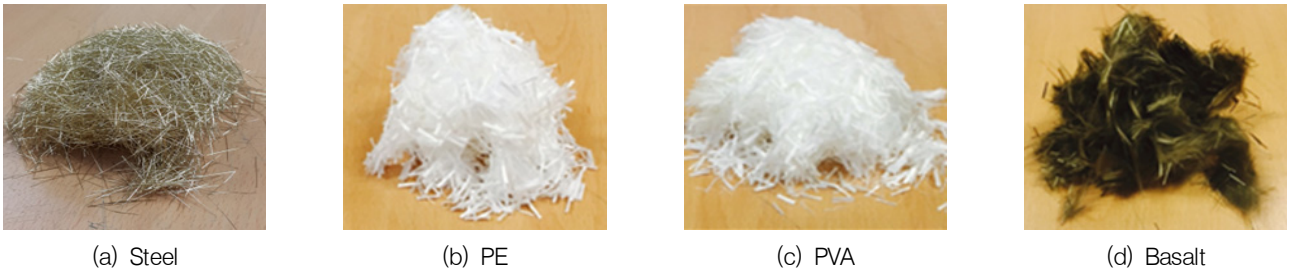


Fig. 1 Fibers

Table 3 Mix proportion of UHPC (ratio in weight except fiber)

Mixture	w/b	Cement	Zirconium	Filler	Fine aggregate	EA <sup>a</sup>	SRA <sup>b</sup>	HRWR <sup>a</sup> <sup>c</sup>	Antifoamer	Fiber (by. vol.)				
										Steel 19.5	Steel 16.5	PE	PVA	Basalt
H-S	0.2	1	0.25	0.3	1.1	0.075	0.01	0.023~0.026	0.0007	1.0	0.5			
H-S-PE										0.67	0.33	0.5		
H-S-PVA										0.67	0.33		0.5	
H-S-B										0.67	0.33			0.5

<sup>a</sup> Expansion admixture

<sup>a</sup> Shrinkage reducing admixture

<sup>a</sup> High-range water-reducing admixture

단면이 원형인 직선형 섬유이다(Fig. 1). 강섬유는 황동으로 표면이 코팅되어 있어 일반 강과 달리 황금색을 띤다.

### 2.1.6 배합

실험에 사용한 UHPC 배합은 Table 3에 나타내었다. 배합은 90 °C에서 3일 동안 증기양생을 실시한 경우 압축강도가 200 MPa 정도, 28일 동안 (23 ± 2) °C의 양생 수조에서 수중양생을 실시한 경우 압축강도 160 MPa 정도가 나타나는 UHPC 배합을 사용하였다(KICT, 2012). 물-결합재비 (W/B)는 0.2이고, 결합재는 시멘트와 지르코늄 실리카를 사용하였다. 섬유량은 섬유 종류에 관계없이 부피비 1.5 %로 일정하고, 길이 19.5 mm인 강섬유 1.0 %와 길이 16.5 mm 강섬유를 0.5 % 혼입한 H-S 배합을 기준으로 설정하였다. H-S-PE, H-S-PVA, H-S-B 배합은 마이크로섬유의 혼입에 따른 영향을 조사하기 위해 강섬유를 각각 폴리에틸렌섬유, 폴리비닐알코올섬유, 현무암섬유로 33 % 대체한 배합이다.

## 2.2 실험체 제조 방법 및 양생 방법

각 구성 재료는 모르타르 강제식 혼합기로 혼합하였다. 먼저, 분말형인 시멘트, 지르코늄 실리카, 충전재, 골재, 팽창재, 수축저감제를 투입한 후 분말들이 고루 섞일 수 있도록 약 90 rpm의 속도로 10분 동안 건비빔을 하였다. 다음으로

혼합기의 회전속도를 동일하게 유지한 상태에서 배합수, 고성능 감수제, 소포제를 투입한 후 재료들의 반응에 의해 유동이 시작될 때까지 3분에서 5분 동안 추가로 혼합하였다. 유동이 시작되면 혼합기의 회전속도를 270 rpm으로 증가하여 2분에서 3분 동안 혼합한 후, 섬유를 혼입하기 위하여 회전속도를 다시 90 rpm으로 줄이고 섬유를 신속하게 투입하였다. 이 후 충분한 섬유 분산성이 확보될 수 있도록 회전속도를 다시 270 rpm으로 증가시켜 2분에서 5분 동안 혼합한 후 균일한 섬유 분산성이 확보되었다고 판단되면 마지막으로 기포를 제거하기 위해 회전속도를 90 rpm으로 줄여 1분간 혼합하였다(KICT, 2014).

