

# 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축 및 인장 거동에 대한 재료모델

## Material Model for Compressive and Tensile Behaviors of High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete

권순오<sup>1</sup> · 배수호<sup>2\*</sup> · 이현진<sup>3</sup>Soon-Oh Kwon<sup>1</sup> · Su-Ho Bae<sup>2\*</sup> · Hyun-Jin Lee<sup>3</sup>

(Received August 26, 2021 / Revised September 13, 2021 / Accepted September 13, 2021)

Many studies have been performed on hybrid fiber reinforced concrete for years, which is to improve some of the weak material properties of concrete. Studies on characteristics of hybrid fiber reinforced concrete using amorphous steel fiber and organic fiber, however, yet remain to be done. The purpose of this research is to evaluate the compressive and tensile behaviors and then propose a material model of high performance hybrid fiber reinforced concrete using amorphous steel fiber and polyamide fiber. For this purpose, the high performance hybrid fiber reinforced concretes 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 of those were evaluated. Also, based on the experimental results of the high performance hybrid fiber reinforced concrete and mortar, each material model for the compressive and tensile behavior was suggested. It was found that the experimental results and the proposed models corresponded relatively well.

**키워드** : 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트, 응력-변형을 특성, 압축거동, 인장거동, 재료모델

**Keywords** : High performance hybrid fiber reinforced concrete, Stress-strain characteristics, Compressive behavior, Tensile behavior, Material model

## 1. 서론

콘크리트는 높은 압축강도를 가지고 있고 경제적인 재료이나, 낮은 인장강도와 갑작스런 파괴를 일으키는 취성적인 특성과 균열에 대한 저항능력이 낮아 균열발생으로 인한 내구성 저하에 대한 문제점을 가지고 있다. 따라서 콘크리트의 낮은 인장강도와 취성 파괴 특성 개선 및 균열을 제어하기 위하여 1960년대부터 강섬유가 개발되어 섬유보강 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이를 구조성능 향상과 균열억제 등의 목적으로 다양한 콘크리트 구조물에 적용하고 있다(ACI Committee 544 1984; Won et al. 2005; Yang 2010; Ku et al. 2014).

1990년대 후반부터 콘크리트의 다양한 균열제어 및 고인성 확보를 목표로, 재료 특성이나 길이가 다른 2종 이상의 섬유를 혼합

한 하이브리드 섬유보강 콘크리트에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 하이브리드 섬유보강 콘크리트에 혼합되는 섬유는 종류 및 형상, 특성 등이 상이하여 단일 섬유보강 콘크리트보다 역학적 특성이 개선되어 다양한 균열 및 외부 요인에 대한 우수한 저항력을 가진다(Lawer et al. 2000).

재료 특성이 다른 섬유의 하이브리드는 콘크리트의 강도와 연성을 증가시키는 데 효과적이며, 길이가 다른 섬유의 하이브리드는 미세균열(microcrack)과 거시균열(macrocrack) 제어에 효과적임을 입증하였다(Lawler 2001). 건설산업에서 가장 일반적으로 사용되는 강섬유는 콘크리트의 유동성을 저하시키나, 콘크리트의 강도와 연성 향상에 매우 효과적인 것으로 알려져 있고, 비정질 강섬유는 강섬유의 필수적인 제조공정인 철강의 제조공정이 생략되어 CO<sub>2</sub> 및 에너지 소비량이 감소되고, 인장강도가 강섬유의 2배

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

<sup>1</sup>(주)세안안전진단 차장 (Diagnosis Team, Sean Safety Industry, Gyeonggi, 13647, Korea)

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

<sup>3</sup>제이와이건설(주) 과장 (Business Department, JY Construction, Daegu, 41907, Korea)

이상 향상되며, 국내에서 생산되어 경제성도 우수한 것으로 알려져 있다. 또한 비정질 강섬유는 부착력이 우수하고 표면적이 커서 결합재와의 높은 결합력으로 인해 콘크리트의 강도 증진 및 균열 제어에 효과적인 것으로 알려져 있다(Song and Hwang 2004; Botta et al. 2014; Ku et al. 2014; Hwang 2015; Moon 2016).

따라서 본 연구에서는 강섬유보다 유동성 및 경제성이 우수한 비정질 강섬유(amorphous steel fiber, ASF)와 균열제어에 가능하고 분산성이 우수한 폴리아미드 섬유(polyamide fiber, PAF)를 이용하여 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트(High performance hybrid fiber reinforced concrete, HPHFRC)와 고성능 하이브리드 섬유보강 모르타르(High performance hybrid fiber reinforced mortar, HPHFRM)를 제작하여 이들의 압축 거동 및 인장 거동을 평가한 후 이에 대한 재료모델을 제안하고자 한다.

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

본 연구에 사용된 시멘트는 밀도 및 분말도가 각각 3.15g/cm<sup>3</sup>, 341m<sup>2</sup>/kg인 H사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트이며, 잔골재는 낙동강산 하천사로서 밀도 및 조립률은 각각 2.54g/cm<sup>3</sup>, 2.72이다. 굵은 골재는 최대치수가 25mm, 밀도 및 조립률이 각각 2.65g/cm<sup>3</sup>, 7.27인 낙동강산 부순돌을 이용하였다.

고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트(HPHFRC)의 유동성 조절을 위한 화학혼화제는 고강도 및 유동화 콘크리트용으로 사용되고 있는 S사의 폴리카보산계의 액상형 고성능 감수제(비중: 1.05, 고형분: 38%, Superplasticizer, SP로 약함)와 섬유의 분산과 콘크리트의 점성을 조절하기 위하여 D사의 액상 타입 저점도 증점제(비중: 1.03, Viscosity agent, VA로 약함)를 사용하였다. 공기량 조절을 위한 화학혼화제는 H사의 공기연행제(비중: 1.08, Air entraining agent, AE로 약함)를 사용하였다. 하이브리드 섬유를 구성하기 위하여 무기질 섬유로서 비정질 강섬유와 유기섬유로서 K사의 폴리아미드 섬유를 혼합·사용하였으며, 이들의 물리적 성질은 Table 1과 같다.

