

## 비정질강섬유보강콘크리트의 휨성능 비교분석

\*김병일 · 이세현

한국건설기술연구원

### Comparisons for Flexural Performance of Amorphous Steel Fiber Reinforced Concrete

\*Byoung-Il Kim and Sea-Hyun Lee

*Building and Urban Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology*

#### 요 약

상대적으로 제조공정이 짧아 환경 및 경제적 이점을 갖는 비정질강섬유(AF)를 길이 및 혼입률을 변화하여 휨성능을 평가와 더불어 기존의 일반강섬유(HF)와의 비교분석을 실시하였다. 섬유의 길이는 10 mm, 20 mm, 30 mm, 및 혼입률은 0.3%, 0.6%로 변화를 주어 실험을 진행하였다. 비정질강섬유(AF)의 경우 비중은 일반강섬유(HF)와 거의 동일한 값을 가지나 겉보기부피는 약 2배정도 커서 같은 혼입률에서 투입되는 섬유의 개수는 훨씬 증가되어 배합설계에서 주의를 할 필요가 있다. 실험결과 휨강도의 영향은 섬유의 길이 및 혼입률이 증가할수록 강도의 증가를 보였으며, 일반강섬유(HF)보다 크게 나타났다. 특히 최대하중부근에서의 에너지 소산능력이 뚜렷하게 증가하여 잔류하중단계에서의 급격한 감소에도 불구하고 일반강섬유(HF)와 거의 유사한 잔류강도 및 에너지 소산능력을 보여주었다. 콘크리트 균열 후 파괴진행단계에서는 섬유의 인발저항에 의한 균열진행이 아닌 섬유의 파단에 의한 강도의 급격한 감소를 보여준 것으로 판단된다.

**주제어** : 비정질강섬유(AF), 휨강도, 잔류강도, 인성, 파괴메커니즘

#### Abstract

The flexural performance of amorphous steel fibers having environmental and economy benefits due to relatively short manufacturing process were evaluated as well as that of hooked steel fibers by varying fiber length and volume fraction. Fiber lengths were 10 mm, 20 mm, 30 mm and fiber volume fractions were varied from 0.3% to 1.2%. Test results with flexural performance showed that mixing design needs to be careful because of relatively high volume of amorphous steel fiber compared to hooked steel fibers. High flexural strength was obtained from both longer fiber length and higher volume fraction. Residual strength and toughness of amorphous steel fiber were similar to that of hooked steel fiber, even though rapid dropping of applied load right after concrete matrix breaking. It can be judged that relatively high ability of energy dissipation around first cracking area relatively overcome rapid dropping of loading.

**Key words** : Amorphous steel fiber, Flexural strength, Residual strength, Failure mechanism

· Received : May 11, 2015 · Revised : June 1, 2015 · Accepted : June 11, 2015

\*Corresponding Author : Byoungil Kim (E-mail : bi-kim@kict.re.kr)

Building and Urban Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 411-712 Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서 론

기본적으로 시멘트, 물 및 골재(잔골재, 굵은골재)로 구성되어, 배합 후 양생과정을 거쳐 용도에 적합한 강도로 제작되는 콘크리트는 압축하중에 대한 저항은 우수하나, 인장 및 휨 거동에 대한 저항력은 압축거동과 비교시 현저하게 낮아 콘크리트의 취성적 단점을 보완하고자 콘크리트 내부에 섬유를 일정부분 혼입하여 제작하였다.<sup>1-2)</sup> 현재 건설현장에서는 사용목적에 맞게 다양한 종류의 유-무기섬유가 사용되고 있으나 콘크리트의 인장강도, 휨강도 및 휨인성의 보강은 전반적으로 강섬유를 혼입한 경우가 우수한 것으로 알려져 있다.<sup>3-5)</sup> 특히 휨성능의 향상은 섬유의 형상비( $L_f/d_f$ ), 혼입률( $V_f$ )과 표면형상에 따른 부착력( $\tau$ )에 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.<sup>6-8)</sup> 섬유의 형상비와 부착력이 우수한 강섬유의 콘크리트내 혼입률을 증가시킬수록 휨성능(강도 및 인성)의 향상이 뚜렷하게 나타난다. 하지만, 혼입률이 약 1%에 가깝게 되면 투입되는 섬유개수의 증가 및 높은 강성으로 인한 섬유뭉침현상(fiber balling)이 발생하여 시공성이 현저하게 떨어질 수 있다. 이와 같은 문제의 해결은 각종 혼화재료 및 배합설계조정으로 일반적으로 해결할 수 있다.

최근에 개발된 비정질강섬유(AF)는 액체 급냉의 원리를 이용한 합금제조기술인 melt spinning 기법으로 개발되었는데, 일반강섬유와 비교시 제조 공정이 단순화되어 CO<sub>2</sub> 발생저감과 더불어 경제적인 이점을 활용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 결정구조에서 방향성에 따른 강도 차이가 거의 없고, 표면구조가 얇은 막의 형태로 섬유의 형상비가 크게 증가하여 콘크리트 매트릭스와의 부착력 증가로 인한 인장강도 및 휨성능의 개선을 기대 할 수 있다.<sup>6,9-11)</sup> 동일한 혼입률에서 투입되는 섬유의 개수가 크게 증가하게 되며, 시멘트 매트릭스에서의 단위표면적이 넓어져 부착성과 균열저항능력이 향상되어 결과적으로 일반강섬유와 비교시 적은 혼입률에서 동일한 휨성능(flexural performance) 확보가 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 비정질강섬유(AF)의 길이(10 mm, 20 mm, 30 mm) 및 혼입률(0.3%, 0.6%)과 후크형 강섬유 30 mm의 혼입률(0.3%, 0.6%, 1.2%)을 혼입하여 각각의 휨강도(flexural strength), 잔류강도(averaged residual strength) 및 휨인성(flexural toughness) 변화에 대한 결과를 도출하여 길이 및 혼입률 변화에 대한 상관관계를 비교분석하였다.

