하이브리드 섬유보강 시멘트 페이스트의 보강효율에 대한 특성화

Characterization of Reinforcing Efficiency in Hybrid Fiber Reinforced Cementitous pastes

박 대 효* 노 명 현** 박 춘 근***

Park, Tae Hyo Noh, Myung Hyun Park, Choon Keun

ABSTRACT

Modulus of rupture (*MOR*) and flexural toughness in hybrid fiber reinforced cement pastes mixed with micro-fiber (carbon fiber) and macro-fiber (steel fiber) and replaced with silica fume according to the fixed ratio were researched. Reinforcing efficiency in specimens were estimated by two factors, such as strengthening factor (F_s) and toughening factor (F_t), which were calculated from the analysis of variance (ANOVA) of the response values, such as *MOR* and absorbtion energy (W_0). According to the experimental design by the fractional orthogonal array, nine hybrid fibrous reinforced paste series and one non-reinforced control paste were manufactured. Specimens of each series were tested by the INSTRON Inc. 8502(model) equipment in three-points bending and then measured the load-deflection response relationships. Considerable strengthening of cement pastes resulted in the case of other factors without carbon fiber and toughening of cement pastes about all factors showed high. Based on the significance of factors related to response values from ANOVA, following assessments were available; F_s or *MOR*: silica fume ≫ steel fiber ≫ carbon fiber; F_t or W_0: steel fiber > carbon fiber > silica fume. Optimized composition condition was estimated by steel fiber of 1.5%, carbon fiber of 0.5% and silica fume 7.5% in side of strengthening and steel fiber of 1.5%, carbon fiber of 0.75% and silica fume 7.5% in side of toughening.

1. 서론

콘크리트는 내구성 및 경제성이 우수하여 지구상에서 가장 널리 사용되는 구조재료 중에 하나지만, 낮은 인장강도와 취약한 균열 저항성, 취성거동, 낮은 비강도 등 때문에 그 활용범위에도 많은 한계가 따른다. 이러한 단점을 보완하고자 많은 연구자들은 높은 인장강도와 인성을 갖는 각종 단상 섬유를 콘크리트에 분산시켜 혼합하여 재료특성을 개선하려는 많은 연구를 해오고 있다. 콘크리트에 섬유를 혼합하여 사용하게 되면 매트릭스의 결함(flaw)으로 발생되는 균열 사이의 응력전달 브리징(bridging)작용과 섬유 뽑힘작용(pull-out)의 인성 메카니즘을 통해 상대적으로 높은 파괴인성 값을 갖게 하고 콘크리트의 취성거동을 연성으로 유도할 수 있게 된다[1-4].

최근에는 높은 혼입율을 가진 마이크로 섬유의 시멘트 복합재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 강섬유의 경우 탄소섬유나 유리섬유에 비해 향상된 *MOR*을, 탄소섬유나 유리섬유는 강섬유보다 우수한 파괴인성을 갖는 것으로 나타났다[5]. 또한 강섬유와 탄소섬유를 하이브리드 형태로 보강할 경우 각 섬유의 개별특성인 강도특성과 고 인성이 동시에 발현된다고 보고하고 있다[6]. 이는 앞으로 사용목적에 따라 콘크리트의 성능을 극대화시킬 수 있는 가능성을 제시하였다. 그러나 기존의 하이브리드 섬유보강 콘크리트 연구에서는 섬유를 하이브리드 형태로 혼입할 경우 단일 섬유 보강 콘크리트에 비해 강도 및 인성의 증진에 효과적임을 보여주긴 하였지만, 각 섬유들 사이의 최적 혼입비율에 대한 연구는 미약한 실정이다.

본 연구에서는 미세구조 관점에서 매트릭스와 섬유계면의 부착특성을 효과적으로 증진시키기 위하여 실리카 흄을 비율별로 충전한 고밀도의 시멘트 매트릭스를 구성하고, 여기에 다시 강, 탄소 두 가지 섬유를 직교 실험원리에 따라 시멘트 페이스트에 보강하여 우수한 *MOR*과 인성을 유도한다. 본 연구의 목적은 실리카 흄의 치환율과 각 섬유의 혼입비율에 따른 페이스트의 보강효율을 평가하기 위해

*정회원, 한양대학교 토목공학과 부교수, 공학박사

**정회원, 한양대학교 토목공학과 대학원

***정회원, 한국생산기술연구원 수석연구원, 공학박사

고려된 강도증진계수와 인성계수를 정량적으로 비교 평가하고, 높은 *MOR*과 우수한 에너지 흡수능력을 갖는 최적의 실리카 흄 치환율과 섬유들의 혼입비율을 찾고자 한다.

