

일부실시 직교배열 실험설계에 의한 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트 배합 최적화

Optimum mixture of high performance hybrid fiber reinforced concrete using fractional experimental design by orthogonal array

박 대 호* 노 명 현** 박 춘 근***
Park, Tae Hyo Noh, Myung Hyun Park, Choon Kean

ABSTRACT

In the present research, slump, modulus of rupture (MOR) and flexural toughness (I_{30}) of high performance hybrid fiber reinforced concrete (HPHFRC) mixed with micro-fiber (carbon fiber) and macro-fiber (steel fiber) and replaced with silica fume were assessed with the analysis of variance (ANOVA). Steel fiber was a considerable significant factor in aspect of the response values of MOR and I_{30} . Based on the significance of factors related to response values from ANOVA, following assessments were available; Slump decrease: carbon fiber >> steel fiber > silica fume; MOR: steel fiber > silica fume > carbon fiber; I_{30} : steel fiber > carbon fiber > silica fume. Steel fiber 1.0%, carbon fiber 0.25% and silica fume 5.0%, and Steel fiber 1.0%, carbon fiber 0.25% and silica fume 2.5% were obtained as the most optimum mixture.

Keywords: hybrid, steel fiber, carbon fiber, orthogonal array, ANOVA

1. 서론

콘크리트는 상대적으로 취성적인 재료라는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 이러한 취성특성을 개선하기 위해 보강재로서 콘크리트 매트릭스 속에 임의로 분산시킨 단섬유는 매트릭스 내부의 공극과 결합에서 생성되는 균열의 진전을 효과적으로 억제해 줌으로써 불안정한 균열 진전 조건들을 개선한다. 그러나 콘크리트는 매트릭스 및 매트릭스와 골재의 경계면 속에 수 마이크로에서 수 밀리미터에 이르는 다양한 크기의 공극 및 결합이 분포하고 특히, 양생과정 중의 수축 및 팽창작용은 미세균열을 생성 및 진전시켜 재하 단계에 따라 수 밀리미터에 이르는 매우 큰 균열로 확대시키기 때문에 한 종류의 크기만을 갖는 단일 섬유 형태로는 일정 수준이상의 섬유 보강효과를 기대하기가 곤란하다.

최근에 이러한 단일 섬유 형태의 한계를 극복하기 위한 방안으로 양생단계에서 발생하는 미세균열 뿐만 아니라 재하과정에서 발생하는 다양한 크기의 균열들을 동시에 제어하기 위하여 다양한 종류와 크기의 섬유를 조합한 새로운 하이브리드 섬유보강 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 하이브리드 섬유보강 시스템은 각 섬유의 개별 특성이 효과적으로 발휘되어 시너지 보강효과가 나타나는 최적 섬유조합비율이 존재한다는 전제를 두고 있다. 하이브리드의 섬유보강 시스템에서는 다양한 크기의 균열에 대해 효과적인 제어를 위해 서로 다른 크기의 섬유를 조합하여 균열을 제어하는 것이 중요하다. 이때 하이브리드 섬유보강 시스템에서 미크론 단위의 직경을 갖는 마이크로 섬유의 역할은 미세 균열의 생성과 진전을 효과적으로 억제하는 것이며 이는 곧 매트릭스의 자체의 높은 MOR을 유도할 수 있게 해준다. 그리고 하이브리드 섬유보강 시스템에서 밀리미터 단위의 직경을 갖는 매크로섬유(강섬유 등)는 미세균열의 진전과 합체로 야기된 주균열을 효과적으로 억제하여 매트릭스의 인성을 현저하게 증진시키는 역할을 한다. 이때 매크로섬유는 주로 뽑힘작용(pull-out)이라는 인성 메커니즘을 통해 상대적으로 높은 파괴인성 값을 갖게 하고 콘크리트의 취성거동을 연성으로 유도 해준다.