## 2. 실험계획

### 2.1. 실험재료

본 연구에서는 1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 비중 1.54, 조립률 2.8인 주문진 표준사를 사용하였다. 굵은 골재는 최대치수 19 mm, 비중 2.72인 부순 골재를 적용하였다. 실험에 사용된 강섬유는 국외 S사에서 생산되는 비정질강섬유(AF)로 길이가 각각 10 mm, 20 mm, 30 mm, 폭 1.3 mm, 두께 35  $\mu$ m 사용하였다. 비정질강섬유는 얇은 판상형으로 만들어지는 과정은 제철소에서 용선을 급랭시켜 생성된 결정의 핵이 성장하지 않도록 하여 액체구조를 동결시켜 만든 비정질강섬유로 Fig. 1에서와 같이 앞면은 매끈한 표면을 가지고 있으며 반대편은 불규칙한 돌기를 갖는 거친 형상이 특징이다. 비중은 7.2로 일반강섬유의 비중 7.8 보다는 다소 낮으며, 겉보기부피는 상대적으로 커서 같은 무게(500 g)에 대한 겉보기 부피의 큰 차이를 가진다(Fig. 2).<sup>12)</sup> 사용된 비정질강섬유(AF)와 후크형강섬유의 재료 특성은 Table 1과 같다.

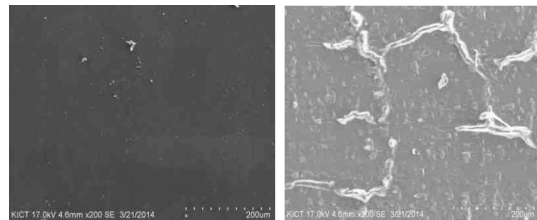


Fig. 1. Surface of amorphous steel fiber (left : forth, right : back).



Fig. 2. Apparent solid volume : amorphous steel fiber vs. hookend steel fiber.

**Table 1.** Fiber properties

Type	Amorphous steel fiber	Steel fiber
Elastic modulus (MPa)	14×10 <sup>4</sup>	20×10 <sup>4</sup>
Specific gravity	7.2	7.8
Thickness (μm)	35	500
Length (mm)	10, 20, 30	30
Shape	Linear	Hooked

## 2.2. 배합설계

Table 2는 비정질강섬유(10 mm, 20 mm, 30 mm) 및 혼입률(0.3%, 0.6%)과 일반강섬유(HF) 30 mm 및 혼입률(0.3%, 0.6%, 1.2%)에 대한 배합설계를 보여준다. 물-시멘트 비는 0.45로 선정하여 보통콘크리트강도를 유지하였다. 일반적으로 섬유보강콘크리트의 섬유 뭉침 현상은 크게 세부분으로 나눌 수 있다.<sup>2)</sup> 우선, 섬유의 형상비(길이와 직경의 비)와 콘크리트를 구성하는 시멘트, 모래 등의 입자와의 상이함으로 인해 섬유를 다량으로 혼입시 섬유 뭉침 현상이 발생한다. 둘째는 섬유의 비중과 콘크리트를 구성하는 재료와의 비중이 크게 다른 점이다. 일반강섬유는 7.8정도이나 시멘트(3.15), 모래(2.5) 정도로 비중이 달라 혼합과정에서 서로 분리되어 비중이 비슷한 재료끼리 엉키는 현상이 발생한다. 마지막으로 배합 후 거품집 및 철근까지 채우기 위해서 다짐작업을 실시하는 과정에서 섬유 뭉침 현상이 발생한다. 일반적으로 사용되는 붐 진동기의 경우 거품집 구석까지 콘크리트를 밀실하게 채우기 위해서는 내부진

동기를 사용하는데 사용기간이 길어질수록 진동으로 인해 섬유의 방향이 한 방향으로 다짐이 되어 섬유 혼입 효과가 감소하게 되고 다짐이 과도할 경우 비중이 큰 강섬유는 가라앉으며, 비중이 다소 작은 유기섬유는 떠오르게 되는 현상이 발생하게 된다. 섬유의 양이 작을 경우 혼화제로 판단하여 배합설계에서의 부피변화를 무시하고 배합설계를 하는 경우와 혼입되는 섬유의 양의 많을 경우 혼입되는 섬유를 혼화제로 치환하여 혼입부피만큼 골재부피를 줄여서 섬유분산성을 확보 할 수 있다.

본 연구에서는 섬유를 혼화제로 치환하는 방법을 사용하여 배합설계를 실시하였다. 또한 고성능 감수제 및 셀룰로오스계의 저점도 증점제를 필요시 적정량을 혼입하여 섬유의 혼입으로 인한 유동성 감소와 섬유뭉침현상을 최소화하고자 하였다. 콘크리트의 혼합은 강제식 트윈샤프트형 믹서를 사용하였으며, 배합과정은 먼저 잔골재와 굵은골재를 투입하고 1분간 건비빔을 실시하였다. 그 후 시멘트를 투입한 후 1분간 비비고 다시 섬유를 천천히 투입하여 1분간 비빈 후 물에 함께 희석한 고성능감수제 및 증점제(필요시)를 각 배합당 최소량을 첨가하여 배합을 완성하였다. 비빔이 완료된 후 굳지 않는 콘크리트 특성을 파악하고자 슬럼프, 공기량을 측정하였으며, 굳은 상태의 섬유보강콘크리트의 역학적 특성을 파악하고자 굳지 않은 콘크리트를 압축강도 공시체에 콘크리트를 타설한 후 시험체를 23±2°C의 온도와 상대습도 50±2% 실내에서 24시간 동안 초기 양생을 실시한 후 탈형하여 상대습도가 100%인 습윤양생실

