

비정질 강섬유의 길이 및 혼입률에 따른 섬유보강 시멘트복합체의 직접인장특성

Direct Tensile Properties of Fiber-Reinforced Cement Based Composites according to the Length and Volume Fraction of Amorphous Metallic Fiber

김 홍 섭¹

김 규 용²

이 상 규³

최 경 철⁴

남 정 수^{2*}

Kim, Hong-Seop¹

Kim, Gyu-Yong²

Lee, Sang-Kyu³

Choe, Gyeong-Cheol⁴

Nam, Jeong-Soo^{2*}

Postdoctoral Researcher, Department of Architecture, The University of Tokyo, Bunkyo-Gu, Tokyo, 113-8656, Japan¹

Professor, Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Yuseong-Gu, Daejeon, 34134, Korea²

Doctoral Course, Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Yuseong-Gu, Daejeon, 34134, Korea³

Research Fellow, Institute of Social Infrastructure Technology, Chungnam National University, Yuseong-Gu, Daejeon, 34134, Korea⁴

Abstract

In this study, the direct tensile properties of amorphous metallic fiber-reinforced cement based composites according to the strain was evaluated. A thin plate-shape amorphous metallic fiber with 15mm and 30mm in length was used. And fiber-reinforced cement based composites were prepared with contents of 1.0, 1.5, 2.0%. The direct tensile test was conducted under the conditions of 10^{-6} /s(static) and 10^1 /s(dynamic) strain rate. As a results, amorphous metallic fiber with a length of 15mm was observed in pull-out behavior from the cement matrix because of the short fiber length and large portion of mixed fiber. On the other hand, amorphous metallic fiber with a length of 30mm were not pulled out from matrix because the bonding force between the fiber and matrix was large due to rough surface and large specific surface area. However, fracture occurred because thin plate shape fibers were vulnerable to shear force. Tensile strength, strain capacity and toughness were improved due to the increase in the fiber length. The dynamic increase factor of L15 was larger that of L30 because the bonding performance of the fiber-matrix interface is significantly affected by the strain rate.

Keywords : amorphous metallic fiber, direct tensile properties, strain rate, dynamic increase factor

1. 서 론

콘크리트는 경제적이고 압축강도와 내구성이 우수하기 때문에 건축구조물 및 사회기반시설물에 널리 사용되고 있다. 그러나 콘크리트는 압축강도에 비하여 휨·인장강도가 작고, 균열 저항성능이 약하기 때문에 취성적으로 파괴되는 특성을 가지고 있다. 이와 같은 배경에서 섬유보강 콘크

리트는 매트릭스 내부에 섬유를 불연속적으로 배열시켜 섬유의 가교작용에 의해 균열을 억제하고 휨·인장성능을 크게 향상 시킨 재료이다. 이러한 섬유보강 시멘트계 복합체는 1960년대부터 연구되어 1970년대부터 다양한 구조물에 적용되고 있다.

한편, 강섬유보강 콘크리트는 휨·인장강도, 에너지 흡수능력이 우수한 재료로 구조물의 보수·보강재로 많이 사용되고 있다. 이러한 강섬유보강 콘크리트의 휨·인장거동은 섬유길이 및 직경, 형상비, 인장강도, 혼입률, 섬유-매트릭스 계면의 부착특성 등에 큰 영향을 받는다. 따라서, 다양한 형태의 강섬유가 개발되고 있으며 이를 적용한 콘크리트의 휨·인장성능에 대한 연구가 수행되고 있다[1-5].

Received : February 12, 2019

Revision received : March 25, 2019

Accepted : April 18, 2019

* Corresponding author : Nam, Jeong-Soo

[Tel: 82-42-821-5629, E-mail: j.nam@cnu.ac.kr]

©2019 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

특히, 비정질 강섬유는 용융금속을 10^5-10^6K/s 의 속도로 급랭시켜 제조 한 것으로 결정구조를 갖는 일반 강섬유와 다르게 비결정 구조를 갖기 때문에 인장강도가 크고 내부식성 및 내마모성이 우수한 재료이다. 또한, 비정질 강섬유는 박판형의 형상을 갖기 때문에 형상비와 비표면적이 크고, 거친 섬유 표면에 의해 매트릭스와의 부착성능이 우수하다. 이러한 비정질 강섬유를 보강한 콘크리트는 후크형 강섬유보강 콘크리트에 비해 휨강도 및 인장강도가 크지만, 비정질 금속의 취성적 성질과 박판형상으로 전단력에 비교적 약하기 때문에 섬유가 인발되지 않고 파단 되어 응력의 저하가 급격하게 발생하는 파괴거동을 보인다[6-11]. 이와 같은 비정질 강섬유보강 시멘트복합체의 재료성능은 정적 및 동적하중환경에서도 충분한 검토가 필요하다.