### 2.2 실험방법

#### 2.2.1 공시체 제작

목표 압축강도 40MPa 및 60MPa급의 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트를 제조하기 위하여 강섬유의 강섬유와 연섬유의 폴리아미드 섬유 등 재료 특성이 다른 섬유를 사용하여 콘크리트의 강도

와 연성을 증가시키는 방법을 채택하였다. 즉, 목표 압축강도 40MPa 및 60MPa 각각에 대해서 물-결합재비는 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 2와 같이 조합·사용하였다. 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축 거동을 평가하기 위하여 KS F 2403(2014)에 따라 원주형 공시체(Ø100×200mm)를 제작하였으며, 인장 거동을 평가하기 위하여 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트를 제작하여야 하나, 몰드 규격 및 시험장치의 제한으로 덩벨 형태의 고성능 하이브리드 섬유보강 모르타르(HPHFRM) 시편을 HPHFRC와 동일한 배합으로 제작하였다. 즉, HPHFRM의 물-결합재비는 각각 45%, 33%로 설정하였으며, 목표 플로값은 210±20mm, 시멘트-잔골재비는 질량비로 1:1.5, 하이브리드 섬유의 혼입율은 전체 체적비의 1.0%로 설정하였다(Table 3). 제작된 콘크리트 및 모르타르 공시체는 성형 후 24시간 경과하여 몰드를 제거한 후 시험 전까지 20±3°C의 온도로 습윤양생하였다.

#### 2.2.2 압축 변위 측정 및 압축인성 평가

고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축 거동에 대한 재료모델을 개발하기 위해서는 압축 시험시 응력-변형률 곡선을 작도하여야 하므로, Table 2와 같이 목표 압축강도(40, 60MPa)에 따른 배합비별로 JSCE-SF5(1984)에 따라 하중 단계별 변위값을 측정하였다(Fig. 1).

Fig. 2는 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축인성 및 압축인성 비에 대한 정의를 나타낸 것으로, 압축 시험시 측정된 하중-변위 데이터를 이용하여 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,  $\text{AREA}_{OABC}$  : Fig. 2의 곡선  $OABC$ 의 면적  
 $f_c$  : 압축강도

Table 1. Properties of fibers

Types	Aspect ratio	Density (g/cm <sup>3</sup> )	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

Table 2. Mix proportions of HPHFRC

Target compressive strength (MPa)	Specimens	Fiber volume fraction (%)		Target slump (mm)	Target air content (%)	W/B (%)	S/a (%)	Unit mass (kg/m <sup>3</sup> )				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	-	-	150±25	3.5±1.5	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

Table 3. Mix proportions of HPHFRM

Target compressive strength (MPa)	Specimens	Fiber volume fraction (%)		Target flow (mm)	W/B (%)	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	-	-	210±20	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

### 2.2.3 인장 변위 측정

국내외적으로 직접인장 시험에 대한 표준은 아직 제정되어 있지 않아서, 자체적으로 직접인장 시험을 수행하고 있는 실정이다. 따라서 고성능 하이브리드 섬유보강 모르타르의 인장 거동에 대한

재료모델에 사용될 응력-변형률 곡선을 작도하기 위하여 Table 3과 같이 목표 압축강도에 따른 배합비별로 Fig. 3과 같은 시험장치를 이용하여 직접인장 시험을 수행하였다. 시편은 Fig. 4와 같이 전체 길이는 350mm이고 시편을 지그에 고정시킨 후 시험에 사용



Fig. 1. Compressive displacement measurement

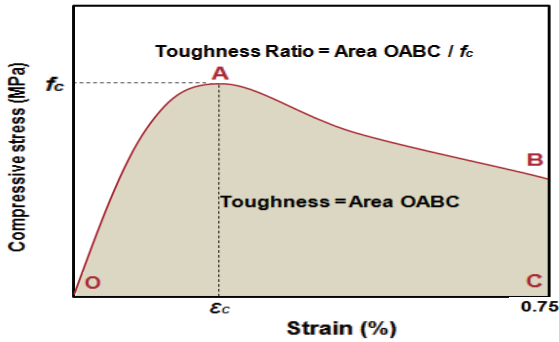


Fig. 2. Definition of compressive toughness

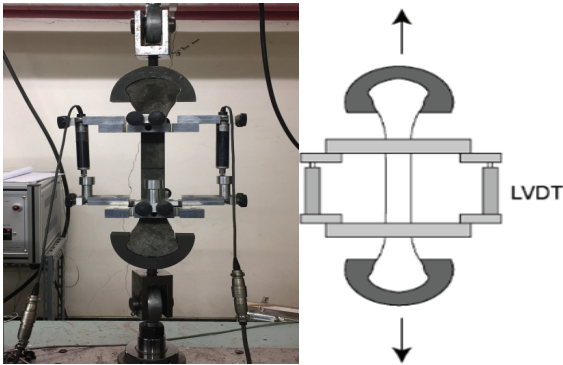


Fig. 3. Apparatus for direct tensile test

되는 길이는 150mm이며 시험체와 재하장치가 수평이 되도록 설치하였다. 이때 시험체의 중앙부에 설치된 변위계를 이용하여 시험체가 완전히 파괴될 때까지의 인장 변위를 측정하고 그 평균치를 사용하였다.



