

유·무기 섬유를 복합사용한 HPFRCC의 공학적 특성

Engineering Properties of HPFRCC Including Both Organic and Inorganic Fibers

이 종 태 한 천 구*

Lee, Jong Tae Han, Cheon-Goo*

Department of Architectural Engineering, Cheongju University, Naedeok-Dong, Cheongju-City, 360-764, Korea

Abstract

The high performance fiber reinforced cementitious composite (HPFRCC) controls the cracking development of the structure by inducing micro-cracking and strain hardening behavior after the initial cracking under the tensile conditions. Although, in Korea, the research about manufacturing the single-fiber reinforced cementitious composite or the mechanical properties of hardened status has been conducted, the research to apply the HPFRCC with multi-fiber is not sufficient. Hence, in this research, considering the workability and economic aspect for practical applications, the engineering properties of HPFRCC with combined long steel fiber (SL) and long organic fiber (OL) are evaluated such as workability and strength. As a result of evaluating the engineering properties of HPFRCC, the most favorable performance was obtained when the mixture contained 1.5% of combined SL and OL.

Keywords : steel fiber, organic fiber, fiber combinations, high performance fiber reinforced cementitious composite

1. 서 론

고성능 시멘트 복합재료(High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites, HPFRCC)는 인장력 작용 하에 있어서 초기 균열이 발생한 이후에도 응력의 저하 없이 변형의 증가와 함께 응력이 증가하는 변형경화(Strain hardening)특성과 다수의 미세 균열이 발생함으로써 균열 폭 제어 특성을 나타내어 에너지 흡수능력 및 변형 능력을 향상시킬 수 있는 재료[1,2]이다.

HPFRCC의 개발은 취성거동을 연성거동으로 유도하기 위하여 콘크리트 속에 섬유를 혼입한 섬유보강 콘크리트(Fiber Reinforced Concrete, FRC)가 가지고 있는 균열이 발생된 이후 섬유가 인장력을 분담하여 인장 저항 능력을 향상시킴으로 연성은 증가하나 인장강도의 증진은 없는 것의

보완으로 균질한 모르타르 배합과 마이크로 섬유를 사용하여 높은 연성을 갖는 HPFRCC가 1990년대 초부터 연구가 시작되어 국내에서도 활발히 진행되고 있다[3]. 그러나 국내의 HPFRCC의 연구는 단일섬유를 사용하는 제조방법이나 재료적 성상에 관한 연구[4]들이 진행되어지고 있으나 유·무기 섬유를 복합한 HPFRCC를 실무에서 활용하기 위한 공학적 성능 분석에 관한 연구는 미미한 실정이다.

특히 가왕의 연구에서 한 등[5]은 강섬유의 장·단섬유(이하 SL, SS)와 유기섬유의 장·단섬유(이하 OL, OS)를 단독섬유에서부터 2, 3, 4종의 조합섬유로 성능 및 시공성 향상을 검토하였는데, 그 중 SL+SS+OL인 3종 섬유에서 유동성 및 강도 측면에서 가장 우수한 것으로 밝혀진 바 있다. 그러나, 실무에 HPFRCC를 활용하기 위해서는 시공성과 아울러 경제성도 고려하여야 하는데 SS는 여타의 섬유보다 구조적 효율은 우수하지만, 유동성 저하 및 경제성 측면에서 2종 섬유의 SL+OL 섬유 조합에서 가치공학적으로 가장 우수한 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 방폭구조물의 실무적용에 앞선 물성평가로 강섬유(이하 SL)와 유기섬유(이하 OL)를 조합한 유·무기 복합섬유로 유동성 및 강도 등 제반 공학적 특성을 분석하고자 한다.