이에 본 연구에서는 변형속도에 따른 비정질 강섬유보강 시멘트복합체(Amorphous metallic fiber-reinforced cement based composite, 이하 AFRCC)의 직접인장특성에 대하여 검토하기 위하여, 길이가 다른 박판형 비정질 강섬유를 사용하여 섬유보강 시멘트복합체를 제작하였으며 변형속도 $10^{-6}/\text{s}$, $10^1/\text{s}$ 의 범위에서 직접인장시험을 수행하였다. 그리고 변형속도의 변화에 따른 비정질 강섬유와 시멘트복합체 매트릭스의 부착 및 인발, 섬유의 파단 특성이 비정질 강섬유보강 시멘트복합체의 직접인장특성에 미치는 영향에 대하여 분석하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용재료 및 배합

Figure 1 및 Table 1에 비정질 강섬유의 성상과 물리적 특성을 나타내었다. 본 연구에서는 길이 15, 30mm의 비정질 강섬유를 사용하였으며, 길이 15mm의 비정질 강섬유는 너비 1.0mm, 두께 $24\mu\text{m}$ 이고, 길이 30mm의 비정질 강섬유는 너비 1.6mm, 두께 $29\mu\text{m}$ 이다. 비정질 강섬유의 밀도와 인장강도는 $7.2\text{g}/\text{cm}^3$, $1,400\text{MPa}$ 이다.

Table 2에 실험 수준과 재령 28일에서의 정적압축강도를 나타내었다. 길이 15, 30mm의 비정질 강섬유를 체적의 외할로 각각 1.0, 1.5, 및 2.0vol.% 혼입하였다. Table 3은 시멘트복합체의 배합을 나타낸 것으로 재령 28일의 설계압축강도를 만족시키기 위하여 W/B는 0.4로 설정했다. 또한, 섬유보강 시멘트 복합체의 유동성과 섬유의 분산 성능을 향상시키기 위하여 플라이 애시와 7호 규사를 사용

하였다. Table 4에 사용 재료의 물리적 성질을 나타냈다.

2.2 시험체 제작

섬유보강 시멘트복합체의 비빔은 먼저 시멘트, 플라이애시 및 규사를 건비빔 한 후 물과 혼화제를 투입하여 모르타르 베이스를 제작하였다. 그 후 섬유가 고르게 분산되도록 투입하고, 유동성을 만족하도록 충분한 비빔을 하였다. 비빔 된 섬유보강 시멘트복합체는 몰드에 타설하고 항온·항습실에서 1일간 양생한 후 탈형하여 재령 28일까지 표준양생을 실시하였다.

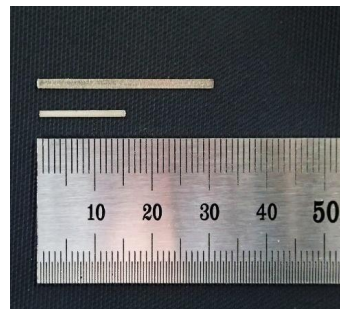


Figure 1. Shape of amorphous metallic fiber

Table 1. Mechanical properties of the amorphous fibers

Length (mm)	15	30
Width (mm)	1.0	1.6
Thickness (um)	24	29
Specific surface (m^2/kg)		10
Density (g/cm^3)		7.2
Tensile strength (MPa)		1,400

Table 2. Details of specimen and compressive strength

ID.	Fiber length (mm)	Volume fraction (%)	Compressive strength ¹⁾ (MPa)
L15-V1.0	15	1.0	51.81
L15-V1.5		1.5	51.18
L15-V2.0		2.0	49.52
L30-V1.0	30	1.0	59.30
L30-V1.5		1.5	54.72
L30-V2.0		2.0	48.27

1) Average value of static compressive strength measured by 3 specimens at the age of 28 days

Table 3. Mix proportions of AFRCC

W/B	C/B	FA/B	S/B
0.4	0.85	0.15	0.35

W: Water, C: Cement, FA: Fly-ash, S: Silica sand

Table 4. Mechanical properties of used materials

Materials	Mechanical properties
Cement	Ordinary portland cement, Density: 3.15g/cm ³ , Fineness: 3,200cm ² /g
Fly-ash	Density: 2.20g/cm ³ , Fineness: 3,000cm ² /g
Silica sand	Type 7, Density: 2.64g/cm ³ , Absorptance: 0.38%
Super plasticizer	Polycarboxylic acid type

