

# 섬유 조합변화가 HPFRCC의 공학적 특성에 미치는 영향

## Effect of Hybrid Fibers on the Engineering Properties of HPFRCC

한 등 업<sup>1</sup>

한 민 철<sup>2\*</sup>

강 병 회<sup>2</sup>

박 용 준<sup>2</sup>

Han, Dongyeop<sup>1</sup>

Han, Min Gheol<sup>2\*</sup>

Kang, Byeong Hoe<sup>2</sup>

Park, Yong Jun<sup>2</sup>

*Research Institute of Industrial Sciences, Cheong ju University, Naedeok-Dong, Cheongju-City, 360-764, Korea <sup>1</sup>*

*Department of Architectural Engineering, Cheong ju University, Naedeok-Dong, Cheongju-City, 360-764, Korea <sup>2</sup>*

### Abstract

For the construction materials, concrete, as the most widely used material, is focused on its improvement of performance. Although concrete has many advantages of easiness of handling, economical benefits, and high compressive strength, low tensile strength, brittleness and drying shrinkage are reported as the drawbacks of concrete. Hence, to solve these drawbacks of concrete, many research has conducted especially using fiber-reinforced concrete technology. Especially, HPFRCC which has high volume of fiber reinforcement was suggested as a solution of these drawbacks of normal concrete with increased ductility while it has the possibility of workability loss with fiber clumping which can cause low performance of concrete. Therefore, in this paper, optimized fiber combination with either or both metal and organic fibers is suggested to provide better performance of HPFRCC in tensile strength and ductility. As the results of experiment, better workability was achieved with 1 % of single fiber rather than multiple fibers combinations, especially, short steel fiber showed the best workability result. Furthermore, in the case of organic fibers which showed higher air content than steel fibers, higher compressive strength was achieved while lower tensile and flexural strength were shown.

Keywords: steel fiber, organic fiber, fiber combinations, high performance fiber reinforced cement composites

## 1. 서 론

현대사회의 기술발전과 더불어 삶의 질이 향상됨에 따라 건설기술의 발전도 이루어지고 있다. 특히, 건축재료의 발전은 건설기술의 발전과 더불어 빠르게 발전하고 있는 실정이다. 가장 널리 사용되는 건축재료인 콘크리트는 시공편이성, 경제성, 및 높은 압축강도 등의 이점이 있는 반면에 낮은 인장강도, 취성거동 및 건조수축균열 등의 문제점들도 함께 가지고 있다[1]. 이를 보완하기 위해 산업계 및 학계에서는 이에 대한 해결책으로 섬유를 보강하여 인성을

증가시키는 섬유보강 콘크리트에 대한 연구가 다방면으로 이루어지고 있다[2].

그 중, 섬유의 다량혼입으로 큰 응력에서 넓은 범위의 변형을 일으킬 수 있는 시멘트 복합재료(이하, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, HPFRCC)의 경우[3,4], 섬유의 다량혼입에 따라 큰 인성을 발휘하는 등 장점이 있으나, 섬유 뭉침과 같은 문제로 유동성이 저하되고[5], 결국에는 콘크리트의 품질을 저하시킬 수 있는 우려가 있다[6,7].

따라서 본 연구에서는 인성개량을 위해 섬유를 활용하는 HPFRCC의 인성개량과 같은 제반 공학적 성능을 향상시킬 뿐 아니라 시공성에 악영향을 가장 적게 줄 수 있는 방법으로 유·무기 섬유를 여러 조합으로 사용하는 방법을 바탕으로 이들 섬유조합변화에 따른 HPFRCC의 유동 특성 및 역학적 특성 등을 분석하여 최적의 섬유조합을 제안

Received : July 8, 2014

Revision received : August 11, 2014

Accepted : November 24, 2014

\* Corresponding author : Han, Min Cheol

[Tel: 82-43-229-8484, E-mail : twhan@cju.ac.kr]

©2014 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같다. W/B 25 %의 1 수준에 대하여 결합재 구성을 시멘트에 대한 질량비로 플라이애시와 실리카폼을 각각 20, 10 % 치환하고, 이 배합을 Plain으로 정의하였다. 이러한 Plain 배합에 대해 목표 플로 150 ± 100 mm, 목표 공기량은 2.0 ± 1.0 %의 범위를 만족하도록 배합 설계하였다.

