

고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축 및 인장 거동

Compressive and Tensile Behaviors of High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete

권순오¹ · 배수호^{2*} · 이현진³

Soon-Oh Kwon¹ · Su-Ho Bae^{2*} · Hyun-Jin Lee³

(Received October 12, 2020 / Revised November 2, 2020 / Accepted November 5, 2020)

The purpose of this experimental research is to evaluate the compressive and tensile behaviors of high performance hybrid fiber reinforced concrete(HPHFRC) using amorphous steel fiber(ASF) and polyamide fiber(PAF). For this purpose, the HPHFRCs using ASF and PAF were made according to their total volume fraction of 1.0% for target compressive strength of 40MPa and 60MPa, respectively. And then the compressive and tensile behaviors such as the compressive strength, compressive toughness, direct tensile strength, and stress-strain characteristics under compressive and tensile tests were estimated. It was observed from the test results that the compressive strength of HPHFRC was slightly decreased than that of plain concrete, but the compressive toughness, compressive toughness ratio, and direct tensile strength of HPHFRC increased significantly. Also, it was revealed that the plain concrete showed brittle fracture after the maximum stress from the stress-strain curves, but HPHFRC showed strain softening.

키워드 : 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트, 응력-변형을 특성, 압축인성, 직접인장강도, 변형연화

Keywords : High performance hybrid fiber reinforced concrete, Stress-strain characteristics, Compressive toughness, Direct tensile strength, Strain softening

1. 서론

콘크리트는 압축강도와 강성이 높고 내구성이 우수한 재료이나, 높은 압축강도에 비해 인장강도 및 인성 등은 상대적으로 낮은 결점을 가지고 있다. 이를 개선하기 위해 개발된 섬유보강 콘크리트는 높은 인성을 가지고 있어 인장 및 휨강도 특성을 향상시키고, 균열 발생 이후 연성거동을 하는 특징을 가지고 있다. 그러나 단일 섬유로 보강된 콘크리트의 경우 다양한 균열 형상에 대한 저항에는 한계가 있다(Quan and Stroeven 2000; Jeon et al. 2014).

이러한 단점을 보완하고 콘크리트의 성능을 극대화하기 위하여 콘크리트 매트릭스에 섬유의 종류나 길이 및 형상이 다른 2종 이상의 섬유를 혼합한 하이브리드 섬유보강 콘크리트에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하이브리드 섬유보강 콘크리트에 혼합되는

섬유는 종류 및 형상, 특성 등이 상이하여 단일 섬유보강 콘크리트 보다 역학적 특성이 개선되어 다양한 균열 및 외부 요인에 대한 우수한 저항력을 가진다(Lawer et al. 2000).

이 같은 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 제조 방법에는 첫째, 직경 및 크기가 작은 마이크로(micro) 섬유와 직경 및 크기가 큰 매크로(macro) 섬유를 사용하여 강도 및 연성을 증가시키는 방법, 둘째, 강성의 섬유와 연성의 섬유 등 재료 특성이 다른 섬유를 사용하여 강도와 연성을 증가시키는 방법, 셋째, 재령 초기에는 소성수축균열을 제어하고, 장기적으로는 역학적 성능을 향상시키는, 콘크리트의 공용연수 전반에 영향을 미치도록 하는 방법, 넷째, 한 종류의 섬유가 콘크리트의 성능을 증가시키고, 다른 종류의 섬유가 증가된 성능의 효율성을 더욱 더 증가시키도록 하는 방법이 있다(Won and Park 2006).

* Corresponding author E-mail: shbae@andong.ac.kr

¹삼표피엔씨(주) 대리 (Quality Management Team, Sampyo P&C, Seoul, 03152, Korea)

²안동대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Andong National University, Andong, 36729, Korea)

³안동대학교 토목공학과 박사과정 (Department of Civil Engineering, Andong National University, Andong, 36729, Korea)

한편, 섬유보강 콘크리트에 사용되는 섬유의 종류로는 강섬유, 비정질 강섬유, 탄소섬유, 유리섬유, 나일론 섬유, 폴리에틸렌 섬유, 폴리비닐 알콜 섬유, 폴리 프로필렌 섬유 및 폴리아미드 섬유 등 다양한 섬유가 사용되고 있다. 그 중, 비정질 강섬유(amorphous steel fiber, ASF)는 부착력이 우수하고 표면적이 커서 바인더와의 높은 결합력으로 인해 강도증진 및 균열제어에 효과적인 것으로 알려져 있다(Botta et al, 2014; Ku et al, 2014; Hwang 2015; Moon 2016). 또한, 유기섬유인 폴리아미드 섬유(polyamide fiber, PAF)는 아미드 결합[CONH-]을 반복단위로 하여 연결되어 있는 고분자를 말하며, 나일론이라고도 불리고 있다. 폴리아미드는 분자구조 특성상 분자들이 서로의 움직임을 제한하여 인장강도를 증가시키며, 분자사슬이 주변의 분자사슬과 수소결합으로 평면 적층구조를 이루어 높은 결정성을 가질수 있게 해준다. 또한, 친수성 재료로서 강섬유에 비해 분산성이 좋고, 탄성이 우수하며 경량이고, 높은 인장강도와 강성, 우수한 인성, 내피로성, 내후성 및 내열성을 가지고 있으며, 특히, 우수한 내마모성, 내식성 및 작은 마찰계수는 금속재료에서 나타나지 않는 우수한 특성으로 알려져 있다. 이러한 특징으로 인해 콘크리트에 혼입시 강섬유 콘크리트와 유사한 휨인성 및 균열제어가 가능한 것으로 알려져 있다(Strong 2006; Nam et al, 2010; Jeon et al, 2014).