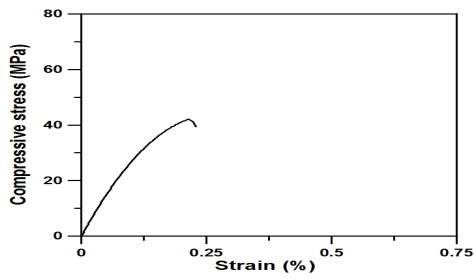
Fig. 4. Detail of specimen for direct tensile test

### 3. 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축 및 인장거동

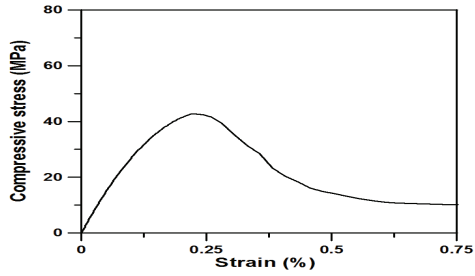
#### 3.1 압축 거동

Figs. 5 및 6은 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축 시험시 응력-변형률 곡선을 나타낸 것으로, 목표 압축강도 수준에 관계 없이 플레인 콘크리트는 최대응력 이후 취성적인 파괴를 나타내는 반면, 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 경우는 모두 최대응력 이후 변형연화(strain softening) 현상이 나타났다. 이는 섬유들의 가교역할로 인해 에너지 흡수능력이 향상되어 취성거동에서 연성거동으로 바뀐 것으로 판단된다. 또한 목표 압축강도 40MPa 및 60MPa인 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 최대응력 점에서의 변형률은 각각 Fig. 5의 (c)(ASF0.4+PAF0.6 조합), Fig. 6의 (d)(ASF0.6+PAF0.4 조합)가 가장 큰 것으로 나타났다.

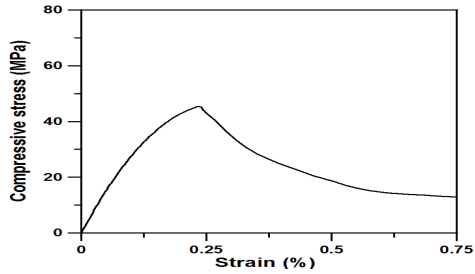
Fig. 7은 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축인성 비를 나타낸 것으로, 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축인성 비는 모두 플레인 콘크리트보다 크게 개선되는 것으로 나타났다. 즉, 목표 압축강도 40MPa의 경우 (ASF0.4+PAF0.6) 조합이 플레인 콘크리트의 2.6배, 목표 압축강도 60MPa의 경우 (ASF0.6+PAF0.4) 조합이 플레인 콘크리트의 2.9배인 것으로 나타나, 압축인성 비를 기준으로 할 때 목표 압축강도 40MPa의 경우 (ASF0.4+PAF0.6) 조합이, 목표 압축강도 60MPa의 경우 (ASF0.6+PAF0.4) 조합이 최적배합인 것으로 나타났다.



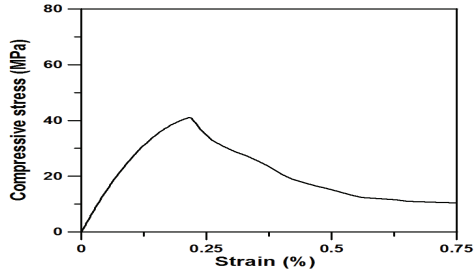
(a) Plain



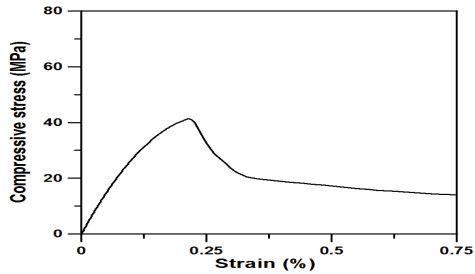
(b) ASF0.2+PAF0.8



(c) ASF0.4+PAF0.6

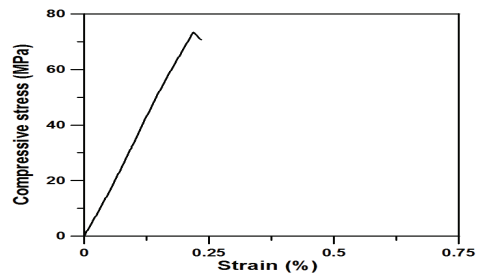


(d) ASF0.6+PAF0.4

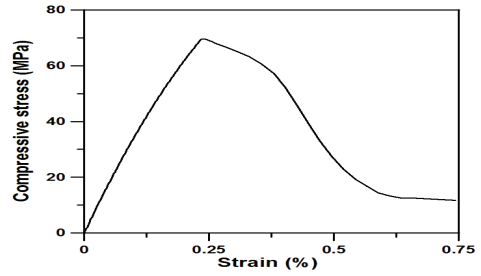


(e) ASF0.8+PAF0.2

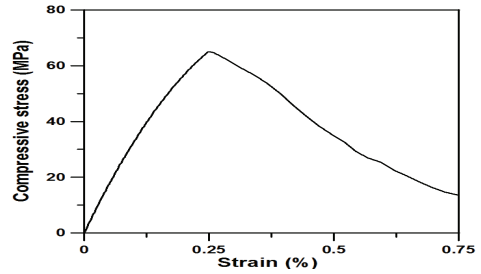
Fig. 5. Stress-strain curves of HPHFRC under compressive test(40MPa)



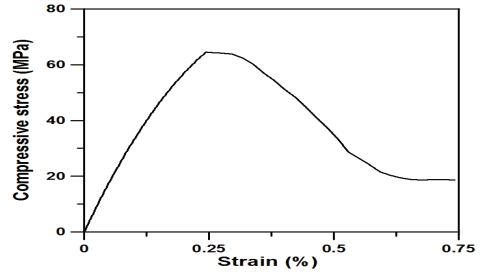
(a) Plain



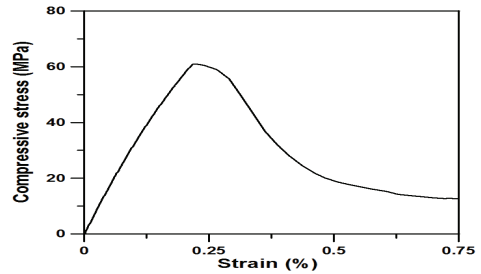
(b) ASF0.2+PAF0.8



(c) ASF0.4+PAF0.6



(d) ASF0.6+PAF0.4



(e) ASF0.8+PAF0.2

Fig. 6. Stress-strain curves of HPHFRC under compressive test(60MPa)