Table 1. Experimental plan

Items		Variables		
W/B(%)		25		
Binder		OPC:FA:SF = 7:2:1		
Target flow (mm)	1	150±100		
Target air content (%)		2.0±1.0		
Mixture		Control mixture	No fiber(Plain)	
			SL	
		Single fiber	SS	
			OL	
			OS	
			SL+SS	
		Binary fibers	SL+OL	
			SL+OS	
			SS+OL	
			SS+OS	
			OL+OS	
			SL+SS+OL	
		Ternary fibers	SL+SS+OS	
			SL+OL+OS	
			SS+OL+OS	
		Quaternary (all) fibers	SL+SS+OL+OS	
Fibers compositions		16	Fiber content (%)	1.0
Fresh concrete	2	· Flow test · Air content		
Test	Hardened concrete	3	· Compressive strength (7, 28, 91 days ) · Tensile strength (7, 28 days) · Flexural strength (28days)	

Table 2. Physical properties of cement

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Setting time (min.)		Compressive strength(MPa)		
		Initial	Final	3 D	7 D	28 D
3.15	3 390	230	345	24.8	39.3	56.9

Table 3. Physical and chemical properties of fly ash

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	L. O. I. (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Moisture content (%)
2.21	3 520	4.60	52.3	0.13

Table 4. Physical and chemical properties of silica fume

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	L. O. I. (%)	Chemical composition (%)				
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO
2.20	160 000	0.05	96.65	1.67	0.03	0.38	0.19

실험변수로는 섬유를 혼입하지 않은 Plain 배합에 강섬유의 장섬유(이하, Steel Long fiber : SL), 단섬유(이하, Steel Short fiber : SS) 유기섬유의 장섬유(이하, Organic Long fiber : OL), 단섬유(이하, Organic Short fiber : OS)를 단독으로 사용하는 경우와 각각의 섬유들을 2 종, 3종, 4종으로 혼합한 총 16수준으로 계획하였다. 본 연구에서는 모르타르 상태에서 모든 실험을 실시하였다. 실험사항으로 굳지 않은 모르타르에서 섬유 종류 및 조합에 따른 영향을 평가하기 위해 플로 및 공기량을 측정하는 것으로 계획하였고, 경화 모르타르에서는 압축강도, 인장강도 및 휨 강도를 측정하여 섬유 종류 및 조합에 따른 영향을 평가하는 것으로 계획하였다.

사용재료로 시멘트는 국내산 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 플라이애시, 실리카폼은 국내에서 제조 판매되는 재료를 사용하였는데, 각각의 물리·화학적 특성은 Table 2~4와 같다. 섬유는 강섬유와 유기섬유의 두 가지 섬유에 대해 길이가 긴 장섬유와 길이가 짧은 단섬유를 사용하였는데, 각각의 물리적 성질은 Table 6 및 7과 같고, 그 모습은 Figure 1과 같다.

실험방법으로는 굳지 않은 모르타르에서 플로와 공기량은 KS L 5111과 KS F 2421, 경화 모르타르에서 압축강도와 휨 강도는 KS F 2405와 KS F 2408의 의거하여 진행을 하였고, 인장강도는 일본토목학회 규정인 JSCE-E-53에 의거하여 실험을 진행하였다.