**Table 2.** Concrete mix proportions

Type	W/C	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )							Slump (mm)	Air (%)
			W	C	S	G	F (%)	SP (C*%)	CT (C*%)		
OPC	0.45	55	175	390	803	556	-	0.4	-	240	3.5
AF-10-0.3	0.45	56	175	390	782	564	0.3	0.5	-	130	3.0
AF-10-0.6	0.45	57	175	390	760	571	0.6	1.5	0.3	200	3.5
AF-20-0.3	0.45	56	175	390	782	564	0.3	0.6	-	160	2.7
AF-20-0.6	0.45	57	175	390	760	571	0.6	2.0	0.3	180	3.0
AF-30-0.3	0.45	56	175	390	782	564	0.3	0.5	-	160	3.0
AF-30-0.6	0.45	57	175	390	760	571	0.6	1.5	0.3	150	4.3
HF-30-0.3	0.45	56	175	390	780	564	0.3	0.5	-	240	5.2
HF-30-0.6	0.45	57	175	390	756	573	0.6	0.5	-	220	5.3
HF-30-1.2	0.45	61	175	390	685	603	1.2	0.5	-	120	4.3

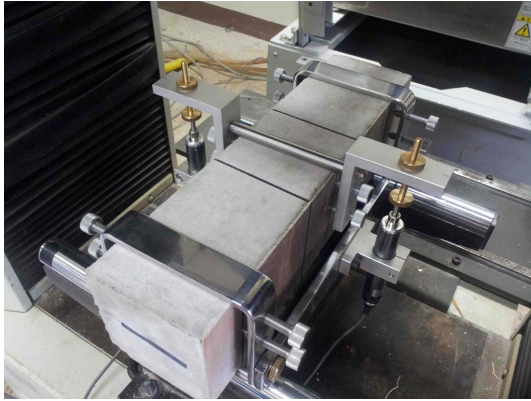


Fig. 3. Flexural testing apparatus (yoke and LVDT).

에서 28일간 양생을 실시한 후 압축강도 및 휨성능 실험을 실시하였다.

2.3. 실험방법

강섬유 혼입량(0.3%, 0.6%, 1.2%) 및 길이변화(10 mm, 20 mm, 30 mm)에 따른 콘크리트 압축강도의 영향평가를 위해 2,000 kN 용량의 UTM를 사용하여 28일 습윤 양생된 직경 100 mm, 높이 200 mm의 원주형 공시체를 가지고 압축강도를 측정하였으며, 본 연구에서 측정하고자 하는 휨성능 평가는 ASTM C1399 및 ASTM C1609표준시험법에 따라 100 mm × 100 mm × 400 mm의 직육면체 형태 실험체를 제작하였으며 중앙부에는 변위계(LVDT) 2개를 설치하여 하중-변위곡선을 측정하였다.

콘크리트메트릭스의 균열 후 섬유가교역할에 대한 저

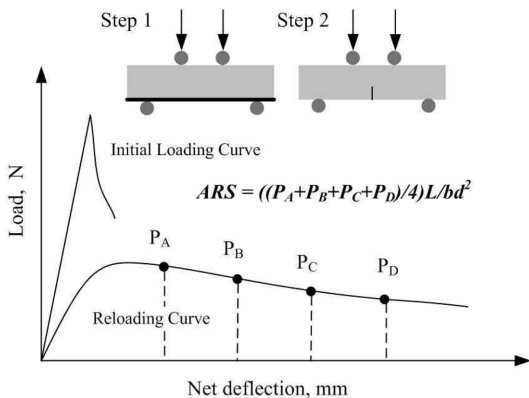


Fig. 4. Averaged residual strength for fiber reinforced concrete (ASTM C1399).

항성을 평가하기 위한 섬유보강콘크리트의 잔류강도 (ASTM C 1399)는 하중을 0.15 mm/min 속도로 4점으로 가력하여 0.2 mm의 콘크리트메트릭스 균열 확보 후 실험체 바닥에 사용된 철판(급격한 파괴진행 방지)을 제거 후 다시 4점 하중으로 0.05 mm/min로 재하하여 0.5 mm, 0.75 mm, 1 mm, 1.25 mm에서 잔류하중으로 평균잔류강도를 측정하였다. 평균잔류강도(ARS)는 식(1)과 같이 ASTM C1399 표준을 따라서 평균잔류강도(ARS)를 산정하였다(Fig. 4).<sup>13)</sup>

$$ARS = ((P_A + P_B + P_C + P_D) / 4) \cdot \frac{L}{bd^2} \tag{1}$$

여기서, PA는 0.5 mm에서 하중, PB는 0.75 mm에서 하중, PC는 1 mm에서 하중, PD는 1.25 mm에서 하중이며, L는 지간거리 300 mm, b는 실험체의 너비(100 mm), d는 실험체의 높이(100 mm)이다. ASTM C1609<sup>14)</sup>은 섬유의 인성을 평가를 위한 시험법으로 기존의 섬유보강 시험법인 ASTM C1018(2006년 폐지)<sup>15)</sup>의 단점을 보완한 표준법으로 최대하중(Pp), 잔류하중(L/600, L/150), 잔류강도(f<sub>D600</sub>, f<sub>D150</sub>), 에너지소산능력(Toughness, L/600 및 L/150까지의 하중-변위 곡선의 면적)을 구하여 섬유보강으로 인한 휨성능을 평가하였다. 휨강도는 식 (2)와 같이 ASTM C1609 표준에 따라 계산하였다.

$$f_p = \frac{P_p L}{bd^2} \tag{2}$$

여기서, PP는 최대하중, L는 지간거리 300 mm, b는 실험체의 너비(100 mm), d는 실험체의 높이(100 mm)이다.

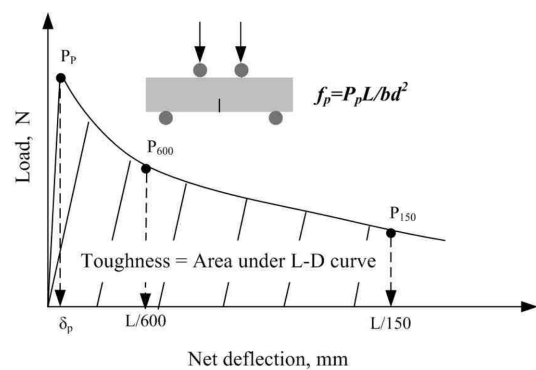


Fig. 5. Flexural toughness for fiber reinforced concrete (ASTM C1609).

