

강섬유의 형상, 길이 및 혼입율에 따른 고성능 섬유보강 시멘트 복합체의 휨 특성 평가

박기준, 박정준*, 김성욱, 이장화
한국건설기술연구원 구조융합연구소

Evaluation of flexural performance of high performance fiber reinforced cementitious composites according to fiber shape, aspect ratio and volume fraction

Gi-Joon Park, Jung-Jun Park*, Sung-Wook Kim, Jang-Hwa Lee
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약 고성능 섬유보강 시멘트 복합체(High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites, HPRCC)는 내구성 및 연성이 우수할 뿐만 아니라, 강도발현이 뛰어나 구조부재 적용 시 단면을 상당히 감소시켜 자중을 줄일 수 있는 재료로 관심을 받고 있다. 이에 본 연구에서는 HPRCC에 사용 가능한 다양한 강섬유 종류 및 강섬유의 특성에 따라 휨 실험을 수행하였으며, 휨 성능 분석을 통해 효율적인 섬유보강 방법을 모색하여 경제성을 향상시키고자 하였다. 따라서 보다 효율적인 섬유보강 방법을 찾기 위해 기존길이 13 mm 보다 긴 강섬유와 일자형 강섬유를 소성 변형시킨 갈고리형 강섬유, 비틀림 강섬유를 사용하여 섬유의 모양(shape), 형상비(aspect ratio) 혼입율에 대한 휨 특성을 평가하고 분석하고자 하였다. 실험결과 HPRCC에 일자형태를 가지는 길이 19.5 mm의 강섬유를 1.5%만큼 혼입할 경우 기존에 많이 사용되고 있는 길이 13 mm의 일자형 강섬유를 2.0% 혼입하였을 때 보다 뛰어난 휨 성능을 나타내었다. 따라서 섬유량을 줄여줄 수 있기 때문에 보다 경제성이 우수한 강섬유 보강 HPRCC를 제조할 수 있을 것으로 판단되었다.

Abstract High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites (HPRCC) has outstanding durability, and has attracted interest because of its ductility and development of strength, which allows a reduction of the self-weight of a structural member by substantially decreasing the cross section. Therefore, the present study aimed to improve the economic efficiency of HPRCC by examining experimentally the flexural performance considering various characteristics of the steel fiber. To find an efficient fiber reinforcement method, the flexural performance was evaluated for different shapes, aspect ratios, and volume ratios of the steel fiber. Straight, hooked, and twisted fiber configurations were considered by adopting a fiber length longer than the usual 13 mm. The test results showed that HPRCC reinforced by 19.5 mm-long straight fibers with a volume fraction of 1.5% shows better flexural performance than that reinforced by 13 mm-long straight fibers with a volume fraction of 2.0%. Consequently, HPRCC with enhanced economic efficiency can be produced by adopting a reduced amount of steel fiber.

Keywords : Fiber aspect ratio, Fiber shape, Fiber volume fraction, Flexural performance, HPRCC,

1. 서론

콘크리트는 경제성이 우수하여 인프라를 구축한 주요
건설재료로 이용되어 지고 있다[1]. 한편, 일반적인 콘크

리트의 인장강도와 휨 강도가 낮고, 파괴 시 취성적인 성
질을 나타내는 재료적 단점을 보완하기 위해 섬유보강
콘크리트가 연구되어지고 있다. 특히 최근 수많은 연구
에 의해 강도, 연성, 휨인성지수, 내구성 등의 여러 방면

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 13IFIP-C113546-01).

*Corresponding Author : Jung-Jun Park (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

Tel: +82-31-910-0105 email: jjpark@kict.re.kr

Received November 2, 2017 Revised November 24, 2017

Accepted December 8, 2017 Published December 31, 2017

에서 우수한 성능을 발휘한다고 알려져 있다[2-5]. 고성능 섬유보강 시멘트 복합체 (High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, 이하 HPRC)는 Fig. 1과 같이 일반 콘크리트 및 섬유보강 콘크리트에 비해 변형 경화 거동을 보이고, 하중 재하 시 다수의 미세 균열이 발생하며 균열이 집중되는 특성을 보인다[6]. HPRC에 하중이 작용하면, 첫 균열 발생 이후 미세 균열이 발생한다. 미세 균열이 발생하는 과정에서 강섬유의 가교효과로 인하여 균열이 억제되며, 강섬유가 인발되기 전까지 하중은 증가한다. 강섬유가 인발되면, 미세 균열이 집중화 되는 현상(Crack localization)이 발생하고 실험체는 최종적으로 파괴에 도달한다.