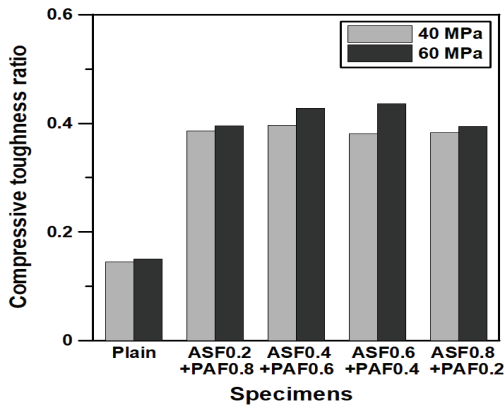


Fig. 7. Compressive toughness ratio of HPHFRC

### 3.2 인장 거동

Figs. 8 및 9는 고성능 하이브리드 섬유보강 모르타르의 인장 시험시 응력-변형률 곡선을 나타낸 것으로, 목표 압축강도 수준에 관계 없이 플레인 모르타르는 최대응력 이후 취성파괴를 보이는 반면, 고성능 하이브리드 섬유보강 모르타르는 압축 거동에서와 마찬가지로 최대응력 이후 응력 상승구간 없이 변형연화 현상을 나타냈다.

직접인장 시험시 시편이 완전히 파손될 때까지의 고성능 하이브리드 섬유보강 모르타르의 최대변형률은 목표 압축강도 40MPa 및 60MPa의 경우 각각 0.71~0.83%, 0.81~0.96%로 나타났는데, 강도수준이 높을수록 최대변형률이 큰 것은 모르타르 매트릭스와 섬유 사이의 부착특성이 개선되기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 8~9, Kwon et al. 2020). 이는 섬유들의 가교역할로 인해 에너지 흡수능력이 향상되어 취성거동에서 연성거동으로 바뀐 것으로 판단된다.

고성능 하이브리드 섬유보강 모르타르의 직접인장강도는 모두 플레인 모르타르보다 큰 것으로 나타났으며, 목표 압축강도 40MPa의 경우(ASF0.4+PAF0.6) 조합이 플레인 모르타르의 110%, 목표 압축강도 60MPa의 경우(ASF0.6+PAF0.4) 조합이 플레인 모르타르의 114%로, 가장 큰 것으로 나타났다(Fig. 8~9, Kwon et al. 2020). 고성능 하이브리드 섬유보강 모르타르의 최대 인장변형률은 거의 유사하므로, 직접인장강도를 기준으로 할 때 목표 압축강도 40MPa의 경우(ASF0.4+PAF0.6) 조합이, 목표 압축강도 60MPa의 경우(ASF0.6+PAF0.4) 조합이 최적배합인 것으로 나타났다(Fig. 8~9).

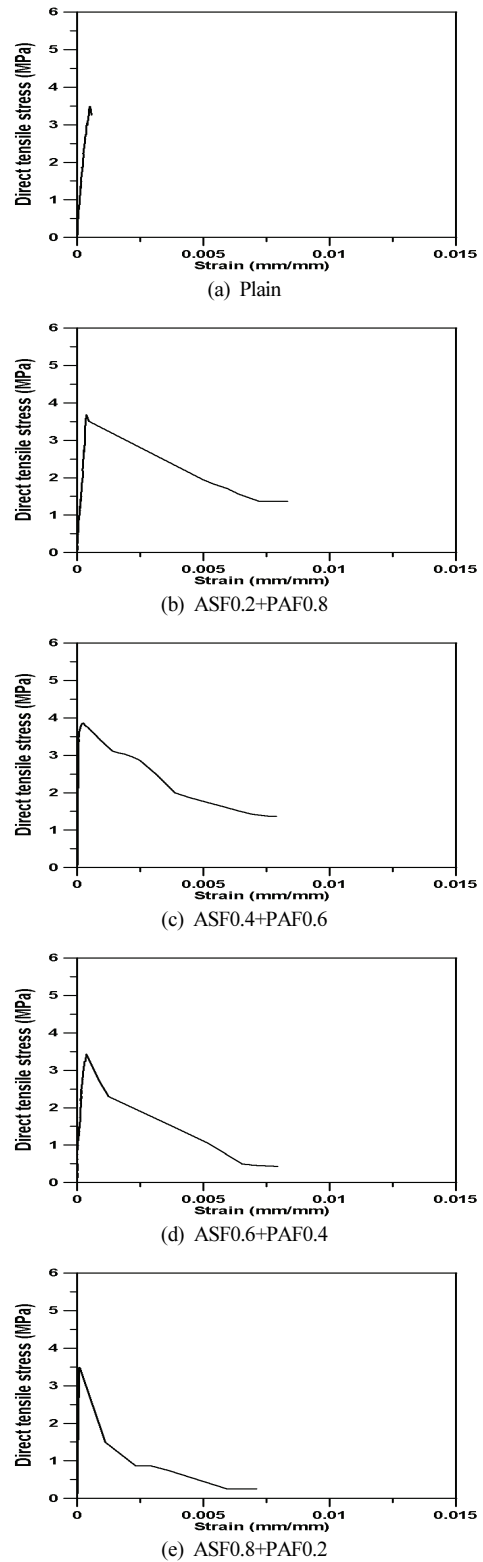


Fig. 8. Stress-strain curves of HPHFRM under direct tensile test(40MPa)