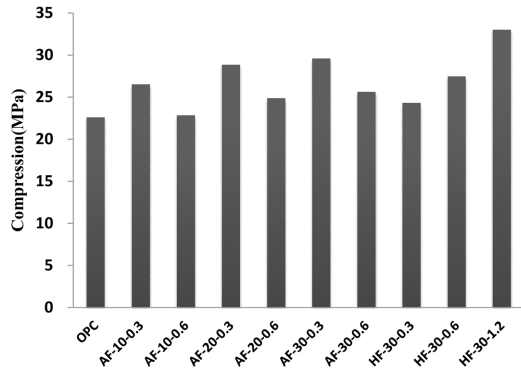


Fig. 6. Comparisons of compressive strength with fiber addition (MPa).

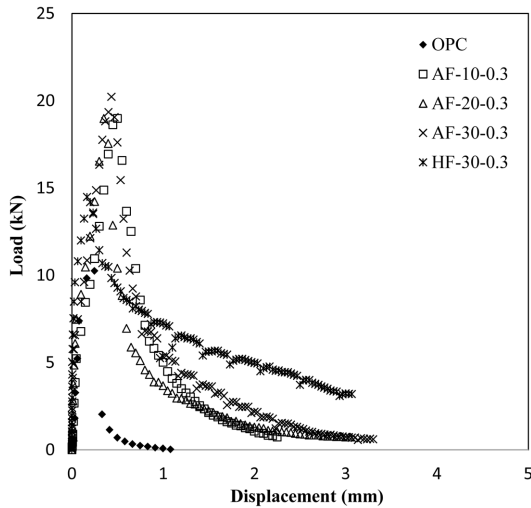


Fig. 7. Load-displacement curve for 0.3% fiber addition (AF vs. HF).

### 3. 실험결과

#### 3.1. 압축강도 (Compressive Strength)

강섬유를 보강한 콘크리트의 압축강도 실험결과는 Fig. 6과 같다. 비정질강섬유의 경우 섬유 길이 증가에 대한 강도는 감소되었으며, 전반적으로 혼입률이 0.3%의 경우가 0.6%를 혼입한 강도보다 높게 나타났다. 후크형 강섬유의 경우는 섬유혼입률이 증가할수록 강도가 증가하는 경향이 나타났다. 하지만, 콘크리트에 섬유를 1% 내외로 혼입하는 경우 휨성능 향상이 주목적으로 압축강도 증가에 대한 평가는 바람직하지 않는 것으로 판단된다.

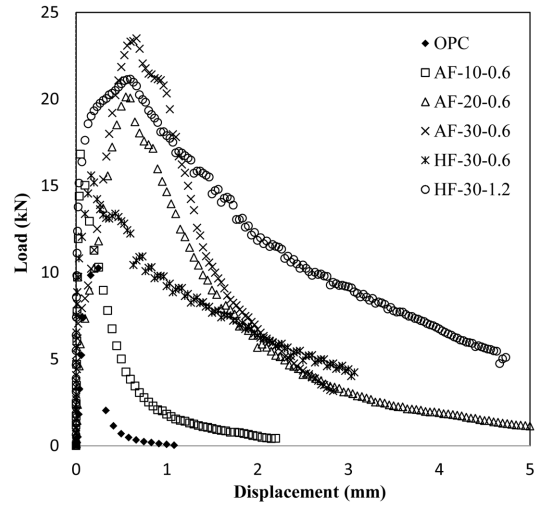


Fig. 8. Load-displacement curve for 0.6% and 1.2% fiber addition (AF vs. HF).

#### 3.2 하중 - 변위곡선 (Load-Deflection Curve)

Fig. 7는 섬유혼입률 0.3%에서 OPC, 비정질강섬유(AF) 및 일반강섬유(HF)의 하중-변위곡선 관계를 보여준다. OPC의 경우 최대하중에 도달함과 동시에 균열 후 하중감소가 급격하게 나타났다. 후크형 일반강섬유(HF)의 경우 최대하중에 도달하기 전에 콘크리트 매트릭스의 균열이 시작되어 섬유로의 하중전달이 되면서 최대하중에 도달한 후 하중 감소가 서서히 진행이 되었다. 잔류하중의 점진적인 감소는 후크형 강섬유의 인발메커니즘에 의한 에너지 소산의 결과로 판단되며, 비정질강섬유와 비교시 잔류하중의 감소현상이 작은 것으로 나타났다.<sup>16-17</sup> 비정질강섬유(AF)의 경우 최대하중의 약 50% 정도에서 콘크리트매트릭스의 균열이 시작되어 최대하중에 도달하였다. 또한 전반적으로 섬유길이에 상관없이 일반강섬유(HF)보다 최대하중이 약 30% 증가하였다. 하지만, 최대하중에 도달한 후 잔류하중의 감소는 일반강섬유(HF)와 비교시 더욱 뚜렷하였으며, 이것은 개별섬유의 인발메커니즘에 의한 하중감소가 아닌 얇은 판상형의 비정질강섬유(AF)의 우수한 부착력으로 인한 섬유파단에 의한 결과로 판단이 된다.<sup>6,18</sup> 실험 후 실험체에서 섬유의 파단현상을 관찰하였다.