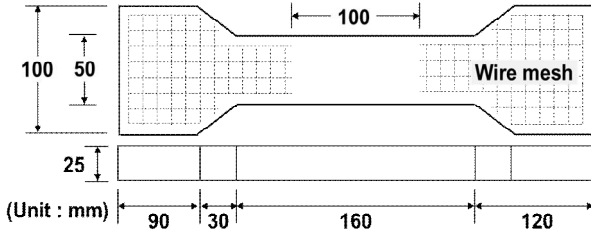


Figure 2. Dumbbell shape tensile test specimen

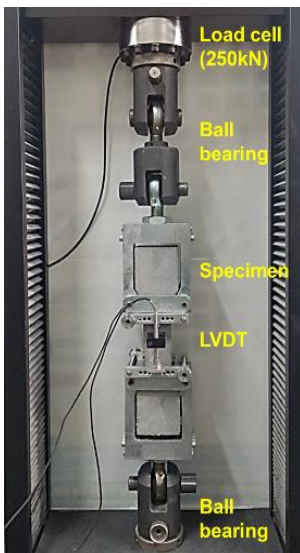


Figure 3. Static direct-tensile test equipment



Figure 4. Dynamic direct-tensile test equipment

Figure 2에 덤벨형 인장시험체를 나타내었다. 시험체의 크기는 길이 400mm, 너비 100mm, 두께 25mm이고, 중앙 단면은 너비 50mm, 두께 25mm이다. 시험체의 양 단부에 와이어 메쉬를 보강하여 변형 측정 범위 내에서 균열이 발생하도록 설정하였다. 각 시험 수준에서 10개의 시험체를 제작하였으며, 10⁻⁶/s 및 10¹/s의 변형속도에서 각각 5개의 시험체를 사용하여 직접인장시험을 수행하였다.

2.3 시험 방법

정적인장시험은 Figure 3의 시험장치를 사용하여 1mm/min.의 재하 속도로 실시하였다. Figure 4에 재하

속도 5m/sec., 변형속도 10¹/s의 고속재하 시험장치를 나타내었다. 기본적으로 일축압축하중을 재하하는 장치이기 때문에 직접인장시험을 설치하여 동적인장시험을 수행하였다. 인장응력은 직접인장시험 상부의 로드셀에서 측정되었으며, 인장변형은 시험체에 LVDT 변위계를 설치하여 측정하였다. 동적인장시험에 의한 응력과 변형 데이터는 고속 데이터 로거를 사용하여 30,000Hz의 샘플링 속도로 수집하였다.

인장특성으로 인장강도(최대 응력 점), 변형능력(최대 응력에서의 변형), 인장인성(응력-변형 곡선의 면적)을 평가하였다. 인장인성은 피크인성과 파괴인성으로 구분하였으며, 피크인성은 최대 응력 점까지 응력-변형곡선의 면적, 파괴인성은 시험체의 최종파괴시점까지 응력-변형곡선의 면적으로 구하였다. 동적증가계수(Dynamic increase factor, 이하 DIF)는 변형속도 10¹/s에서 측정된 인장특성 값을 정적변형속도(10⁻⁶/s)에서의 인장특성 값으로 나누어 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 직접인장응력-변형 곡선 및 파괴성상

Figure 5에 변형속도에 비정질 강섬유보강 시멘트복합체의 인장응력-변형 곡선 및 균열패턴을 나타내었다. 모든 시험조건에서 초기 균열 이후 멀티크랙과 함께 변형경화 거동이 나타났다. 길이 30mm 비정질 강섬유보강 시멘트 복합체는 섬유와 매트릭스의 부착성능이 우수하기 때문에 응력의 분산 효과가 크게 되어 변형능력 0.5%이상의 변형경화 거동이 나타났으며, 길이 15mm 비정질 강섬유보강 시멘트복합체에 비해 인장강도와 변형능력이 큰 것으로 나타났다. 한편, 변형속도가 증가함에 따라 변형경화거동이 더욱 뚜렷하게 나타났으며 인장강도와 변형능력이 향상되었다.

Figure 6에 인장파괴단면에서 섬유길이에 따른 파괴성상을 나타내었다. 길이 15mm 비정질 강섬유는 섬유 길이가 짧고 혼입개체수가 많기 때문에 섬유가 매트릭스로부터 인발되는 파괴거동이 관찰되었다. 한편, 길이 30mm의 비정질 강섬유는 섬유표면이 거칠고 비표면적이 크기 때문에 매트릭스와의 부착성능이 우수하지만, 박편형의 섬유 형상이 전단력에 취약하기 때문에 섬유가 매트릭스로부터 인발되지 않고 파단되었다.