Table 5. Physical properties of Steel fiber

Types	Length (mm)	Diameter (mm)	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)
SL	35	0.53	66	1 108
SS	13	0.12	108	2 650

Table 6. Physical properties of Organic fiber(Nylon)

Types	Length (mm)	Diameter (mm)	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)
OL	30	0.47	63	650
OS	12	0.023	521	520



(a) SL fiber



(b) SS fiber



(c) OL fiber



(d) OS fiber

Figure 1. Shape of the fibers



1) Test set-up for tensile strength measurement



2) Tensile strength test

Figure 2. JSCE-E-531

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 굳지 않은 모르타르의 특성

Figure 3과 4는 섬유 조합변화에 따른 플로 및 공기량을 나타낸 그래프이다. 이 중, 플로에서 초기치로 표기된 것은 충격 없이 플로콘을 제거한 직후에 플로를 측정하였을 때 얻어진 값이고, 표준치는 초기치 측정 후에 25회 충격 후 측정된 값을 나타낸 것이다.

전반적으로 유·무기 및 장·단섬유를 조합하여 혼입하였을 때에는 섬유가 혼입되지 않은 Plain보다 초기치 플로치가 감소하는 경향을 나타내었다. 세부적으로 단독섬유인 1종의 경우는 강섬유가 유기섬유보다 다소 높은 표준 플로치를 나타내었는데, 특히, 강섬유의 길이가 짧은 SS섬유는 가장 높은 초기 플로치 및 표준 플로치를 나타내었다. 이는 섬유가 모르타르의 시스템 속에서 강섬유의 경우가 유기섬유보다 큰 밀도에 의해 마찰작용이 감소하여 모르타르 유동에 영향을 적게 주어 높은 플로치를 나타낸 것으로 사료된다[8].

초기 플로치의 경우, 1종 단독섬유에 비해 2~4종 섬유를 조합 혼입하였을 경우 섬유간의 적절한 분산성에 기인하여 플로치가 어느 정도 증가할 것으로 기대하였으나 결과적으로 1종 섬유혼입과 유사한 플로치를 나타내어 섬유 조합에 따른 유동성에 영향은 거의 없는 것으로 분석된다[9].

공기량의 경우는 전반적으로 Plain배합보다 섬유혼입시 증가하는 하는 경향을 나타내었다. 먼저 1종 섬유에서는 OS 섬유 혼입시에 Plain과 유사한 정도의 공기량을 나타내었고 다른 경우에 모두 공기량이 증가하는 결과를 보였다. 이를 통해 짧은 유기섬유가 공기량 변화에 미치는 영향이 가장 적음을 알 수 있었다. 또한 복합 섬유들의 경우는 특정한 경향성을 찾기는 어려웠으나, 특히 SL 섬유를 포함한 경우에는 대체로 공기량이 증가한 결과를 나타내었다. 이는 짧은 유기섬유와 반대로 긴 강섬유가 추가적인 공기연행 작용을 하는 것으로 생각되어 길고 강성이 높은 섬유가 모르타르 내에서 비빔과정 동안 상대적으로 불리한 유동성능으로 많은 공극을 유발하는 것으로 생각된다. 즉, 유기섬유가 강섬유와 비교하여 움직임 및 형태변화가 자유롭고, 짧은 섬유가 긴 섬유에 비해 움직임이 자유로워 모르타르 매트릭스 내에서 공극 및 공기량 연행에 미치는 영향이 적은 것으로 판단된다.

