



비정질 강섬유보강콘크리트의 휨성능 특성

구동오¹⁾ · 김선두¹⁾ · 김희승¹⁾ · 최경규^{1)*}

¹⁾승실대학교 건축학부

Flexural Performance Characteristics of Amorphous Steel Fiber-Reinforced Concrete

Dong-Oh Ku,¹⁾ Seon-Du Kim,¹⁾ Hee-Seung Kim,¹⁾ and Kyoung-Kyu Choi^{1)*}

¹⁾School of Architecture, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

ABSTRACT In this study, the flexural test of amorphous steel fiber-reinforced concrete was performed according to ASTM C 1609 to investigate its flexural performances. The amorphous steel fibers have different configurations from conventional steel fibers : thinner sections and coarser surfaces. Primary test parameters are fiber type (amorphous and conventional steel fibers), concrete compressive strength (27 and 50 MPa), and fiber volume fraction (0.25, 0.50, and 0.75%). Based on the test results, flexural strength and flexural toughness of the amorphous and conventional steel fiber-reinforced concrete were investigated. The results showed that the addition of the amorphous steel fibers into concrete could enhance both flexural strength and toughness while the addition of the conventional steel fibers into concrete was mainly effective to increase the flexural toughness.

Keywords : amorphous steel fibers, fiber-reinforced concrete, flexural behavior, flexural strength, flexural toughness index

1. 서 론

콘크리트 재료의 취성적 인장 거동을 개선하고 에너지 소산능력을 향상시키기 위하여 섬유보강콘크리트가 사용되고 있다.¹⁻⁸⁾ 1960년대부터 강섬유가 개발되어 1971년 미국 Ohio주의 트럭터미널에 최초로 시공되었고, 그 이후에 계속해서 공항도로 포장공사,⁹⁾ 공업 바닥공사,¹⁰⁾ 교면 포장공사¹¹⁾ 등 건축·토목 분야에서 널리 사용되고 있다.

Naaman¹²⁾의 연구에 의하면 강섬유보강콘크리트는 무근 콘크리트에 비하여 인장강도 및 휨강도, 휨인성, 내충격성, 파괴에너지가 우수하며, 이러한 인장성능의 개선 정도는 섬유의 직경(d_f)과 길이(L_f)의 비율인 형상비(L_f/d_f)와 섬유 혼입률(V_f), 섬유의 부착력(τ)에 큰 영향을 받는 것으로 밝혀졌다. 따라서 이러한 재료변수 설계를 통하여 휨강도 및 휨인성, 에너지 흡수능력을 크게 향상시킬 수 있으며,¹³⁻¹⁶⁾ 또한 구조물에 발생하는 균열을 제어할 수 있다.^{17,18)} 그러나 섬유 혼입률 0.75% 이상의 다량의 강섬유를 콘크리트에 투입시 강섬유의 높은 강성으로 인해 섬유끼리 뭉치는 섬유볼 현상(fiber balling)이 발생할

수 있으며,¹⁹⁾ 이러한 현상은 콘크리트의 시공성을 저하시키고 재료의 성능을 예기치 않게 저하시키는 문제점으로 지적되고 있다.²⁰⁾

최근 강섬유 이외에 폴리비닐알콜(PVA) 섬유, 폴리프로필렌(PP) 섬유, 나일론 섬유 등 다양한 섬유가 개발되어 사용되고 있다. 이들 섬유는 기존의 강섬유에 비하여 섬유의 두께가 매우 가늘며 콘크리트 균열단면에서 가교작용을 통하여 콘크리트 균열 진전을 억제하고 균열폭을 감소시키는 것으로 알려져 있다.^{21,22)} 또한 최근에 개발된 비정질 강섬유는 콘크리트와의 부착력이 우수하여 균열 제어에 효율적이며, 일반 강섬유와 혼합하여 사용하였을 경우 강도와 인성을 동시에 향상시킬 수 있음이 밝혀졌다.²³⁾

선행연구에²⁴⁾ 의하면, 비정질 강섬유는 일반 강섬유와 달리 분자의 결정 구조에서 방향성에 따른 강도 차이가 거의 없고 인장강도 및 휨강도가 우수하여 콘크리트의 취성적 인장파괴와 건조수축에 의한 미세균열을 효과적으로 방지할 수 있으며, 섬유 혼입율에 따라 콘크리트의 휨거동이 매우 뚜렷하게 향상되는 것을 보여주었다.²⁵⁾ 또한 두께가 얇으므로 동일한 섬유 혼입률에서 기존의 강섬유 보다 투입되는 섬유 개수가 많으며, 섬유의 단위표면적이 넓어서 시멘트페이스트와의 부착성과 균열 저항성이 우수하다. 또한 섬유볼 현상이 개선되어 시공성이 우수하다.

*Corresponding author E-mail : kkchoi@ssu.ac.kr

Received March 7, 2014, Revised May 12, 2014,

Accepted May 12, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

이 연구에서는 비정질 강섬유의 휨 특성을 파악하기 위하여, ASTM C 1609²⁶⁾ 표준시험방법에 따라서 휨시험을 수행하였고 실험 결과에 근거하여 휨강도와 휨인성지수를 분석하였다.