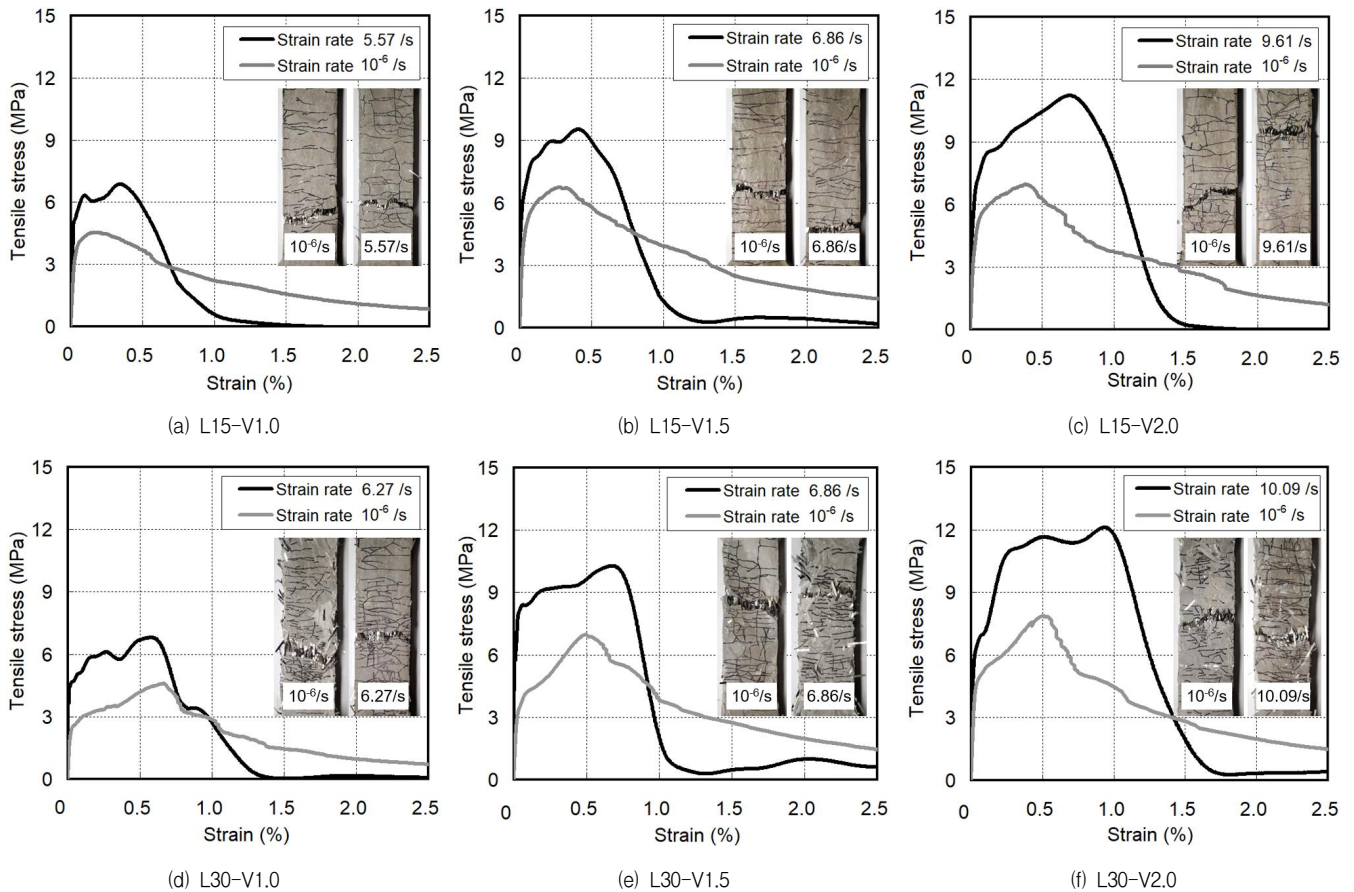
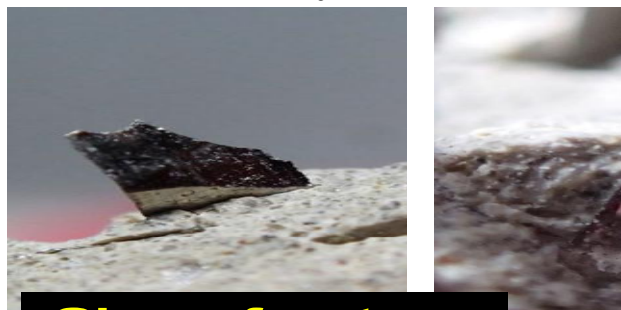