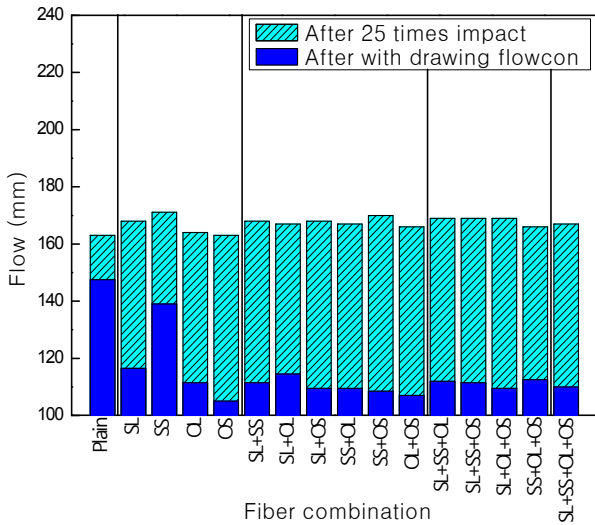


Figure 3. Flow according to fiber combination

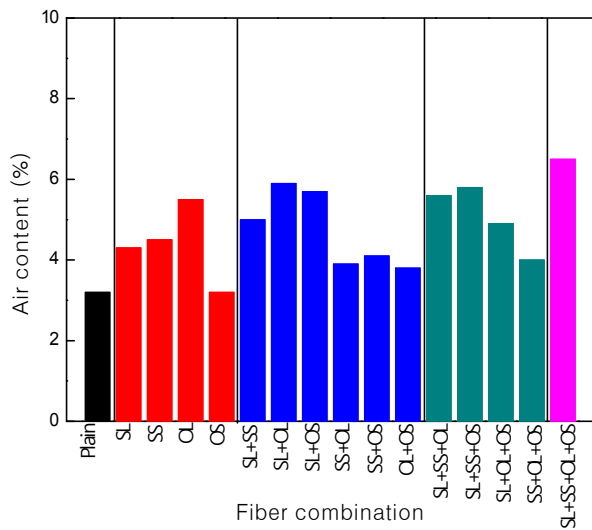


Figure 4. Air content according to fiber combination

### 3.2 경화 모르타르의 특성

Figure 5는 섬유 조합변화에 따른 압축강도를 나타낸 그래프이다. 전반적으로 압축강도는 Plain배합과 유사하거나 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 섬유가 보강됨에 따른 구속작용에 의한 결과로 생각된다. 대체적으로 공기량 측정에서 보인 SL 섬유에 의한 공극의 발생으로 SL섬유를 포함한 모르타르의 압축강도가 감소하는 경향을 보였다. 다만, 짧은 강섬유인 SS섬유를 함유한 경우는 역으로 압축강도가 증가하는 경향을 보였다. 이를 통해 짧은 강섬유는 이동이 자유롭고 강한 구속력을 발휘하여 압축강도 증진에 좋은 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한, 공기량

에 따른 직접적인 압축강도 결과에 대한 영향으로 재령 7일의 경우 공기량이 높았던 모르타르의 경우 Plain에 비해 감소하는 경향도 나타낸 반면에, 재령 91일에서는 인성보강에 기인하여 Plain에 비해 높은 압축강도 발현율을 나타내었다[10].