따라서 본 연구에서는 비정질 강섬유와 폴리아미드 섬유를 이용한 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트(high performance hybrid fiber reinforced concrete, HPHFRC)와 고성능 하이브리드

드 섬유보강 모르타르(high performance hybrid fiber reinforced mortar, HPHFRM)의 압축 및 인장 거동을 평가하기 위하여 목표 압축강도 및 섬유 조합에 따라 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트를 제조한 후 압축강도 및 압축인성, 직접인장강도, 압축 및 인장 시험시의 응력-변형률 특성 등을 평가하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

시멘트는 H사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 물리적 성질은 Table 1과 같다. 잔골재는 경북 안동에서 생산된 낙동강산 하천사를, 굵은 골재는 최대치수가 25mm인 안동산 부순돌을 이용하였으며, 이들의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트(high performance hybrid fiber reinforced concrete, HPHFRC)의 유동성 조절을 위한 화학혼화제는 고강도 및 유동화 콘크리트용으로 사용되고 있는 S사의 폴리카르본산계의 고성능 감수제(superplasticizer, SP)와 섬유의 분산과 콘크리트의 점성을 조절하기 위하여 D사의 액상 타입 저점도 증점제(viscosity agent, VA)를 사용하였다. 공기량 조절을 위한 화학혼화제는 H사의 공기연행제(air entraining agent, AE)를 사용하였으며, 이들의 품질 특성은 Table 3과 같다.

Table 1. Physical properties of cement

Type	Density (g/cm ³)	Setting time(min)		Fineness (m ² /kg)	Compressive strength(MPa)		
		Initial	Final		3 Days	7 Days	28 Days
Ordinary portland cement	3.15	225	305	341	26.8	38.6	56.0

Table 2. Physical properties of aggregates

Types	G _{max} (mm)	Density (g/cm ³)	Absorption (%)	Unit mass (kg/m ³)	Amount of passing 0.08mm sieve(%)	Fineness modulus
River sand	-	2.54	2.15	1,660	2.25	2.72
Crushed stone	25	2.65	1.22	1,648	-	7.27

Table 3. Properties of chemical admixtures

Types	Specific gravity	pH	Solid content(%)	Quantity(%) (by mass of cement)	Main component
Super-plasticizer(SP)	1.05	9	38	0.5~2.5	Polycarbonin acid admixture
Viscosity agent(VA)	1.03	-	-	0.1~1.0	-
Air entraining agent(AE)	1.08	12	28	0.002~0.004	Surfactant

Table 4. Properties of fibers

Types	Aspect ratio	Density (g/cm ³)	Length (mm)	Diameter (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
ASF*	188	7.16	30	-	0.8	0.025	2,200	140,000
PAF**	60	1.14	30	0.5	-	-	600	3,100

* Amorphous steel fiber

** Polyamide fiber

Table 5. Mix proportions of HPHFRC

Target compressive strength (MPa)	Specimens	Fiber volume fraction (%)		Target slump (mm)	Target air content (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit mass(kg/m ³)				Chemical admixtures (C×%)		
		ASF	PAF					W	C	S	G	SP*	VA**	AE***
40	Plain	-	-	150±25	3.5±1.5	45	33	212.9	473.1	504.5	1068.7	0.5	0.6	0.002
	ASF0.2+PAF0.8	0.2	0.8									0.8	0.6	0.002
	ASF0.4+PAF0.6	0.4	0.6									1.0	0.7	0.003
	ASF0.6+PAF0.4	0.6	0.4									1.2	0.8	0.003
	ASF0.8+PAF0.2	0.8	0.2									1.5	0.8	0.003
60	Plain	-	-			33	52	190	576	782	753	0.5	0.9	0.003
	ASF0.2+PAF0.8	0.2	0.8									1.4	0.9	0.003
	ASF0.4+PAF0.6	0.4	0.6									1.6	1.0	0.003
	ASF0.6+PAF0.4	0.6	0.4									1.8	1.1	0.003
	ASF0.8+PAF0.2	0.8	0.2									2.0	1.1	0.003

* Superplastizer

** Viscosity agent

*** Air entraining agent

하이브리드 섬유를 구성하기 위하여 무기질 섬유로서 비정질 강 섬유(ASF)와 유기섬유로서 K사의 폴리아미드 섬유(PAF)를 혼합·사용하였으며, 이들의 물리적 성질 및 형상은 Table 4와 같다.