Received : September 22, 2015

Revision received : October 20, 2015

Accepted : October 27, 2015

* Corresponding author : Han, Cheon Goo

[Tel: 82-43-229-8480, E-mail: cghan@chongju.ac.kr]

©2015 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획 및 배합사항은 Table 1 및 2와 같다. 먼저 실험계획의 경우 W/B는 25%의 1수준에 대하여 결합재 구성을 시멘트(이하 C)에 대한 질량비로 고로슬래그 미분말(이하 BS)과 플라이애시(이하 FA)를 각각 20, 10%치환하고, 섬유 종류로는 강섬유의 장섬유(이하 SL)와 유기섬유의 장섬유(이하 OL)를 복합한 유·무기 복합섬유를 사용하는 것으로 계획하였다. 이때 배합설계의 목표 플로는 200 ± 20 mm, 목표 공기량은 $2.0 \pm 1.0\%$ 의 범위를 만족하도록 실험 계획하였다. 실험변수로는 유·무기 복합섬유인 SL+OL 섬유의 혼입율 변화로 0, 1.0, 1.5, 2.0%의 총 4수준으로 하였다.

Table 1. Experimental plan

Items		Variables	
W/B(%)		25	
C : S		1 : 0.6	
Binder		OPC : BS : FA = 7 : 2 : 1	
Mixture	Target initial flow (mm)	1	200±20
	Target air content (%)		2.0±1.0
	Fibers compositions		SL+OL
	Fiber content (%)	4	0, 1.0*, 1.5, 2.0
Test	Fresh concrete	2	· Flow test · Air content
	Hardened concrete	2	· Compressive strength (7, 28 days) · Tensile strength (7, 28 days)

* Plain

실험사항으로는 굳지 않은 모르타르에서 플로 및 공기량을 측정하는 것으로 계획하였고, 경화 모르타르에서는 압축강도 및 인장강도를 측정하는 것으로 하였다.

2.2 사용재료

본 실험의 사용재료로 시멘트는 국내산 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 고로슬래그 미분말 및 플라이애시는 국내에서 제조·판매되는 것을 사용하였는데, 각각의 물리·화학적 특성은 Table 3~5와 같다. 섬유는 국내산으로 강섬유와 유기섬유의 길이가 긴 장섬유를 복합 사용하였는데, 각각의 물리적 성질은 Table 6과 같고, 그 모습은 Figure 2와 같다.

2.3 실험방법

Table 3. Physical properties of cement

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /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 4. Physical and chemical properties of blast furnace slag powder

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	L. O. I. (%)	Chemical composition (%)		
			SiO ₂	MgO	Cl ⁻
2.88	4 469	0.9	2.14	4.22	0.009

Table 5. Physical and chemical properties of fly ash

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

Table 6. Physical properties of fiber

Types	Length (mm)	Diameter (mm)	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)
SL(Steel)	35	0.53	66	1 108
OL(Organic)	30	0.47	63	650

Table 2. Mixing proportions

Types	W/B (%)	C : S [*]	Fiber content (%)	SP/C (%)	Unit weight (kg/m ³)						
					W	C	BS	FA	S	SL	OL
SL+OL	25	1 : 0.6	0	0.56	302	846	242	121	711	-	-
			1.0		299	837	239	120	703	39.3	5.6
			1.5		297	833	238	119	700	58.9	8.3
			2.0		296	829	239	118	696	78.5	11.1

* The weight ratio of the fine aggregate to cement



(a) SL fiber (b) OL fiber

Figure 1. Shape of the fibers



Figure 2. JSCE-E-53 test

실험방법으로 굳지 않은 모르타르에서 플로와 공기량은 KS L 5111과 KS F 2421, 경화 모르타르에서 압축강도는 KS F 2405에 의거하여 진행하였고, 인장강도 및 인장변형은 Figure 2와 같은 일본토목학회 규정인 JSCE-E-53에 의거하여 진행하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 실험결과

Table 7은 유·무기 복합섬유 혼입율 변화에 따른 굳지 않은 상태 및 경화상태의 실험결과를 나타낸 것이다.