2. 실험 계획

2.1 실험재료

이 실험에서 사용한 콘크리트의 압축강도는 27 MPa와 50 MPa 두 종류이다. 배합에 적용한 시멘트는 Type 1 포틀랜드 시멘트이고 잔골재는 강모래를 사용하였으며, 구체적인 콘크리트 배합은 Table 1에 제시되어 있다. 굵은골재 최대크기는 표준 휨시험체의 크기를 고려하여 13 mm로 결정하였다.²⁷⁾ 또한 섬유 혼입시 무보강 콘크리트의 배합보다 슬럼프가 작은 문제점을 막고 타설 작업에서 적절한 워커빌리티를 확보하기 위하여 고성능 감수제를 사용하였다.

콘크리트의 비빔시 강제식 믹서기가 사용되었으며, 비빔방법과 비빔시간은 콘크리트 표준시방서²⁸⁾와 KS시험법²⁹⁾에 따라 결정되었다. 개량된 잔골재, 굵은골재, 시멘트를 순서대로 넣고 1분 동안 건비빔하였고, 그 뒤 골재의 혼합이 잘 되었는지 확인한 후 섬유를 투입하고 1분 30초 동안 2차 건비빔을 실시하였다. 2차 건비빔 후에 섬유의 고른 분포를 재확인한 후 물을 넣고 2분 동안 비빔하였고, 마지막으로 비빔 상태 및 배합의 질기를 확인한 후 고성능 감수제를 소량의 물과 함께 투입하였다.

이 실험에서 사용한 비정질 강섬유는 일반적인 강섬유와 섬유두께 및 모양에서 큰 차이를 갖고 있다. Fig. 1(a)와 같이 일반 강섬유에는 콘크리트와의 부착력을 증가시키기 위하여 단부에 후크(Hook)가 있는 반면, 비정질 강섬유는 후크가 없는 일자 형태이며 일반 강섬유와 다른

폭과 두께를 갖는 사각형 단면을 가지고 있다(Fig. 1(c)). 이 연구에서 사용한 일반 강섬유는 지름 0.5 mm(d), 길이 30 mm(L)로 형상비(L/d)는 60이며, 비정질 강섬유는 두께가 29 μm (t), 길이 30 mm이며 등가형상비²⁴⁾가 123의 특징을 가지고 있다(Table 2).

Fig. 2는 섬유 표면에 대한 SEM(Scanning electron microscopy)사진으로서, 일반 강섬유는 매끈한 표면을 가짐에 반해 비정질 강섬유는 거친 표면을 가지고 있다. 이런 비정질 강섬유의 거친 표면은 콘크리트 표면과 섬유의 부착력을 증가시키는 효과가 있어 일반 강섬유에 비하여 우수한 부착 성능을 발휘할 것으로 기대된다. 또한 두께가 29 μm 로 매우 얇으므로 콘크리트와 배합시 잘 휘고 분산력이 우수하여 섬유불 현상을 개선하는 것으로 나타났다³⁰⁾.

2.2 휨시험

이 연구에서는 비정질 강섬유보강콘크리트의 휨 성능을 평가하기 위하여, ASTM C 1609 표준에 따라서 100 × 100 × 400 mm의 직육면체 형태의 실험체를 제작하여 휨시험을 수행하였다. Fig. 3과 같이 원형단면을 가진 강재롤러 위에 실험체를 설치하여 만능시험기(UTM)로 4점 가력 하였다. 0.05 mm/min의 가력속도로 변위제어 방식으로 가력 하였으며, 시험체 중앙부에 변위계(LVDT) 2개를 장착한 측정 프레임을 설치하여 변위를 측정하였고, 100 kN 성능의 로드셀을 이용하여 하중을 측정하였다.

실험의 주요변수는 섬유종류(비정질 강섬유, 일반 강섬유)와 섬유 혼입률(0.25, 0.50, 0.75%), 콘크리트 압축강도(27, 50 MPa)이다 (Table 3). 단, 비교목적에서 일반 강

Table 1 Concrete mix proportions

f_{ck} (MPa)	W/C (%)	S/a (%)	Unit content (kg/m ³)				
			Water	Cement	Fine agg.	Coarse agg.	Admix- tures
27	50	45.9	178	356	764	897	1.7
50	35	44.7	236	675	592	733	2.4

Table 2 Material properties of fibers

Type	Amorphous Steel fibers	Steel fibers
Elastic modulus (MPa)	14×10 ⁴	20×10 ⁴
Specific gravity	7.2	7.85
Fiber thickness (μm)	29	500
Fiber length (mm)	30	30
Aspect ratio	123	60
Shape	Linear	Hooked