*정회원, 한양대학교 토목공학과 부교수, 공학박사

**정회원, 한양대학교 토목공학과 대학원

***정회원, 한국생산기술연구원 수석연구원, 공학박사

최근의 하이브리드 섬유보강 콘크리트 연구는 섬유를 하이브리드 형태로 혼입할 경우 단일 섬유 보강 콘크리트에 비해 강도 및 인성의 증진에 효과적임을 보여주긴 하였지만, 각 섬유들 사이의 최적 혼입비율에 대한 체계적 연구와 실제 적용 가능성과 관련이 깊은 유동성에 대해서는 관심을 소홀히 해왔다. 따라서 본 연구에서는 우수한 MOR과 인성을 유도함과 동시에 유동성을 고려하여 실제 적용 가능한 하이브리드 섬유보강 콘크리트 연구에 초점을 맞추기로 한다. 따라서 본 연구의 목적은 높은 MOR, 우수한 에너지 흡수능력, 일정 수준의 유동성을 갖춘 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트 (high performance hybrid fiber reinforced concrete, HPHFRC)를 유도하기 위하여 실리카 흙의 최적 치환비율과 각 섬유들의 최적 조합비율을 찾는 데 있다.

2. 실험개요

2.1. 실험설계 및 실험 인자/수준

본 연구에서는 섬유의 개별적 성능과 실리카 흙의 재료적 특성이 최대한 발현되도록 하는 하이브리드 섬유의 혼입비율과 실리카 흙 치환율에 대한 최적 조합 조건을 찾기 위해 직교실험 원리가 이용되었다. 두 종류의 섬유(강섬유, 탄소섬유)의 혼입율과 실리카 흙의 치환율을 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트를 평가하는 특성치(slump, MOR, flexural toughness(I_{30}))에 영향을 주는 인자로 하였고, 각 섬유들의 혼입율과 실리카 흙의 치환율을 동일하게 세 개의 수준으로 택하여 실험횟수를 최소로 하는 일부 실시 직교 배열 방법을 통해 실험이 설계되었다. 본 연구에 채택된 3개의 인자들 사이에는 교호작용이 없다고 가정하고 강섬유, 탄소섬유, 실리카 흙의 주효과만 고려되었다. Table 1에 3인자 3수준 직교 배열($OA_9(3^3)$)과 이를 통한 각 섬유들의 조합비율, 실리카 흙의 치환 비율이 나타나 있다.

2.2. 사용재료와 배합 및 양생

시멘트는 국내 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트(평균분말도=0.33 m²/g, 평균입경=18.07 μm)가 용되었고 밀실한 매트릭스 구조를 유도하기 위해 미세 고로 슬래그(평균분말도=0.6 m²/g, 평균입경: 8.07 μm)가 바인더의 중량비로 20% 치환되었다. 또한 섬유 및 골재 계면의 부착특성을 개선하고 더욱 치밀한 매트릭스를 구성하기 위해 시멘트 입자크기의 약 1/180인 0.1 μm의 평균입경을 갖는 실리카 흙(평균분말도=20 m²/g)이 바인더 중량비로 0%, 2.5%, 5%씩 비율별로 치환되어 사용되었다. 매트릭스 취성특성 개선을 위해 사용된 강섬유와 탄소섬유의 특성이 Table 2에 나타나 있다. 또한 실리카 흙과 섬유들이 매트릭스 내에 일정하고 균일하게 분산되고 혼합 가능한 배합범위를 유도하기 위해 국내 K사의 액상 폴리카르본산계(PC계) 고성능 감수제가 사용되었다.

고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트 배합에 사용된 물-바인더 비(w/b)비는 0.26으로 일정하게 고정되었고, 최대치수(G_{max})가 13mm인 굵은 골재가 사용되었다. 바인더, 잔골재, 굵은골재는 1 : 1.04 : 1.23의 중량비로 배합되었고, 바인더 중량의 2.0%의 고성능 감수제가 첨가되었다. Table 1의 직교 배열표에 따라 두개의 섬유(강섬유, 탄소섬유)와 실리카 흙을 혼합한 아홉 개의 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트 배합이 배합별로 세 개씩 100mm × 100mm × 350mm의 크기로 성형되었다. 성형된 시편은 24시간이 지난 후 탈형하여 강도 측정일(재령 28,29일)까지 20±3℃로 습윤 양생되었다.