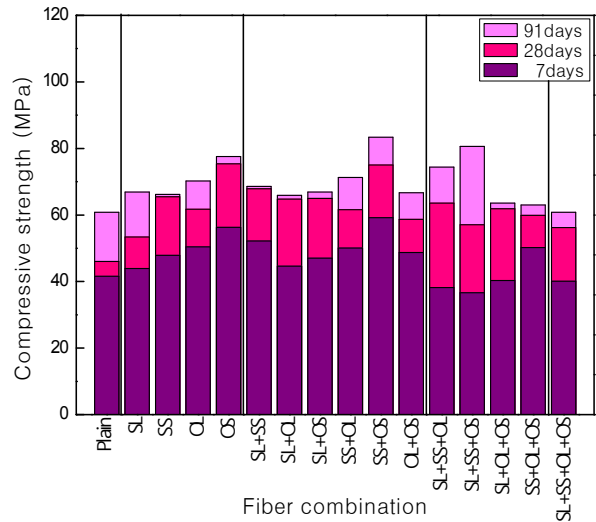


Figure 5. Compressive strength according to fiber combination

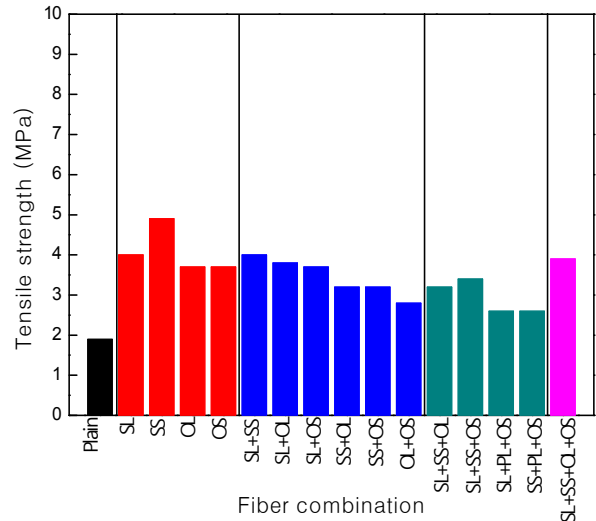


Figure 6. Tensile strength according to fiber combination

Figure 6은 섬유 조합변화에 따른 인장강도를 나타낸 그래프이다. 전반적으로 섬유를 혼입한 경우는 Plain배합보다 증가하는 경향을 나타내었다. 특히, 1종에서는 강섬유의 SS섬유가 가장 높은 인장강도를 나타내었고, 2종에서는 SL+SS섬유와 3종에서는 SL+SS+OS섬유, 4종인

SL+SS+OL+OS섬유 조합에서 다른 조합변화보다 높은 인장강도를 나타내었다. 즉, 대체적으로 강섬유를 포함한 모르타르에서 높은 인장강도를 보였다. 이는 강섬유의 인장강도가 모르타르 매트릭스의 인장강도에 기여한 결과라고 생각된다.

Figure 7은 섬유 조합변화에 따른 인장강도를 압축강도로 나눈 인성계수를 나타낸 그래프이다. 일반적으로 인성계수는 0.1 (인장강도가 압축강도의 1/10) 이라고 알려져 있는 것에 반해, 본 연구에 사용된 모르타르는 고강도 모르타르로 매우 낮은 인성계수의 취성재료임을 나타내었다. 전반적으로 섬유를 포함한 경우에 Plain배합보다 인성계수가 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 섬유의 가교작용으로 인해 인성계수가 증가한 것으로 판단된다. 특히, 1종에서는 강섬유의 혼입으로 인성계수가 81 % 정도 증가하였고, 2종의 경우는 강섬유와 유기섬유의 조합별로 최대 42 % 정도 증가하였고, 짧은 섬유조합인 SS+OS 섬유는 가장 작은 3 % 정도로 미소하게 증가하였다. 3종의 경우에는 SL+SS+OS섬유 조합에서 44 % 정도 증가하였고 4종에서는 68 %의 증가를 나타내었다. 인성계수는 단일 종류

의 강섬유를 포함한 경우에 가장 높았고, 복합적인 섬유들을 포함한 경우에는 오히려 인성계수가 낮아지는 결과를 보였다. 이는 섬유조합과정의 강섬유양의 감소에 따라 인성계수 증진효과가 저하된 것으로 판단된다.