2. 실험개요

2.1. 일부실시 직교 배열에 의한 실험설계: 본 연구에서는 섬유의 개별적 성능과 실리카 흄의 재료적 특성이 최대한 발현되도록 하는 하이브리드 섬유의 혼입비율과 실리카 흄 첨가율에 대한 최적 조합 조건을 찾기 위해 직교실험원리가 이용되었다. 두 종류의 섬유(강섬유, 탄소섬유)와 실리카 흄을 평가하고자 하는 특성치(*MOR*, absorbed energy(W_0))에 영향을 주는 인자로 하였고, 각 섬유들의 혼입비율과 실리카 흄의 첨가비율을 동일하게 세 개의 수준으로 택하여 실험횟수를 최소로 하는 직교 배열표에 의해 실험이 설계되었다. 본 연구에 사용된 인자와 수준을 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 채택된 3개의 인자들 사이에는 교호작용이 없다고 가정하였고, Table 2에 3인자 3수준 직교 배열 $OA_9(3^3)$을 나타내었다. 이를 통해서 섬유들과 실리카 흄의 혼합 비율이 결정되었다. 각각의 열에서 각 인자의 수준은 정확하게 세 번씩 나타나고 각 인자의 수준은 다른 인자의 각 수준과 정확하게 한 번씩 만난다.

Table 2 Factors and levels

Factor	Level 1	Level 2	Level 3
A: Steel fiber[a]	0.5%	1.0%	1.5%
B: Carbon fiber[a]	0.25%	0.5%	0.75%
C: Silica fume[b]	2.5%	5.0%	7.5%

[a] Volume fraction(%) of total mix volume
[b] Replacement ratio(wt.%) of the cementitious materials

Table 3 $OA_9(3^3)$ Orthogonal array for three factors and three levels

Exp.no.	Factor A	Factor B	Error	Factor C
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

2.2. 사용재료/배합/양생: 국내 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트(OPC, 평균입경: 18.07 μm)와 고밀도의 매트릭스를 구성하기 위해 시멘트 입자크기의 약 1/180인 0.1 μm의 평균입경을 갖는 활성 실리카 흄이 매트릭스 내부와 섬유 계면의 부착특성 개선을 위해 사용되었다. 사용된 시멘트와 실리카 흄의 물리·화학적 특성이 Table 3에 제시되어 있다. 매트릭스를 보강하기 위해 강섬유와 탄소섬유가 사용되었으며, 두 섬유의 특성이 Table 4에 나타나 있다. 실험에 사용된 물-시멘트재료(w/cm, cm=OPC+SF)비는 0.3으로 일정하게 고정되었다고, 실리카 흄과 섬유들이 매트릭스 내에 일정하게 분산되고 혼합 가능한 배합범위를 유도하기 위해 국내 K사의 액상 폴리나프탈렌 설포네이트계(PNS, 40 % solids) 고성능 감수제 1.0%(wt.% of the cementitious materials)가 첨가되었다. Table 2와 같은 직교 배열표에 따라 두개의 섬유(강섬유, 탄소섬유)와 실리카 흄을 함께 혼합한 아홉 개의 하이브리드 섬유보강 페이스트 배합과 섬유를 전혀 보강하지 않은 한 종류의 기준 배합에 대해서 각각 세 개의 시편이 40mm × 40mm × 160mm의 빔몰드로 성형되었다. 자세한 배합 비율은 Table 5에 나타나 있다. 성형된 시편은 항온항습장치(20±3℃, 98%RH.)에 응결을 위해 보관되었고, 탈형하여 강도 측정일(재령 28일)까지 20℃로 습윤 양생이 실시되었다.

Table 4 Chemical and physical properties of used materials

Components (wt.%)	Cement	Silica fume
SiO_2	21.10	92.0
Al_2O_3	5.13	1.3
Fe_2O_3	3.30	2.4
CaO	62.51	-
MgO	2.72	0.4
SO_3	2.37	-
C	-	1.2
Na_2O_3	-	0.1
K_2O	-	1.2
Loss on ignition	1.39	-
Physical properties		
Density (g/cm^3)	3.15	2.20
Specific surface area (cm^2/g)	3,290	20,000
Mean particle diameter (μm)	18.07	0.1
Particle shape	Angular	Spherical

