

## UHPCC 휨부재 제작 시 타설 중 충전방향에 따른 휨인장거동의 변화

강수태\* · 류금성\*\* · 고경택\*\*\* · 김선용\*\*\*\*

Kang, Su-Tae\*, Ryu, Gum Sung\*\*, Koh, Kyung Taek\*\*\*, Kim, Sunyong\*\*\*\*

### Comparison of Flexural Tensile Behaviors with Different Filling Directions in Producing UHPCC Flexural Member

#### ABSTRACT

This study was intended to estimate the efficiency of inducing fiber arrangement in UHPCC (Ultra High Performance Cementitious Composites). For the purpose, UHPCC members produced by several different placing methods according to flow characteristics were prepared; flexural behaviors were compared and correlation between the flexural behavior and the characteristics of fiber arrangement was investigated. Test results showed that placing method for inducing specific fiber arrangement had a considerable influence on the flexural performance. The standard specimen in which fibers are induced to be directed parallel to the principle tensile direction presented higher flexural tensile strength but lower variation. Therefore it should be considered that the flexural tensile strength actually developed in UHPCC member may be highly different and in lager variation. The qualitative variation of fiber arrangement according to the flow of UHPCC was also predicted considering the flow pattern and the boundary effect; the prediction provided good explanation to the difference in the flexural behavior according to the induced flow.

**Key words** : UHPCC, Flexural tensile strength, Fiber arrangement, Flow, Placing method

#### 초 록

본 연구는 UHPCC (Ultra High Performance Cementitious Composites)에서 섬유배열 유도의 효율성을 평가하기 위한 연구의 일환으로, 흐름특성을 달리한 다양한 방법으로 UHPCC 부재를 제작하여 휨거동의 변화를 비교하고, 섬유 배열특성과의 상관관계를 정성적으로 분석하였다. 실험을 통해 섬유배열 유도방법에 따라 휨거동의 차이가 크게 나타남을 확인하였다. 일반적인 휨실험체 제작방법으로, 섬유가 주인장방향으로 배열되도록 유도한 경우가 다른 방법으로 제작된 휨실험체에 비해 더 높은 휨인장강도와 낮은 변동성을 보였다. 따라서 실제 UHPCC 부재에서의 재료의 휨인장강도는 실험실 수준에서 측정된 휨인장강도와 비교하여 크게 다를 수 있고, 변동성도 더 크게 나타날 수 있음을 반드시 고려해야 할 것이다. 한편, UHPCC의 유동흐름에 따른 섬유의 배열특성의 변화를 흐름의 종류 및 경계면 효과를 고려하여 정성적으로 예측하였으며, 이러한 예측결과는 실험에서 여러 가지 형태로 유도된 유동흐름에 따른 휨인장거동의 변화를 잘 설명하였다.

**검색어** : 초고성능 시멘트 복합체, 휨인장강도, 섬유배열, 유동흐름, 타설방법

\* 정회원 · 교신저자 · 대구대학교 토목공학과 조교수 (Corresponding Author · Daegu University · [stkang@daegu.ac.kr](mailto:stkang@daegu.ac.kr))

\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 인프라구조연구실 수석연구원 ([ryu0505@kict.re.kr](mailto:ryu0505@kict.re.kr))

\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 인프라구조연구실 연구위원 ([ktgo@kict.re.kr](mailto:ktgo@kict.re.kr))

\*\*\*\* 한국수력원자력(주) 중앙연구원 선임연구원 ([sunyongkim@khnpp.co.kr](mailto:sunyongkim@khnpp.co.kr))

Received June 14, 2013/ revised July 17, 2013/ accepted September 25, 2013

### 1. 서론

최근 활발한 연구가 진행되고 있는 초고성능 시멘트 복합체(Ultra High Performance Cementitious Composites, 이하 UHPCC)는 압축강도 200 MPa 이상의 초고강도와 내구수명 200년 이상의 고내구성을 나타낸다(Koh et al., 2013; KICT, 2012; Richard et al., 1995). 그뿐만 아니라, 강섬유를 혼입함으로써 고강도 콘크리트의 취성파괴 문제를 극복하여 압축 및 인장 파괴 시 충분한 연성거동을 보이고, 직접인장강도 10 MPa 이상, 휨인장강도 35 MPa 이상으로 인장상태에서도 높은 강도를 나타낸다(Yoo et al., 2012; Park et al., 2012; Wuest et al., 2008). 이러한 우수한 역학적 성능 및 내구성능으로 인해 국내외에서 교량, 건축물 등 다양한 구조물에 적용되는 사례가 최근 많이 증가하고 있으며, 앞으로도 지속적으로 활용분야를 넓혀갈 것으로 예상된다.

일반적으로 콘크리트에 섬유를 혼입할 경우, 가장 크게 개선되는 콘크리트의 재료적 특성이라고 하면 인장강도 및 연성의 향상을 들 수 있다. 하지만 인장강도 및 연성의 향상 정도는 섬유의 형상, 혼입부피, 재질, 분산정도, 배열상태 등에 따라서 크게 다르게 나타난다. 그래서 섬유보강 콘크리트의 인장강도 또는 인장거동 특성을 나타낼 때에는 이러한 영향인자들을 고려한 함수의 형태로 나타내는 것이 보편적이다(Lee et al., 2004; Naaman 1972). 그 중에서 가장 일반적으로 사용하는 변수로는 섬유의 혼입률, 섬유의 형상비(길이/직경비), 섬유의 방향성 등을 들 수 있다. 여기에서 섬유의 혼입률과 섬유의 형상비는 배합설계를 하는 단계에서 결정되는 변수인 반면에 섬유의 방향성은 시공단계에서 부재의 기하학적 특성과 타설방법 등에 의해 결정되는 변수이다.