2.2 실험방법

2.2.1 공시체 제작

목표 압축강도 40MPa 및 60MPa급의 HPHFRC를 제조하기 위하여 전술한 섬유보강 콘크리트 제조 방법 중 두 번째 방법인 강성의 섬유와 연성의 섬유 등 재료 특성이 다른 섬유를 사용하여 강도와 연성을 증가시키는 방법을 채택하였다. 즉, 물-시멘트비는 45% 및 33%로 설정하였고, 목표 슬럼프 및 목표 공기량은 각각 150±25mm, 3.5±1.5%로 설정하였으며, 하이브리드 섬유의 혼입율은 전체 체적비의 1.0%로 설정한 후, 비정질 강섬유와 폴리아미드 섬유를 Table 5와 같이 조합·사용하였다. HPHFRC의 압축강도 및 압축 인성을 평가하기 위하여 KS F 2403(2014)에 따라 원주



Fig. 1. Detail of specimen for direct tensile test

형 공시체(Ø100×200mm)를 제작하였고, 직접인장강도를 평가하기 위하여 HPHFRC를 제작하여야 하나, 몰드 규격 및 시험 장치의 제한으로 dumb-bell 형태의 고성능 하이브리드 섬유보강 모르타르(high performance hybrid fiber reinforced mortar, HPHFRM) 시편을 HPHFRC와 동일한 배합으로 Fig. 1과 같이 제작하였다. 즉, 모르타르의 물-시멘트비는 각각 45%, 33%로 설정하였으며, 목표 플로

Table 6. Mix proportions of HPHFRM

Target compressive strength (MPa)	Specimens	Fiber volume fraction (%)		Target flow (mm)	W/C (%)	Cement-aggregate ratio (ratio in mass)		Chemical admixture (C×%)
		ASF	PAF			Cement	Fine aggregate	SP
40	Plain	-	-	210±20	45	1	1.5	0.5
	ASF0.2+PAF0.8	0.2	0.8					0.8
	ASF0.4+PAF0.6	0.4	0.6					1.0
	ASF0.6+PAF0.4	0.6	0.4					1.2
	ASF0.8+PAF0.2	0.8	0.2					1.5
60	Plain	-	-		33	1	1.5	0.5
	ASF0.2+PAF0.8	0.2	0.8					1.4
	ASF0.4+PAF0.6	0.4	0.6					1.6
	ASF0.6+PAF0.4	0.6	0.4					1.8
	ASF0.8+PAF0.2	0.8	0.2					2.0

값은 210±20mm, 시멘트-잔골재비는 질량비로 1:1.5, 하이브리드 섬유의 혼입률은 전체 체적비의 1.0%로 설정하였다(Table 6). 제작된 공시체는 성형 후 24시간 경과하여 몰드를 제거한 후 시험 전까지 20±3℃의 온도로 습윤양생하였다.

2.2.2 압축강도 및 압축인성 시험

HPHFRM의 압축강도 특성을 평가하기 위하여 KS F 2405 (2010)에 따라 재령 7일 및 28일 압축강도 시험을 수행하였으며, 압축인성 비를 평가하기 위하여 JSCE-SF5(1984)에 따라 하중 단계별 변위값을 Fig. 2와 같이 측정하였다.

Fig. 3은 섬유보강 콘크리트의 압축인성 및 압축인성 비에 대한 정의를 나타낸 것으로, 압축 시험시 측정된 하중-변위 데이터를 이용하여 HPHFRM의 압축인성 및 압축인성 비를 계산하였다. 압축인성은 식 (1)과 같이 기준 변형률에서 응력-변형률 곡선 아래의 면적으로 정의되며, 압축인성 비는 기존의 연구(JSCE-SF5 1984; Nataraja et al, 1999; Poon et al, 2004)와 같이 시험체 길이의 0.75%에 해당하는 변형률 값을 기준으로 응력-변형률 곡선 아래의 면적을 압축강도로 나눈 값으로, 식 (2)와 같이 압축인성 비를 평가하였다.