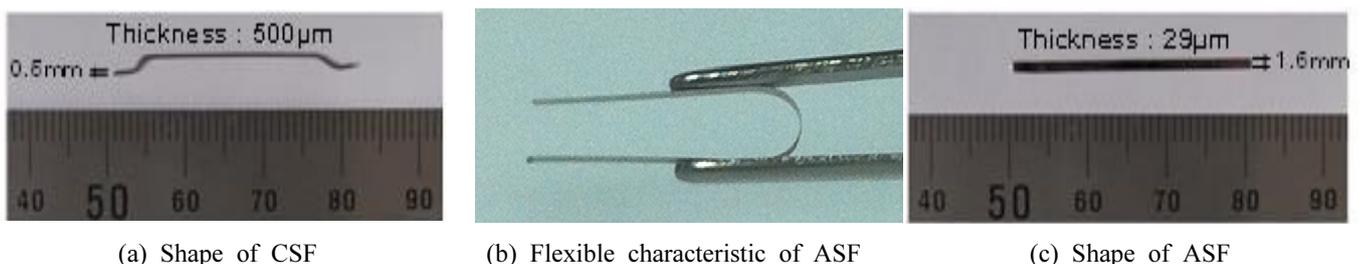
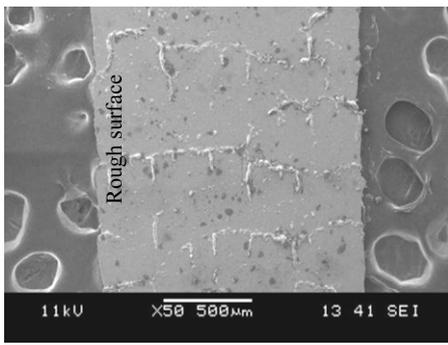
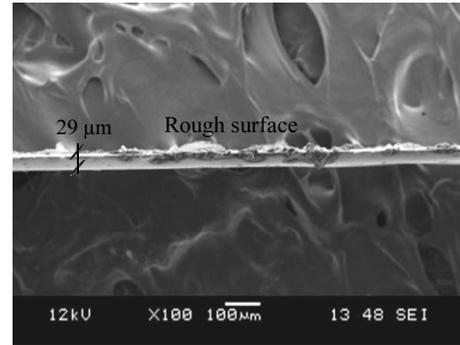


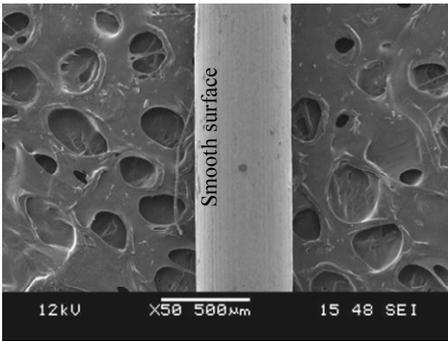
Fig. 1 Geometric characteristics of fibers used in test



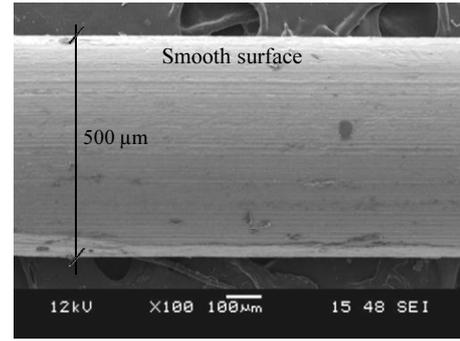
(a) ASF (SEM × 50)



(b) ASF (SEM × 50)



(c) CSF (SEM × 50)



(d) CSF (SEM × 100)

Fig. 2 Photos of amorphous steel and conventional steel fibers by scanning electron microscope

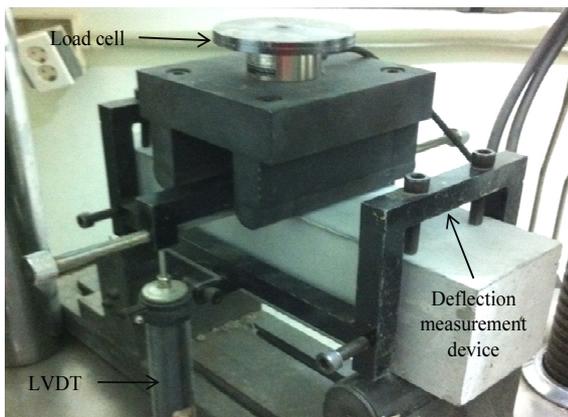


Fig. 3 Test setup of flexural test according to ASTM C 1609

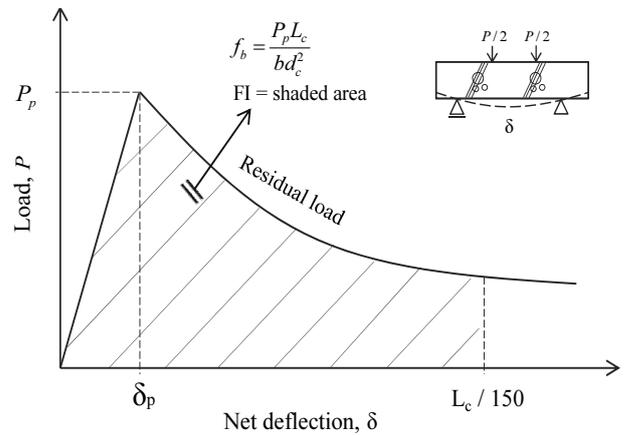


Fig. 4 Evaluation of flexural strength and flexural toughness according to ASTM C 1609