혼합이 완료되면 인장성능과 밀도를 측정하기 위한 실험체를 제작하였다. 실험체 제작 후 플라스틱 시트로 표면을 덮은 후 약 36시간 동안 (23 ± 3) °C와 상대습도 (50 ± 5) % 조건에서 양생하고, 탈형 후 재령 28일까지 양생온도 (23 ± 2) °C의 양생 수조에서 수중양생을 실시하였다.

## 2.3 실험 방법

직접인장 실험을 통해 섬유보강 복합재료의 응력에 따른 인장성능을 평가하였다. 일본토목학회에서 제안한 방법(JSCE, 2008)에 따라 Fig. 2(a)와 같은 형태의 실험체를 제작한 후, 28일 재령에서 인장성능을 측정하였다. 실험체는 각 배합별

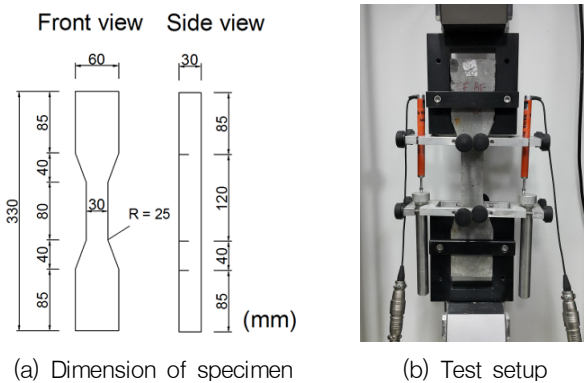


Fig. 2 Dimension of specimen and test setup

로 6개씩 제작하였다. 직접인장 실험은 최대용량 2톤의 인장 시험기에서 0.1 mm/min. 속도의 변위 제어 방식으로 수행하였다. 변위 측정 방법은 실험체의 좌우 측면에 100 mm의 LVDT를 부착하여 측정하였으며, 변형률 환산을 위한 측정 길이는 80 mm이며 측정구간 내의 단면은 30 mm × 30 mm로 일정하다. Fig. 2(b)는 직접인장 실험 모습을 나타낸다.

밀도는 강섬유 이외 섬유를 혼입할 경우 의도하지 않은 과도한 기포가 생성되는가를 확인하기 위하여 50 mm 입방 실

험체를 이용하여 공기 중 무게와 수중 무게를 측정하여 다음 식 (3)과 같이 계산하였다.

$$\rho = \frac{W_{air}}{W_{air} - W_{water}} \times \rho_w \quad (1)$$

여기서,  $\rho_w$ 는 물의 밀도이고,  $W_{air}$ 와  $W_{water}$ 는 각각 입방 실험체의 공기 중과 수중에서의 무게를 나타낸다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 인장성능

Fig. 3은 보강섬유의 조합에 따른 UHPC의 직접인장 응력-변형률 곡선을 나타낸다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 대부분의 실험체에서 일반적인 UHPC의 거동과 유사한 인장특성을 나타냈었다. 즉 첫 번째 균열이 발생한 이후 변형 경화 거동이 나타난 이후 인장강도에 도달하고, 이 후 변형이 증가하면서 응력이 감소하는 변형 연화 거동이 나타났다. 변형 연