Table 1 Mix proportions of each factors using the orthogonal array($OA_9(3^3)$)

Exp. No.	Factor				Experimental condition
	A Steel fiber (vol.%)	B Carbon fiber (vol.%)	Error	C Silica fume (wt.%)	
1 (control)	1(0.0)	1(0.0)	1	1(0.0)	A ₁ B ₁ C ₁
2	1(0.0)	2(0.25)	2	2(2.5)	A ₁ B ₂ C ₂
3	1(0.0)	3(0.5)	3	3(5.0)	A ₁ B ₃ C ₃
4	2(0.5)	1(0.0)	2	3(5.0)	A ₂ B ₁ C ₃
5	2(0.5)	2(0.25)	3	1(0.0)	A ₂ B ₂ C ₁
6	2(0.5)	3(0.5)	1	2(2.5)	A ₂ B ₃ C ₂
7	3(1.0)	1(0.0)	3	2(2.5)	A ₃ B ₁ C ₂
8	3(1.0)	2(0.25)	1	3(5.0)	A ₃ B ₂ C ₃
9	3(1.0)	3(0.5)	2	1(0.0)	A ₃ B ₃ C ₁

Table 2 Physical properties of fibers

Fiber type	Geometry			Specific gravity	Tensile strength (Mpa)	Modulus of elasticity (GPa)	Elongation at break (%)
	Length	Diameter	Aspect ratio				
Steel fiber	30mm(aver.)	0.5mm	60	7.86	700	205	0.5
Carbon fiber	6mm(aver.)	18μm	333	1.63	590	30	2.0

2.3. 시험 방법 및 특성치 평가 방법

하이브리드 섬유보강 콘크리트의 특성치로 고려된 슬럼프, MOR과 휨인성을 평가하기 위해서 KS F 2402에 따라 슬럼프 시험이 실시되었다. 또한 휨인성과 MOR은 KS F 2566에 준하여 실시된 3등분점 재하 시험을 통해 얻어진 하중 처짐 곡선을 분석하여 계산되었다. 휨 시험을 위하여 SIMADZU사의 100톤 용량의 만능 시험기가 사용되었으며, 0.2mm/min의 속도의 변위제어 방식으로 가력되었다. 외부기기와 지점부의 이상 변형으로 발생하는 외부처짐을 배제하기 위하여 지간 중앙에 50mm 용량의 LVDT를 설치한 요크(yoke) 방식을 채택하여 순수처짐이 측정되었다. 시편이 설치된 측정 장비의 모습은 Fig. 1과 같다.

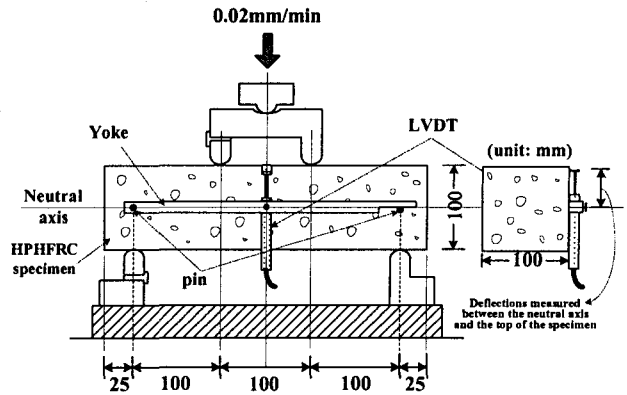


Fig. 1 Flexural test arrangement

고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 특성치 평가를 위해 슬럼프 시험을 통해 얻어진 각 배합의 슬럼프 값과 하중 처짐응답 관계를 분석하여 얻어진 각 시편의 파계계수(MOR, modulus of rupture) 및 휨인성지수(toughness index, I_{30})의 데이터를 이용하여 각 인자에 대한 변동값을 구하고 분산분석(analysis of variance, ANOVA)이 실시되었다. 분산분석이 수행된 후 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 각 특성치가 우수한 최적배합조건이 도출되었다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1. 실험 결과