Table 3 Properties of test specimens

Specimens	Fiber type	Concrete compressive strength (MPa)	Volume fraction (%)	Number of specimens
Plain 27	-	27	-	5
Plain 50	-	50	-	3
ASF 27-25	Amorphous	27	0.25	5
ASF 27-50			0.50	5
ASF 27-75			0.75	5
ASF 50-25	Steel Fibers	50	0.25	5
ASF 50-50			0.50	5
ASF 50-75			0.75	5
CSF 27-25	Steel Fibers	27	0.25	5
CSF 27-75			0.75	5

섬유의 섬유혼입율은 0.25, 0.75%로 사용하였다. 실험 결과의 신뢰성을 위하여 변수 당 5개의 실험체를 제작하였다.

휨성능 평가를 위하여 식 (1)과 같이 ASTM C 1609 표준을 따라서 휨강도를 산정하였다(Fig. 4).

$$f_b = \frac{P_p L_c}{b d_c^2} \quad (1)$$

여기서, P_p 는 실험에서 측정된 최대 하중, L_c 는 지간거리 (300 mm), b 는 실험체의 너비(100 mm), d_c 는 실험체의 높이(100 mm)이다. 또한 비정질 강섬유보강콘크리트의 에너지 소산능력을 평가하기 위하여 ASTM C 1609에서 제

시하는 휨인성지수를 사용하였다. 휨인성지수는 실험에서 얻은 하중-처짐 곡선에서 시간거리 $1/150$, 처짐 $L_c/150$ 까지의 면적으로 정의된다.

3. 실험 결과

3.1 휨거동

Fig. 5는 섬유종류에 따른 하중-처짐 관계를 보여주고 있다. 무보강 콘크리트와 일반 강섬유보강콘크리트(0.75% 부피비)는 균열이 발생하는 순간 최대강도에 도달하였으며, 비정질 강섬유보강콘크리트(0.75% 부피비)는 균열발생 이후에 하중이 계속 증가한 후에 최대강도에 도달하였다.

무보강 콘크리트는 최대강도에 도달한 이후 급격히 강도가 저감되었으나 일반 강섬유보강콘크리트는 무보강 콘크리트에 비하여 최대강도는 증가하지 않으며 잔류강도가 지속되는 특징을 보여 주고 있다. 반면 비정질 강섬유보강콘크리트는 최대강도 자체가 대략 30% 정도 향상되었으며 1 mm 처짐 이후에 잔류강도가 비교적 급격히

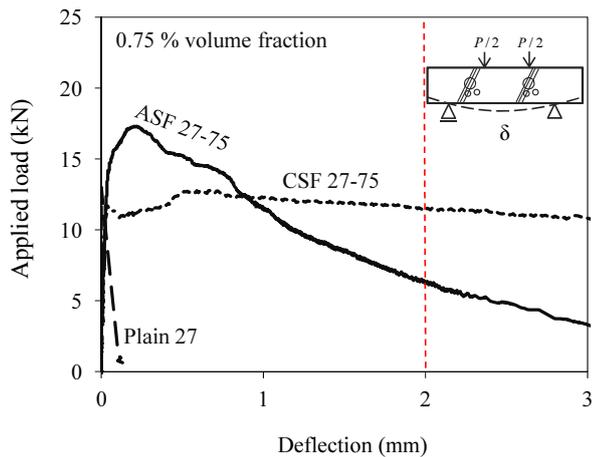


Fig. 5 Load-mid span deflection curves according to fiber types

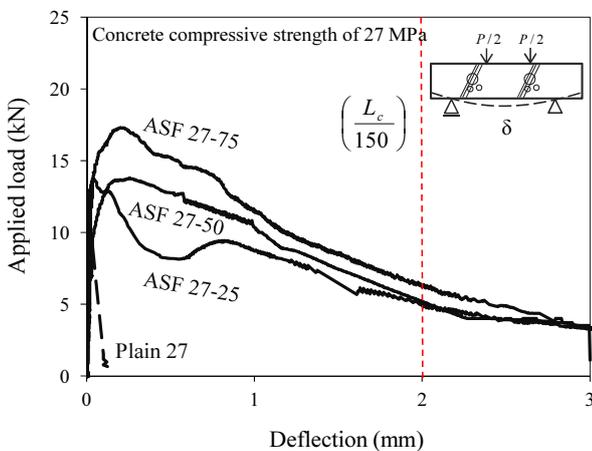


Fig. 6 Load-mid span deflection curves according to fiber volume fraction (ASF)

저감되었다. 이는 두 섬유의 파괴 메커니즘의 차이를 나타내는데, 일반 강섬유의 경우 최대부착강도 이후에 개별 섬유가 뽑히면서 에너지를 소산하는 반면, 비정질 강섬유의 경우 섬유의 개별 부착력이 우수하여 최대부착강도 이전에 섬유뽑힘 대신에 섬유가 파단되는 파괴 양상을 보여준다.³⁰⁾

Fig. 6은 비정질 강섬유보강콘크리트의 섬유 혼입률에 따른 휨거동변화를 나타내고 있다. 비교를 위하여 콘크리트 압축강도는 27 MPa로 일정한 실험 결과를 사용하였다.