HPRC에 혼입되어 있는 강섬유는 체적의 2.0%의 혼입 시 전체 제작비용의 약 45%를 차지할 정도이다[7]. 따라서 보다 효율적인 섬유보강 방법을 찾기 위해 기존 길이 13 mm 보다 긴 강섬유와 일자형 강섬유를 소성 변형시킨 갈고리형 강섬유, 비틀림 강섬유를 사용한 경우에 대하여 섬유길이와 혼입율을 변화시켜 HPRC에 미치는 휨특성을 평가하고 분석하고자 하였다. 또한 이를 통해 HPRC의 경제적인 섬유보강 방법을 모색하여 경제성을 향상시키고자 하였다.

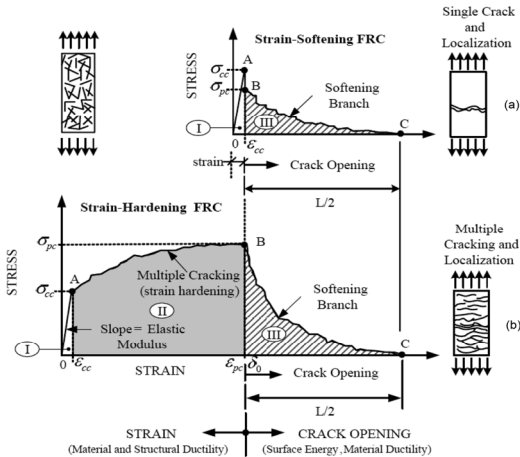


Fig. 1. Typical tensile softening and hardening behavior of FRC, HPRC, UHPRC[6]

2. 실험방법 및 내용

2.1 사용재료 및 시험체 제작 방법

본 실험에는 HPRC의 강도 증진 및 유동성 향상을 위해 1종 포틀랜드 시멘트 및 입경 0.5 mm 이하의 잔골

재, 98%의 SiO₂를 포함한 충전재, 노르웨이산 실리카폼 (SF) 등의 결합재를 사용하였다. 또한 HPRC의 매우 낮은 물-결합재비로 인한 작업성 문제를 해결하기 위해 1.06 g/cm³의 밀도를 가진 폴리카본산계 고성능감수제를 사용하였다. 배합에 사용된 재료들의 화학적 구성 성분은 Table 1과 같다.

사용된 섬유의 종류는 밀도 7.8 g/cm³를 갖는 High strength straight steel fiber(S-), High strength hooked-end steel fiber(H-), High strength twisted steel fiber(T-) 등 3종류를 사용하였다. S-fiber는 일자 형태이며, H-fiber는 양 단부가 갈고리(Hook)인 형태, T-fiber는 섬유를 축을 따라 비튼 형태이다(Fig. 2). 실험에서 사용된 섬유의 직경(d_f), 길이(L_f), 인장강도, 섬유 형상비(L_f/d_f) 및 물리적 성질을 Table 2에 나타내었다. 실험에 사용된 강섬유는 모두 형상비 100이 넘지 않도록 하였다. 그 이유는 형상비가 100 이상일 경우 섬유 뭉침 현상이 두드러지게 나타나고 그에 따른 유동성 저감이 발생하기 때문이다[8]. 사용된 배합은 압축강도 180 MPa를 달성하기 위해 물-결합재비(W/B)를 20%로 하고 사용된 재료중 모래는 호주산 모래와 평균입경 4 μm인 충전재를 사용하였다. 또한 HPRC의 인성을 향상시키기 위하여 전체 체적의 2%에 해당하는 강섬유를 혼입하였다. 이들 재료를 제외한 나머지 사용된 재료는 모든 배합에서 동일하며 시험체 제작에 사용된 배합표를 Table 3에 나타내었다.

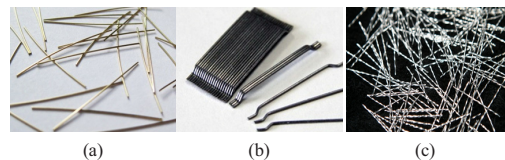


Fig. 2. Picture for steel fibers
(a)Straight fiber (b)Hooked fiber (c)Twisted fiber

Table 1. Chemical properties of materials

Composition % (mass)	Cement	Silica fume (SF)
CaO	61.33	0.38
Al ₂ O ₃	6.40	0.25
SiO ₂	21.01	96.00
Fe ₂ O ₃	3.12	0.12
MgO	3.02	0.10
SO ₃	2.30	-
Specific surface (cm ² /g)	3,413	200,000
Loss ignition (%)	1.40	1.50
Density (g/cm ³)	3.15	2.10

Table 2. Properties of steel fiber

Type of fiber	Tensile strength (MPa)	$l_f^{1)}$ (mm)	$d_f^{2)}$ (mm)	l_f/d_f (mm/mm)
S-fiber	2,788	13	0.2	65
	2,500	19.5	0.2	97.5
	2,580	30	0.3	100
H-fiber	2,500	30	0.38	78.95
T-fiber	2,428	30	0.3	100