Fig. 8는 섬유혼입률 0.6% 및 1.2%에서의 하중-처짐곡선 관계를 보여준다. 전체적으로 혼입률 0.3%와 비교시 최대하중 및 잔류하중이 증가되었음을 확인할 수 있다. 일반강섬유(HF)의 경우 1.2% 혼입률에서 최대하중

에 도달하기 전에 균열의 시작이 보다 뚜렷하게 나타났으며, 최대하중에 도달한 후 인발메커니즘에 의한 하중의 감소가 가장 천천히 진행이 되었다. 비정질강섬유(AF)의 경우 균열의 시작은 최대하중의 약 50% 지점에서 서서히 시작되어 최대하중에 도달하였으며, 최대하중은 같은 혼입률에서 일반강섬유(HF)와 비교시 약 30-40% 증가한 것으로 나타났다. 잔류하중단계에서는 0.3% 혼입률의 경우와 동일하게 섬유 인발이 아닌 파단현상에 의한 하중 감소가 뚜렷하게 나타났다. 결과적으로 섬유의 길이가 길수록 최대하중의 증가와 더불어 잔류하중단계에서 처짐 발생도 적은 것으로 나타났으나, 잔류변경단계에서는 인발메커니즘에 의한 잔류하중이 보다 지속적으로 유지되었다.

3.3. 휨강도 (Flexural Strength)

Fig. 9는 섬유의 혼입률, 길이 및 종류 변화에 대한 섬유의 휨강도를 비교하였다. OPC의 경우 휨강도가 3.6 - 4.7 MPa 정도이며, 비정질강섬유(AF) 10 mm의 경우 섬유혼입률 0.3%에서 휨강도가 약 44% 증가하였으며, 0.6%에서는 26%정도 증가하였다. 20 mm의 경우 0.3% 혼입률에서 약 40%의 증가와 0.6%에서는 약 57% 증가하였으며, 30 mm의 경우 0.3% 혼입률에서 30% 및 0.6%에서 63%정도 휨강도가 증가하였다. 일반강섬유(HF)의 경우 0.3%에서 13%, 0.6%에서 13%정도 증가되었으며, 1.2%의 혼입률에서는 약 56% 증가한 결과를 보였다. 일반강섬유(HF)와 비정질강섬유(AF) 간의 비교에서는 같은 혼입률에서 비정질강섬유(AF)의 경우가 약 50% 휨강도가 크게 나타났다. 비정질강섬유

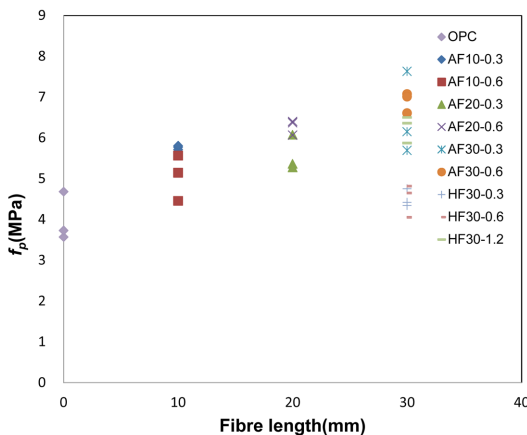


Fig. 9. Flexural strength (MPa) for AF vs. HF.

(AF)의 경우는 겉보기부피가 일반강섬유(HF)에 비해 훨씬 크며, 혼입되는 섬유의 개수가 크게 늘어나서 시멘트 매트릭스에서 분산이 균일하게 될 경우 섬유보강으로 인한 휨강도가 증가된 것으로 판단되며, 잔류변형단계에서의 파괴메커니즘과는 별개의 것으로 판단된다.

3.4. 평균잔류강도 (Averaged Residual Strength)

Fig. 10는 콘크리트 균열 후 균열진행에 따른 섬유의 저항력을 잔류강도로 나타내었다. 비정질강섬유(AF)의 경우 길이 10 mm의 경우 잔류강도가 0.3% 혼입률에서 0.7 MPa, 0.6%에서 0.5 MPa 가장 낮게 나타났으며, 섬유혼입률의 차이로 인한 평균잔류강도의 차이는 미비한 것으로 나타났다. 섬유의 길이 20 mm의 경우 잔류강도가 0.3% 혼입률에서 0.7 MPa, 0.6%에서 2.8 MPa로 섬유혼입률의 증가로 인한 평균잔류강도가 4배 정도 증가하였다. 섬유의 길이 30 mm의 경우 잔류강도가 0.3% 혼입률에서 1.8 MPa, 0.6%에서 2.7 MPa로 섬유혼입률의 증가로 인한 평균잔류강도가 1.5배 정도 증가하였다. 일반강섬유(HF)의 경우 잔류강도가 0.3% 혼입률에서 1.9 MPa, 0.6%에서 2.9 MPa, 1.2%에서 4.7 MPa로 섬유혼입률의 증가로 인한 평균잔류강도가 1.5배 및 2.5배로 각각 증가하였다. 결론적으로, 비정질강섬유(AF)를 혼입하였을 때 섬유길이 증가로 인하여 평균잔류강도가 증가하는 경향을 보였으며, 또한 섬유혼입률의 증가로 인한 평균잔류강도도 증가하였다. 평균잔류강도의 증가는 섬유의 길이가 길수록 더욱 뚜렷한 경향을 보여주었다. 일반강섬유(HF)와의 비교에서는 길이 30 mm 및 혼입률 0.3% 및 0.6%에서의 평균

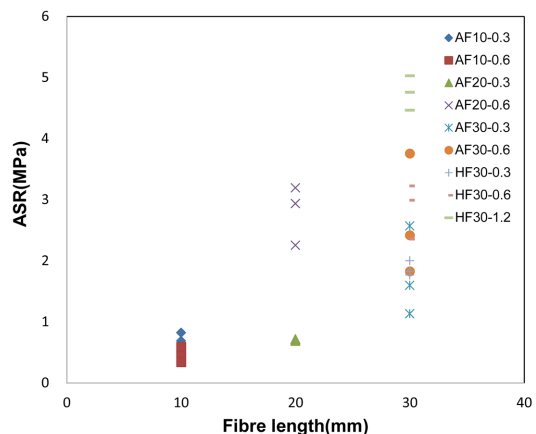


Fig. 10. Averaged residual strength (MPa) for AF vs. HF.

잔류강도는 거의 유사한 잔류강도가 나타났다.