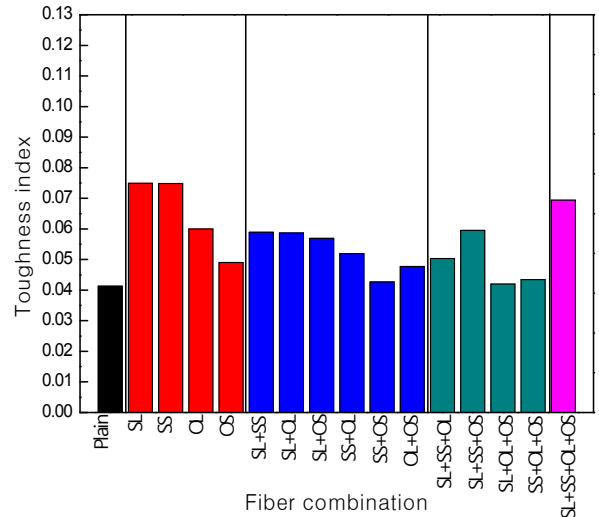


Figure 7. Toughness index according to fiber combination

Table 7. Overall analysis

Fiber combination	Flow		Compressive strength	Tensile strength	Toughness index	Flexural rigidity
	Initial value	Sample value				
SL	○	●	○	●	●	●
SS	●	●	○	●	●	●
OL	○	●	●	●	●	●
OS	○	○	●	●	○	●
SL+SS	○	●	●	●	●	●
SL+OL	●	●	○	●	●	●
SL+OS	○	●	○	●	●	●
SS+OL	○	●	●	○	○	●
SS+OS	○	●	●	○	○	●
OL+OS	○	●	○	○	○	○
SL+SS+OL	○	●	●	○	○	○
SL+SS+OS	○	●	●	●	●	●
SL+OL+OS	○	●	○	○	○	○
SS+OL+OS	●	●	○	○	○	○
SL+SS+OL+OS	○	●	○	●	●	●

For the symbol ● : Good, ● : Normal, ○ : Bad

Annotation : 1) For flow, if the difference between hybrid fibers and average result is in the range of ±2 % means normal, higher than 2% means good, less than 2% means bad

2) For the compressive strength, if the difference between hybrid fibers and average result is in the range of ±2 % means normal, higher than 2% means good, less than 2% means bad

3) For the tensile strength, the difference between hybrid fibers and average result is in the range of ±2 % means normal, higher than 2% means good, less than 2% means bad

4) For the toughness index, the difference between hybrid fibers and average result is in the range of ±2 % means normal, higher than 2% means good, less than 2% means bad

5) For the flexural strength, the difference between hybrid fibers and average result is in the range of ±2 % means normal, higher than 2% means good, less than 2% means bad

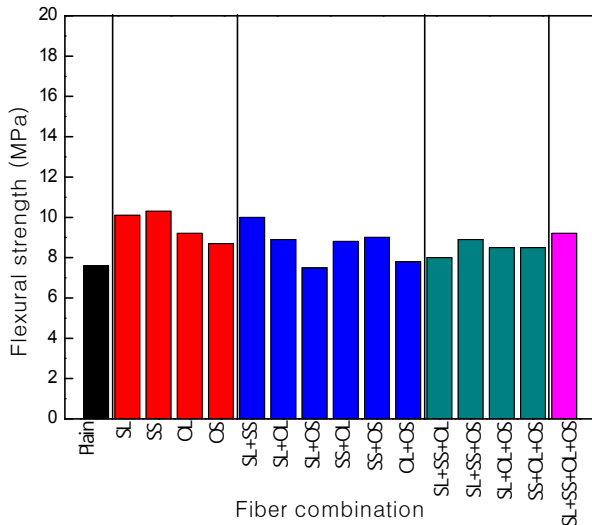


Figure 8. Flexural rigidity according to fiber combination

Figure 8은 섬유 조합변화에 따른 휨강도를 나타낸 그래프이다. 전반적으로 모든 경우에 Plain 배합보다 섬유의 가교작용에 기인하여 휨강도가 증가하는 경향을 나타내었는데, 1종의 경우 강섬유의 경우에 높은 휨강도를 나타내었다. 2종에서는 강섬유의 조합인 SL+SS섬유가 높은 휨강도를 나타내었으며 3종의 조합에서는 SL+SS+OS섬유에서 가장 높은 휨강도를 나타내었다. 또한 4종 조합에서도 3종 조합과 유사한 휨강도값을 나타내었는데, 이는 섬유가 인발되는 면적이 커짐에 따라 휨강도가 증가된 것으로 판단된다. 단, 유기섬유 중 OS섬유가 포함된 배합의 경우 휨강도가 낮아지는 것으로 나타났다. 이 또한 인성계수 결과와 유사하게 섬유조합에 따른 강섬유량의 감소로 인한 결과로 판단된다.