$$\text{압축인성} = \text{AREA}_{OABC} \tag{1}$$

$$\text{압축인성 비} = \frac{\text{AREA}_{OABC}}{f_c} \tag{2}$$

여기서, AREA_{OABC} : Fig. 3의 곡선 OABC의 면적
f_c : 압축강도



Fig. 2. Compressive toughness test

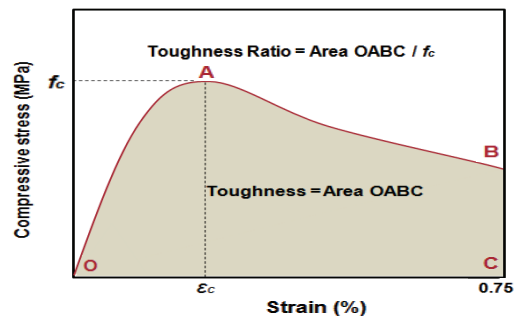


Fig. 3. Definition of compressive toughness

2.2.3 직접인장강도 시험

직접인장에 대한 표준시험은 국·내외적으로 아직 제정되지 않아서, 자체적인 인장강도 평가방법에 의해 수행되고 있으며, HPHFRM과 동일 배합의 고성능 하이브리드 섬유보강 모르타르

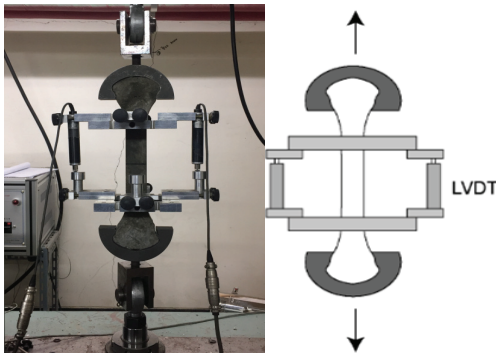


Fig. 4. Test of direct tensile strength

(HPHFRM)의 직접인장강도 특성을 평가하기 위하여 Fig. 4와 같은 시험장치를 이용하여 직접인장 시험을 수행하였다.

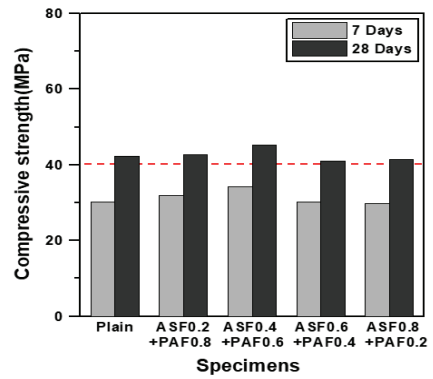
직접인장 시험시 HPHFRM의 응력-변형률 특성을 평가하기 위하여 Fig. 1과 같이 전체 길이가 350mm의 시편을 지그에 고정시킨 후 변위가 측정되는 유효길이는 150mm로 하여, 시험체와 재하장치가 수평이 되도록 설치하였다. 이 때 시편의 중앙부에 설치된 변위계를 이용하여 시편이 완전히 파괴될 때까지 좌, 우측의 변위를 측정한 후 이들의 평균치를 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

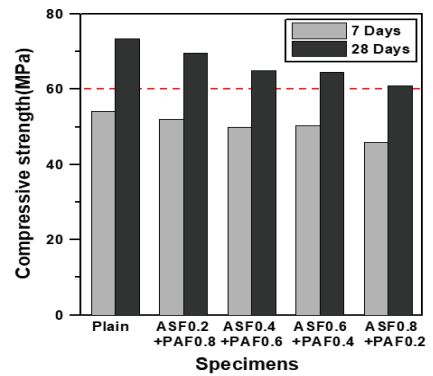
3.1 압축 거동

Fig. 5는 HPHFRC의 재령별 압축강도를 나타낸 것으로, 목표 압축강도 40MPa인 경우 플레인 콘크리트에 대한 HPHFRC의 재령 7일 및 28일 압축강도비는 각각 99~113%, 97~107%로 나타났으며, 목표 압축강도 60MPa인 경우 각각 85~96%, 83~95%로 나타나, 고강도 콘크리트일수록 섬유 혼입이 압축강도 저하에 미치는 영향은 더 큰 것으로 나타나, 향후 HPHFRC의 배합 시 이를 고려하여야 할 것으로 판단된다. 목표 압축강도 40MPa인 경우 재령 28일을 기준으로 할 때, B와 C배합을 제외하면, 플레인 콘크리트에 대한 HPHFRC의 압축강도 증진 효과는 없는 것으로 나타났으며, 압축강도 60MPa인 경우 전반적으로 HPHFRC의 압축강도가 플레인 콘크리트보다 저하되며, 비정질 강섬유 혼입량이 증가하고 유기섬유 혼입량이 감소할수록 압축강도 저하 현상이 뚜렷해지는 것으로 나타났다.