Note, 1) l_f : length of fiber, 2) d_f : diameter of fiber

HPFRCC를 배합하기 위하여 120 ℓ 용량을 지니고 100 rpm의 속도를 발휘할 수 있는 팬타입의 실험실 믹서를 사용하여 제조하였다. 제작된 시험체는 온도 20℃, 상대습도 65%가 되는 조건에서 습윤양생을 1일간 실시한 후 공시체를 탈형한 뒤, 온도 90±2℃의 고온증기양생 72시간 동안 실시한 후 시험평가를 실시하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 압축강도

압축강도(KS F 2405)는 φ100 x 200 mm인 원주형 공시체를 변수별로 제작하고 최대용량 3,000 kN의 UTM(Universal Testing Machine)을 이용하여 Fig. 3과 같이 측정하였고 시험체 5개에 대한 평균값으로 사용하였다.

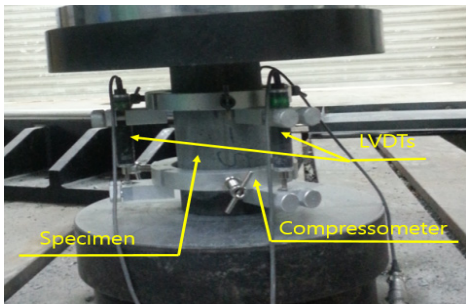


Fig. 3. Test Method for Compressive Strength

2.2.2 휨강도

휨강도는 KS F 2566에 따라 100×100×400 mm 크기

의 직육면체 시편을 사용하여 4점 휨실험(four point bending test)을 수행하였다(Fig. 4). 이 실험에서는 최대 하중용량 200 kN를 갖는 UTM을 사용하였으며, 0.04 mm/min 가력속도의 변위제어 방식으로 4점 가력 하였다. 실험체 중앙부에 변위계(LVDT) 2개를 장착한 측정 프레임을 설치하여 변위를 측정하였고 시험체 4개에 대한 평균값을 강도측정값으로 사용하였다.

휨 성능 평가를 위하여 ASTM C 1609 표준을 따라 휨 강도 산정하였고, 실험체의 첫 균열(Limit of Proportionality, LOP) 휨 강도와 최대 하중(Modulus of Rupture, MOR)에서의 휨 강도를 산정하였다.

$$f_{LOP} = \frac{P_{LOP}L_c}{bd_c^2} \quad (1)$$

$$f_{MOR} = \frac{P_{MOR}L_c}{bd_c^2} \quad (2)$$

여기서, P_{LOP} 는 실험체 첫 균열시 하중, P_{MOR} 은 최대 하중, L_c 는 지간거리(300 mm), b 는 실험체의 너비(100 mm), d_c 는 실험체의 높이(100 mm)이다.

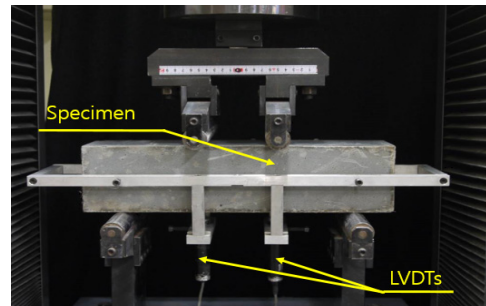


Fig. 4. Test Method for Flexural Tensile Strength

2.2.3 에너지 소산능력 평가

HPFRCC의 에너지 소산능력을 평가하기 위해서 ASTM C 1609에서 제시하는 휨인성지수(Toughness)를 사용하였다. 휨인성지수는 실험에서 얻은 하중-처짐 곡선에서의 면적으로 정의된다. 이 논문에서는 각 실험체

Table 3. Mix proportions of HPFRCC (ratio in weight)

Nomenclature	W/B	Cement	SF	Filler	Sand	Superplasticizer	Steel fiber	Flow [mm]
HPF 180	0.2	1	0.25	0.30 (4 μm)	1.10	0.02	$V_f^1=2\%$	220

Note, V_f = Volume fraction of fiber

의 하중-처짐 곡선에서 처짐이 δ_{LOP} , δ_{MOR} , $L_c/150$, $L_c/75$, $L_c/50$ 일 때의 면적을 산정하여 에너지 소산능력 T_{LOP} , T_{MOR} , T_{150} , T_{75} , T_{50} 을 평가하였다.