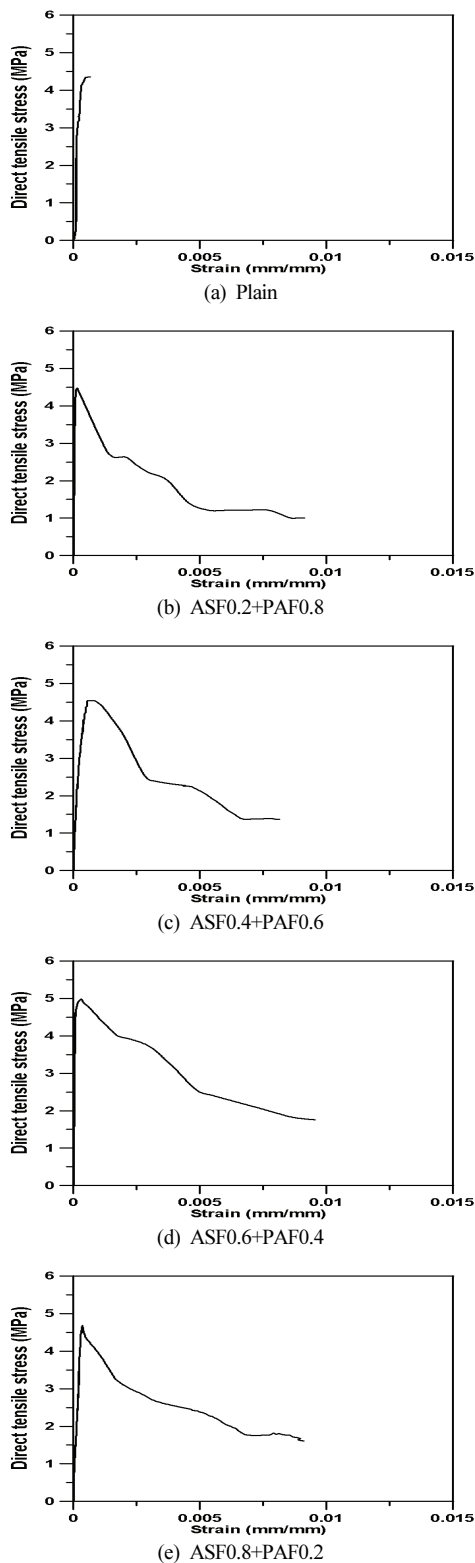


Fig. 9. Stress-strain curves of HPHFRM under direct tensile test(60MPa)

## 4. 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 재료모델

### 4.1 기존의 재료모델

1990년 이후 많은 연구자들은 콘크리트의 압축 및 인장 시 응력-변형률 관계를 나타내기 위한 다양한 재료모델을 제안하였다. 관련 연구자들은 콘크리트의 비선형 거동을 표현하기 위하여 응력-변형률 곡선을 직선, 포물선·쌍곡선·타원 등의 곡선, 직선과 포물선의 조합 및 사인(sine) 곡선과 포물선의 조합 등의 복합 형태로 묘사하였으며, 최근에는 지수함수의 형태로 제안하였다.

콘크리트의 압축 거동 모델로, Eurocode2 모델(CEN 2004), Kim and Lee(1993)의 모델, Carreira and Chu(1985)의 모델, Ahmad and Shah(1982)의 모델, Martinez et al.(1982)의 모델, Scott et al.(1982)의 모델 및 Desayi and Krishnan(1964)의 모델 등이 제안되었는데, 상승부는 포물선, 하강부는 직선 또는 포물선 형태 등으로 표현하였다.

한편, 콘크리트의 인장 거동 모델로 Parente et al.(2014), Jeng and Hsu(2009)의 모델, Reinhardt(1984) 모델, Scott et al.(1982)의 모델 및 Grelat(1978) 모델 등이 제안되었는데, 상승부는 직선, 하강부는 직선이나 포물선 또는 지수함수 형태 등으로 표현하였다.

### 4.2 재료모델 개발

Tables 2 및 3에서 목표 압축강도별로 모든 경우의 섬유 조합을 포괄하는, 압축 거동 및 인장 거동 각각에 대한 재료모델 개발은 불가능하고, 또한 그 재료모델은 개발되어도 큰 의미가 없을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 Tables 2 및 3에서 압축 거동 및 인장 거동 평가로부터 도출된 최적배합비(목표 압축강도 40MPa: ASF0.4+PAF0.6 조합, 목표 압축강도 60MPa: ASF0.6+PAF0.4 조합)에 대해서 재령 28일 기준의 실험결과를 토대로 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축 거동 및 인장 거동과 고성능 하이브리드 섬유보강 모르타르의 인장 거동에 대한 재료모델을 제시하고자 한다.

#### 4.2.1 압축거동에 대한 재료모델

콘크리트는 압축응력에 대해서는 큰 저항능력을 갖는 반면 인장응력에 대해서는 취약한 재료이므로, 이러한 재료성질을 묘사하기 위해서는 압축 거동과 인장 거동에서 각기 다른 응력-변형률 관계를 정의할 필요가 있다. 즉, 콘크리트의 압축 거동에 대한 응력-변형률 관계를 정의하는 모델로는 2차 포물선 모델로부터 선

형 직선 모델에 이르기까지 다양한 모델이 존재하는데, 이들 중 본 논문에서는 콘크리트 구조물의 수치해석에서 널리 사용되고 있는 Kent and Park(1971)가 제안하고 Scott et al.(1982)이 수정한 응력-변형률 관계를 바탕으로, 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축 거동에 대한 재료모델을 제안하였다.

즉, Fig. 10과 같이 응력-변형률 관계를 상승부, 하강부 및 수렴부 등 총 3구간으로 나누어서 식 (3)~(6)과 같이 제안하였다.

①  $\epsilon_c < \epsilon_0$

③ 목표 압축강도: 40MPa(ASF0.4+PAF0.6) :

$$f_c = f'_c [1.7(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0}) - 0.7(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0})^2] \quad (R^2 = 1) \quad (3)$$

여기서,  $\epsilon_0 = 0.00235$

④ 목표 압축강도: 60MPa(ASF0.6+PAF0.4) :

$$f_c = f'_c [1.37(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0}) - 0.4(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0})^2] \quad (R^2 = 1) \quad (4)$$