Fig. 6 및 7은 HPHFRC의 압축 시험시 응력-변형률 곡선을 나타낸 것으로, 목표 압축강도 수준에 관계 없이 플레인 콘크리트는 최대응력 이후 취성적인 파괴를 나타내는 반면, HPHFRC의 경우는 모두 최대응력 이후 변형연화(strain softening) 현상이 나타났



(a) Target compressive strength 40MPa



(b) Target compressive strength 60MPa

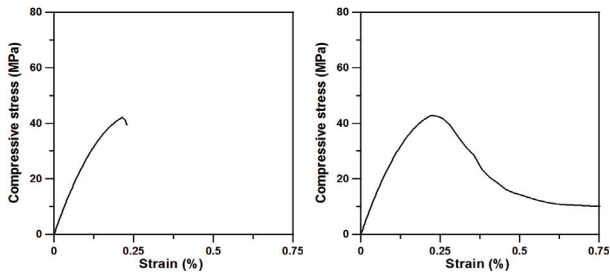
Fig. 5. Compressive strength of HPHFRC

다. 또한, 목표 압축강도 40MPa 및 60MPa인 HPHFRC의 최대 응력점에서의 변형률은 각각 C 배합, D 배합이 가장 큰 것으로 나타났다.

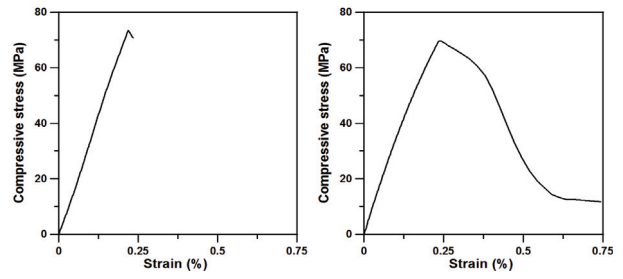
Fig. 8 및 9는 HPHFRC의 압축인성 및 압축인성 비를 나타낸 것으로, HPHFRC의 압축인성 및 압축인성 비는 모두 플레인 콘크리트보다 크게 개선되는 것으로 나타났으며, 압축인성 비를 기준으로 할 때 목표 압축강도 40MPa의 경우 C 배합이 플레인보다 2.6배, 목표 압축강도 60MPa의 경우 D 배합이 플레인보다 2.9배 큰 것으로 나타났다. 이는 기존의 연구결과(Jang et al, 2015)와 유사하게 압축응력 하에서 콘크리트 내의 섬유들이 미세균열을 효과적으로 제어·구속하여 압축인성이 증가한 것으로 판단된다.

3.2 인장 거동

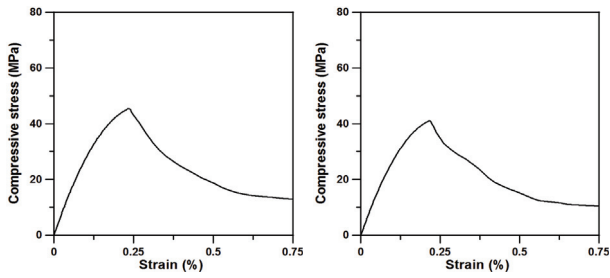
Fig. 10과 11은 각각 HPHFRM 시편의 직접인장강도와 최대변형률을 나타낸 것이고, Fig. 12 및 13은 직접인장 시험시 HPHFRM의 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다. HPHFRM의 직접인장강도는



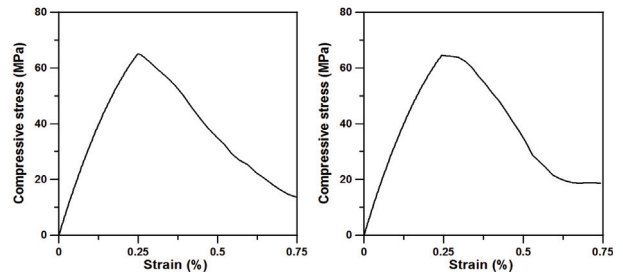
(a) Plain (b) ASF0.2+PAF0.8



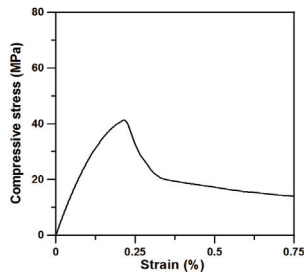
(a) Plain (b) ASF0.2+PAF0.8



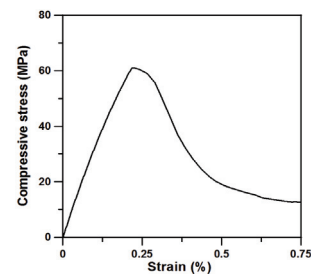
(c) ASF0.4+PAF0.6 (d) ASF0.6+PAF0.4



(c) ASF0.4+PAF0.6 (d) ASF0.6+PAF0.4



(e) ASF0.8+PAF0.2



(e) ASF0.8+PAF0.2

Fig. 6. Stress-strain curves of HPHFRC under compressive test(40MPa)

Fig. 7. Stress-strain curves of HPHFRC under compressive test(60MPa)