2.2.4 실험변수

실험의 주요 변수는 섬유 종류(Steel, Hooked, Twisted)와 섬유의 길이(13, 19.5, 30 mm), 섬유의 혼입률(0.5, 1.0, 1.5, 2.0%)이다. 실험체의 명칭은 보강된 섬유의 종류와 길이, 혼입률에 따라 표시하여 Table 4에 나타내었다. S와 H, T는 섬유의 종류(Straight, Hooked, Twisted)를 의미하고, 13과 19.5, 30은 섬유의 길이(13 mm, 19.5 mm, 30 mm)를 의미하며, 마지막으로 (0.5)와 (1.0), (1.5), (2.0)는 섬유의 혼입률을 의미한다. 예를 들어, S19.5(2.0) 실험체는 길이 19.5 mm의 일자형 강섬유가 전체 체적의 2.0% 혼입된 제작된 실험체이다.

Table 4. Chemical properties of materials

Specimens	Fiber type	Volume fraction (%)
S13(0.5)	Straight	0.5
S13(1.0)		1.0
S13(1.5)		1.5
S13(2.0)		2.0
S19.5(0.5)		0.5
S19.5(1.0)		1.0
S19.5(1.5)		1.5
S19.5(2.0)		2.0
S30(0.5)	Hooked	0.5
S30(1.0)		1.0
S30(1.5)		1.5
S30(2.0)		2.0
H30(0.5)	Twisted	0.5
H30(1.0)		1.0
H30(1.5)		1.5
H30(2.0)		2.0
T30(0.5)	Twisted	0.5
T30(1.0)		1.0
T30(1.5)		1.5
T30(2.0)		2.0

3. 실험결과 및 고찰

3.1 HPFRCC의 압축강도

각 섬유 종류의 혼입률에 따른 실험체의 평균압축강도를 Fig. 5에 나타내었다. 섬유의 길이나 혼입률에 따른 경향을 나타내지 않았고 모든 시험체에서 목표강도인 180 MPa를 달성한 것으로 나타났다.

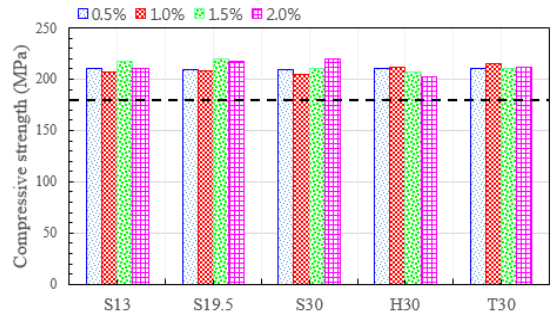


Fig. 5. Compressive strength of HPFRCC

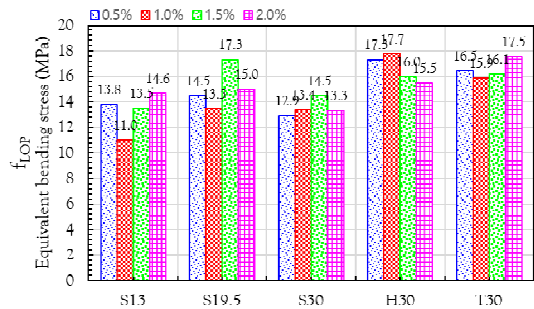


Fig. 6. Average f_{LOP} of HPFRCC

3.2 HPFRCC의 휨강도

각 섬유 종류의 혼입률에 따른 HPFRCC의 평균 f_{LOP} 값을 Fig. 6에 나타내었다. S-fiber 실험체의 경우 섬유의 길이 및 혼입률에 따른 f_{LOP} 값의 차이는 미미한 것으로 나타났고, H- 및 T-fiber 실험체 또한 섬유의 혼입률에 따른 f_{LOP} 값의 차이는 미미한 것으로 나타났다. 섬유의 형상에 따른 차이로, H- 및 T-fiber 실험체가 S-fiber 실험체에 비해 약간 큰 f_{LOP} 값을 나타내었다. 평균적으로 S-fiber 실험체의 f_{LOP} 는 13.94 MPa이며, H- 및 T-fiber 실험체의 경우 각각 16.63 MPa와 16.50 MPa로 나타났다. 그러나 상기 f_{LOP} 값의 차이는 균열 후 최대 강도 (f_{MOR})의 차이보다는 미미한 것이며, 이는 첫 균열 강도가 섬유의 가교효과 보다 매트릭스의 균열 강도에 큰 영향을 받기 때문으로 판단된다[9]. 또한 S19.5 실험체와 S30 실험체를 혼입률에 따라서 비교하면, 혼입률이 1.0% 이하일 때(0.5%, 1.0%)는 두 실험체가 비슷한 f_{MOR} 값을 보였다. 그러나 1.5% 이상일 때(1.5%, 2.0%)는 S19.5 실험체가 S30 실험체보다 큰 f_{MOR} 값을 나타내었다.