### 3.3 종합분석

종합분석으로 Table 7은 단독섬유 및 섬유 조합별로 각 항목에서 측정된 평균치를 기준으로 평균치와  $\pm 2\%$ 이내면 보통, 2이상이면 양호, 2이하이면 불량으로 평가하였다. 각 항목인 플로, 압축강도, 인장강도 및 휨강도 측면에서는 1종 섬유에서는 SS, 2종의 섬유조합에서 SL+SS, 3종 섬유조합에서는 SL+SS+OS 섬유 조합에서 가장 양호한 것으로 평가되었고, SL+SS+OL+OS인 4종 섬유조합도 양호한 것으로 분석된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 섬유보강 시멘트 복합재료의 공학적 성능을 향상시키기 위한 목적으로 유·무기의 장·단섬유 조합 변화에 따른 HPFRCC의 유동성 및 역학적 특성을 분석하고자 하였는데 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 유동성 측면에서 섬유의 혼입은 Plain배합보다 저하하는 경향을 나타내었는데, 각 조합별 1종에서는 SS 섬유, 2종은 SL+SS섬유, 3종은 SL+SS+OL섬유가 큰 차이는 아니지만 섬유혼입에 따라 유동성이 향상되었으나 단일섬유배합인 SS섬유가 가장 좋은 유동성을 나타내었다.
- 2) 공기량의 경우는 섬유가 혼입됨에 따라 공기량이 증가 하였지만, 유기섬유가 강섬유보다 공기량에 미치는 영향이 적은 것으로 나타났다. 특히 친수성인 OS 섬유일 때 가장 크게 감소하였다.
- 3) 압축강도는 유사 또는 증가하는 경향을 나타내었는데, 초기재령에서는 공기량의 영향으로 강도 발현 작게 나타나지만, 후기재령에서는 증가 하였는데, 그 중에서도 OS섬유가 가장 크게 나타났다.
- 4) 인장 및 휨 강도 측면에서는 섬유의 혼입으로 강도 발현이 크게 증가 하였는데, 강섬유의 조합이 유기섬유의 조합보다 높은 강도 발현율을 나타내었고, 유기 단일섬유인 OS섬유는 섬유의 인발이 용이하여 낮은 강도 발현을 나타내었다.

이상을 종합하여 볼 때, 섬유를 활용하는 HPFRCC의 시멘트 복합재료에 시공성과 인성개량 등 제반 공학적 성능을 향상시키기 위해 섬유 조합변화를 주어 1종에서는 SS 섬유, 2종은 SL+SS섬유, 3종의 경우 SL+SS+OL섬유, 4종에서는 모든 섬유의 혼입으로 유동성 및 인성개량 등 양호한 성능을 나타내었는데, 특히, 유동성과 인성개량 등의 성능에서 단독으로 사용한 1종의 SS섬유가 가장 양호한 것으로 판단된다.

## 요 약

최근에는 현대사회의 기술발전으로 인간의 삶의 질이 향상됨에 따라 건설산업에서도 재료 및 건축구조물의 발전이 계속되고 있는데, 그 중에서 콘크리트 재료의 발전이 특히