굵은 골재를 포함하는 섬유보강 콘크리트에서는 섬유의 방향성이 부재의 기하학적 특성에 따라 약간씩 변하며, 이를 섬유 방향성 계수로 고려하여 인장강도 등에 미치는 영향을 나타내었으나, 그 영향이 섬유의 혼입률이나 섬유의 형상비가 미치는 영향에 비해 상대적으로 크지 않다(Johnston, 1974; Swamy et al., 1975). 하지만 UHPCC는 굵은 골재를 사용하지 않고 매트릭스의 높은

유동성과 점성으로 인해 섬유의 배향특성이 크게 변하며, 이로 인한 인장강도 및 거동에 매우 큰 변동성을 유발하고, 섬유의 혼입률이나 형상비 등과 비교해서도 그 영향이 적지 않은 특징을 나타낸다(Ferrara et al., 2010; Kang et al., 2011; Kwon et al., 2012; Markovic, 2006). 현재 프랑스, 일본 및 우리나라 등에서 제시하고 있는 UHPCC의 설계 및 시공에 관한 지침들을 살펴보면, 이러한 섬유 배향의 변동성을 반드시 고려하도록 명시하고 있으며, UHPCC의 설계기준강도에 대해 1.25~1.75의 큰 값의 방향계수 또는 안전계수로 나눈 값을 설계값으로 사용하도록 하고 있다(KCI, 2012; JSCE, 2004; SETRA/AFGC, 2002). 이러한 설계방법은 결국 UHPCC의 재료특성, 특히 인장특성을 효율적으로 사용하지 못하고 비경제적인 설계의 요인이 되고 있다. 이러한 문제를 해결하는 하나의 방법으로 섬유의 배열을 부재내력에 유리하도록 유도하는 방법이 있을 수 있다. 즉, 주인장 방향으로 섬유를 배열하도록 하는 것이다.

본 연구에서는 섬유배열 유도의 효율성을 평가하기 위한 것으로 유도된 섬유배열 특성이 인장특성에 얼마나 영향을 미치는지 확인하고자 하였으며, 타설 및 유동방향을 달리한 UHPCC 부재 제작방법들에 대해 휨인장 강도 및 거동특성을 비교하였다.

### 2. 실험

#### 2.1 사용재료 및 배합

UHPCC는 시멘트, 모래, 실리카폼, 충전재 등을 주요 구성재료로 하여 매트릭스를 구성하고 있으며, 아주 낮은 물-결합재비에서 충분한 유동성 확보를 위해 고성능 감수제를 첨가하였다. 시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 실리카폼은 비압축상태(undensified)로 사용하였다. 시멘트와 실리카폼의 물리·화학적 성질은 Table 1과 같다. 골재로는 밀도 2.62 g/cm<sup>3</sup>, 평균입경 0.5 mm이하의 모래만을 사용하고, 굵은 골재는 사용하지 않았다. 충전재는 평균입경 약 4 μm 정도, SiO<sub>2</sub>의 함유율은 98% 이상, 밀도는 2.60 g/cm<sup>3</sup>의 석영질 미분말을 사용하였다. 고성능 감수제는 폴리

Table 1. Physical & Chemical Properties of Cement and Silica Fume

Item	Specific surface area (cm <sup>2</sup> /g)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Ig.loss (%)	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>
Cement	3,413	3.15	1.40	21.01	6.40	3.12	61.33	3.02	2.3
Silica fume	200,000	2.10	1.50	96.00	0.25	0.12	0.38	0.1	-

Table 2. Mix Proportion of UHPCC Matrix (Ratio in Weight)

Water/Binder	Cement	Silica fume	Filler	Sand	Superplasticizer	Steel fiber
0.2	1	0.25	0.3	1.1	0.018	2% (in vol.)

칼본산계를 사용하였다. 매트릭스에 혼입된 섬유는 밀도 7.5 g/cm<sup>3</sup>, 길이 13 mm, 직경 0.2 mm, 형상비 65, 인장강도 2,500 MPa의 강섬유를 사용하였으며, 전체 부피의 2%만큼 혼입하였다. Table 2는 UHPCC의 배합구성을 보여주고 있다. 배합 후 굳지 않은 상태 UHPCC의 슬럼프 플로우는 약 220 mm정도를 나타내었다.

## 2.2 실험체 제작

섬유배열 유도방법에 따라 다른 양상으로 나타날 것으로 예상되는 인장거동 특성을 조사하기 위하여 실험을 계획하였다. 섬유배열의 변화를 유도하기 위하여 타설위치 및 유동방향을 달리한 다섯 가지 방법으로 UHPCC 부재를 제작하였으며, 제작된 실험체로부터 휨인장실험을 통해 강도 및 거동특성을 평가하였다.

Fig. 1은 UHPCC의 부재 제작방법을 설명하고 있다. Fig. 1(a)는 휨인장실험을 목적으로 일반적으로 실험실에서 제작하는 휨실험체의 형상으로 한쪽 끝단에서부터 다른 끝단으로 순차적으로 몇 겹의 형태로 부어서 섬유배열을 2차원 배열에 가깝고 또한 주인장방향과 나란할 수 있도록 인위적으로 유도하여 실험체를 제작하는 방법이다. 실험체의 크기는 단면이 100 mm × 100 mm이고 길이가

500 mm가 되도록 하였다. Figs. 1(b)~(e)는 모두 가로, 세로 500 mm × 500 mm에 높이 100 mm의 플레이트를 제작한 후 Fig. 1(a)의 크기로 절단하여 제작하는 것으로, UHPCC의 흐름방향과 절단면 방향에 따라 구분하였다. Figs. 1(b) and (c)는 플레이트의 한쪽 면의 가운데에서 UHPCC를 부어 흐르도록 유도한 방법으로 경화 후 100 mm × 100 mm × 500 mm의 휨실험체로 절단할 때, 그 절단방향을 다르게 한 경우이다. Fig. 1(b)는 흐름방향과 절단방향을 나란히 한 경우이고, Fig. 1(c)는 흐름방향과 절단방향을 서로 수직하게 한 경우이다. Fig. 1(d)는 Fig. 1(a)와 같은 제작효과를 얻기 위하여 타설 전에 미리 100 mm 간격으로 칸막이를 설치한 후에 타설을 실시하였으며, 타설 후 곧바로 칸막이를 제거하여 하나의 플레이트를 제작한 경우이다. 경화 후에 절단방향은 흐름방향과 나란하게 하여 휨실험체를 제작하였다. Fig. 1에 나타난 각각의 제작방법을 순서대로 M1~M5로 표시하였다.