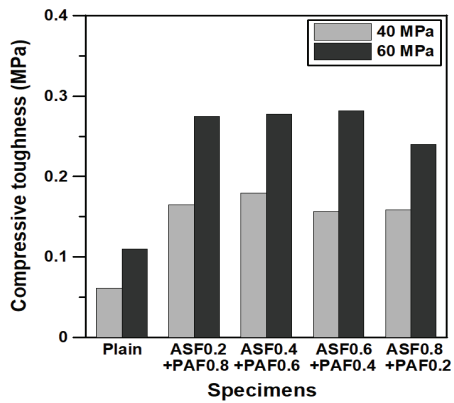


Fig. 8. Compressive toughness of HPHFRC

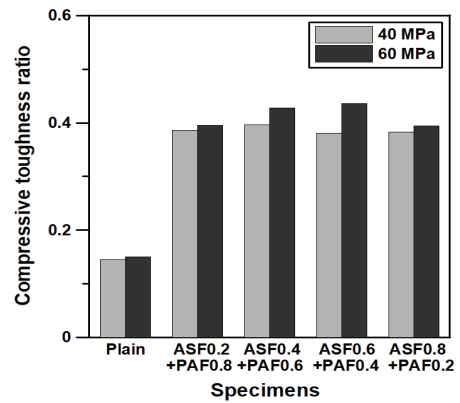


Fig. 9. Compressive toughness ratio of HPHFRC

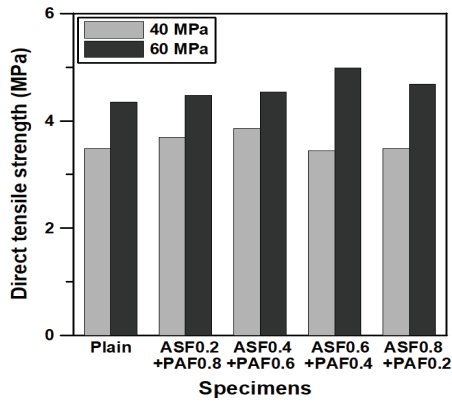


Fig. 10. Direct tensile strength of HPHFRM

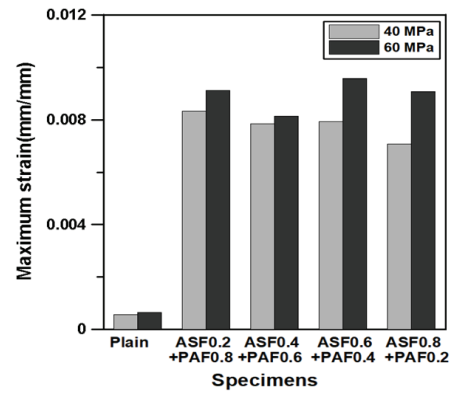
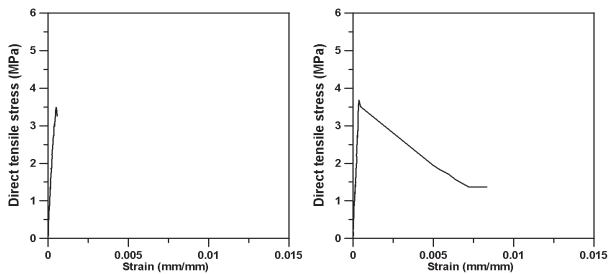
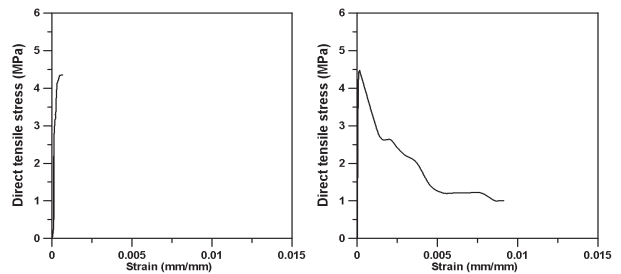