Table 7. Result of test

W/B (%)	Fiber content (%)	Flow test (mm)		Air content (%)	Compressive strength (MPa)		Tensile strength (MPa)	
		Initial flow	Standard flow		7 day	28 day	7 day	28 day
25	0	273	330	4.6	53.0	61.2	2.3	2.5
	1.0	215	268	3.6	54.5	74.5	3.1	3.5
	1.5	228	258	3.6	58.4	74.6	4.3	5.5
	2.0	120	155	2.2	60.4	74.9	3.2	3.7

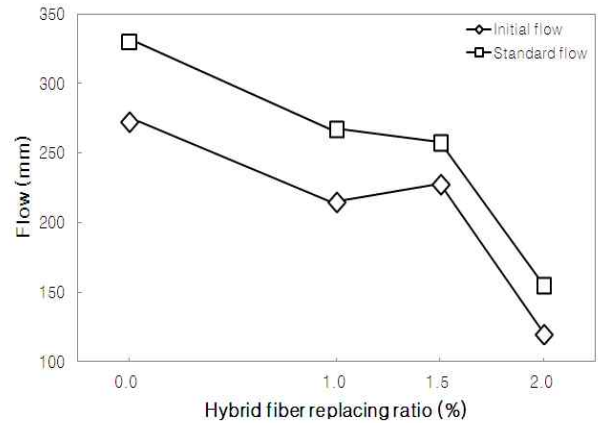


Figure 3. Flow according to hybrid fiber contents



a) 0% b) 1.0% c) 1.5% d) 2.0%

Figure 4. Initial appearance flow



a) 0% b) 1.0% c) 1.5% d) 2.0%

Figure 5. Standard appearance flow

3.2 굳지 않은 모르타르의 특성

굳지 않은 모르타르의 특성분석으로 Figure 3은 복합섬유 혼입율 변화에 따른 플로치를 나타낸 것이며, Figure 4 및 5는 초기치 및 표준치의 플로 모습을 나타낸 것이다. 먼저 플로에서 초기치는 충격 없이 플로콘을 제거한 직후에 플로를 측정된 값이고, 표준치의 경우는 초기치 측정 후에 25회 충격을 가한 후 측정하는 KS L 5111의 표준규격에 따른 값을 나타낸 것이다. 전반적으로 복합섬유의 혼입율이 증가할수록 플로치는 감소하는 경향을 나타내었다. 즉 초기치의 경우 기준배합인 혼입율 1.0%의 경우는 215mm의 플로치를 나타내었고, 이에 비해 혼입율 0%에서는 플로치가 크게 증가하는 경향을 나타내었으며, 혼입율 1.5%에서는 오차의 요인으로 사료되나 큰 차이는 아니지만 다소 증가한 플로치를 나타내었다. 하지만 혼입율 2.0%에서는 섬유 혼입율 증가로 플로치가 크게 감소하는 경향을 나타내었다.

표준치의 경우로서, 기준배합인 혼입율 1.0%에서는 약 270mm의 플로치를 나타내었고, 섬유가 혼입되지 않은 0%에서는 약 330mm로 측정 시 플로판을 넘쳐 모르타르의 흐름 상태를 보고 예상 판단하였다. 또한 혼입율 1.5%에서는 기준배합과 유사한 플로를 나타내었지만, 혼입율 2.0%에서는 플로치가 크게 감소하였다. 이는 복합 섬유의 혼입율이 증가함으로써 결합재와 섬유간의 부착력이 증가되어[6] 유동성이 감소된 것으로 판단된다.

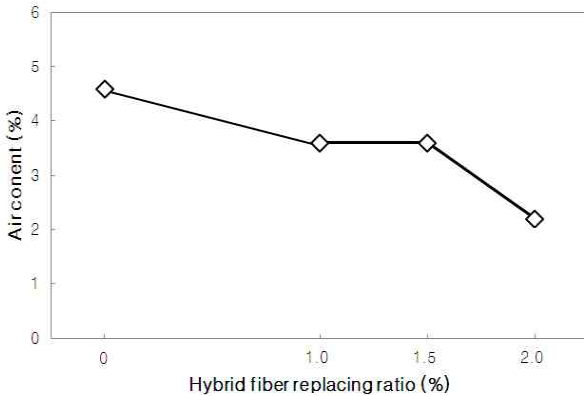


Figure 6. Air content according to hybrid fiber contents

Figure 6은 복합 섬유 혼입율 변화에 따른 공기량을 나타낸 그래프이다. 전반적으로 복합섬유 혼입율이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, 섬유 혼입율 1.0%와 1.5%에서는 공기량이 약 4%로 유사한 경향을 나타내었지만, 섬유가 혼입되지 않은 0%는 공기량이 약 0.8%정도 증가

하는 경향을 나타내었다. 단 혼입율 2.0%에서는 1.0%보다 약 1%이상 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 복합 섬유의 혼입량이 증가하므로써 모르타르 매트릭스 내부 공극을 섬유 혼입으로 인해 채워짐으로써 공극량이 감소되어 공기량이 저하된 것으로 사료된다.