비정질 강섬유보강콘크리트의 경우 섬유 혼입률이 증가함에 비례하여 강도 및 잔류강도가 증가하였다. 0.75% 섬유부피비의 경우 무보강콘크리트에 비하여 휨강도와 휨인성지수는 각각 50%, 770%로 크게 증가하였다. Fig. 7은 콘크리트 압축강도에 따른 비정질 강섬유보강콘크리트의 휨거동 변화를 나타내고 있다. 고강도콘크리트(50 MPa)의 경우 저강도 콘크리트(27 MPa)에 비해 휨강도가 88% 증가하지만, 고강도 콘크리트의 취성으로 인하여 1 mm 변형 이후에 잔류강도가 급격히 감소하는 양상을 보이고 있다.

3.2 휨강도 및 휨인성지수

실험 결과를 바탕으로 하여 휨강도와 휨인성지수를 분석하였다. 실험 결과의 오차를 감안하여 최대값 및 최소값을 제외한 실험 결과를 분석에 사용하였다.

Fig. 8은 무보강 콘크리트(Plain 27), 0.25% 와 0.75% 일반 강섬유(CSF27-25, CSF27-75), 0.25%와 0.75% 비정질 강섬유 (ASF-27-25, ASF27-75)에 대하여 휨강도 및 휨인성지수를 나타내고 있다. 비교를 위하여 콘크리트 압축강도 27 MPa로 일정한 실험 결과를 사용하였다. Fig. 8(a)에서 일반 강섬유는 무보강 콘크리트와 비교할 때, 섬유 혼입률에 관계없이 휨강도가 일정하였다. 반면 비정질 강섬유(ASF)의 경우 무보강 콘크리트에 비하여 약 120-150% 정도로 휨강도가 증가하였으며, 섬유 혼입률에 비

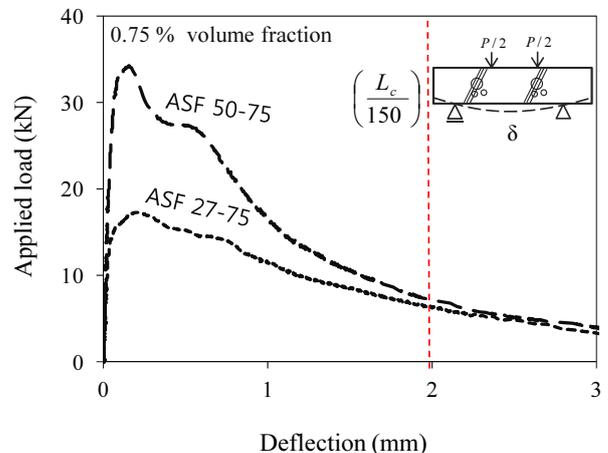
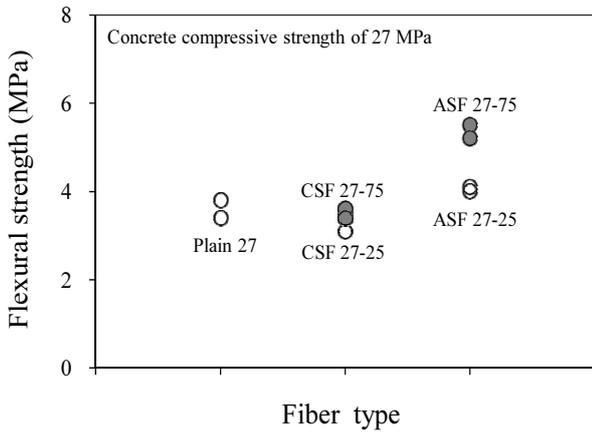
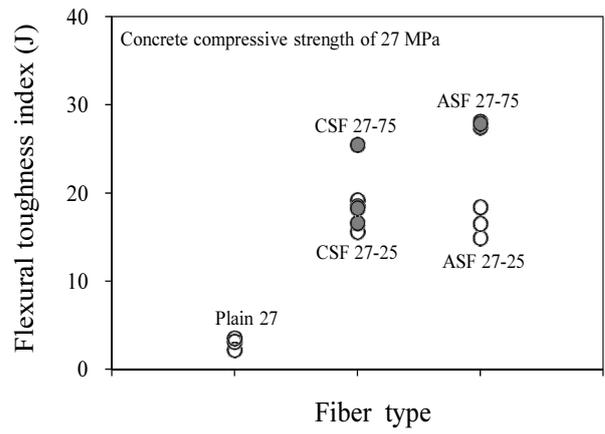


Fig. 7 Load-mid span deflection curves according to compressive strength (ASF)