### 3.5. 인성 (Toughness)

Fig. 11는 일정구간(0 ~ 0.5 mm)에 대한 비정질(AF) 및 일반강섬유(HF)의 보강효과를 휨인성(flexural toughness)관점에서 결과를 도출하여 섬유길이 및 혼입률에 대하여 그래프에 표현하였다. 비정질강섬유(AF)의 경우 길이 10 mm의 경우 휨인성은 0.3% 혼입률에서 5.3 MPa, 0.6%에서 5.6 MPa로 가장 낮게 나타났으며, 섬유혼입률의 차이로 인한 에너지소산능력의 차이는 미비한 것으로 나타났다. 섬유의 길이 20 mm의 경우 0.3% 혼입률에서 6.2 MPa, 0.6%에서 5.5 MPa로 섬유혼입률의 증가로 인한 혼입률 증가로 인한 휨인성이 약 10%정도 감소하였다. 섬유의 길이 30 mm의 경우 0.3% 혼입률에서 6.3 MPa, 0.6%에서 7.7 MPa로 섬유혼입률의 증가로 인한 휨인성이 약 20%정도 증가하였다. 일반강섬유(HF)의 경우 0.3% 혼입률에서 5.5 MPa, 0.6%에서 6.6 MPa, 1.2%에서 8.7 MPa로 섬유혼입률의 증가로 인한 휨인성이 약 19% 및 35%정도 각각 증가하였다. 결론적으로, 비정질강섬유(AF)를 혼입하였을 때 길이 및 혼입률 증가로 인하여 에너지소산능력이 증가하는 경향을 보였다. 일반강섬유(HF)와의 비교에서는 길이 30 mm 및 혼입률 0.3% 및 0.6%에서의 휨인성은 비정질강섬유의 경우가 약간 더 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Figs. 7과 8에서 하중-변위곡선에서 상대적으로 겉보기 부피가 큰 비정질강섬유의 섬유혼입률 증가로 휨강도가 증대되어 최대하중 부근에서의 에너지소산능력 향상이 잔류단계에

서의 급격한 강도감소에도 불구하고 부족한 부분이 보완되어진 것으로 판단된다.

Fig. 12은 일정구간(0 ~ 2 mm)에 대한 휨인성(flexural toughness)관점에서 결과를 도출하여 섬유길이 및 혼입률에 대하여 그래프에 표현하였다. 비정질강섬유(AF)의 경우 길이 10 mm의 경우 에너지 소산능력은 0.3% 혼입률에서 11.2 MPa, 0.6%에서 9.2 MPa로 섬유길이 및 혼입률에서 가장 낮게 나타났으며 혼입률 증가로 인한 에너지소산능력이 감소된 것으로 나타났다. 섬유의 길이 20 mm의 경우 0.3% 혼입률에서 11.3 MPa, 0.6%에서 23.3 MPa로 섬유혼입률의 증가로 인한 혼입률 증가로 인한 휨인성이 약 100%정도 증가하였다. 섬유의 길이 30 mm의 경우 0.3% 혼입률에서 15 MPa, 0.6%에서 25 MPa로 섬유혼입률의 증가로 인한 휨인성이 약 75%정도 증가하였다. 일반강섬유(HF)의 경우 0.3% 혼입률에서 16 MPa, 0.6%에서 22 MPa, 1.2%에서 35 MPa로 섬유혼입률의 증가로 인한 휨인성이 약 40% 및 117%정도 각각 증가하였다. 결론적으로, 비정질강섬유(AF)를 혼입하였을 때 길이 및 혼입률 증가로 인하여 에너지소산능력인 휨인성은 증가하는 경향을 보였다. 일반강섬유(HF)와의 비교에서는 길이 30 mm 및 혼입률 0.3% 및 0.6%에서의 평균에너지소산능력은 비정질강섬유의 경우와 거의 동등한 수준으로 나타났다. 에너지 소산구간의 증가는 섬유의 혼입률 증가로 인한 에너지소산능력의 격차가 더욱 벌어지는 결과를 보여주었다.

### 3.6. 휨인성지수 (Toughness)

Fig. 13와 Fig. 14은 휨 보강에 의한 인성을 평가하

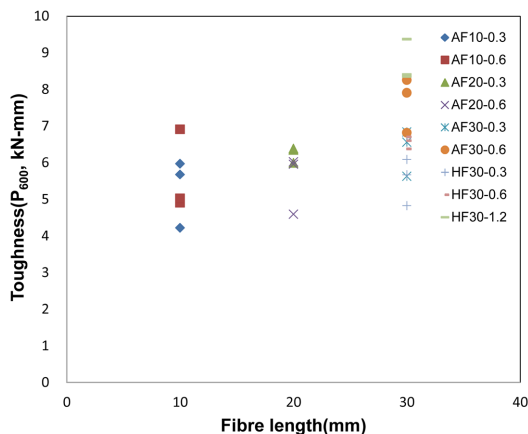


Fig. 11. Flexural toughness ( $\sim L/600$ , kN-mm) for AF vs. HF.

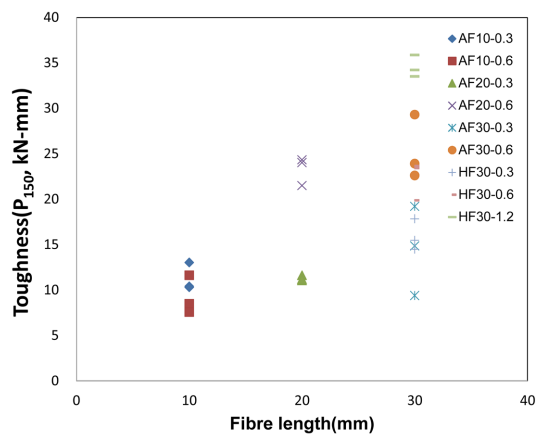


Fig. 12. Flexural toughness ( $\sim L/150$ , kN-mm) for AF vs. HF.