UHPCC는 타설 후 2~3일 동안 습윤양생을 실시한 다음 탈형한 후, 48시간 동안 90℃에서 고온 증기양생을 실시하였다. 그 후 플레이트는 휨실험체의 제작조건에 맞춰 절단하고 실험재령까지 20℃ 전후의 기건 상태에서 양생하였다.

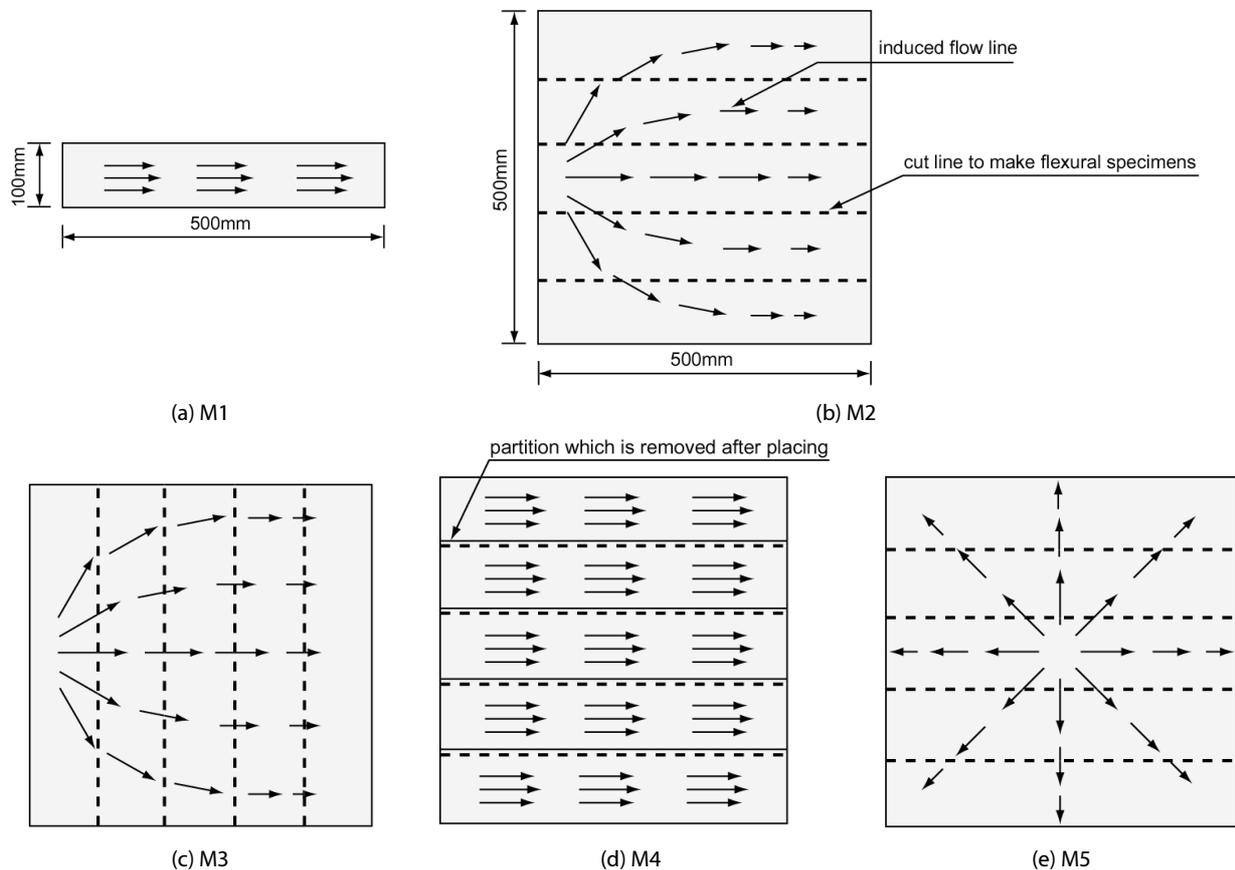


Fig. 1. Various Placing Methods Considering Pouring Point and Flow Direction in Producing Specimens

### 2.3 실험방법

휨인장실험에서는 타설방법에 따라 제작 또는 절단된  $100 \times 100 \times 500$  mm 크기의 휨실험체를 이용하였으며, 실험체는 타설 시 상부 마감면이 가력면과 동일하도록 거치하였고, 지간 300 mm를 적용하였다. 가력면이 완전히 접촉할 수 있도록 가력 전에 상부 마감면을 연마하여 매끄럽게 처리하였다. 실험은 200 kN 용량의 UTM를 사용하여 3등분점 재하실험으로 수행되었으며, 변위제어 방식을 적용하였다. 변위제어속도는 0.3 mm/min으로 적용하였다. 실험 시 가력지점에서의 처짐을 LVDT를 이용하여

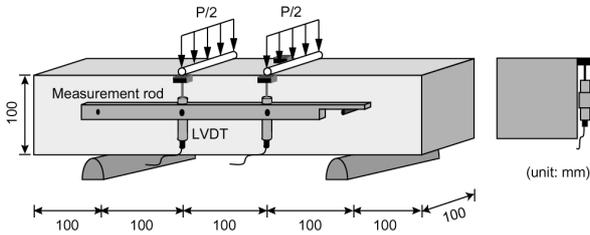


Fig. 2. Test Setup

측정하였으며, 재하점 처짐은 두 개의 LVDT에서 측정한 값의 평균을 사용하였다. Fig. 2는 3등분점 재하 휨실험의 모습을 나타내고 있다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 제작방법에 따른 휨인장거동의 비교

실험체 제작방법에 따른 휨인장거동의 실험결과는 Fig. 3에 나타내었다. M1의 경우 실험체 3개에 대한 결과이며, M2~M5의 경우에는 5개 실험체 결과가 있어야 하나 절단작업 중에 일부 실험체가 훼손되어 방법별 3~5개 실험체의 결과를 보여주고 있다. Fig. 3을 살펴보면, 일반적인 휨실험체 제작방법으로 제작된 M1의 경우는 평균 휨인장강도 36.2 MPa를 나타내었으며, 휨인장강도에는 다소 편차가 있는 반면에 처짐연화거동 구간에서는 처짐량 증가에 따라 거의 하나의 곡선으로 수렴하는 경향을 나타내었다. M2의 경우에는 평균 휨인장강도는 33.3 MPa로 M1에 비해 작게 나타났으며, 처짐연화구간에서의 거동에서의 편차가 M1에 비해 크게 나타났다. M1, M2와 달리 M3에서는 초기균열발생 이후 다시