여기서,  $\epsilon_0 = 0.00245$

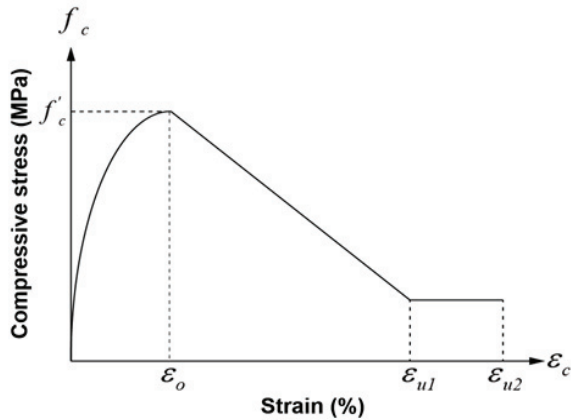


Fig. 10. Proposed model of compressive stress-strain curve

②  $\epsilon_0 < \epsilon_c < \epsilon_{u1}$

$$f_c = f'_c [1 - Z(\epsilon_c - \epsilon_0)] \quad (5)$$

여기서,  $Z = \frac{0.7}{(\epsilon_{u1} - \epsilon_0)}$

③ 목표 압축강도 40MPa(ASF0.4+PAF0.6) :

$$\epsilon_{u1} = 0.0045 \quad (R^2 = 0.91)$$

④ 목표 압축강도 60MPa(ASF0.6+PAF0.4) :

$$\epsilon_{u1} = 0.006 \quad (R^2 = 0.92)$$

③  $\epsilon_{u1} < \epsilon_c < \epsilon_{u2}$

$$f_c = 0.3f'_c \quad (6)$$

여기서,  $\epsilon_{u2} = 0.0075$

상기 식 (3)~(6)에서  $f'_c$ 는 HPHFRC의 압축강도(MPa),  $\epsilon_0$ 는 HPHFRC의 압축강도 도달시 변형률,  $\epsilon_{u1}$ 은 HPHFRC의 소성 거동 후 최소 압축강도 도달시 변형률,  $\epsilon_{u2}$ 는 HPHFRC의 극한 압축변형률이다.

#### 4.2.2 인장 거동에 대한 재료모델

고성능 하이브리드 섬유보강 모르타르의 인장 거동에 대한 응력-변형률 관계는 균열 발생 이후의 거동은 변형연화를 고려하여 적절한 기울기를 부여한 단순한 곡선형태로, 하중 증가에 따른 미세균열의 발달을 묘사하도록 설정하였다(Fig. 11). 인장 거동에 대한 재료모델은 Jeng and Hsu(2009)의 모델, Jofriet and McNeice(1971)가 제안한 모델을 바탕으로 인장강도( $f'_t$ )까지는 선형 거동으로 가정하였으며, 이후 2구간으로 나누어서 식 (7)~(9)와 같이 재료모델을 제안하였다.

①  $\epsilon_t < \epsilon_{cr}$

$$f_t = E_c \epsilon_t \quad (7)$$

②  $\epsilon_{cr} < \epsilon_t$

i) 목표 압축강도 40MPa(ASF0.4+PAF0.6) :

$$f_t = f'_t e^{[150(\epsilon_{cr} - \epsilon_t)]} \quad (8)$$

여기서,  $\epsilon_{cr} = 0.00025$

$$\epsilon_{ct} = 0.00785$$

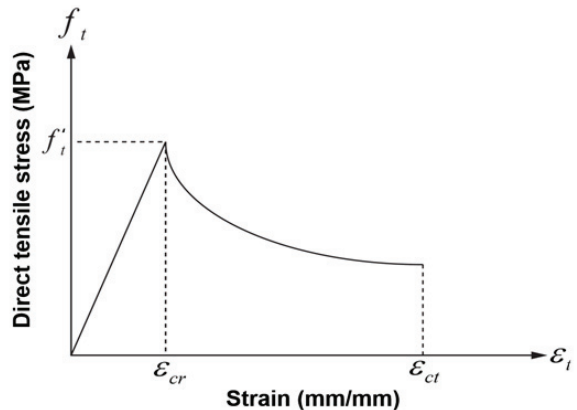


Fig. 11. Proposed model of tensile stress-strain curve



ii) 목표 압축강도 60MPa(ASF0.6+PAF0.4) :

$$f_t = f_t' e^{[124(\epsilon_{cr} - \epsilon_d)]} \quad (9)$$

여기서,  $\epsilon_{cr} = 0.00030$

$\epsilon_d = 0.00957$

상기 식 (7)~(9)에서  $f_t$ 는 HPHFRM의 인장강도(MPa),  $\epsilon_{cr}$ 은 HPHFRM의 인장강도 도달시 변형률,  $\epsilon_d$ 는 HPHFRM의 극한 인장 변형률이 존재하지 않는 상태에서의 인장변형률이다.

### 4.3 제안된 재료모델의 검증

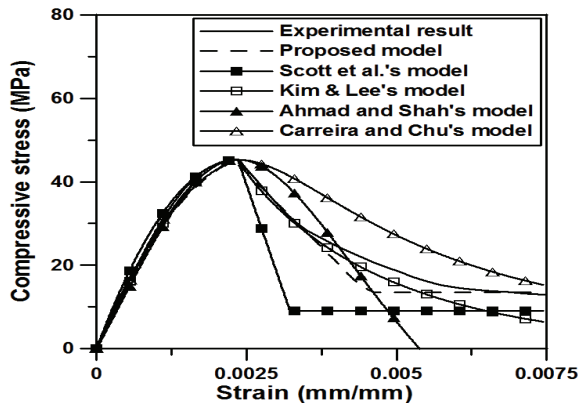
HPHFRC의 압축 거동과 HPHFRM의 인장 거동 평가 결과를 근거로 제안된 재료모델의 신뢰성을 검증하기 위하여 제안된 재료모델을 실험결과 및 기존의 재료모델들과 비교하였다.