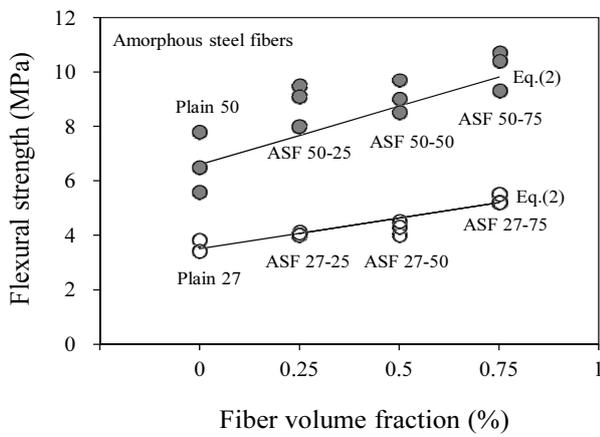


(a) Flexural strength

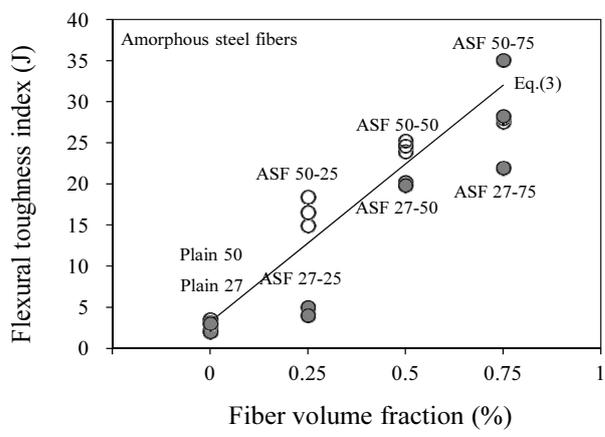


(b) Flexural toughness

Fig. 8 Flexural performance as a function of fiber type



(a) Flexural strength



(b) Flexural toughness

Fig. 9 Flexural performance as a function of compressive strength and volume fraction

레하여 강도가 증가하였다. Fig. 8(b)에서 일반 강섬유 및 비정질 강섬유보강콘크리트 모두 휨인성지수가 크게 증가한 결과(대략 400-750%)를 보여 주고 있는데, 특히 비정질 강섬유의 경우 섬유 혼입률에 따라서 휨 인성지수가 증가하는 경향이 뚜렷하다. 실험체 별로 휨강도와 휨인성지수의 산정 결과는 Table 4에 자세히 제시되어 있다.

Fig. 9는 콘크리트 압축강도와 섬유부피에 따른 휨강도와 휨인성지수의 변화를 나타내고 있다. Fig. 9(a)에서 섬유 혼입률이 증가할수록 휨강도가 증가하였는데, 콘크리트 압축강도가 50 MPa인 경우, 27 MPa에 비하여 대략 2 배 정도의 휨강도를 보이고 있다. Fig. 9(b)에서 비정질 강섬유보강콘크리트는 섬유혼입률에 비례하여 휨인성지수가 증가하는 경향을 보였지만, 콘크리트 압축강도가 휨인성지수에 미치는 영향은 명확하지 않았다.

실험관측 결과를 바탕으로 이 연구에서 사용한 실험조건(콘크리트 배합강도, 섬유부피비 등)에 대하여 휨강도($f_{r,frp}$)와 휨인성지수($F_{L,frp}$)는 다음과 같이 섬유부피비의 함수로 간단히 나타낼 수 있다.

$$f_{r,frp} = f_{r,p}(1 + 0.65 V_f) \quad (2)$$

$$F_{L,frp} = F_{L,p}(1 + 12 V_f) \quad (3)$$

여기서 $f_{r,p}$ 는 무보강 콘크리트의 휨강도, $F_{L,p}$ 는 무보강 콘크리트의 휨인성지수이다. 식 (2)와 (3)에서 섬유부피에 곱해져 있는 계수(0.65와 12)를 비교할 때, 비정질 강섬유의 투입에 따라서 휨인성지수가 휨강도 보다 증가 효과가 더 큰 것으로 나타났다. Fig. 9 에 나타나듯이 식 (2)와 (3)은 이 실험 결과에서 나타나는 휨강도 및 인성지수 변화를 비교적 잘 나타내는 것으로 나타났다.

4. 결 론

이 연구에서는 비정질 강섬유 콘크리트의 휨거동 특성을 규명하기 위하여 ASTM 표준을 따라서 휨실험을 수행하였다. 일반 강섬유에 대하여 비교실험을 수행하였으며, 섬유 혼입률 및 콘크리트 압축강도에 따라서 휨거동 특성을 비교하였다. 이 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 비정질 강섬유는 최대강도 이후 잔류강도가 비교적 급격하게 감소하였으나, 일반 강섬유는 최대강도 이후 잔류강도가 지속되었다.