3.3 경화 모르타르의 특성

경화모르타르의 특성으로 Figure 7은 재령 7일 및 28일에 있어 복합 섬유 혼입율 변화에 따른 압축강도를 나타낸 것이다. 전반적으로 복합 섬유 혼입율이 증가할수록 압축강도는 증가하는 경향을 나타내었다. 먼저 재령 7일의 경우 0% 혼입율에서는 약 52MPa정도의 압축강도를 나타내었으며 혼입율 1.0%와 유사한 강도발현을 나타내었다. 또한 혼입율 1.5%와 2.0%에서는 기준배합보다 약 8% 증가하여 약 60MPa전·후의 강도발현을 나타내었다. 재령 28일의 경우에는 혼입율 0%인 약 61MPa보다 섬유가 혼입된 배합에서 약 18%인 약 75MPa 전·후의 강도를 나타내었지만, 복합섬유가 1.0~2.0% 혼입된 경우간에서는 유사한 압축강도를 나타내었다. 이는 공기량 감소의 영향과 섬유 혼입으로 인한 모르타르 매트릭스에 결합재와 섬유간의 결합력이 증진됨에 따른 구속효과로[7,8] 인해 공극량이 감소되어 압축강도가 증가되는 것으로 사료된다.

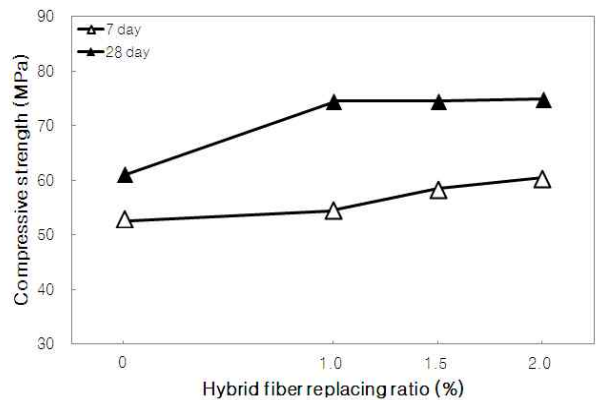


Figure 7. Compressive strength according to hybrid fiber contents

Figure 8은 복합섬유 혼입율 변화에 따른 재령 7일과 28일의 인장강도를 나타낸 그래프이다. 전반적으로 복합섬유 혼입율이 증가할수록 인장강도가 증가하는 것으로 나타났다. 이중 복합섬유 혼입율 1.0~2.0%에서는 무혼입인 0%보다 인장강도가 증가하는 경향을 나타내었는데, 특히 재령 28일의 1.5% 혼입율에서 약 5.5MPa의 가장 높은 인장강도를 나타내어 섬유