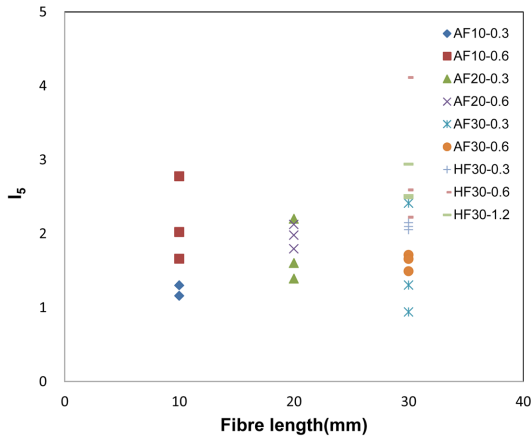


Fig. 13. Flexural toughness index  $I_5$  for AF vs. HF.

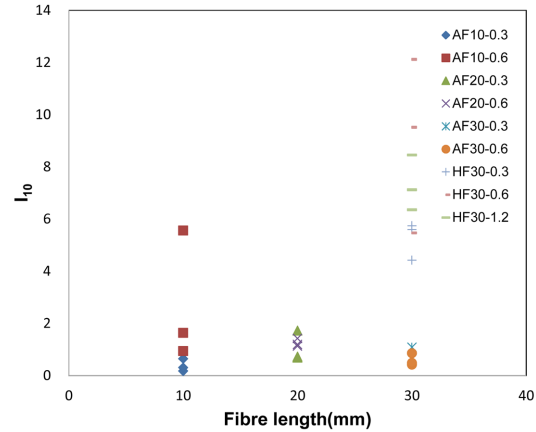


Fig. 14. Flexural toughness index  $I_{10}$  for AF vs. HF.

는 방법 중에 하나인 ASTM C1018에 의한 휨인성 지수로 콘크리트의 균열시작점(frist cracking point)에서 3배 및 5배까지의 에너지소산을 첫 균열지점까지의 에너지소산 값으로 나누어 구한 지수( $I_5$ ,  $I_{10}$ )로 ASTM C1609 및 JSCE-SF4 시험법이 나오지 전까지 휨 보강에 의한 인성을 평가하던 방법이다. 섬유 길이에 대한 휨인성지수의 비교 그래프에서 ASTM C1609 방법에 의한 섬유의 에너지소산능력보다 데이터간의 범위가 크며, 섬유길이 및 혼입률에 대한 영향을 구분하는데 다소 불규칙하게 나타났다. 이와 같은 결과는 전 구간에 대한 에너지소산능력을 평가하는 ASTM C1609방법과는 달리 휨 인성지수를 평가하는 중요한 인자인 콘크리트의 첫 균열지점(frist cracking point)이 모든 시험체마다 다르며, 또한 균열시작점에서의 3배 및 5배까지의 에너지소산 구간도 모두 달라지게 되어 휨인성지수( $I_5$ ,  $I_{10}$ )의 값이 불규칙하게 변화되어 섬유의 길이 및 혼입률에 대한 휨성능의 영향을 평가하는데 다소 혼란스러운 점이 있는 것으로 판단된다. Table 3은 ASTM C1609 및 ASTM C1018방법으로 구한 시험데이터를 보여준다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 상대적으로 제조공정이 짧아 환경 및 경제적 측면에서 이점을 갖는 비정질강섬유(AF)를 길이 및 혼입률을 변화하여 휨성능의 평가와 더불어 기존 일반강섬유(HF)와의 비교 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 비정질강섬유(AF)는 일반강섬유(HF)에 비해 결보

기부피가 크며, 같은 혼입률에서 투입되는 섬유개수가 월등히 증가하여 배합과정에서 섬유의 균일한 분산에 주의 할 필요가 있다.

(2) 비정질강섬유(AF)의 적용으로 휨강도 변화는 섬유의 길이가 길수록, 혼입률이 증가할수록 강도는 증가하였으며, 일반강섬유(HF)와 비교에서는 같은 혼입률에서 투입되는 개수의 증가로 휨강도가 보다 크게 나타나는 것으로 판단된다.

(3) 하중-변위 곡선에서는 비정질강섬유(AF)의 혼입은 일반강섬유(HF)에 비해 최대하중의 증가로 매트릭스 균열 후 파괴진행은 일반강섬유(HF)와 비교시 급격하게 진행이 되며, 섬유의 인발에 의한 파괴진행이 아닌 개별섬유의 파단에 의한 하중감소가 진행되는 것으로 판단된다.

(4) 잔류강도와와의 비교에서는 균열 후 파괴가 급격하게 진행이 되지만, 섬유의 혼입으로 인한 최대하중부근에서 상대적으로 일반강섬유(HF)에 비해 에너지소산능력이 우수하여 일반강섬유(HF)와는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

(5) 에너지소산능력인 휨인성에서도 일정구간까지의 하중-변위곡선은 서로 다르지만 전 구간에서 발산되는 에너지소산능력은 일반강섬유(HF)와 거의 동일한 수준으로 나타났다.

(6) 일반강섬유(HF)의 경우 균열 후 인발저항에 의한 균열의 진행으로 잔류단계에서의 저항력은 보다 우수하며, 비정질강섬유(AF)의 경우는 투입되는 섬유개수의 증가로 인한 최대하중부근에서의 에너지소산능력의 증가가 궁극적으로는 잔류단계에서의 부족한 부분을 보완하는 것으로 판단된다.