Table 4 Flexural strength and flexural toughness obtained from flexural tests

Specimens	Flexural strength (MPa)	Flexural toughness (J)	Average of flexural strength (MPa)	Average of flexural toughness (J)
Plain 27	3.8	2.1	3.5	3.2
	3.4	4.5		
	4.3	2.2		
	3.4	3.1		
	3.3	3.5		
Plain 50	6.5	3	6.6	2.5
	5.6	2		
	7.8	3		
ASF 27-25	4.1	18.4	4.0	16.5
	4.0	14.9		
	4.0	11.8		
	4.0	16.5		
	₍₁₎	₍₁₎		
ASF 27-50	4.0	23.9	4.3	24.6
	4.5	25.2		
	4.3	24.6		
	₍₁₎	₍₁₎		
	₍₁₎	₍₁₎		
ASF 27-75	5.2	28.1	5.2	27.9
	4.7	27.5		
	5.5	28.2		
	5.2	27.9		
	₍₁₎	₍₁₎		
ASF 50-25	5.0	5.0	8.9	4.5
	9.5	4.0		
	9.1	5.0		
	8	4.0		
	₍₁₎	₍₁₎		
ASF 50-50	9.7	19.8	9.1	19.9
	7.9	19.1		
	9.0	20.2		
	8.5	19.8		
	₍₁₎	₍₁₎		
ASF 50-75	9.3	21.9	10.0	28.4
	10.3	37.1		
	9.1	35.0		
	10.7	28.2		
	10.4	16.2		
CSF 27-25	3.6	19.2	3.4	16.4
	3.1	15.6		
	3.6	11.6		
	4.8	22.4		
	3.1	18.5		
CSF 27-75	3.5	25.5	3.5	20.1
	3.6	16.6		
	3.4	18.3		
	3.1	15.0		
	3.6	38.3		

⁽¹⁾Test data neglected because of unexpected premature failure

2) 휨강도를 비교하면, 비정질 강섬유보강콘크리트는 무보강콘크리트에 비하여 혼입률 증가에 비례하여 최대 1.5배까지 휨강도가 증가하였다(0.75% 섬유

혼입률). 반면 일반 강섬유보강콘크리트는 혼입률 증가에 관계없이 휨강도 증가에 기여하지 못하였다. 그러나 이 실험은 제한된 변수범위에서 수행되었으므로 일반 강섬유의 휨성능에 대한 효과를 일반적으로 규명하기 위해서는 추가 실험 또는 선행 연구 결과에 근거하여 심층적인 연구가 필요하다.

3) 휨인성지수를 비교하면, 27 MPa 콘크리트의 경우 비정질 강섬유보강콘크리트는 혼입률에 따라서 최대 8.7배 (27.9 J) 까지 향상되었으며, 일반 강섬유보강콘크리트의 경우 6.3배 (20.1 J) 까지 향상되었다. 비정질 강섬유는 균열 발생 이후 비교적 취성적인 휨 인장거동을 보이지만, ASTM에서 정의하는 휨인성지수 측면에서 일반강섬유에 동등 이상의 성능을 발휘하였다.

감사의 글

이 논문은 포항산업과학연구원이 지원하는 “용선기반 마이크로 스틸파이버 콘크리트의 실용화” 의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. Mehta, P. K. and Monteiro, P. J., “Concrete: Microstructure, Properties and Materials,” Third Edition, Mc Graw-Hill, Inc., New York, 2006, pp. 502-522.
2. Benter, A. and Mindess, S., “Fiber-Reinforced Cementitious Composites,” Elsevier Science, London, 1990, pp. 1-4.
3. Balaguru, P. N. and Shah, S. P., “Fiber-Reinforced Cement Composites,” McGraw-Hill, Inc., New York, 1992, pp. 1-5.
4. Banthia, N. and Sappakittipakorn, M., “Toughness Enhancement in the Steel Fiber Reinforced Concrete through Fibers Hybridization,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, 2007, pp. 1366-1372.
5. Ellouze, A., Ouezdou, M. B., and Karray, M. A., “Experimental Study of Steel Fiber Concrete Slabs Part I: Behavior under Uniformly Distributed Loads,” *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 4, No. 2, 2010, pp. 113-118.
6. Higashiyama, H., Ota, A., and Mizukoshi, M., “Design Equation for Unching Shear Capacity of SFRC Slabs,” *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 5, No. 1, 2011, pp. 35-42.
7. Won, J. P., Hong, B. T., Choi, T. J., Lee, S. J., and Kang, J. W., “Flexural Behaviour of Amorphous Micro-Steel Fibre-Reinforced Cement Composites,” *Composite Structures*, Vol. 94, 2012, pp. 1443-1449.
8. Balaguru, P. N., Ouyang, C., and Shah, S. P., “Fiber Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar,” *Adv Cem Based Mater*, Vol. 2, No. 2, 1995, pp. 53-61.
9. Lankard, D. R. and Schrader, E. K., “Inspection and Analysis of Curl in Steel Fiber-Reinforced Concrete