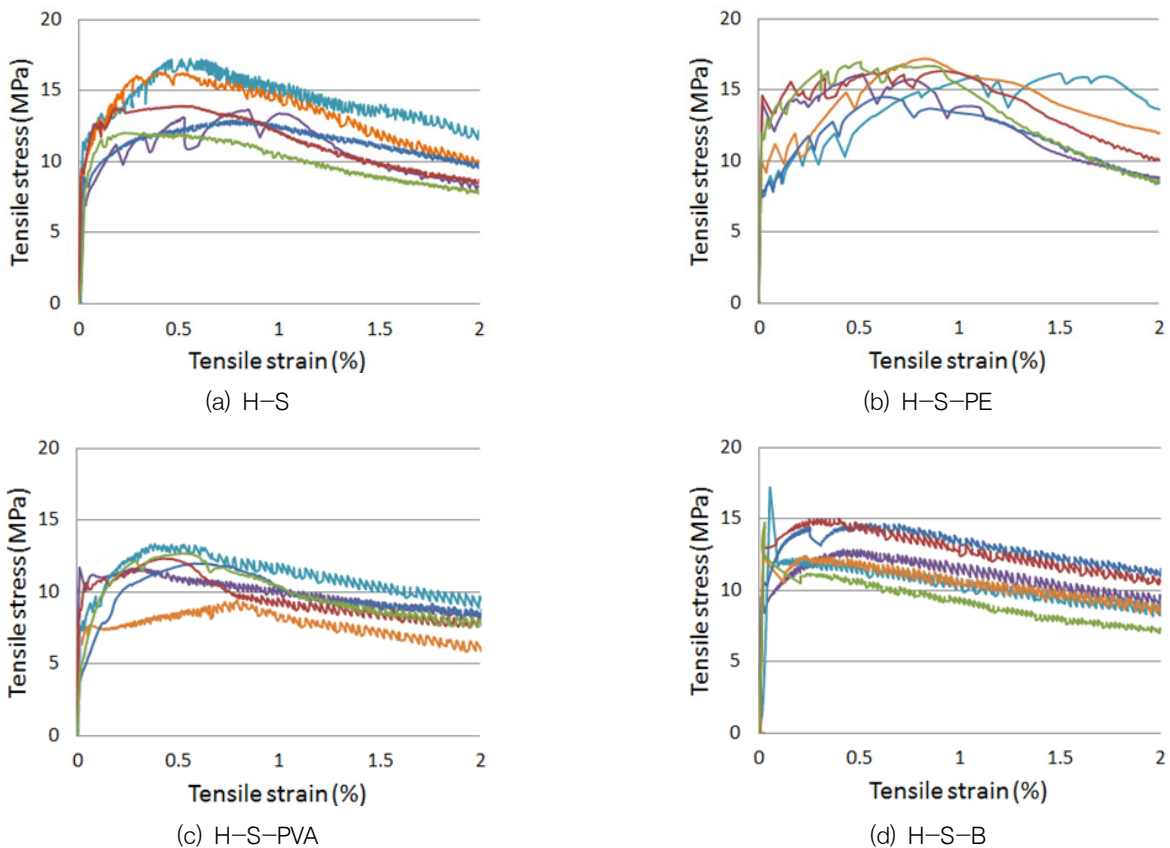


Fig. 3 Tensile stress and strain curves

화 거동 중에는 하나의 균열 폭이 지속적으로 커지면서 최종적으로 실험체가 파괴되는 양상을 나타내었다.

기준 배합인 H-S에 비하여 강섬유를 폴리에틸렌섬유로 33 % 대체한 H-S-PE 실험체가 전반적으로 우수한 인장성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 강섬유를 폴리비닐알코올섬유와 현무암섬유로 대체한 H-S-PVA 실험체와 H-S-B 실험체는 전반적으로 인장성능이 떨어진 것을 알 수 있다.

강섬유를 현무암섬유로 33 % 대체한 H-S-B 실험체의 총 6개의 실험체 중에서 3개의 실험체에서 첫 번째 균열이 발생한 이후 응력이 급격히 감소하고 약간의 변형 경화 현상이 나타난 이후 변형 연화 거동이 나타났다. 이는 섬유 가교 응력이 균열강도에 비해 작기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 4는 첫 번째 균열이 발생하는 균열강도를 나타내며, 섬유조합에 따라 다소 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 기준 실험체인 H-S 실험체의 균열강도는 평균 9.80 MPa로 나타났다. H-S-PE 실험체의 균열강도는 H-S 실험체에 비해 균열강도가 1 % 감소한 반면 H-S-PVA 실험체의 균열강도는 23 % 감소하였다. 이에 반해 H-S-B 실험체의 균열강도는 18 % 증가하였다. 이 실험결과로부터 현무암섬유를 혼입한 경우 UHPC의 균열강도를 증가시킬 수 있다는 것을 알 수 있고, 이러한 이유는 타 섬유와 달리 유사한 화학조성을 갖고 있는 현무암섬유가 매트릭스와 화학적으로 강하게 결합하여 부착강도가 높기 때문인 것으로 판단된다. (Baek et al., 2014)