2.3. 휨시험 및 보강효율 평가방법: 하이브리드 섬유보강 시편의 특성치로 고려된 *MOR*과 W_0를 평가하기 위해서 제작된 40mm × 40mm × 160mm의 보에 120mm를 지간으로 하여 3점 휨 재하시험이 이루어졌다. 하이브리드 섬유보강 시멘트 페이스트의 보강효율은 하중 처짐응답 관계로부터 측정되는 시편의 *MOR*과 W_0를 특성치로 하여, 각 인자에 대한 변동값을 구하고 분산분석[7](ANOVA)을

Table 5 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	12mm(aver.)	0.2mm	60	7.86	700	205	0.5
Pitch based carbon fiber	6mm(aver.)	18μm	333	1.63	590	30	2.0

실시하여 평가되었다. 각 실험조건에 대한 모평균을 이용하여 강도증진계수(F_s, strengthening factor)와 인성계수(F_t, toughening factor)라는 두 가지 계수치가 평가되었다. 보강효율(reinforcing efficiency)에 대한 계수치는 Table 6에 정의[8]된다.

3. 결과 및 토론

하이브리드 섬유보강 시편 아홉 종류와 섬유를 비보강한 기준 시편 한 종류에 대해서 랜덤하게 실시된 휨 시험 결과, 기준 시편을 제외한 모든 시편에서 항복이후의 휨 거동이 연성으로 유도되는 것으로 나타났다(Fig. 1). 총 27개의 휨 시험 결과로부터 각 요인변동에 대한 분산분석 결과와 분산분석으로부터 얻어진 각 시편의 역학적 특성치 및 그에 따라 평가된 보강효율이 Table 7,8에 제시되어 있다.

3.1. 유의 인자의 평가

강섬유는 *MOR* 증진에 매우 유의한 효과를 나타낸다. 강섬유의 혼입비율이 증가할수록 *MOR*이 증가하는 이유는 섬유자체의 성질에 기인하는 것으로 판단된다. 강섬유는 탄소섬유와 시멘트 페이스트에 비해서 높은 인장강도와 탄성계수를 지닌다. 이러한 재료적 성질로 인해서 매트릭스 내에 균질하게 분포된 강섬유는 매트릭스의 전체적인 성능을 개선시키고, 특히 하중전달 능력을 향상 시키게 된다. 강섬유는 인성증진에도 탄소섬유에 비해서 매우 큰 영향을 주고 있는 것으로 나타났다. 이처럼 강섬유가 인성에 유의한 영향을 나타내는 이유는 강섬유의 혼입량이 증가함에 따라 항복점 이후 급격히 발생되는 매크로 균열에 대한 탁월한 제어작용 때문이다.

탄소섬유는 다른 두 인자에 비해서 *MOR* 증진에 유의한 영향을 주는 인자가 아닌 것으로 나타났다. 효과가 미약하게 오차범위에서 나타나는 이유는 *MOR* 증진에 유의한 효과를 나타내는 강섬유와 실리카 흄의 혼입율과 첨가량이 탄소 섬유의 혼입율과 비교할 때 상대적으로 높아서 탄소섬유의 효과가 반감되었기 때문이다. 인성증진에 대한 탄소섬유의 영향은 매우 높게 나타났다. 탄소섬유가 첨가됨에 따라 마이크로 균열 제어 메카니즘을 통해서 *MOR*점까지의 처짐 변위를 연장시켜주고 *MOR*점 이후에 발생되는 거시균열로의 급격한 진전을 막아주기 때문이다.

실리카 흄은 *MOR* 증진과 인성증진에 매우 유의한 인자로서 나타난다. 실리카 흄의 첨가량이 증가됨에 따라 *MOR*이 급격히 증가하고, 인성도 상당히 증가하고 있다. 실리카 흄이 *MOR* 증진에 기여하는 이유는 높은 포졸란 반응률과 입자 충전효과로 압축된다. 즉, 실리카 흄은 치환량이 증가될수록 시멘트의 수화작용으로 생성되는 포틀랜다이트(CH)와 반응을 하여 미세하고 치밀한 CSH겔의 양이 증가되기 때문이다. 실리카 흄의 첨가를 통해 치밀한 매트릭스를 유도함으로써 직접 매트릭스 자체의 성능을 개선하여 *MOR*을 높이는 효과가 나타나지만, 이러한 매트릭스의 개선이 직접적으로 인성을 증가시키지는 못한다. 개선된 매트릭스는 섬유들과의 부착성능을 향상시켜 *MOR*점 이전엔 마이크로 균열을 제어하고, 균열발생 이후에도 섬유의 뽑힘에 대한 저항성능을 개선하여 시편이 파괴되기까지의 거동을 연성으로 유도하게 된다.