Table 3. ASTM C1609 vs. C1018

Specimen	ASTM C 1609 (Toughness)		ASTM C 1018 (Toughness Index)		
	P <sub>600</sub> (kN-mm)	P <sub>150</sub> (kN-mm)	first crack	I <sub>5</sub>	I <sub>10</sub>
AF-10-0.3-1	5.68	13.04	5.68	1.16	0.18
AF-10-0.3-2	4.22	10.40	4.22	1.30	0.31
AF-10-0.3-3	5.97	10.30	1.82	2.02	0.64
AF-10-0.6-1	4.91	8.49	1.82	2.02	1.64
AF-10-0.6-2	5.03	7.57	0.54	2.78	5.55
AF-10-0.6-3	6.91	11.63	3.29	1.66	0.94
AF-20-0.3-1	6.34	11.62	2.36	2.20	1.72
AF-20-0.3-2	6.38	11.04	3.64	1.60	0.69
AF-20-0.3-3	6.00	11.19	3.81	1.39	0.72
AF-20-0.6-1	4.59	24.03	7.59	2.12	1.42
AF-20-0.6-2	5.96	24.33	7.96	1.98	1.19
AF-20-0.6-3	6.02	21.49	7.07	1.80	1.13
AF-30-0.3-1	5.63	19.19	5.63	2.41	-
AF-30-0.3-2	6.84	14.86	5.57	1.31	0.63
AF-30-0.3-3	6.56	9.38	4.10	0.94	1.08
AF-30-0.6-1	6.82	29.31	10.63	1.71	0.42
AF-30-0.6-2	7.91	23.92	7.91	1.66	0.86
AF-30-0.6-3	8.25	22.60	8.25	1.49	0.49
HF-30-0.3-1	5.67	15.48	1.83	2.10	4.42
HF-30-0.3-2	6.08	17.85	1.56	2.15	5.60
HF-30-0.3-3	4.82	14.48	0.38	2.06	5.74
HF-30-0.6-1	6.70	23.64	0.73	4.11	12.11
HF-30-0.6-2	6.37	23.42	0.22	2.59	9.52
HF-30-0.6-3	6.60	19.86	2.05	2.22	5.47
HF-30-1.2-1	9.37	34.21	2.08	2.52	8.46
HF-30-1.2-2	8.35	35.87	4.28	2.94	7.12
HF-30-1.2-3	8.41	33.50	4.58	2.49	6.35

### 감사의 글

본 논문은 2014년 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행한 건설기술혁신사업(11기술혁신F04)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사합니다.

### References

1. Benter, A. and Mindess, S., "Fiber-Reinforced Cementitious Composite," Elsevier Science, London, 1990, pp. 1-20.
2. Mindess, S, Young, J. F. and Darwin, D., "Concrete," Prentice Hall, New Jersey, 2003, pp. 599-618.
3. Abrishami, H. H. and Mitchell, D., "Influence of Steel fibers on Tension Stiffening," ACI Structural Journal, Vol. N0. 6, 1997, pp. 769-776.
4. Kwon, W. H, Kim, W. S., Kang, T. H. K., Hong, S. G. and Kwak, Y. K., Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Exterior Connections under Cyclic Loads, " Korea Concrete Institute, Vol. 23, No. 6, 2011, pp. 711-722.
5. Yang, I. H., Joh, C. B., Kang, S. T. and Kim, B. S., "An Experimental Study on Flexural Behavior of Steel Fiber

- Reinforced Ultra High Performance Concrete,” Korea Concrete Institute, Vol. 21, No. 6, 2009, pp. 737-744.
6. Ku, D. O., Kim S. D., Kim, H. S. and Choi, K. K., “Flexural Performance Characteristics of Amorphous Steel Fiber-Reinforced Concrete,” Korea Concrete Institute, Vol. 26, No. 4, 2014, pp. 483-489.
  7. Oh, Y. H., “Evaluation of Flexural Strength for Normal and High Strength Concrete with Hooked Steel Fibers,” Korea Concrete Institute, Vol. 20, No. 4, 2008, pp. 531-539.
  8. Bantia, 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.
  9. Park, K. W, Lee, J. S., Kim, W., Kim, D. J. and Lee, G. Y., “Cracking Behavior of RC Tension Members Reinforced with Amorphous Steel Fibers, Korea Concrete Institute, Vol. 26, No. 4, 2014, pp. 475-482.
  10. Yang, J. M., Yoon, S. H., Choi, S. J., and Kim, G. D., “Development and Application of Pig Iron Based Amorphous Fiber for Concrete Reinforcement,” Magazine of the Korea Concrete Institute, Vol. 25, No. 4, 2013, pp. 38-41.
  11. Park, K. W, Lee, J. S., Kim, W., Kim, D. J. and Lee, G. Y., “Tension Stiffening Effect of RC Tension Members Reinforced with Amorphous Steel Fibers, Korea Concrete Institute, Vol. 26, No. 5, 2014, pp. 581-589.
  12. Kim, B and Lee S. H., “Comparison Analysis of Fiber Distribution and Workability for Amorphous Steel Fiber Reinforced Concrete,” J. of Korean Inst. of Resources Recycling, Vol. 23, No. 4, 2014, pp. 47-57.
  13. ASTM C1399, “Standard Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced Concrete,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
  14. ASTM C1609, “Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete(Using Beam with Third-Point Loading),” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
  15. ASTM C1018, “Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete(Using Beam with Third-Point Loading),” ASTM International, West Conshohocken, PA, 1997.
  16. Bentur, A., Mindess, S., Diamond, S., “Pull-out processes in steel fibre reinforced cement,” International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 7(1), Feb. 1985, pp. 29-37.
  17. Frantzis, P. and Baggott, R., “Transition Points in Steel Fibre Pull-out Tests from Magnesium Phosphate and Accelerated Calcium Aluminate Binders,” Cement and Concrete Composites, 25(1), Jan. 2003, pp. 11-17.
  18. Choi, H., “Shrinkage Cracking Characteristics of Micro Steel Fiber Reinforced Concrete,” Soongil University, Seoul, Korea, 2010, pp. 38-48.



김 병 일

- 영남대학교 건축공학과 학사
- University of Florida 토목공학 공학석사
- University of Florida 토목공학 공학박사
- 현재 한국건설기술연구원 도시건축연구소 수석연구원



이 세 현

- 건국대학교 건축공학과 학사
- 건국대학교 건축공학과 석사
- 건국대학교 건축공학과 박사
- 현재 한국건설기술연구원 도시건축연구소 선임연구원