Fig. 5는 측정된 인장강도로서 UHPC의 최대 인장응력을 의미하며, 동시에 각 실험체의 균열면에서 섬유가 저항하는 섬유 가교 응력에 해당된다. H-S 실험체의 인장강도는 평균 14.3 MPa로 나타났다. H-S-PE 실험체의 인장강도는 H-S 실험체에 비해 13 % 증가한 반면 H-S-PVA 실험체는 17 %

감소하였다. H-S-B 실험체의 경우 기준 실험체에 비해 3 % 증가하였다. 이 실험을 통해 현무암섬유를 혼입하면 강섬유만 사용한 UHPC와 비교하여 균열강도 및 인장강도를 동시에 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 섬유조합별 UHPC의 인장 변형 성능, 즉 인장강도에 도달했을 때 변형률을 의미하는 극한 인장 변형률을 나타낸다. H-S의 인장 변형 성능은 평균 0.71 %로 나타났다. H-S-PE 실험체의 인장 변형 성능은 H-S 실험체에 비해 39 % 증가하였다. 이에 반해 H-S-PVA 실험체와 H-S-B 실험체는 H-S 실험체에 비해 각각 18 %, 68 % 감소하였다. 이 실험을 통해 기존 연구에서와 같이 UHPC에서도 마이크로섬유를 혼입함으로써 매크로 균열의 발생을 지연시켜 UHPC의 인장강도 및 연성을 증가시킬 수 있다는 것을 확인하였다. 다만 UHPC와 같이 강도가 매우 높은 섬유보강 콘크리트의 경우 폴리에틸렌 섬유와 같이 섬유의 인장강도가 높은 것을 사용해야 인장성능을 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 각 배합별 균열 패턴을 나타낸다. Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 H-S-PE 실험체의 경우 타 실험체에 비하여

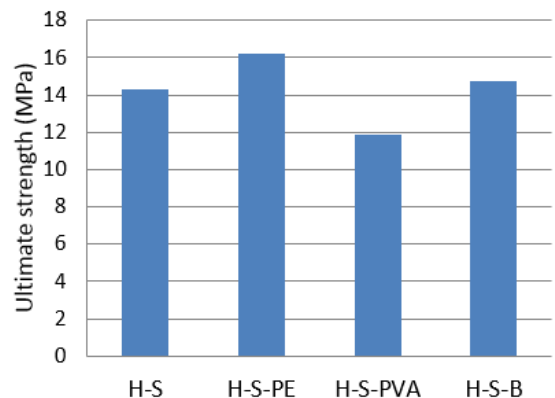


Fig. 5 Ultimate strength

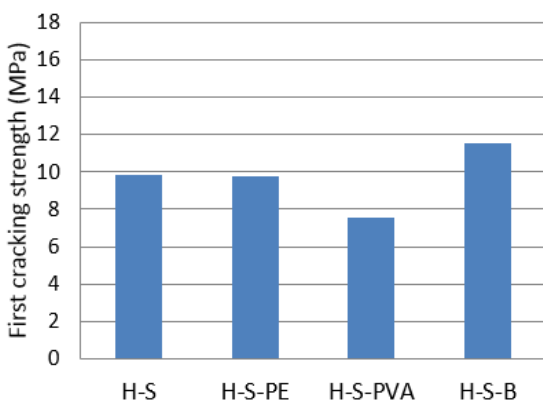


Fig. 4 First cracking tensile strength

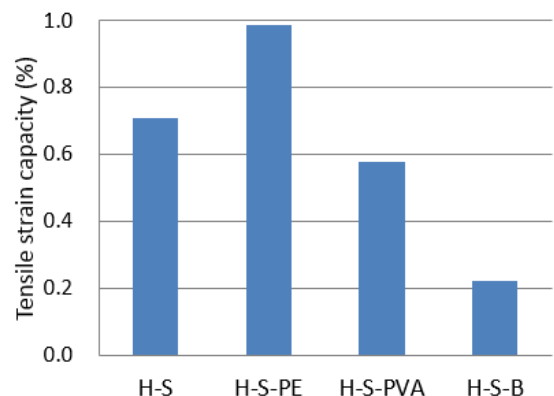
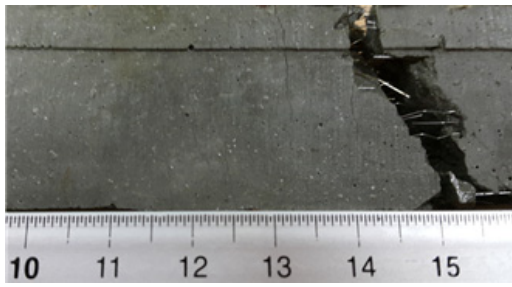
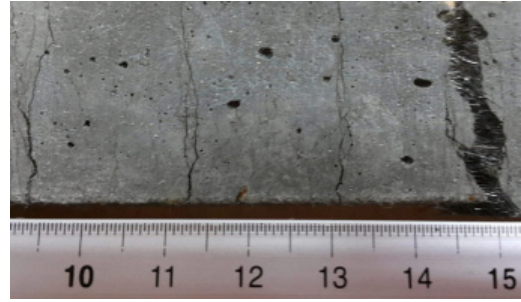