Fig. 7은 각 섬유 종류의 혼입율에 따른 f_{MOR} 값을 나타낸 것으로 혼입율이 증가함에 따라 f_{MOR} 값이 커지는 것을 나타내고 있다. 섬유의 길이가 30 mm인 실험체 (S30, H30, T30)의 혼입율에 따른 f_{MOR} 증가량이 혼입율이 1.5% 이상일 때 크게 감소하였다. S13 실험체와 S19.5 실험체의 혼입율이 1.0%에서 1.5%로 증가할 때 증가율은 두 실험체 모두 약 40%인 반면에 S30 실험체와 H30, T30 실험체의 혼입율이 1.0%에서 1.5%로 증가할 때 증가율은 각각 약 25%, 13%, 22%이다.

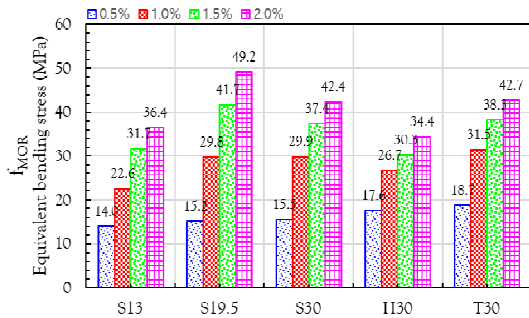


Fig. 7. Average f_{MOR} of HPRC

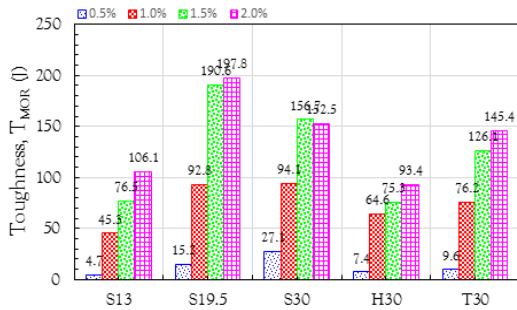


Fig. 8. Average T_{MOR} of HPRC

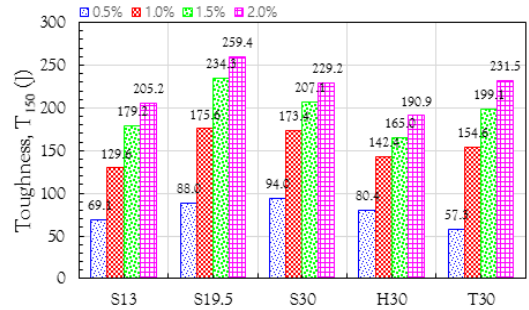
3.3 HPRC의 에너지 소산능력

3.3.1 휨인성지수

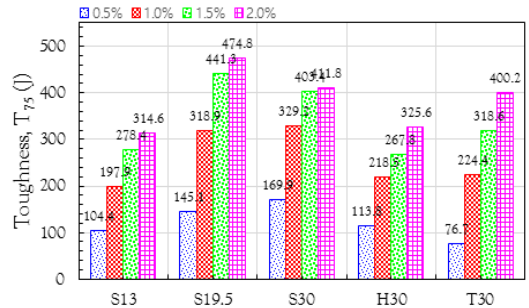
Fig. 8은 HPRC의 최대 하중 시 휨인성지수 (Toughness, T_{MOR})를 강섬유 혼입률 별로 나타낸 그림이다. Fig. 9는 HPRC의 최대 하중 시 처짐 값이 $L_d/150(2\text{ mm})$, $L_d/75(4\text{ mm})$, $L_d/50(6\text{ mm})$ 일 때 휨인성지수(T_{150} , T_{75} , T_{50})를 혼입률 별로 나타낸 그래프이다.

S19.5 실험체와 S30 실험체의 휨인성지수 값을 비교하면, 혼입율이 1.0% 이하일 때는 S30 실험체의 값이 더

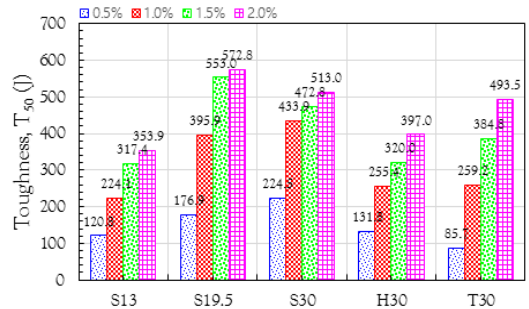
큰 반면에 혼입율이 1.5% 이상일 때는 S19.5 실험체의 값이 더 큰 것으로 나타났다. 따라서 두 실험체의 휨 인성지수의 차이는 f_{MOR} 값의 차이에 의한 것으로 섬유가 길고 혼입율이 높으면, 섬유의 간섭효과가 증가했기 때문으로 판단된다[7].