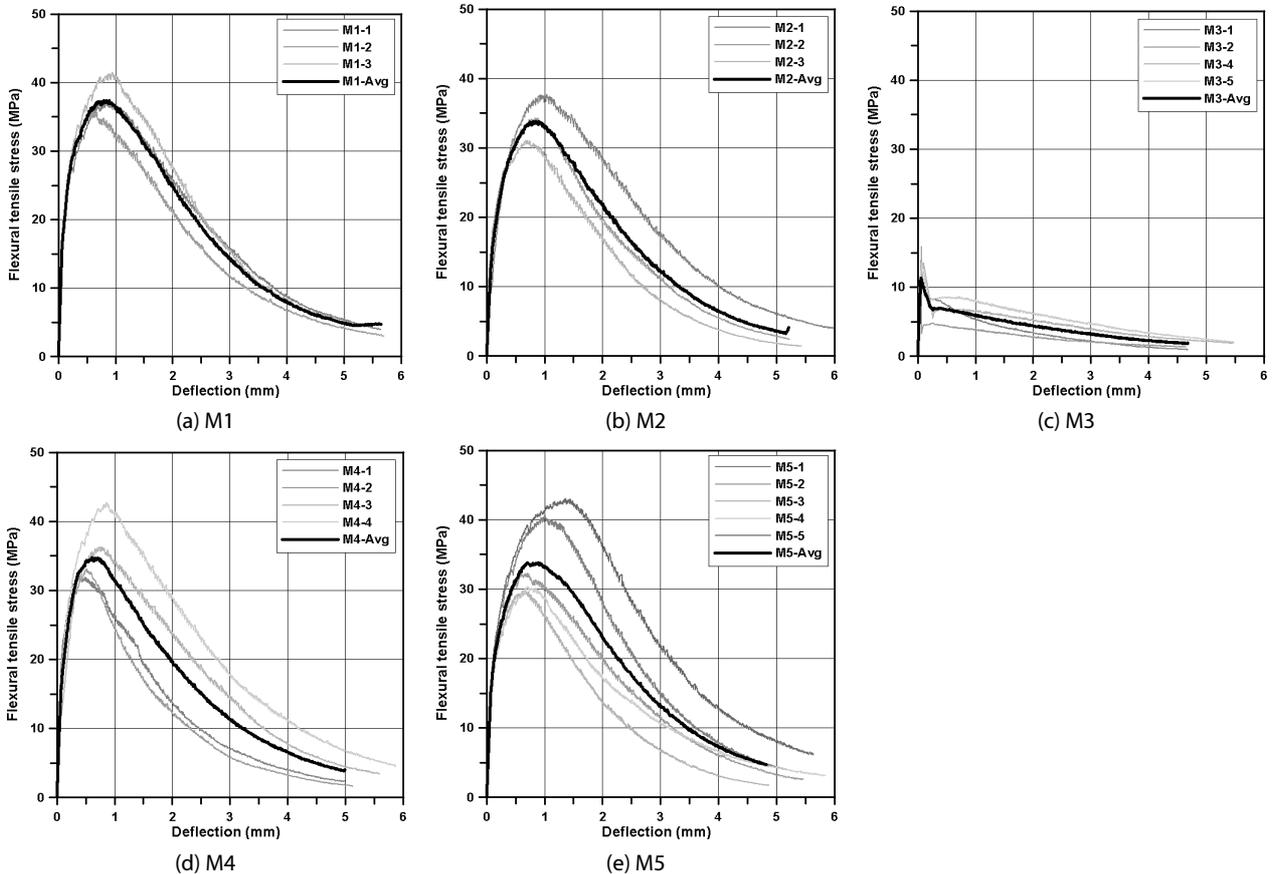


Fig. 3. Flexural Tensile Behaviors for Various Placing Methods in Producing Specimens

하중이 증가하는 처짐경화거동(deflection hardening behavior)이 전혀 나타나지 않고 곧바로 하중이 떨어지는 거동을 나타내었다. M4에서는 휨인장강도 36.2 MPa로 M1과 M2와 비교했을 때 강도가 크게 다르지 않았으며, 다만 거동의 편차가 좀 더 크게 나타났다. M5의 경우에는 휨인장강도는 35.3 MPa로 M1, M2, M4와 유사한 평균 휨인장강도를 나타내었지만, 최대값과 최소값의 차이가 약 13.0 MPa로 결과의 편차가 매우 크게 나타났다.

이러한 휨거동 특성을 초기균열이 발생하는 시점과 최대하중에 도달하는 시점으로 구분하여 정리하여 나타내면 Table 3과 같으며, Fig. 4를 통해 실험체 제작 방법에 따른 초기균열발생강도 및 휨인장강도의 변화를 살펴보았다. Fig. 4(a)는 초기균열발생강도를 비교한 것으로, 실험실에서 적용하는 일반적인 휨실험체 제작방법으로 제작된 M1의 초기균열발생강도에 비해 다른 방법들로 제작된 M2~M5의 결과가 대체적으로 강도가 작게 보이는 경향을 확인할 수 있다. 가장 작은 값을 보인 M3의 경우는 초기균열발생강도가 12.9 MPa로 M1의 16.7 MPa와 비교했을 때 약 77% 수준을 보였으며, M2, M4 및 M5의 경우는 80~95% 정도를 나타내었다. 개체별 강도의 변동성에서도 M1에 비해 M2~M5에서 더 큰 표준편

차를 나타내었다. 특히 M2, M3, M4에서는 표준편차가 M1의 약 4~5배 정도로 매우 크게 나타났다. Fig. 4(b)는 휨인장강도를 실험체 제작 방법에 따라 비교하여 나타낸 것으로, 초기균열발생강도와 마찬가지로 M1의 결과에 비해 M2~M4의 휨강도 결과가 상대적으로 작은 값을 나타내었다. 특히 M3의 경우는 휨인장강도가 초기균열발생강도의 유사한 13.7 MPa로 M1의 38.2 MPa에 비해 겨우 36%에 지나지 않았다. M2, M4 및 M5의 결과는 M1의 87~95% 정도를 나타내었다. 휨인장강도의 변동성은 M1과 비교했을 때 M2, M3는 조금 작게, M4는 조금 크게 나타났지만 큰 차이는 없는 것으로 볼 수 있으며, 다만 M5의 경우에는 표준편차가 M1의 2배 이상으로 크게 나타났다.