주목받고 있다. 그러나, 콘크리트는 간편성, 공기단축 및 높은 압축강도 등의 이점이 있는 반면에, 낮은 인장 및 휨 강도, 취성파괴 및 건조수축 등의 문제점들이 발생하여 일부 기업 및 학계에서는 이를 해결하기 위하여 섬유보강 콘크리트 등 다방면의 연구가 진행되고 있다. 그 중, 섬유의 다량혼입으로 큰 응력에서 넓은 범위의 변형을 일으킬 수 있는 HPRCC 재료 개발의 경우 섬유의 다량 혼입으로 높은 인성 등 발휘하는 장점이 있으나, 섬유 뭉침 등의 문제로 유동성 저하의 문제점이 발생하여 궁극적으로는 콘크리트의 품질저하를 초래할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 인장 및 휨 강도 성능 향상을 확보를 위해 섬유를 활용한 섬유보강 HPRCC의 시멘트 복합재료에 시공성을 향상시키기 위한 목적으로 유·무기 섬유 조합변화에 따른 HPRCC의 유동 특성 및 역학적 특성 등을 분석하므로서 최적의 섬유조합을 제안하고자 한다. 결과적으로 1% 소량 혼입시 유동성 측면에서는 섬유 조합변화한 경우보다 단독으로 사용하였을 경우 높은 유동성을 나타내었고 특히, SS 섬유의 경우가 가장 높은 유동성을 나타내었다. 또한 공기량이 낮았던 유기섬유의 경우 상대적으로 공기량이 높았던 강섬유의 비해 강도는 높았지만 인장 및 휨 강도는 낮은 것으로 나타났다.

**키워드** : 강섬유, 유기섬유, 섬유조합, 고성능 시멘트 복합체

## Acknowledgement

This research was supported by a grant from a Construction Technology Research Project (Development of impact/blast resistant HPRCC and evaluation technique thereof, 13SCIPS02) funded by the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport.

## References

1. Masuhiro B, Koji M, Tomonori O, Masanori S. An experimental study on the local damage of concrete plate due to high velocity impact of steel projectile. Japan society of civil engineers, 2007 Mar;63(1):178-91.
2. Kim YD, Cho BS, kim JH, Kim GY, Choi KY, Kim MH. An experimental study on the engineering properties of HPRCC

according to kinds, shapes and volume fraction of fibers. Proceeding of the Korea Institute of Building Construction Conference Proceeding; 2003 Nov 15; Seoul, Korea, Seoul (Korea): The Korea Institute of Building Construction; 2003. p. 59-62.

3. Kim YD, Cho BS, Kim JW, Kim YR, Yun HD, Kim MH. An experimental study on the development of hybrid discontinuous fiber reinforced cementitious composite. Proceeding of the Korea Institute of Building Construction Conference Proceeding; 2003 May 7; Seoul, Korea, Seoul (Korea): 2003. p. 57-60.
4. Kim GY, Kim YD, Cho BS, Yun HD, Kim MH. The present status of application and the demanding forecasting of fiber reinforced cementitious. Journal of the Korea Concrete Institute, 2006 Jan;18(1):44-51.
5. Choi YW, Choi W, Jung JG, An TH. Flowability and strength properties of high self-compacting with steel fiber reinforced. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 2009 Jan;13(1):161-68.
6. Lee HH, Lee HJ. Characteristic strength and deformation of SFRC considering steel fiber factor and volume fraction. Journal of the Korea Concrete Institute, 2004 Dec;16(6):759-66.
7. Kang ST, Kim SW, Park JJ, Koh GT. The effect of steel fiber on the compressive strength of the high strength steel fiber reinforced cementitious composites. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 2008 May;12(3):101-9.
8. Kim KL, Ahn TH, Kim YT, Kim BG. Application of nylon fiber for fiber reinforced concrete. Magazine of the Korea Concrete Institute, 2004 Nov;16(6):65-73.
9. Kwak CH. Effect of micro steel fibers on fluidity and mechanical performance of high-strength cementitious material [master's thesis]. [Seoul(Korea)]: Hanyang University; 2011. 38 p
10. Kim YL, Park DS, Seo CH. Variations of material characteristics of high-strength concrete according to increase of steel fiber volume. Journal of the architectural Institute of Korea : Structure, 2005 Fer;21(2):95-101.