(a)



(b)



(c)

Fig. 9. Toughness of HPRC

(a) T_{150} (b) T_{75} (c) T_{50}

3.3.2 처짐 및 균열 거동 분석

실험체의 종류 별 최대 응력 발생 시 처짐값을 Fig. 10에 나타내었다. 전반적으로 섬유의 혼입율이 증가함에 따라 f_{MOR} 값이 증가하여 처짐 값이 증가하는 것으로 나타났다.

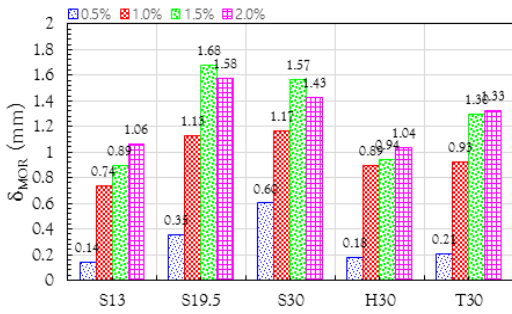
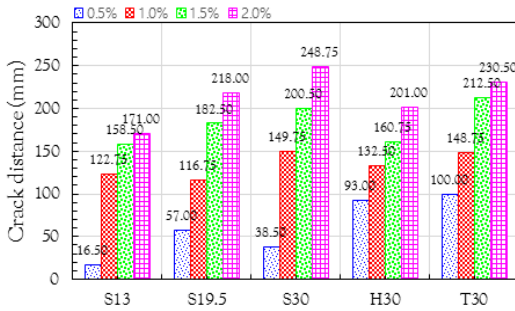
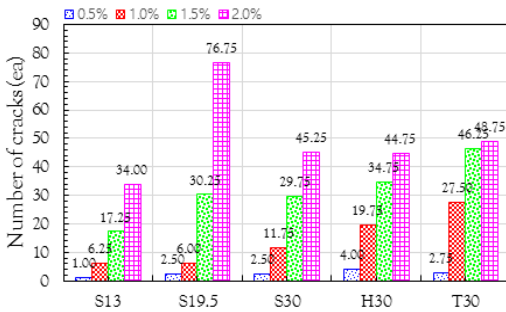


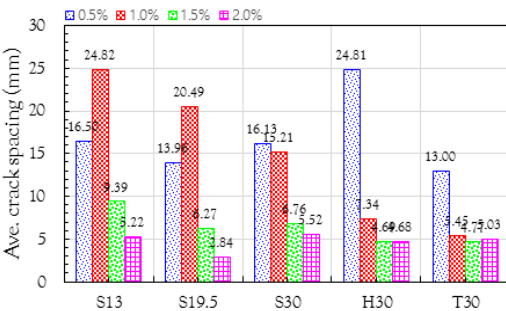
Fig. 10. Average δ_{MOR} of HPRC



(a)



(b)



(c)

Fig. 11. Toughness of HPRC
 (a) Crack distance (b) Number of cracks
 (C) Average crack spacing

Fig. 11에 실험체의 종류 별 균열길이, 균열수, 평균 균열간격을 나타낸 것이다. 전반적으로 섬유 혼입률이 증가함에 따라 균열 길이와 균열 개수가 증가하며, 평균 균열 간격은 감소하였다. 여기서, 균열 길이는 실험체의 양 끝단 균열지점의 길이이며, 균열 개수는 실험체에 발생한 균열의 개수이며 평균 균열 간격은 균열 길이를 균열 개수로 나누어준 값이다. S19.5(2.0) 실험체의 처짐 값(1.58 mm)과 S30(1.5) 실험체의 처짐 값(1.57 mm)을 비교해보면 매우 비슷한 것을 확인 할 수 있다. 두 실험체의 균열 길이는 비슷한 값을 보이지만 균열 개수와 평균 균열 간격은 차이를 보인다. 이는 섬유의 인발 하중의 차이로 인한 것으로 판단된다.

섬유의 길이가 19.5 mm일 때와 30 mm일 때의 섬유 인발 하중은 섬유의 문힘 길이가 더 긴 30 mm일 때가 더 크며, 비슷한 f_{MOR} 값이라면 섬유의 길이가 19.5 mm일 때 균열이 더 많이 발생한다. Fig. 7에서 두 실험체의 f_{MOR} 값은 S19.5-2.0% 실험체(49.2 MPa)가 S30-1.5%(37.4 MPa)보다 더 크다. 따라서 균열개수는 19.5 mm일 때 2.0% 혼입률 실험체가 더 많으며, 비슷한 균열길이에서 균열개수가 많고 균열 간격이 좁아 보다 큰 변형경화 현상을 나타낸 것으로 판단된다.