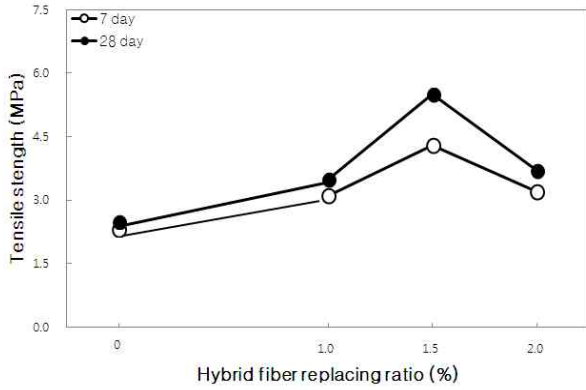


Figure 8. Tensile strength according to hybrid fiber contents

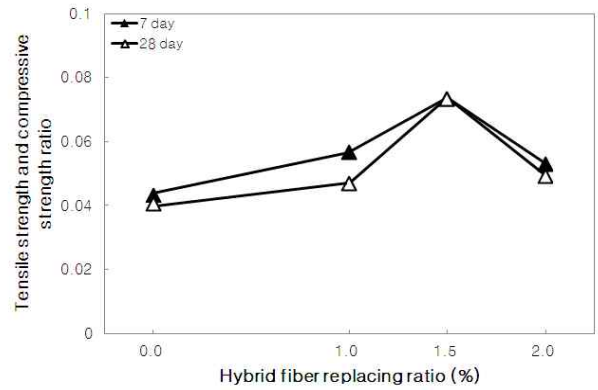


Figure 9. Tensile strength and compressive strength ratio according to hybrid fiber

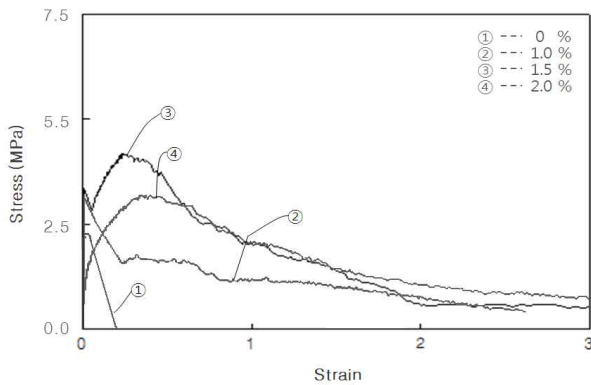


Figure 10. Stress-strain curve according to change of hybrid fiber replacing ratio

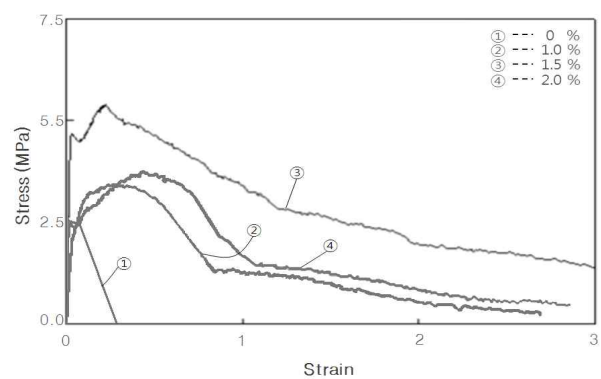


Figure 11. Stress-strain curve according to change of hybrid fiber replacing ratio

유가 혼입되지 않은 0%보다 약 2배정도의 인장강도 증진효과로 나타났다. 이는 복합섬유 혼입으로 모르타르 매트릭스와 섬유간의 부착력이 증가되어 나타난 결과로 판단된다.

Figure 9는 복합섬유 혼입율 변화에 따른 인장강도와 압축강도의 비를 재령 7일과 28일에 대하여 나타낸 그래프이다. 섬유를 혼입하지 않은 경우는 고강도 콘크리트이므로 압축강도에 대한 직접인장강도의 비가 4% 남짓이지만 섬유를 혼입함에 따라 특히 섬유 혼입율 1.5%일 경우에는 약 7%까지 향상되는 결과를 나타내었다. 특히 재령의 변화의 경우 인성을 나타내는 압축강도에 대한 인장강도의 비는 재령 7일보다 28일에서 작게 나타나 압축강도는 클지라도 상대적으로 인장강도가 증가하지 않아 인성이 작은 즉 취성적이 됨을 알 수 있었다.