Fig. 11. Maximum strain of HPHFRM



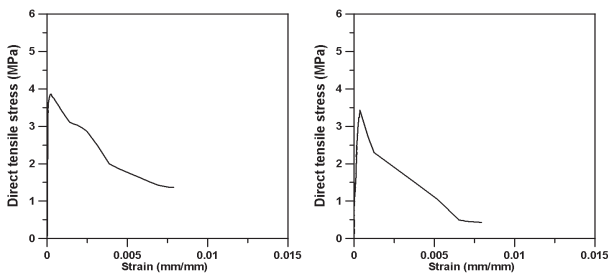
(a) Plain

(b) ASF0.2+PAF0.8



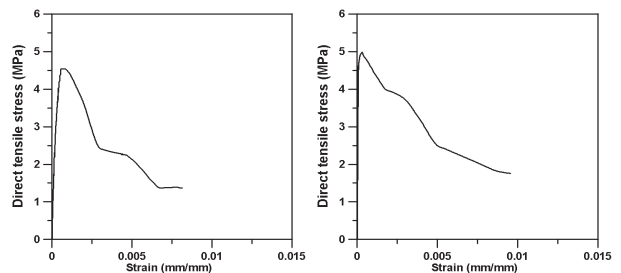
(a) Plain

(b) ASF0.2+PAF0.8



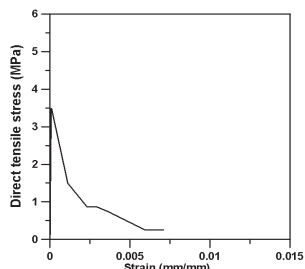
(c) ASF0.4+PAF0.6

(d) ASF0.6+PAF0.4



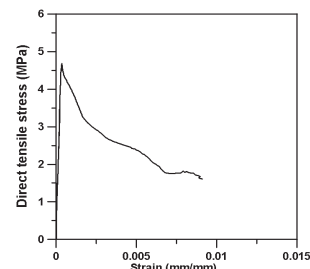
(c) ASF0.4+PAF0.6

(d) ASF0.6+PAF0.4



(e) ASF0.8+PAF0.2

Fig. 12. Stress-strain curves of HPHFRM under direct tensile test (40MPa)



(e) ASF0.8+PAF0.2

Fig. 13. Stress-strain curves of HPHFRM under direct tensile test (60MPa)

모두 플레인 모르타르보다 큰 것으로 나타났으며, 목표 압축강도 40MPa의 경우 C 배합이 플레인 모르타르의 110%, 목표 압축강도 60MPa의 경우 D 배합이 플레인 모르타르의 114%로, HPHFRM의 직접인장강도가 플레인 모르타르보다 다소 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 비정질 강섬유와 유기섬유가 균열 저항성 및 에너지 흡수능력을 높여 직접인장강도가 향상된 것으로 판단된다.

한편, 목표 압축강도 40MPa 및 60MPa인 HPHFRM의 직접인장 강도는 비정질 강섬유 혼입량이 증가하고 유기섬유 혼입량이 감소할수록 증가하다가 각각 C와 D 배합에서 가장 높게 나타났으며, 그 이후로는 감소하는 경향으로 나타났는데, 이는 강도수준에 따라 섬유 조합이 직접인장강도에 미치는 영향이 다르다는 것을 나타낸다. 즉, 목표압축강도 40MPa인 경우는 연성의 섬유인 폴리아미드 섬유가, 60MPa인 경우는 강성의 섬유인 비정질 강섬유가 균열 가교에 더욱 지배적인 역할을 하는 것으로 나타났다.

직접인장 시험시 시편이 완전히 파손될 때까지의 HPHFRM의 최대변형률은 목표 압축강도 40MPa 및 60MPa의 경우 각각 0.71~0.83%, 0.81~0.96%로 나타났는데, 강도수준이 높을수록 최대 변형률이 큰 것은 모르타르 매트릭스와 섬유 사이의 부착특성이 개선되기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 11).

또한, 목표 압축강도 수준에 관계 없이 플레인 모르타르는 최대 응력 이후 취성파괴를 보이는 반면, HPHFRM은 최대응력 이후 응력 상승구간 없이 변형연화(strain softening) 현상을 나타냈다. 이는 섬유들의 가교역할로 인해 에너지 흡수능력이 향상되어 취성거동이 연성거동으로 바뀐 것으로 판단된다(Fig. 12~13).

4. 결론

비정질 강섬유와 폴리아미드 섬유를 이용한 HPHFRC의 압축 및 인장 거동을 평가한 실험연구 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 목표 압축강도 40MPa인 HPHFRC의 압축강도는 B와 C배합을 제외하면, 플레인 콘크리트보다 저하되는 것으로 나타났으며, 목표 압축강도 60MPa인 HPHFRC의 압축강도는 전반적으로 플레인 콘크리트보다 저하되며, 비정질 강섬유 혼입량이 증가하고 유기섬유 혼입량이 감소할수록 압축강도 저하 현상이 뚜렷해지는 것으로 나타나, 향후 HPHFRC의 배합 시 이를 고려하여야 할 것으로 판단된다.
2. 플레인 콘크리트의 압축 거동은 최대응력 이후 취성파괴를 나타내나, HPHFRC는 최대응력 이후 변형 연화 현상을 나타

냈고, 압축인성 및 압축인성 비는 모두 플레인 콘크리트보다 크게 개선되는 것으로 나타났으며, 압축인성 비를 기준으로 할 때 목표 압축강도 40MPa의 경우 C 배합이 플레인 콘크리트보다 2.6배, 압축강도 60MPa의 경우 D 배합이 플레인 콘크리트보다 2.9배 큰 것으로 나타났는데, 이는 압축응력 하에서 콘크리트 내의 섬유들이 미세균열을 효과적으로 제어·구속한 것으로 판단된다.