고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트 시편에 대해서 랜덤하게 실시된 휨 시험결과 Fig. 2와 같은 하중 처짐응답 곡선이 얻어졌다. 총 27개의 휨 시험 결과로부터 각 인자의 변동에 대한 분산분석을 실시하여 얻어진 각 시편의 슬럼프, MOR, 휨인성 특성치와 그에 따라 평가된 보강효율이 Table 3에 제시되어 있다.

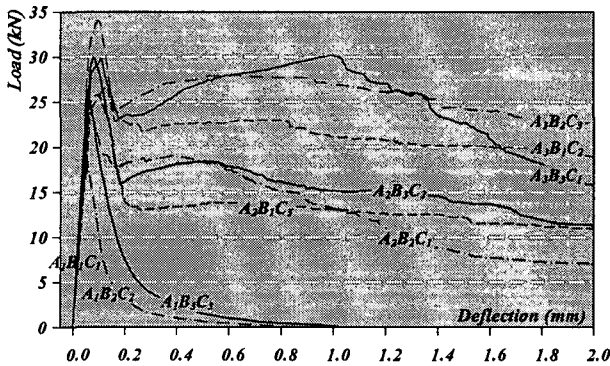


Fig. 2 Load vs. deflection curves

Table 3 Test results

Exp. condition	Slump		Modulus of Rupture		Toughness Index (I_{30})
	Analysis (cm)	Decrement (%)	Analysis (MPa)	Increment (%)	
A ₁ B ₁ C ₁ (control)	28.0	-	5.5	-	1.0
A ₁ B ₂ C ₂	19.7	-30	6.8	24	5.5
A ₁ B ₃ C ₃	10.9	-61	8.1	47	4.5
A ₂ B ₁ C ₃	26.4	-6	8.0	45	18.4
A ₂ B ₂ C ₁	9.6	-66	7.2	31	21.3
A ₂ B ₃ C ₂	9.8	-65	8.7	58	20.4
A ₃ B ₁ C ₂	26.9	-4	8.2	49	26.5
A ₃ B ₂ C ₃	9.7	-65	9.4	71	29.1
A ₃ B ₃ C ₁	1.4	-95	8.8	60	28.5

3.2. 각 인자 및수준의 기여도 평가

고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 유동성과 강도 증진, 인성 증진 측면을 고려한 분산분석을 수행한 결과 각 인자들의 유의도에 따라 다음과 같은 평가를 내릴 수 있다.

- 슬럼프 저하 (유동성 저해요인): 탄소섬유 >> 강섬유 > 실리카 흙
- MOR (휨강도 증진요인): 강섬유 > 실리카 흙 > 탄소섬유
- I_{30} (휨인성 증진요인): 강섬유 >> 탄소섬유 > 실리카 흙