다섯 가지 경우의 실험체 제작방법에 따른 휨거동 특성들을 비교했을 때, 실험실에서 일반적인 방법으로 제작된 휨실험체로부터 구한 초기균열발생강도 및 휨인장강도는 부재 수준에서 보이는 강도와는 다소 차이가 있으며, 특히 측정강도의 변동성이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 경우에 따라서는 부재 수준에서의 휨인장강도가 실험실 수준에서 측정된 강도에 비해 거의 1/3 수준까지 떨어지는 경우도 나타났다.

Table 3. Summary of Flexural Tensile Test Results

Notation	At first cracking		At peak load	
	Strength (MPa)	Deflection (mm)	Strength (MPa)	Deflection (mm)
M1	16.7(0.61)	0.065(0.005)	38.2(2.95)	0.780(0.197)
M2	13.4(3.19)	0.077(0.005)	33.3(1.85)	0.874(0.164)
M3	12.9(2.36)	0.055(0.017)	13.7(1.72)	0.164(0.072)
M4	14.9(3.46)	0.063(0.011)	36.2(4.67)	0.633(0.225)
M5	15.9(0.75)	0.075(0.008)	35.3(6.09)	0.890(0.298)

\* all the results were expressed as the mean value with the standard deviation in parenthesis

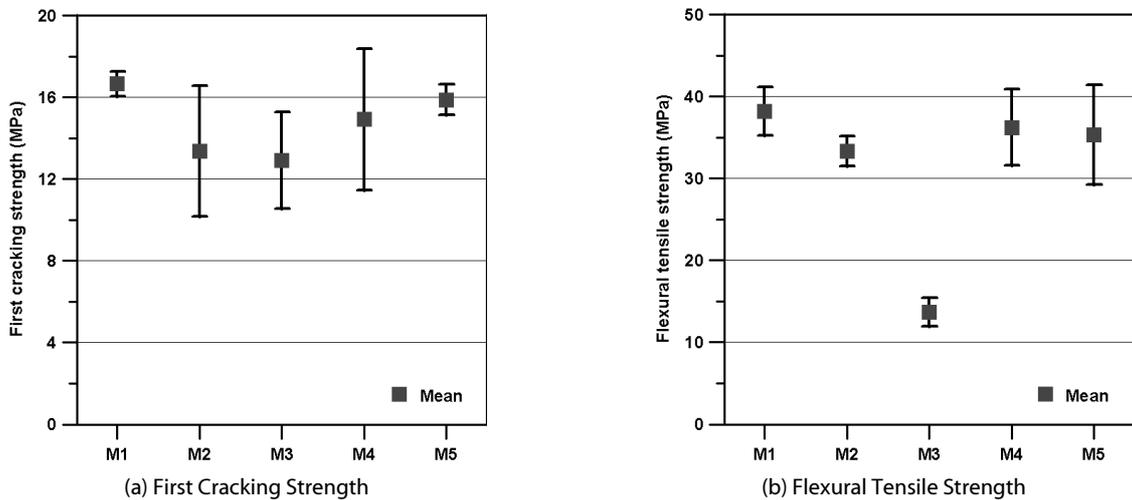


Fig. 4. Effect of Placing Method in First Cracking Strength and Flexural Tensile Strength

### 3.2 섬유배열 특성의 영향 평가

유체 내 섬유가 혼입된 경우, 섬유가 유체의 충분한 점성으로 인해 침강이 일어나지 않는다고 가정하면, 섬유의 회전운동은 유체의 유동장 특성과 경계면 효과에 전적으로 좌우된다고 할 수 있다 (Chiba et al., 2001; Kim et al., 2001). Fig. 5는 섬유보강 복합체에서 일반적으로 나타날 수 있는 유동장과 섬유배열 특성의 관계를 나타낸 것이다.

Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 전단흐름에서는 속도구배가 포물선 형태로 나타나게 되며, 이로 인해 섬유의 배열이 유동흐름이 진행됨에 따라 흐름방향에 나란하게 배열되려는 경향을 보인다. 반면에 Fig. 5(c)와 같이 방사형 흐름에서는 유입지점으로부터 유동거리가 증가함에 따라 유동속도가 감소하게 되는데, 유동거리에 따른 속도구배가 결과적으로 섬유의 회전운동을 유발하여 섬유가 동심원의 원주방향과 나란하게 배열되려는 경향을 나타낸다. 이와 같은 현상은 Fig. 6을 통해 잘 설명되어진다. Fig. 6(a)는 Fig. 5의 'A'부분에서 섬유의 회전운동을 나타낸 것이고, Fig.

6(b)는 Fig. 5의 'B'부분에서 섬유의 회전운동을 나타낸 것이다. Fig. 5(b)는 전단흐름과 방사형 흐름이 혼재하는 형태로, 흐름 선단부에서는 방사형 흐름이 지배하게 되고, 나머지 부분에서는 전단흐름이 지배적인 유동장을 나타낸다.

또한 경계면에서의 섬유의 배열특성을 살펴보면, 우선 전단흐름의 경우 경계면에서의 마찰작용으로 인해 속도구배가 가장 크게 나타나기 때문에 Fig. 7(a)과 같이 섬유가 경계면과 나란하게 배열되려는 경향을 나타낸다. 분수형 흐름에서는 선단부가 이동함에 따라 경계면 근처에서의 유선이 Fig. 7(b)과 같이 경계면 방향으로 향하게 되어 섬유의 배열이 경계면과 나란하게 놓이게 되고, 그리고 방사형 흐름에서도 선단부가 경계면에 부딪혔을 때 유선의 방향이 Fig. 7(c)과 같이 변하게 되어 마찬가지로 섬유가 경계면과 나란한 방향으로 놓이려는 경향을 보이게 된다.