3.3.3 섬유혼입률 저감 효과 분석

HPRC에 길이 13 mm S-fiber가 2.0% 혼입된 S13(2.0) 실험체를 기준으로 더 낮은 혼입률에서 더 높은 휨 성능을 갖는 실험체를 표시하여 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었다. S13(2.0) 실험체보다 혼입률이 0.5% 낮은 S19.5(1.5) 및 S30(1.5), T30(1.5) 실험체가 기존의 S13(2.0) 실험체보다 T_{150} 값을 제외한 휨 성능(f_{MOR} , T_{MOR} , T_{75} , T_{50})에서 더 큰 값을 보이는 것으로 나타났다. T_{150} 값은 S19.5(1.5) 실험체와 S30(1.5) 실험체가 S13(2.0) 실험체보다 더 큰 값을 보였으며, T30(1.5) 실험체는 S13(2.0) 실험체와 큰 차이를 보이지 않고 비슷한 값을 보였다. 이를 통해 S19.5, S30, T30 섬유를 사용한 실험체가 S13(2.0) 실험체보다 0.5% 낮은 1.5% 혼입률에서 크거나 비슷한 최대 휨 강도(f_{MOR})와 에너지소산능력(T_{MOR} , T_{150} , T_{75} , T_{50})을 갖는 것으로 나타났다. 즉, S13(2.0) 실험체보다 높은 휨 성능을 가지며, 혼입률을 줄여줄 수 있는 실험체는 총 세 종류(S19.5(1.5), S30(1.5), T30(1.5))로 제안할 수 있다.

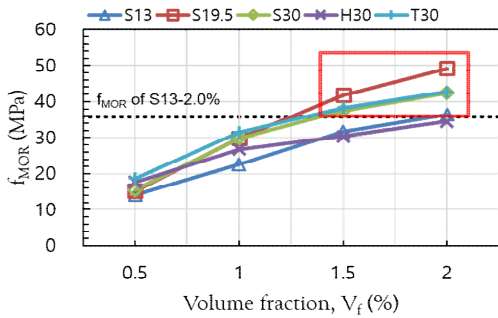
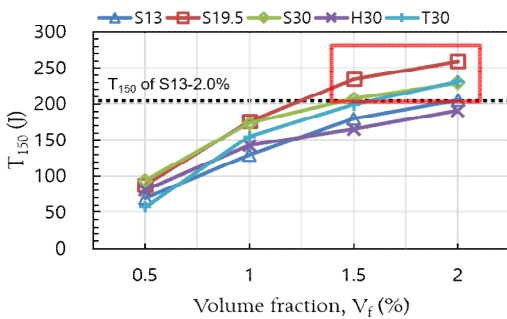
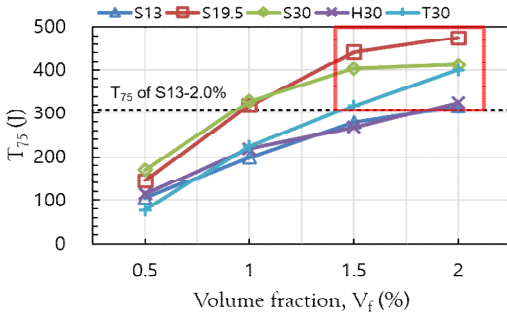


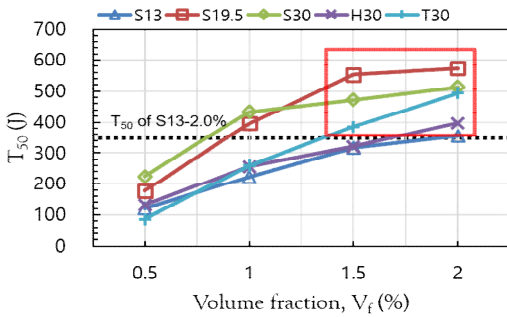
Fig. 12. HPRC f_{MOR} for fiber type



(a)



(b)



(c)

Fig. 13. HPRC Toughness for fiber type
(a) T_{150} (b) T_{75} (c) T_{50}

세 종류의 실험체 중 S19.5-1.5% 실험체가 모든 휨 성능 지표에서 가장 큰 값을 갖는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 13 mm 강섬유를 2% 혼입하는 HPRC에 비해 19.5 mm를 1.5% 대체할 경우 보다 경제적인 HPRC를 제조할 수 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

이 논문에서는 HPRC의 강섬유의 형상, 길이, 혼입률에 따른 휨 실험을 수행하고, 그 결과로부터 HPRC의 효율적인 섬유보강 방법을 파악한 것으로 결론은 다음과 같다.