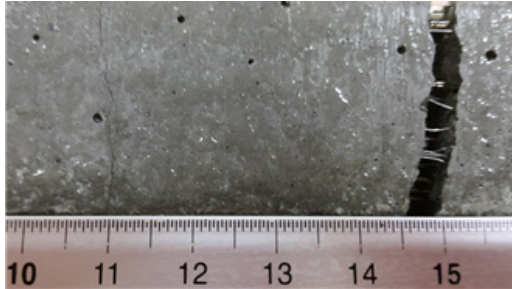
Fig. 6 Tensile strain capacity in terms of ultimate strain



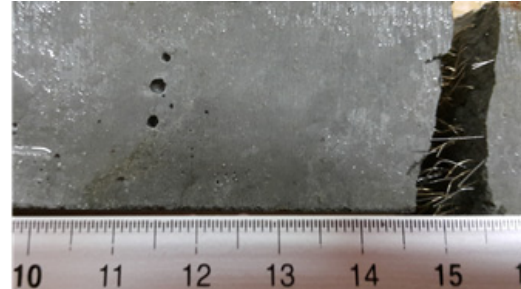
(a) H-S



(b) H-S-PE



(c) H-S-PVA

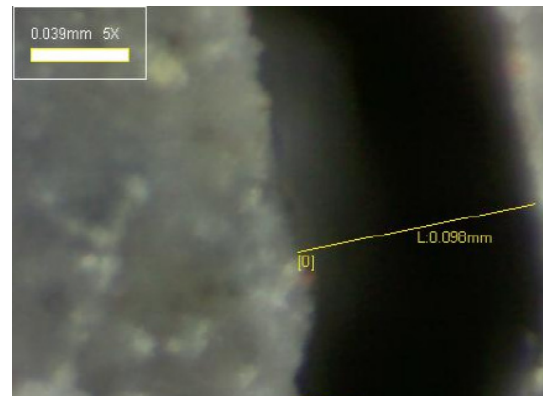


(d) H-S-B

Fig. 7 Cracking pattern (Unit of number: cm)



(a) H-S



(b) H-S-PE

Fig. 8 Crack width

눈으로 식별이 가능한 다중 균열이 다수 발생하였다. Fig. 8은 실험 종료 후 하중이 제거된 상태에서 H-S 실험체와 H-S-PE 실험체에 발생한 하나의 균열을 광학현미경으로 관찰한 것이다. 균열 폭은 균열 발생 위치에 따라 다소 차이가 있을 수 있으나 H-S 실험체의 관찰된 균열 폭은 23  $\mu\text{m}$ 로 눈으로 식별이 어려웠으며, H-S-PVA 실험체와 H-S-B 실험체도 유사한 균열 양상을 나타내었다. 이에 반해 H-S-PE 실험체의 균열 폭은 98  $\mu\text{m}$ 로 상대적으로 눈으로 식별이 가능한 균열이 발견되었다. 이러한 관찰 결과로부터 폴리에틸렌섬유를 혼입할 경우 강섬유만 사용한 경우에 비하여 더 큰 균열 폭

이 발생할 때까지 섬유가 저항할 수 있다는 것을 알 수 있다. 이는 간접적으로 최대 섬유 가교 응력에 해당하는 균열 개구 변위가 크다는 것을 의미한다. 이러한 인장거동에 대하여 정량적인 분석을 위해서는 섬유 인발 실험 및 섬유 가교 거동에 대한 실험 및 분석이 필요할 것으로 판단된다.