3. HPHFRM의 직접인장강도는 모두 플레인 모르타르보다 큰 것으로 나타났으며, 목표 압축강도 40MPa의 경우 C 배합이 플레인 모르타르의 110%, 압축강도 60MPa의 경우 D 배합이 플레인 모르타르의 114%로, HPHFRM의 직접인장강도가 플레인 모르타르보다 다소 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 비정질 강섬유와 유기섬유가 균열 저항성 및 에너지 흡수능력을 높여 직접인장강도가 향상된 것으로 판단된다.
4. 플레인 모르타르의 인장 거동은 최대 응력 이후 취성파괴를 나타내나, HPHFRM은 최대응력 이후 변형 연화 현상을 나타냈다. 직접인장 시험시 시편이 완전히 파손될 때까지의 HPHFRM의 최대변형률은 목표 압축강도 40MPa 및 60MPa인 경우 각각 0.71~0.83%, 0.81~0.96%로 나타났으며, 강도수준이 높을수록 최대변형률이 큰 것으로 나타났는데, 이는 모르타르 매트릭스와 섬유 사이에 부착특성이 개선되기 때문인 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

이 논문은 안동대학교 기본연구지원사업에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Botta, W.J., Berger, J.E., Kiminami, C.S., Roche, V., Nogueira, R.P., Bolfarini, C. (2014). Corrosion resistance of Fe-based amorphous alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, **586(1)**, S105-S110.
- Hwang, J.Y. (2015). Microstructure and Soft Magnetic Properties of $Fe_{80}P_{20-x}Si_x$ ($X=4.5-6.5$ at.%) Amorphous Alloy, Master's Thesis,

- Kyungpook National University [in Korean].
- Jang, S.J., Kang, S.W., Yun, H.D. (2015). Cracking behavior and flexural performance of RC beam with strain hardening cement composite and high-strength reinforcing bar, Journal of the Korea Concrete Institute, **27(1)**, 37-44 [in Korean].
- Jeon, J.K., Kim, W.S., Yoon, J.H., Jeon, C.K. (2014). An experimental study on the flexural characteristics of polyamide fiber reinforced concrete, Proceedings of the Korea Concrete Institute, **26(1)**, 379-380 [in Korean].
- JSCE-SF5. (1984). Method of Test for Compressive Strength and Compressive Toughness of Steel Fibre-Reinforced Concrete, Concrete Library of JSCE.
- KS F 2403. (2014). Standard Test Method for Making and Curing Concrete Specimens, KS Standard, Korea [in Korean].
- KS F 2405. (2010). Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete, KS Standard, Korea [in Korean].
- Ku, D.O., Kim, S.D., Kim, H.S. (2014). Flexural performance characteristics of amorphous steel fiber-reinforced concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, **26(4)**, 483-489 [in Korean].
- Lawer, J.S., Zampini, D., Shah, S.P. (2000). Permeability of cracked hybrid fiber-reinforced under load, ACI Material Journal, **99(4)**, 379-385.
- Moon, J.W. (2016). Mechanical Properties, Corrosion Resistance and Thermal Neutron Shielding Efficiency of $Fe_{72-x}B_{25}Mo_3Cr_x$ ($x=0, 5, 10, 15, 20$) High Boron Amorphous Ribbons, Master's Thesis, Kyungpook National University [in Korean].
- Nam, J.S., Kim, G.Y., Lim, C.H., Yun, K.H., Kim, M.H., Jeon, J.K. (2010). Mechanical properties of tunnel shotcrete with polyamide fiber ratio, Proceedings of the Korea Concrete Institute, **22(2)**, 163-164 [in Korean].
- Nataraja, M.C., Dhang, N., Gupta, A.P. (1999). Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression, Cement and Concrete Composites, **21**, 383-390.
- Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L. (2004). Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures, Cement, Concrete, Res., **34**, 2215-2222.
- Quan, C.X., Stroeven, P. (2000). Fracture properties of concrete reinforced with steel-polyethylene hybrid fibers, Cement and Concrete Composites, **22(5)**, 651-658.
- Strong, A.B. (2006). Plastics : Materials and Processing 3rd Edition, PEARSON Prentice Hall.
- Won, J.P., Park, C.G. (2006). Performance and application of hybrid fiber reinforced concrete, Magazine of the Korea Concrete Institute, **18(1)**, 22-27.

고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축 및 인장 거동

이 연구의 목적은 비정질 강섬유와 폴리아미드 섬유를 이용한 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축 및 인장 거동을 평가하는 것이다. 이를 위하여 목표 압축강도 40MPa 및 60MPa 각각에 대해서 비정질 강섬유와 폴리아미드 섬유를 총 부피비로 1.0% 혼입한 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트를 제작한 후 압축강도, 압축인성, 직접인장강도 및 응력-변형률 특징 등의 압축 및 인장 거동을 평가하였다. 그 결과, 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축강도는 플레인 콘크리트보다 다소 감소하였으나, 압축인성, 압축인성 비, 직접인장강도는 크게 증가하는 것으로 나타났다. 또한 압축 및 인장 시험시 플레인 콘크리트는 최대응력 이후 취성파괴를 나타냈으나, HPHFRC는 변형연화 현상을 나타내어, 압축 및 인장 거동이 크게 개선되는 것으로 나타났다.