Table 6 Mix proportions of hybrid fiber reinforced cementitious pastes

Exp. no.	Factor: Steel fiber (vol.%)	Factor: Carbon fiber (vol.%)	Factor: Error	Factor: Silica fume (wt.%)	Exp. condition
1	1(0.5)	1(0.25)	1	1(2.5)	$A_1B_1C_1$
2	1(0.5)	2(0.5)	2	2(5.0)	$A_1B_2C_2$
3	1(0.5)	3(0.75)	3	3(7.5)	$A_1B_3C_3$
4	2(1.0)	1(0.25)	2	3(7.5)	$A_2B_1C_3$
5	2(1.0)	2(0.5)	3	1(2.5)	$A_2B_2C_1$
6	2(1.0)	3(0.75)	1	2(5.0)	$A_2B_3C_2$
7	3(1.5)	1(0.25)	3	2(5.0)	$A_3B_1C_2$
8	3(1.5)	2(0.5)	1	3(7.5)	$A_3B_2C_3$
9	3(1.5)	3(0.75)	2	1(2.5)	$A_3B_3C_1$
10	0	0	-	0	Control

Table 7 Definition of reinforcing efficiency

$$\textit{Strengthening Factor, } F_s = \frac{\textit{MOR for the hybrid fibrous cement paste}}{\textit{MOR for the plain cement paste}}$$

$$\textit{Toughening Factor, } F_t = \frac{W_0 \textit{ by the hybrid fibrous cement paste to fracture}}{W_0 \textit{ by the plain cement paste to fracture}}$$

Table 7 ANOVA results

Factors	S^a	ϕ^b	V^c	F_0^d
ANOVA result of *MOR* data				
m[e]	39449.2	1	39449.2	88686.7
A (Steel fiber)	61.5	2	30.8	69.2
B (Carbon fiber)	1.2	2	0.6	1.4
C (Silica fume)	481.7	2	240.8	541.4
E (Error)	0.9	2	0.4	
Total	39,994.5	9		
ANOVA result of W_0 data				
m[e]	10614.2	1	10614.2	13992.8
A (Steel fiber)	613.3	2	306.7	404.3
B (Carbon fiber)	189.0	2	94.5	124.6
C (Silica fume)	64.8	2	32.4	42.7
E (Error)	1.5	2	0.8	
Total	91,471.8	9		

[a]Sum of squares; [b]Degree of freedom; [c]Mean square; [d]F value; [e]Correction term

Table 9 Analysis results

Experimental condition	*MOR* (MPa)	W_0 (N-m)	F_s	F_t
$A_1B_1C_1$	31.8	9.5	1.25	5.27
$A_1B_2C_2$	36.2	13.5	1.43	7.47
$A_1B_3C_3$	41.9	19.5	1.65	10.84
$A_2B_1C_3$	43.2	18.4	1.70	10.18
$A_2B_2C_1$	33.3	18.1	1.31	10.04
$A_2B_3C_2$	36.9	21.9	1.45	12.16
$A_3B_1C_2$	39.5	21.8	1.55	12.10
$A_3B_2C_3$	46.0	28.0	1.81	15.54
$A_3B_3C_1$	35.2	27.6	1.39	15.32
Control	25.4	1.8	1.00	1.00

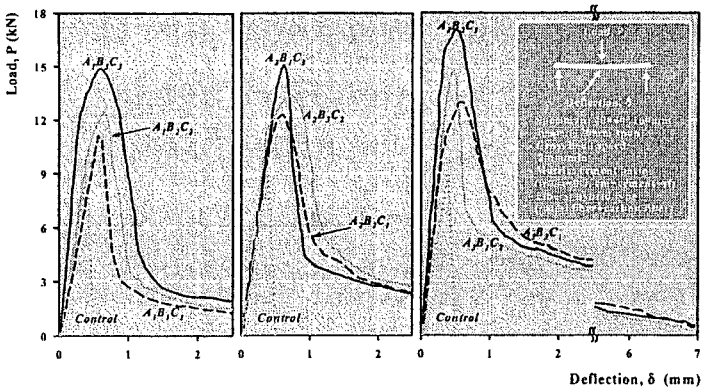

Fig. 1 Load versus deflection response for hybrid firbrous DSP cement pastes

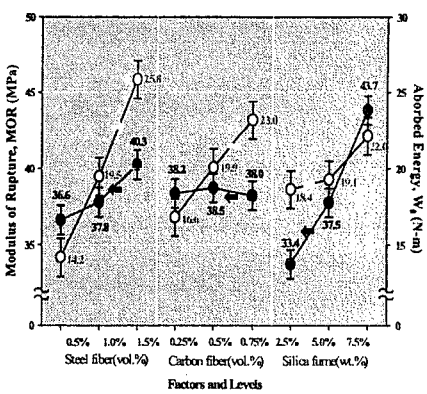

Fig. 2 Effect of factors on the reinforcing efficiency

3.2. 각 인자와 수준의 기여도 평가

*MOR*과 W_0에 대한 분산분석을 통해 강도증진과 인성증진이라는 측면에 대해서 각 인자들의 유의성에 근거하여 보강효율에 대한 다음과 같은 평가를 내릴 수 있다.