### 3.2 밀도

Fig. 9는 섬유조합별 UHPC의 밀도를 나타낸다. H-S 실험체의 밀도는 평균 2.50  $\text{g}/\text{cm}^3$ 을 나타내었다. H-S-PE 실험체,

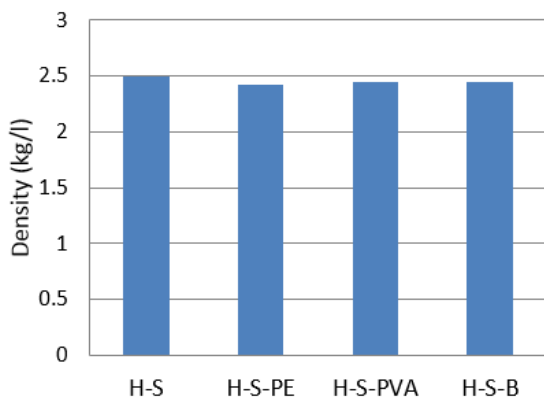


Fig. 9 Density

H-S-PVA 실험체, H-S-B 실험체 모두 기준 실험체에 비하여 각각 3 %, 2 %, 2 % 감소하였다. 이는 상대적으로 밀도가 작은 섬유를 혼입함에 따라 나타나는 현상으로 마이크로 섬유를 혼입함에 따라 의도하지 않은 과도한 기포가 생성되지 않은 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 기존 K-UHPC의 인장 변형 성능을 향상시키기 위한 기초연구로서 강섬유와 강섬유 이외의 마이크로 섬유의 조합이 UHPC의 인장거동에 미치는 영향을 실험적으로 조사하고자 하였다. 이를 위하여 압축강도 160 MPa 정도를 나타내는 UHPC 매트릭스에 부피비로 1.5 %의 강섬유를 혼입한 경우를 기본으로 강섬유를 폴리에틸렌섬유, 폴리비닐알코올섬유, 현무암섬유로 각각 33 % 대체하여 실험체를 제작한 후 직접 인장 실험과 밀도 등 일련의 실험을 수행하였고, 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 강섬유를 폴리에틸렌섬유로 33 % 대체한 경우 강섬유만 사용한 경우에 비하여 균열강도는 1 % 감소한 반면 인장강도는 13 % 증가하였으며, 인장 변형 성능은 39 % 증가하였다. 이에 반하여 강섬유를 폴리비닐알코올섬유로 33 % 대체한 경우 강섬유만 사용한 경우에 비하여 균열강도, 인장강도, 인장 변형 성능 모두 감소하였다. 이를 통해 합성섬유를 사용하여 UHPC의 인장성능을 향상시킬 수 있지만, 섬유의 인장강도가 높은 것을 사용해야 인장성능을 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.
- (2) 강섬유를 현무암섬유로 33 % 대체한 경우 강섬유만 사용한 경우에 비하여 균열강도와 인장강도가 각각 18

%, 3 % 증가하였으나, 인장 변형 성능은 68 % 감소하였다. 이를 통해 매트릭스와 유사한 화학조성을 갖는 높은 인장강도를 갖는 섬유를 혼입한 경우 UHPC의 인장강도를 향상시키는데 효과적인 것으로 나타났다.

- (3) 밀도 실험을 통해 강섬유 기반 UHPC에서 강섬유를 일부 마이크로섬유로 대체하여도 의도하지 않은 과도한 기포가 생성되지 않은 것을 확인하였다.

이 연구를 통해 UHPC에서도 강섬유와 마이크로섬유의 조합을 통해 인장성능을 향상시킬 수 있다는 것을 확인하였다. 다만, UHPC의 높은 압축강도 특성 때문에 적절한 섬유를 선정해야 원하는 성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 추가연구로 섬유조합이 UHPC의 압축강도 및 유동성에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다.

#### 감사의 글

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

#### References

1. Association Française de Génie Civil (2002), Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes—Interim Recommendations, Paris, France.
2. Baek, H. J., Choi, J. I., Kim, H. U., Jang, Y. H., and Lee, B. Y. (2014), Pullout Behavior of Basalt Fibers, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, 26(1), 363-364.
3. Banthia, N. Majdzadeh, F. Wu, J. Bindiganavile, V., (2014), Fiber Synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in Flexure and Direct Shear, *Cement & Concrete Composites*, 48, 91-97.
4. Buitelaar, P. (2004), Heavy Reinforced Ultra High Performance Concrete, *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Ed., Schmidt, M., Fehling, E., and Geisenhanslüke, C., Kassel University Press, Kassel, Germany, 25-35.
5. Japan Society of Civil Engineers (2008), Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC), Concrete Engineering Series.
6. Kang, S. H., and Hong, S. G. (2014), Performance of Fresh and Hardened Ultra High Performance Concrete without heat Treatment, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 26(1), 23-34.
7. Kim, Y. Y. (2007), Design and Constructibility of an Engineered Cementitious Composite Produced with Cement-based Mortar