한편 섬유의 배열상태가 인장강도에 어떻게 영향을 미치는지 살펴보면, 주인장력이 작용하는 방향에 대해 섬유가 얼마나 기울어져 있느냐에 따른 섬유의 부착거동의 변화와 단면에서의 섬유분포

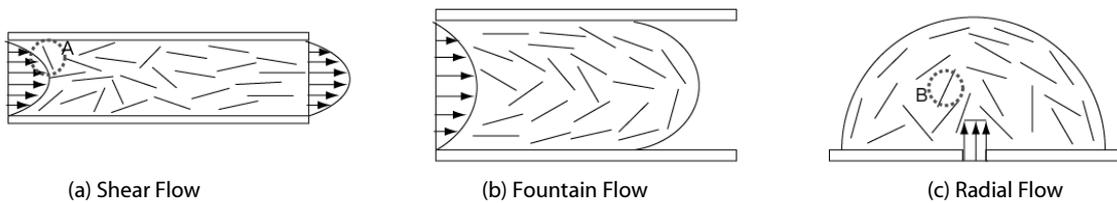


Fig. 5. Variation of Fiber Arrangement in Flow Field of Fiber-Reinforced Composites

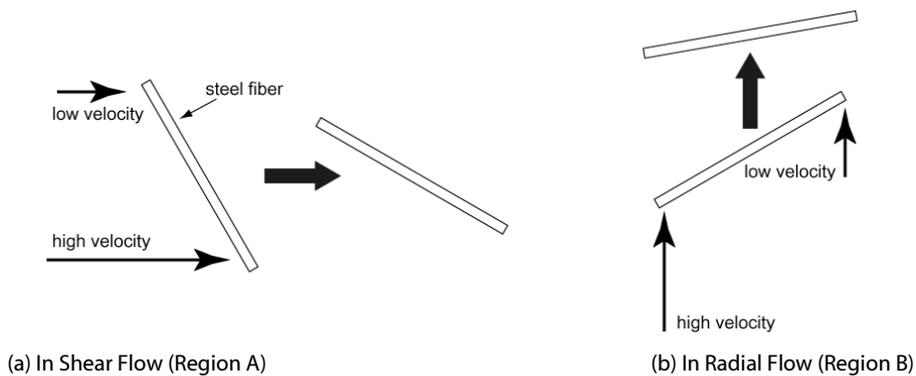


Fig. 6. Rotational Movement of Steel Fiber According in Shear & Radial Flow Field

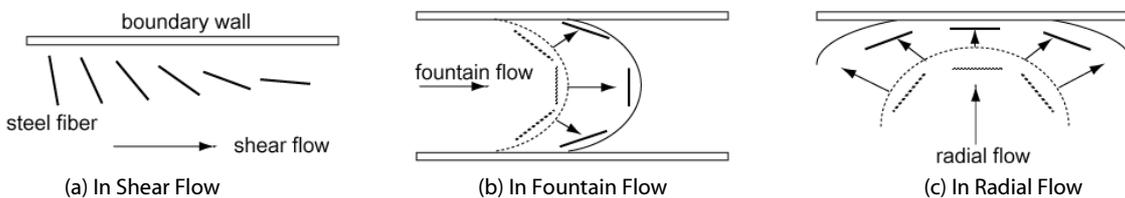


Fig. 7. Boundary Effect in Fiber Arrangement

밀도의 변화가 인장강도에 지배적으로 영향을 미치게 된다. 기울지게 놓여진 강섬유 개개의 부착거동은 인발 시 경계면에서의 휨 작용으로 인한 스너빙 효과(snubbing effect)와 경계면 주변 매트릭스에 작용하는 압축력으로 인한 매트릭스 스폐링 효과(matrix spalling effect)의 영향을 받으며, 대체적으로 인장력 작용방향에 대해 45°까지는 이러한 영향으로 인해 부착강도가 증가하는 것으로 보고되고 있다(Lee et al., 2010). 하지만 섬유가 기울어지게 놓일수록 균열면 또는 인장력을 받는 면에서 단위면적당 섬유의 개체 수는 감소하게 되므로 섬유의 방향성 변화에 따른 인장강도의 변화는 부착강도의 변화와 인장력을 받는 단면 내 섬유분포밀도를 복합적으로 고려하여 평가할 수 있다. UHPCC에서의 섬유방향성과 관련한 기존의 연구결과(Kang et al., 2011; Markovic, 2006)에 따르면 섬유의 배열이 주인장방향에 나란하도록 유도된 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 직접인장강도가 훨씬 크게 나타남을 밝히고 있다. 이러한 연구결과를 바탕으로 본 실험에서의 섬유 배열특성을 고려한 휨인장거동의 변화를 분석할 수 있다.

M2와 M3의 경우를 살펴보면, Fig. 5의 분류에서 분수형 흐름으로 고려할 수 있으며, 이러한 경우 흐름선단에서는 방사형 흐름이 나타나는 반면, 선단 이후에서는 전단흐름이 지배하게 되며, 흐름양단의 경계면에서 Fig. 7(b)과 같은 경계면 효과가 나타나게 된다. 결과적으로 M2의 경우에는 휨실험을 수행한 실험체의 중앙단면에서의 섬유의 배열상태를 예측해 볼 때, 가운데 3개의 실험체에서는 전단흐름으로 인해 섬유가 흐름방향으로 배열되고 양단에 접한 2개의 실험체에서는 경계면 효과에 의해 섬유가 흐름방향으로

배열되었을 것으로 판단할 수 있다. 반면에, M3에서는 흐름에 따른 섬유의 주배열 방향이 휨실험체의 주인장 방향과 수직하게 배치됨을 쉽게 알 수 있다. 따라서 이러한 섬유배열 특성이 M2와 M3의 휨인장거동의 큰 차이를 유발하게 된 것이다. Fig. 8은 M2와 M3에 대해 실험체 위치별 휨인장거동을 비교하여 나타낸 것이다.