Figs. 12 및 13은 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트 및 모르타르의 실험값과 제안한 재료모델 및 기존의 재료모델들과 비교한

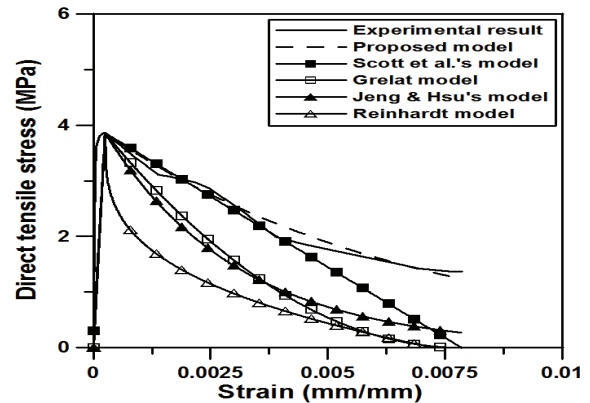
것으로, 기존 재료모델의 압축 거동은 Scott et al.(1982)의 모델, Kim과 Lee의 모델(1993), Ahmad와 Shah의 모델(1982), Carreira and Chu(1985)의 모델을, 인장 거동은 Scott et al.(1982)의 모델, Grelat(1978) 모델, Jeng and Hsu(2009)의 모델, Reinhardt(1984) 모델을 사용하였다.

실험값과 제안한 재료모델을 비교해 보면 압축과 인장 거동 모두 상승부에서는 비교적 좋은 상관관계를 보이나, 최대응력 이후 하강부에서는 다소의 차이가 있는 것으로 나타났다. 전반적으로 실험값과 제안 모델은 잘 일치하는 것으로 나타났으나, 제안된 모델의 경우, 응력-변형률 관계를 단순화된 직선 또는 곡선으로 표현하였기 때문에 응력-변형률 곡선의 하강부는 어느 정도 오차가 나타난 것으로 판단된다.

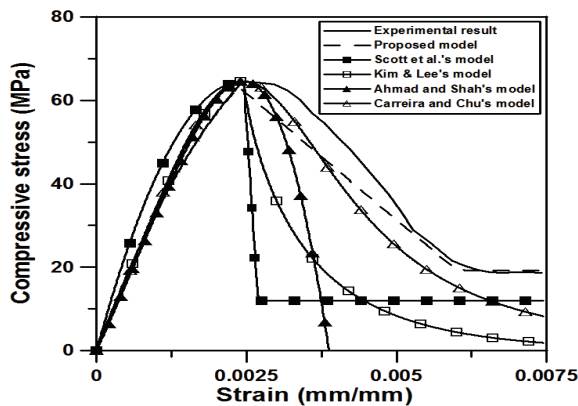
실험값과 기존의 재료모델을 비교해 보면 제안한 재료모델과 마찬가지로 압축과 인장 거동의 상승부에서는 좋은 상관관계를 보이나, 최대응력 이후 하강부에서는 많은 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 공시체의 형상과 크기, 실험조건, 변위제어 방법 및



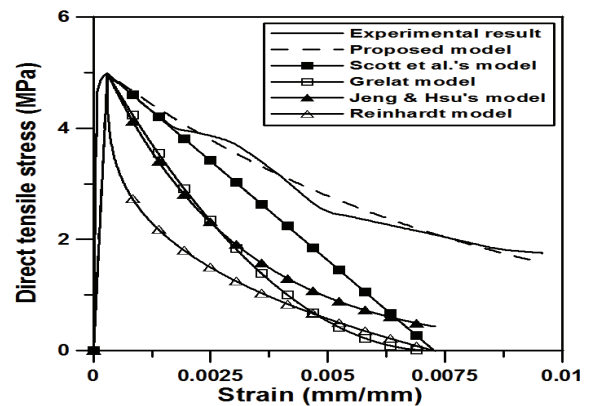
(a) Target compressive strength: 40MPa



(a) Target compressive strength: 40MPa



(b) Target compressive strength: 60MPa



(b) Target compressive strength: 60MPa

Fig. 12. Compressive behavior of HFRC

Fig. 13. Tensile behavior of HFRC

적용대상 등이 재료모델마다 다르기 때문에 판단된다. 또한, 기존의 재료모델로 구한 압축 및 인장 거동의 하강부는 곡선의 형상과 기울기가 재료모델마다 큰 차이를 보이며, 대체적으로 기존의 모델에서의 인성은 실험값보다 작게 평가되는 것으로 나타났다.

한편, 압축 거동의 경우 목표 압축강도 40MPa 수준은 Kim and Lee(1993)의 모델, 목표 압축강도 60MPa 수준은 Carreira and Chu(1985)의 모델이 실험값과 가장 잘 맞는 것으로 나타났으며, 인장 거동은 두 강도 수준 모두 Scott et al.(1982)의 모델이 실험값과 유사한 것으로 나타났다. 그러나 재료모델을 제안한 연구자마다 콘크리트 배합비, 공시체의 형상과 크기, 실험조건 및 변위제어 방법 등이 다르므로 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 일반화된 재료모델 개발은 향후 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

비정질 강섬유와 폴리아미드 섬유를 이용한 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트 및 모르타르의 압축, 인장 거동을 평가하고, 실험결과를 토대로 압축 및 인장 거동의 재료모델을 제안한 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축인성 비는 목표 압축강도 및 섬유조합에 관계 없이 플레인 콘크리트 보다 크게 개선되는 것으로 나타났다. 즉, 목표 압축강도 40MPa의 경우 ASF0.4+PAF0.6 조합이 플레인 콘크리트의 2.6배, 목표 압축강도 60MPa의 경우 ASF0.6+PAF0.4 조합이 플레인 콘크리트의 2.9배인 것으로 나타나, 압축인성 비를 기준으로 할 때 목표 압축강도 40MPa의 경우 ASF0.4+PAF0.6 조합이, 목표 압축강도 60MPa의 경우 ASF0.6+PAF0.4 조합이 최적배합인 것으로 나타났다.
- 2) 고성능 하이브리드 섬유보강 모르타르의 직접인장강도는 목표 압축강도 및 섬유조합에 관계 없이 플레인 모르타르 보다 큰 것으로 나타났으며, 목표 압축강도 40MPa의 경우 ASF0.4+PAF0.6 조합이 플레인 모르타르의 110%, 목표 압축강도 60MPa의 경우 ASF0.6+PAF0.4 조합이 플레인 모르타르의 114%로, 가장 큰 것으로 나타났다. 고성능 하이브리드 섬유보강 모르타르의 최대 인장변형률은 거의 유사하므로, 직접인장강도를 기준으로 할 때 목표 압축강도 40MPa의 경우 ASF0.4+PAF0.6 조합이, 목표 압축강도 60MPa의 경우 ASF0.6+PAF0.4 조합이 최적배합인 것으로 나타났다.