F_s or *MOR*: silica fume ≫ steel fiber≫ carbon fiber; F_f or W_0: steel fiber > carbon fiber > silica fume

Table 9 Estimated optimum experimental condition of hybrid fiber reinforced cement paste

Exp. Cond.	Mix composition (vol. or wt.%)			*MOR* (MPa)	W_0 (N·m)	F_s	F_f
	Steel fiber	Carbon fiber	Silica fume				
$A_3B_2C_3$	1.5	0.5	7.5	46.02±1.11	28.64±1.44	1.81	15.54
$A_3B_3C_3$	1.5	0.75	7.5	45.51±1.11	31.21±1.44	1.79	17.30

또한 한 요인에 대한 각 수준의 *MOR*과 W_0로의 평균 기여도가 Fig. 2에 나타나 있다. 특히 탄소섬유의 첨가량의 증가에 따라 *MOR*에 대한 평균 기여도는 오차범위 내에 있기 때문에 앞서 언급한 것처럼 본 연구범위 내에서 탄소섬유는 수준에 따라 유의한 작용을 나타내지 못한다. 그러나, 인성에 대한 평균 기여도는 상당히 크게 나타난다.

3.3. 최적조합 도출

9개의 실험조건에 얻어진 최적조건을 강도증진계수와 인성계수라는 두 보강 효율에 관한 계수치로 평가한 결과, $A_3B_2C_3$ 실험조건을 갖는 경우, 즉 강섬유 1.5%, 탄소섬유 0.5%, 실리카 흄을 7.5%로 치환된 경우에 F_s=1.81로 가장 뛰어난 MOR 증진이 나타났고, 인성계수도 동일한 실험조건에서 F_f=15.54로 가장 높은 값을 나타내었다. 실제로 실험을 수행한 $A_3B_2C_3$ 실험조건 이외에도 3^3=27개의 실험조건 중에서 강도와 인성증진에 가장 좋은 조건이라고 예측되는 조합을 요인분석을 통해 추정하게 되면, 강도 증진 면에서는 본 연구의 실험조건이었던 $A_3B_2C_3$이 최적조건으로 기준보다 약 1.81배의 *MOR* 증진이 추정되고, 인성증진 면에서는 강섬유 1.5%, 탄소섬유 0.75%, 실리카 흄 7.5%를 혼합한 $A_3B_3C_3$가 최적조건으로 기준보다 약 17.30배의 인성증가가 추정되었다. 이 때 두 배합조건에 대한 *MOR*과 W_0를 신뢰구간 95%의 t-검정을 통해서 추정하게 되면 Table 9와 같은 범위의 값을 갖게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 *MOR*과 W_0에 대한 분산분석에 따르면 탄소섬유를 제외한 강섬유와 실리카 흄 두 인자는 *MOR* 증진에 유의한 인자였으며, 인성증진 면에서 정도의 차이는 있지만, 세 개의 인자 모두 유의한 효과로 나타났다. silica fume ≫ steel fiber ≫ carbon fiber; steel fiber > carbon fiber > silica fume 크기 순으로 각각 F_s(또는 *MOR*) 와 F_f(또는 W_0)에 유의한 효과를 주는 것으로 나타났다. 본 실험조건에서 강도와 인성증진 모든 면에서 가장 좋은 보강효율을 나타낸 실험조건은 강섬유 1.5%, 탄소섬유 0.5%, 실리카 흄을 7.5%로 혼합한 경우였다. 최적조합을 도출하기 위해서 신뢰구간 95%의 t-검정을 실시한 결과, 강도증진 면에서는 강섬유 1.5%, 탄소섬유 0.5%, 실리카 흄 7.5%를 혼합한 조건이, 인성증진 면에서는 강섬유 1.5%, 탄소섬유 0.75%, 실리카 흄 7.5%를 혼합한 조건이 각각 1.81배의 *MOR* 증진과 17.3배의 인성증진을 보이며 최적조건으로 추정되었다.

감사의 글

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