1. 초고성능 섬유보강 콘크리트의 매트릭스의 첫 균열은 강섬유의 형상과 길이, 혼입률에 영향을 받지 않으며 매트릭스 자체의 균열 강도에 큰 영향을 받는다.
2. 일반적으로 휨 성능은 강섬유의 혼입률이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이며, 섬유의 길이가 길고 혼입률이 1.5% 이상일 때에는 섬유의 간섭효과로 인하여 그 증가량이 감소하거나 휨 성능이 저하되는 것을 확인하였다.
3. S19.5 섬유의 배열과 분산이 타 섬유들에 비해 우수했고, 균열단면에 존재하는 가교 섬유의 수 또한, 상대적으로 많다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 이유로 2%의 섬유 혼입률에서 가장 우수한 휨 성능을 나타내었다.
4. S-fiber 길이 19.5 mm의 혼입률 1.5%가 기준 S-fiber 길이 13 mm의 2.0% 혼입률 보다 뛰어난 휨 성능을 가지며, 필요한 섬유량을 줄여줄 수 있기 때문에 경제성이 더 우수한 것으로 판단되었다.

References

- [1] P. C. Aitcin, "Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow," Cement and Concrete Research, vol. 30, pp. 1349-1359, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00365-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00365-3)
- [2] P. Richard and M. H. Cheyrezy, "Composition of Reactive Powder Concrete", Cement and Concrete research, vol. 25, no. 7, pp. 1501-1511, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2)
- [3] KICT, Development of Technology to improve the

Durability of Concrete Bridges, Report no. KICT 2006-89, Korea Institute of Construction Technology, Korea, 2006.(in Korean)

- [4] D. Y. Yoo, J. J. park, S. W. Kim, "Fiber pullout behavior of HPRCC: Effects of matrix strength and fiber type", Composite structure vol. 132, pp. 219-229, 2017.
- [5] S. W. Kim, S. T. Kang and S. M. Han, "Characteristics and Application of Ultra High Performance Cementitious Composite," Magazine of the Korea Concrete Institute, vol. 18, no. 1, pp. 16-21, 2006.(in Korean)
- [6] S. H. Park, D. J. Kim, G. S. Ryu, K. T. Koh, "Tensile behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete", Cement and Concrete Composites, vol. 34, no. 2, pp. 172-184, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.009>
- [7] D. Y. Yoo, M. J Kim, S. W. Kim, J. J. park, "Development of cost effective ultra-high-performance fiber-reinforced concrete using single and hybrid steel fibers", Construction and Building Materials 150, pp. 383-394, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.018>
- [8] D. Y. Yoo, "[Literature Review]A Review on Mechanical Properties of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete" Magazine of the Korea Concrete Institute vol. 29, no. 2, pp. 38-44, 2017.
- [9] F. Lauren., R. Todd. and L. Eric, "Energy Dissipation Mechanisms in the Fracture of Fiber Reinforced Ultra High Performance Concrete", In: 4th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials(HiPerMat 2016), Kassel, Germany, pp. 1-8, 2016.

박 기 준(Gi-Joon Park)

[정회원]



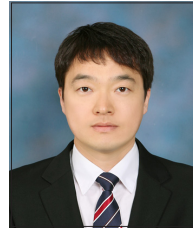
- 2013년 2월 : 세종대학교 공과대학 건설환경공학과 (공학학사)
- 2015년 2월 : 세종대학교 일반대학원 건설환경공학과 (공학석사)
- 2015년 4월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원, 연구원

<관심분야>

토목공학, 건설재료

박 정 준(Jung-Jun Park)

[정회원]



- 2000년 2월 : 계명대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2013년 8월 : 고려대학교 대학원 건축사회환경공학과 (공학박사)
- 2000년 5월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원, 수석연구원
- 2016년 8월 ~ 현재 : CEVI 융합연구단 겸임연구원

<관심분야>

콘크리트, 건설재료

김 성 옥(Sung-Wook Kim)

[정회원]



- 1984년 2월 : 영남대학교 토목공학과 (공학사)
- 1986년 2월 : 영남대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 : 동국대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2003년 12월 ~ 2004년 12월 : 호주 UNSW, 객원연구원
- 1989년 5월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원, 선임연구위원

<관심분야>

토목공학, 건설재료

이 장 화(Jang-Hwa Lee)

[정회원]



- 1983년 8월 : 연세대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1995년 8월 : 연세대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1984년 4월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원, 선임연구위원
- 1998년 9월 ~ 1999년 9월 : 미국 NIST 객원과학자

<관심분야>

토목공학, 건설재료