M4에서는 적극적으로 전단흐름을 유도하여 섬유의 양호한 배열을 얻고자 한 경우로, M1의 실험실 수준의 양호한 강도 및 변형성을 기대하였으나, M1에는 미치지 못하였고, M2와 유사한 결과를 보였다. M1의 경우에 미치지 못한 이유로는 UHPCC의 큰 점성으로 인해 타설 후 경계판(partition)을 제거하는 과정에서 UHPCC 내 섬유배열에 어느 정도 교란이 발생하였기 때문으로 판단된다.

M5의 경우는 동심원 형태의 방사형 흐름이 발생하게 된다. 그러면 Fig. 6(b)과 같은 섬유의 회전운동이 발생하게 되고, Fig. 1(e)에서의 같이 동심원 방향의 흐름이 진행됨에 따라 휨실험체의 중앙단면에서의 섬유 배열이 휨실험체의 주인장 방향과 나란하게 되려는 경향을 나타내게 된다. 또한 플레이트의 경계면에 도달했을 때에는 경계면 효과도 보이게 된다. 따라서 방사형 유동거리가 증가할수록 섬유의 배열특성이 인장저항에 효과적으로 변화하게 된다. Fig. 9는 유동거리에 따른 휨인장거동의 변화를 잘 나타내고 있다. 유동거리가 가장 먼 M5-1과 M5-5 실험체에서 휨강도가 가장 크게 나타나고, 다음으로 M5-2와 M5-4이며, M5-3에서 가장 작은 휨인장강도를 나타내었다. M5-2 및 M5-4의 휨거동 결과를 M5-3과 비교했을 때 차이가 뚜렷하게 나타나지 않은 이유는 UHPCC의 초기타설 위치에서 일정크기의 부피를 가지게 되므로

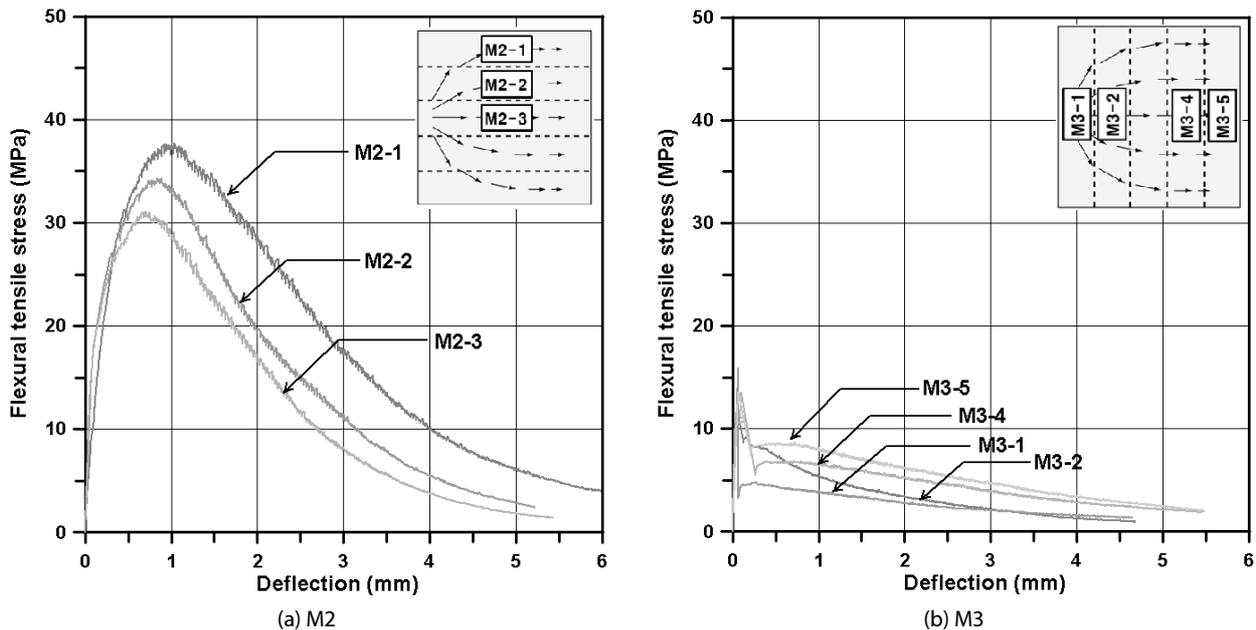


Fig. 8. Comparison of Flexural Behaviors for M2 & M3 Specimens

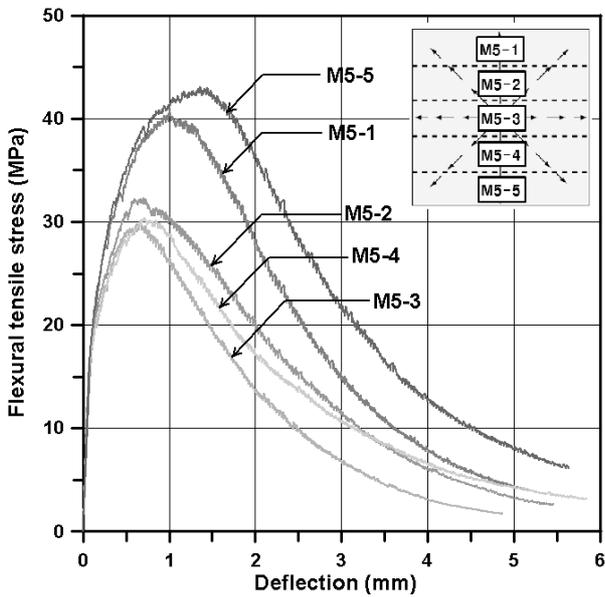


Fig. 9. Variation of Flexural Behavior with Flow Distance in Radial Flow Field

실제 M5-2 또는 M5-4의 중앙단면까지의 방사형 흐름의 지배거리가 매우 짧기 때문에 섬유회전의 회전이 많이 일어나지 않았기 때문으로 판단된다.