- Matrix and Synthetic Fibers, *Journal of the Korea Society for Composite Materials*, 21(2), 21-26.
8. Koh, K. T., Park, J. J., Ryu, G. S., and Kim, S. W. (2013), State-of-the-Art on Development of Ultra-High Performance Concrete, *The Magazine of the Korean Society of Civil Engineers*, 61(2), 51-60.
  9. Koh, K. T., Ryu, G. S., Park, J. J., An, K. H., Kim, S. W., and Kang, S. T. (2013), Effects of the Composing Materials on the Rheological and Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete (UHPC), *RILEM-fib-AFGC International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, UHPFRC2103*, Marseille, France, 749-756.
  10. Korea Concrete Institute (2012), *Design Guidelines of Ultra High Performance Concrete (K-UHPC)*.
  11. Korea Institute of Construction Technology (2012), *Development of Advanced Technology of Toughness in Ultra High Performance Concrete for Hybrid Cable Stayed Bridge*.
  12. Korea Institute of Construction Technology (2014), *Provisional Specifications for the Fabrication and Quality Control Guidelines of SUPER Concrete*.
  13. Lawler, J. S., Wilhelm, T., Zampini, D., and Shah, S. P. (2003), *Fracture Processes in Hybrid Fiber-Reinforced Mortar, Materials and Structures*, 36, 197-208.
  14. Lee, B. Y., Bang, J. W., and Kim, Y. Y. (2013), Enhancing the Performance of Polypropylene Fiber Reinforced Cementitious Composite Produced with High Volume Fly Ash, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 17(3), 118-125.
  15. Li, V. C. (2012), Tailoring ECC for Special Attributes: A Review, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 6(3), 135-144.
  16. Li, V. C., Wang, S. and Wu, C. (2001), Tensile Strain-hardening Behavior of PVA-ECC, *ACI Materials Journal*, 98(6), 483-492.
  17. Naaman, A. E. and Wille, K. (2012), *The Path to Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHP-FRC): Five Decades of Progress*, *Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, Ed., Schmidt, M., Fehling, E., Glotzbach, C., Fröhlich, S., and Piotrowski, S., Kassel University Press, Kassel, Germany, 3-15.
  18. Rossi, P. (2008), *Ultra High-Performance Concrete*, *Concrete International*, 30(2), 31-34.
  19. Russel, H. G. and Graybeal, B. A. (2013), *Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community*, Federal Highway Administration, McLean.

Received : 02/02/2015  
 Revised : 02/16/2015  
 Accepted : 02/23/2015

## 요 지

초고성능 콘크리트는 높은 강도와 유동성을 갖는 우수한 재료 특성을 나타내는 콘크리트이다. 그러나 고연성 시멘트 복합체에 비하여 낮은 연성을 나타낸다. 이 연구에서는 강섬유와 마이크로섬유의 조합이 초고성능 콘크리트의 인장거동에 미치는 영향을 조사하였다. 이를 위하여 강섬유와 폴리에틸렌, 폴리비닐알코올, 현무암섬유 조합에 따라 4가지 초고성능 콘크리트 배합을 결정하였고, 인장거동을 평가하기 위하여 직접인장 실험을 수행하였다. 또한 마이크로섬유가 제조과정에서 의도하지 않은 과도한 기포를 생성하는지를 확인하기 위하여 밀도 실험을 수행하였다. 실험결과 인장강도가 높은 폴리에틸렌섬유는 초고성능 콘크리트의 인장거동을 향상시키는데 효과적임을 확인하였고, 현무암섬유는 초고성능 콘크리트의 균열강도 및 인장강도를 증가시키는데 효과적임을 확인하였다. 또한 마이크로섬유가 의도하지 않은 기포를 생성하지 않는다는 것도 확인하였다.

**핵심 용어** : 균열강도, 섬유 조합, 인장 변형 성능, 인장강도, 초고성능 콘크리트