- Airfield Pavements,” Bekaert Corp., Marietta, GA, 1983, pp. 230.
10. Robinson, C., Colasanti, A., and Boyd, G., “Steel Fiber-Reinforced Auto Assembly Plant Floor,” *Concrete International*, Vol. 13, No. 4, Apr. 1991, pp. 30-35.
 11. Scharader, E. K., “Fiber-Reinforced Concrete Pavements and Slabs -a State-of-the-Art Report,” in *Steel Fiber Concrete*, Elsevier, NewYork, 1986, pp. 109-131.
 12. Naaman, A. E., “Toughness, Ductility, Surface Energy and Deflection-Hardening FRC Composites,” in *Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composites (DRFCC)-Application and Evaluation (DRFCC-2002)*,” *Journal of JCI*, Oct. 2002, pp. 33-57.
 13. Bencardino, F., Rizzuti, L., Spadea, G., and Swamy, R. N., “Implications of Test Methodology on Post-Cracking and Fracture Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete,” *Composites: Part B*, Vol. 46, 2013, pp. 31- 38. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.10.016>)
 14. Yao, W., Li, J., and Wu, K., “Mechanical Properties of Hybrid Fiber-Reinforced Concrete at Low Volume Fraction,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 1, 2003, pp. 27-30.
 15. Grzybowski, M. and Shah, S. P., “Shrinkage Cracking of Fiber Reinforced Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No. 2, 1990, pp. 138-148.
 16. Balaguru, P., Narahari, R., and Patel, M., “Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol. 89, No. 6, 1992, pp. 541-546.
 17. Ahmed, S. F. U. and Maalej, M., “Tensile Strain Hardening Behaviour of Hybrid Steel-Polyethylene Fiber Reinforced Cementitious Composites,” *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 1, 2009, pp. 96-106.
 18. Quan, C. X. and Stroeven, P., “Fracture Properties Concrete Reinforced with Steel-Polypropylene Hybrid Fibres,” *Cement Concrete Composites*, Vol. 22 No. 4, 2000, pp. 343-353.
 19. Xu, G., Magnani, S., and Hannant, D. J., “Behavior of Fiber Cement Hybrid Composites Polyvinyl Alcohol Fiber Yarns,” *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 6, 1998, pp. 667-674.
 20. Lee, H. H. and Lee, H. J., “Characteristic Strength and Deformation of SFRC Considering Steel Fiber Factor and Volume Fraction,” *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 16, No. 6, 2004, pp. 759-766.
 21. Soroushian, P., Mirza, F., and Alhozajiny, A., “Plastic Shrinkage Cracking of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol. 92, No. 5, 1993, pp. 553-560. (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/894>)
 22. Song, P. S., Hwang, S., and Sheu, B. C., “Strength Properties of Nylon-and Polypropylene-Fiber-Reinforced Concretes,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 8, 2005, pp. 1546-1550. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.033>)
 23. Hameed, R., Turatsinze, A., Duprat, F., and Sellier, A., “Study on the Flexural Properties of Metallic-Hybrid-Fibre-Reinforced Concrete,” *Maejo Int. J. Sci. Technol.* Vol. 4, No. 2, 2010, pp. 169-184.
 24. Choi, O. C., Choi, K.-K., Choi, H. J., and Hwang, Y. J., “A Prediction Model of Shrinkage Cracking of Steel Fiber Reinforced Concrete,” *Journal of Architectural Institute of Korea Structure&Construction*, Vol. 29, No. 6, 2012, pp. 59-66.
 25. Hameed, R., Turatsinze, A., Duprat, F., and Sellier, A., “Effect of Fiber Aspect Ratio on the Flexural Properties,” *Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 4, No. 5, 2009, pp. 68-72.
 26. ASTM C 1609, “Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Three-Point Loading),” American Society for Testing and Materials (ASTM), 2007.
 27. Lee, J. H., Park, H. S., Cho, H. W., Kang, S. T., Kim, D. J., and Kim, J. J. “Effect of Fine Aggregate Size and Sand Percentage on Flexural Characteristics of SFRC,” *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 2, 2011, pp. 431-432.
 28. Korea Concrete Institute, *Concrete Standard Specification*, 2009.
 29. KS F 2425, *Method of Making Test Sample of Concrete in the Laboratory*, Korean Industrial Standards, 2012.
 30. Choi, H., “Shrinkage Cracking Characteristics of Micro Steel Fiber Reinforced Concrete,” Soongsil University, Seoul, Korea, 2010, pp. 38-48.

요 약 이 연구에서는 ASTM C 1609을 따라서 비정질 강섬유보강콘크리트의 휨실험을 수행하였고, 이를 바탕으로 휨성능을 평가하였다. 비정질 강섬유는 기존의 일반 강섬유와 달리 얇은 두께, 거친 표면의 특성을 가지고 있다. 주요한 실험변수는 섬유 종류(비정질 강섬유, 일반 강섬유), 섬유 혼입률(0.25, 0.50, 0.75%) 그리고 콘크리트 압축강도(27, 50 MPa)이다. 실험 결과에 근거하여 비정질 강섬유와 일반 강섬유보강콘크리트의 휨강도와 휨인성을 분석하였고, 그 결과 일반 강섬유보강콘크리트의 경우 주로 휨인성이 증가하였으나 비정질 강섬유보강콘크리트의 경우 휨강도와 인성을 모두 증가하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 비정질 강섬유, 섬유보강콘크리트, 휨성능, 휨강도, 휨인성지수