3.3. 최적조합 도출

9개의 실험조건에서 얻어진 실험결과를 유동성 측면에서 최소 기준 슬럼프를 10cm로, 휨강도 증

진 측면에서 최소 기준 MOR을 8.5MPa로 그리고 인성증진 측면에서 최소 기준 I_{30} 을 28로 정하여 각 측면의 실험 인자와 수준을 평가한 결과 강섬유 1.0%, 탄소섬유 0.25%, 실리카 흙이 5.0%로 치환된 $A_3B_2C_3$ 실험조건에서 슬럼프=10cm, MOR=9.4MPa, I_{30} =29.1로 가장 뛰어난 보강특성을 나타내었다. 실제로 수행된 실험 이외에도 $3^3=27$ 개 실험조건 중에서 유동성, 강도, 인성증진 측면에서 기준 이상의 값을 갖는 조건이라고 예측되는 조합을 요인분석과 신뢰구간 95%의 t-검정을 통해서 추정하게 되면, 강섬유 1.0%, 탄소섬유 0.25%, 실리카 흙 2.5%를 혼합한 $A_3B_2C_2$ 의 경우 슬럼프 = 12.8 ± 5.5 cm, MOR = 8.8 ± 1.4 MPa, $I_{30} = 29.3 + 3.2$ 로서 기준값을 상회하는 범위의 값을 갖는 것으로 분석되었다.

4. 결론

본 실험에서는 슬럼프, 휨강도(MOR), 휨인성지수(I_{30}) 데이터에 대한 분산분석을 통해 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 보강특성이 평가되었다. 분산분석 결과 슬럼프 저하(유동성 저해인자)는 탄소섬유 >> 강섬유 > 실리카 흙, 휨강도(MOR) 증진은 강섬유 > 실리카 흙 > 탄소섬유, 휨인성(I_{30}) 증진은 강섬유 >> 탄소섬유 > 실리카 흙 크기 순으로 유의한 효과를 나타내었다.

강섬유는 MOR과 I_{30} 증진에 매우 유의한 인자였지만 탄소섬유와 실리카 흙은 상대적으로 MOR과 I_{30} 증진에 미미한 기여를 하였다. 이는 본 실험에서는 탄소섬유와 강섬유, 두 섬유와 실리카 흙의 교호작용을 오차로 무시하여 주효과만을 분석하였기 때문이지만 탄소섬유는 강섬유와 교호작용을 통해 인성이 향상된 시너지 효과를 나타내었다. 또한 실리카 흙의 첨가에 따른 섬유의 부착 특성 향상을 통한 인성 증진의 간접적인 기여도가 오차로 해석되어 실리카 흙에 대한 보강효율이 상대적으로 저평가 되었다. 따라서 향후 탄소섬유와 강섬유의 상호 작용과 실리카 흙과 섬유의 부착효율을 정량적인 분석하기 위해 두 섬유의 교호작용과 실리카 흙과 섬유와의 교호작용을 고려한 연구가 진행될 필요가 있다.

한편, 본 실험조건에서 유동성, 강도와 인성증진 모든 면에서 최적 보강효율을 나타낸 실험조건은 강섬유 1.0%, 탄소섬유 0.25%, 실리카 흙이 5.0%로 혼합한 경우였으며, 실험 조건이외에 유동성, 강도, 인성증진 측면에서 기준값 이상을 갖는 조건이라고 예측되는 조합을 요인분석과 신뢰구간 95%의 t-검정을 통해서 추정한 결과 강섬유 1.0%, 탄소섬유 0.25%, 실리카 흙 2.5% 역시 최적조건으로 도출되었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 건설교통기술혁신사업(02 산학연A03-01)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Li, V.C. and Maalej, M., "Toughening in Cement Based Composites. Part I: Cement, Mortar, and Concrete," Cement and Concrete Composites, Vol.18, No.4, 1996, pp.223-237.
2. Li, V.C. and Maalej, M., "Toughening in Cement Based Composites. Part II: Fiber Reinforced Cementitious Composites," Cement and Concrete Composites, Vol.18, No.4, 1996, pp.239-249.
3. Lin, W.-L., "Toughness behaviour of fiber reinforced concrete," in Fiber Reinforced Cement and Concrete (Eds by R.N. Swamy) E&FN SPON, No.25, 1992, pp.299-315.
4. Yao, W., Li, J. and Wu, K., "Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction," Cement and Concrete Research, Vol.33, No.1, 2003, pp.27-30.
5. Banthia, N. and Sheng, J., "Micro-Reinforced Cementitious Materials," in Fiber Reinforced Cementitious Materials (Eds. by Mindess S. and Skalny J.) Material Research Society, 1991, pp.25-32.