이상과 같이 유동흐름의 특성에 따른 섬유의 배열 변화에 대한 정성적 분석을 통해 제작방법에 따른 UHPCC의 휨인장거동 실험 결과를 논리적으로 설명할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 섬유배열 유도의 효율성을 평가하기 위한 연구의 일환으로, UHPCC의 흐름특성을 달리한 다양한 방법으로 UHPCC 부재를 제작하여 휨거동의 변화를 비교하고, 섬유 배열특성과의 상관관계를 정성적으로 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

일반적인 휨실험체 제작방법으로, 섬유가 주인장방향으로 배열되도록 유도한 경우(M1 경우)가 다른 방법으로 제작된 휨실험체에 비해 더 높은 휨인장강도와 낮은 변동성을 보였다. 대체적으로 실험실에서 제작하는 방법 이상의 더 좋은 결과를 UHPCC 부재에서 흐름유도 방법으로 얻기는 힘든 것으로 나타났다. 특히, 플레이트의 한쪽 면의 가운데에서 UHPCC를 부어 흐르도록 유도한 후, 그에 직각방향을 길이방향으로 하여 절단하여 휨실험체를 제작한 경우(M3 경우)에는 일반적인 실험체 제작방법으로 만든 경우의 휨인장강도에 비해 1/3 정도 수준으로 매우 낮게 나타났다. 또, 동심원 형태의 방사형 흐름을 유도한 경우(M5 경우)에는 위치에 따른 휨인장강도의 변화가 매우 크게 나타났으며, 유동거리가 증가

함에 따라 강도가 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 이러한 결과들을 종합적으로 살펴볼 때, 실제 UHPCC 부재에서의 재료의 휨인장강도는 실험실 수준에서 측정된 휨인장강도와 비교하여 크게 다를 수 있고, 변동성도 더 크게 나타날 수 있음을 반드시 고려해야 하며, 이러한 특성을 반영하여 인장거동에 대한 설계기준 값을 결정해야 할 것으로 판단된다.

한편, UHPCC의 유동흐름에 따른 섬유의 배열특성의 변화를 흐름의 종류 및 경계면 효과를 고려하여 정성적으로 예측하였으며, 이러한 예측결과는 실험에서 여러 가지 형태로 유도된 유동흐름에 따른 휨인장거동의 변화를 잘 설명함을 입증하였다. 실제 UHPCC 부재에서 발생 가능한 유동특성을 예상할 수 있다면, 그에 따른 섬유의 배열특성과 인장거동특성을 정성적으로 예측 가능할 것이며, 역으로 부재에 작용하는 인장력에 가장 효과적으로 저항할 수 있도록 타설 시 UHPCC의 유동흐름을 제어하는 것도 가능할 것이라 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(PSC 교량의 스마트 긴장력 관리 및 고품질 그라우트 기술 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### References

Chiba, K., Yasuda, K. and Nakamura, K. (2001). "Numerical solution of fiber suspension flow through a parallel plate channel by coupling flow field with fiber orientation distribution." *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 99, pp. 145-157.

Ferrara, L., di Prisco, M. and Lamperti, M. G. L. (2010). "Identification of the stress-crack opening behavior of HPFRCC: The Role of Flow-Induced Fiber Orientation." *Proceedings of FraMCoS-7. Vol. 3.*, Jeju, Korea; pp. 1541-1550.

Johnson, C. D. (1974). "Steel fiber reinforced mortar and concrete: A review of mechanical properties." *Fiber Reinforced Concrete*, ACI SP-44, American Concrete Institute, Detroit, pp. 127-142.

JSCE (2004). *Recommendations for design and construction of ultra high-strength fiber-reinforced concrete structures (draft)*, Japan Society of Civil Engineering, Japan (in Japanese).

Kang, S. T. and 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*, Vol. 41, No. 10, pp. 1001-1014.

KCI (2012). *Ultra high performance concrete K-UHPC structural design guideline*, Korea Concrete Institute (in Korean).

KICT (2012). *Development of the advanced technology of toughness in ultra high performance concrete for hybrid stayed cable bridge*, No. KICT 2012-079, Korea Institute of Construction

- Technology (in Korean).
- Kim, E. G., Park, J. K. and Jo, S. H. (2001). "A study on fiber orientation during the injection molding of fiber-reinforced polymeric composites (Comparison between image processing results and numerical simulation)." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 111, pp. 225-232.
- 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*, KSCE, Vol. 61, No. 2, pp. 51-60 (in Korean).
- Kwon, S. H., Kang, S. T., Lee, B. Y. and Kim, J. K. (2012). "The variation of flow-dependent tensile behavior in radial flow dominant placing of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites (UHPFRCC)." *Construction and Building Materials*, Vol. 33, pp. 109-121.
- Lee, H. H. and Lee, H. J. (2004). "Characteristic strength and deformation of SFRC considering steel fiber factor and volume fraction." *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, Vol. 16, No. 6, pp. 759-766 (in Korean).
- Lee, Y., Kang, S. T. and Kim, J. K. (2010). "Pullout behavior of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix." *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 10, pp. 2030-2041.
- Markovic I. (2006). *High-performance hybrid-fiber concrete-development and utilisation*, Ph.D. Dissertation, Delft University of Technology, Netherland.
- Naaman, A. E. (1972). *A statistical theory of strength for fiber reinforced concrete*, Ph.D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, USA.
- Park, S. H., Kim, D. J., Ryu, G. S. and Koh K. T. (2012). "Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete." *Cement & Concrete Composites*, Vol. 34, pp. 172-184.
- Richard, P. and Cheyrezy, M. (1995). "Composition of reactive powder concretes." *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 7, pp. 1501-1511.
- SETRA/AFGC (2002). *Ultra high performance fiber-reinforced concretes, SETRA/AFGC Interim Recommendations*, SETRA, France.
- Swamy R. N. and Stavrides H. (1975). "Some properties of high workability steel fiber reinforced concrete by electro-magnetic method." *Fibre Reinforced Cement and Concrete*, A. M. Neville, Construction Press Ltd, Lancaster, pp. 197-208.
- Wuest, J., Denarie, E. and Bruhwiler, E. (2008). "Model for predicting the UHPFRC tensile hardening response." *Proceedings of the second international symposium on ultra high performance concrete*, University of Kassel, Kassel, Germany, pp. 153-160.
- Yoo, D. Y., Park, J. J., Kim, S. W. and Yoon, Y. S. (2012). "Properties and prediction model for ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC): (I) Evaluation of setting and shrinkage characteristics and tensile behavior." *Journal of the Korean Society of Civil Engineer*, KSCE, Vo. 32, No. 5A, pp. 307-315 (in Korean).