- 3) 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 최적배합(목표 압축강도 40MPa: ASF0.4+PAF0.6 조합, 목표 압축강도 60MPa: ASF0.6+PAF0.4 조합)에 대해서 재령 28일 기준의 실험결과를 토대로 압축 및 인장거동에 대한 재료모델을 제시하였으며, 전반적으로 실험값과 제안 모델은 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 재료모델을 제안한 연구자마다 콘크리트 배합비, 공시체의 형상과 크기, 실험조건 및 변위제어 방법 등이 다르므로 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 일반화된 재료모델 개발은 향후 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.

## Conflicts of interest

None.

## 감사의 글

이 논문은 2018학년도 안동대학교 해외파견연구보조금에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

ACI Committee 544, (1984). Fiber Reinforced Concrete, USA, Ditorit: American Concrete Institute, No. SP-81.

Ahmad, S.H., Shah, S.P. (1982). Stress-strain curve of concrete confined by spiral reinforcement, *Journal of ACI*, **79(6)**, 484-490.

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.

Carreira, D.J., Chu, K.H. (1985). Stress-strain relationship for plain concrete in compression, *Journal of ACI*, **82(6)**, 797-804.

CEN(European Committee for Standardization). (2004). Design of concrete structures part 1-1, Eurocode2.

Desayi, P., Krishnan, S. (1964). Equation for the stress-strain curve of concrete, *Journal of ACI*, **61(3)**, 345-350.

Grelat, A. (1978). Nonlinear Analysis of Hyperstatic Reinforced Concrete Frames, Ph.D Thesis, University Paris VI.

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].

Jeng, C.H., Hsu, T.T. (2009). A softened membrane model for

- torsion in reinforced concrete members, Engineering Structures, **31(9)**, 1944–1954.
- Jofriet, J.C., McNeice, G.M. (1971). Finite element analysis of reinforced concrete slabs, ASCE Journal of the Structural Division, **97(3)**, 785–806.
- JSCE–SF5, (1984). Method of Test for Compressive Strength and Compressive Toughness of Steel Fibre–Reinforced Concrete, Concrete Library of JSCE.
- Kent, D.C., Park, R. (1971). Flexural members with confined concrete, ASCE Journal of the Structural Division, **97(8)**, 1969–1990.
- Kim, J.K., Lee, T.G. (1993). Failure behavior of reinforced concrete frames by the combined layered and nonlayered method, Computers and Structures, **48(5)**, 819–825.
- KS F 2403, (2014). Standard Test Method for Making and Curing Concrete Specimens, KS Standard, Korea [in Korean].
- Ku, D.O., Kim, S.D., Kim, H.S., Choi, K.K. (2014). Flexural performance characteristics of amorphous steel fiber–reinforced concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, **26(4)**, 483–489 [in Korean].
- Kwon, S.O., Bae, S.H., Lee, H.J. (2020) Compressive and tensile behaviors of high performance hybrid fiber reinforced concrete, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **8(4)**, 458–466 [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.
- Lawler, J.S. (2001). Hybrid Fiber Reinforcement in Mortar and Concrete, Ph.D Thesis, Department of Civil Engineering, Northwestern University, USA.
- Martinez, S., Nilson, A.H., Slate, F.O. (1982). Spirally–Reinforced High–Strength Concrete Columns, Research Report No. 82–10, Department Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, New York, 255.
- 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].
- Nataraja, M.C., Dhang, N., Gupta, A.P. (1999). Stress–strain curves for steel–fiber reinforced concrete under compression, Cement and Concrete Composites, **21(5–6)**, 383–390.
- Parente, J.E., Nogueira, G.V., Meireles, N.M., Moreira, L.S. (2014). Material and geometric nonlinear analysis of reinforced concrete frames, Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, **7(5)**, 879–904.
- Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L. (2004). Compressive behavior of fiber reinforced high–performance concrete subjected to elevated temperatures, Cement and Concrete Research, **34(12)**, 2215–2222.
- Reinhardt, H.W. (1984). Fracture mechanics of an elastic softening material like concrete, HERON, **29(2)**, 1–37.
- Scott, B.D., Park, R., Priestley, M.J.N. (1982). Stress–strain behavior of concrete confined overlapping hoops at low and high strain rates, Journal of ACI, **79(1)**, 13–27.
- Song, P.S., Hwang, S. (2004). Mechanical properties of high–strength steel fiber–reinforced concrete, Construction and Building Materials, **18(9)**, 669–673.
- Won, J.P., Hwang, K.S., Park, C.G. (2005). Mechanical and early shrinkage crack of hydrophilic PVA fiber reinforced concrete with fiber volume fraction and fiber length, Journal of the Korean Society of Civil Engineers A **25(1A)**, 134–141 [in Korean].
- Yang, K.H. (2010). Slump and mechanical properties of hybrid steel–PVA fiber reinforced concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, **22(5)**, 651–658 [in Korean].

### 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축 및 인장 거동에 대한 재료모델

콘크리트의 낮은 인장강도와 취성적인 특성 등의 약한 재료 특성을 개선하기 위하여 수년간 하이브리드 섬유보강 콘크리트에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 비정질 강섬유와 유기섬유를 이용한 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 특성에 관한 연구는 미진한 실정이다. 본 논문의 목적은 비정질 강섬유와 폴리아미드 섬유를 이용한 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축 및 인장 거동을 평가한 후 이들에 대한 재료모델을 제안하는 것이다. 이를 위하여 목표 압축강도 40MPa 및 60MPa 각각에 대해서 비정질 강섬유와 폴리아미드 섬유를 총 부피비 1.0%로 설정하여 섬유 조합별로 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트를 제작한 후, 압축 거동 및 인장 거동을 평가하였다. 고성능 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 실험결과를 바탕으로 압축 및 인장 거동에 대한 재료모델을 제안하였으며, 제안한 모델은 실험결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.