인장강도 시험시 인장변형을 측정하여 응력-변형도 곡선으로 나타낸 것은 Figure 10 및 11과 같다. 전반적으로 복합섬유의 혼입율이 증가할수록 항복응력치의 증가도 존재하지만 항복치 이후의 연성이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

특히 재령 7일 및 28일의 경우 복합섬유 혼입율 1.5%에서 가장 높은 항복치와 연성을 나타내었다. 단, 혼입율 2.0%에서도 높은 항복치와 연성을 예상하였지만, 섬유 사용량의 지나친 증가보다는 적정 사용량으로 모르타르 매트릭스에서 분산작용과 섬유의 기교작용이 효과적으로 작용되어 혼입율 1.5%에서 효과가 크게 나타난 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 유·무기 섬유를 복합 사용한 경우에 섬유 혼입율 변화에 따른 HPPFRCC의 유동성 및 역학적 특성을 검토하고자 하였는데 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 유동성 측면에서 복합섬유의 혼입율이 증가할수록 플로치는 감소하는 경향을 나타내었는데, 혼입율 1.5%의 경우는 섬유가 혼입되지 않은 0%보다 플로치가 감소하였지만, 혼입율 1.0%와는 유사한 유동성을 나타내었다.
- 2) 공기량의 경우는 복합섬유의 혼입율이 증가할수록 감

소하는 경향을 나타내었는데, 혼입율이 1.0% 증가 시 공기량은 약 1.0%정도 감소하였다.

- 3) 압축강도는 섬유가 혼입되지 않은 배합보다 섬유가 1.0~2.0% 혼입된 배합에서 재령 28일의 경우 약 18%정도 증가하는 경향을 나타내었는데, 혼입율 변화 간에서는 유사한 압축강도를 나타내었다.
- 4) 인장강도의 경우는 복합섬유의 혼입율이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었는데, 특히 혼입율 1.5%인 경우는 2.0%보다 섬유의 분산성에 따른 가교작용에 기인하여 가장 높은 인장강도를 나타내었다.
- 5) 압축강도와 인장강도의 비는 복합섬유 혼입율 1.5%일 경우 7%로 가장 크게 나타났고, 인장강도 시험의 응력-변형도 곡선에서도 혼입율이 가장 많은 2.0%보다 혼입율 1.5%에서 항복치 이후의 연성이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

이상을 종합하여 볼 때, SL과 OL 섬유를 복합하여 활용하는 HPFRCC의 경우 시공성 및 역학적 성능 등 제반 공학적 성능을 검토한 결과 혼입율 1.5%에서 가장 우수한 것으로 판단되었다.

요 약

고성능 시멘트 복합재료(HPFRCC)는 인장력 작용 하에 있어서 초기 균열이 발생한 이후에도 변형의 증가와 함께 응력이 증가하는 변형경화 특성과 다수의 미세 균열이 발생함으로써 균열 폭 제어 특성을 나타낸다. 그러나 국내의 HPFRCC의 연구는 단일섬유를 중심으로한 제조방법이나 경화전후의 재료적 성상에 관한 연구들이 진행되어지고 있으나 복합섬유인 HPFRCC를 실무에서 활용하기 위한 연구는 미미한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 시공성 및 경제성을 고려하여 실무에서 효율적인 활용성을 검토하기 위한 방안으로 강섬유(이하 SL)와 유기섬유(이하 OL)를 조합한 복합섬유로 유동성 및 강도 등 제반 공학적 특성을 검토하고자 한다. 결과적으로 강섬유 장섬유(SL)과 유기섬유 장섬유(OL)의 복합섬유를 활용하는 HPFRCC의 제반 공학적 성능을 검토한 결과 복합섬유 혼입율 1.5%일 때 가장 우수한 것으로 판단되었다.

키워드 : 강섬유, 유기섬유, 섬유조합변화, 고성능 시멘트 복합재료

Acknowledgement

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

References

1. 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.
2. 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.
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): The Korea institute of building construction; 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. Han DY, Han MC, Kang BH, Park YJ, Effect of hybrid fibers on the engineering properties of HPFRCC, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 2014 Dec;14(6):639-645
6. Kim KL, Ahn TH, Kim YT, Kim BG, Application of nylon fiber for fiber reinforced concrete, Magazine of the Korea Concrete Institute, 2004 Nov;6(6):65-73.
7. Opara N. K, and Malak S, Tensile Behavior of Slurry Unfiltrated Mat Concrete(SIMCON) ACI Material Journal, 1997;94(1):39-46
8. 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, 2005 Fer;21(2): 95-101.