Figure 5. Direct tensile stress-strain curve according to the strain rate



(a) Fiber length = 15mm



(b) Fiber length = 30mm

Figure 6. Fiber fracture properties

3.2 섬유길이 및 변형속도에 따른 인장특성

Figure 7에 변형속도에 따른 비정질 강섬유보강 시멘트 복합체의 인장특성을 비교하여 나타내었다. 같은 섬유혼입률과 변형속도 조건에서 섬유의 길이가 길수록 섬유의 가교작용의 범위가 증가하고 내부 구속력이 크기 때문에 길이 30mm 비정질 강섬유보강 시멘트복합체의 인장강도는 길이 15mm 비정질 강섬유보강 시멘트복합체에 비해 큰 것으로 나타났다. 한편, 변형속도의 증가는 섬유와 매트릭스의 강도, 섬유-매트릭스의 부착성능을 향상시키기 때문에 모든 시험조건에서 인장강도가 향상되었다.

섬유길이에 따른 변형능력의 경우, 정적 및 고변형속도 조건에서 길이 30mm 비정질 강섬유보강 시멘트복합체가 길이 15mm 비정질 강섬유보강 시멘트복합체 보다 큰 것으로 나타났다. 길이 30mm 비정질 강섬유는 섬유의 길이 때문에 매트릭스 내부에서의 구속력 및 가교 작용의 범위가 증가하고, 따라서 변형경화 거동과 변형 능력이 크게 되는 것으로 판단된다. 또한, 섬유가 매트릭스로부터 인발되지

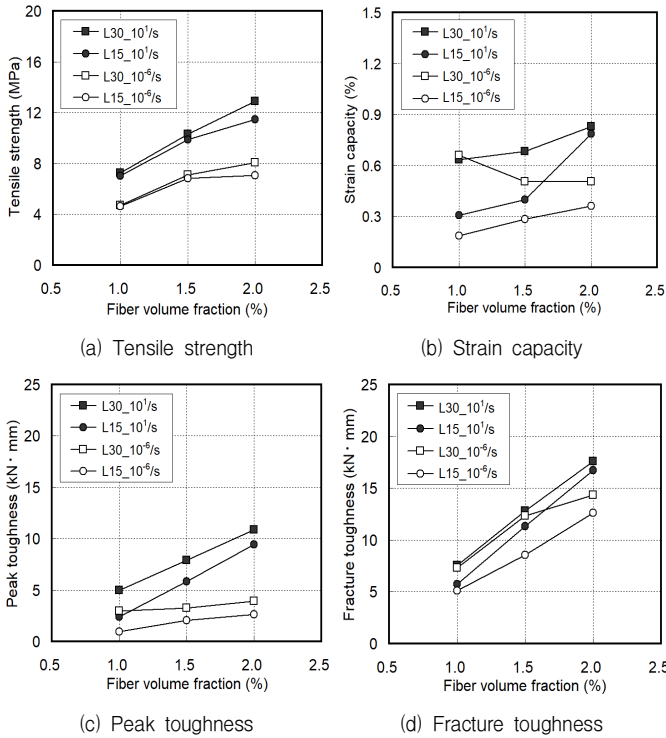


Figure 7. Tensile properties according to the strain rate and fiber length

않고 파단되기 전에 매트릭스의 약한 부분으로 균열이 유도되어 다수의 멀티크랙이 생성되는 것으로 판단된다. 반면, 길이 15mm의 비정질 강섬유는 섬유 길이가 짧기 때문에 매트릭스의 균열 개구부에서의 가교작용의 범위가 작고, 섬유가 매트릭스로부터 인발되는 파괴 거동을 보이므로 멀티크랙의 수와 변형능력이 길이 30mm 비정질 강섬유보강 시멘트복합체에 비해 작은 것으로 판단된다.

피크인성과 파괴인성은 응력-변형곡선의 면적으로 산출되기 때문에 인장강도와 변형능력과 밀접한 관계가 있다.

따라서, 인장강도와 변형능력이 큰 길이 30mm 비정질 강섬유보강 시멘트복합체의 인장인성이 길이 15mm 비정질 강섬유보강 시멘트복합체 보다 큰 것으로 나타났다. 또한, 변형속도와 섬유 혼입률이 증가할수록 인장인성은 향상되는 경향이 나타났다.

비정질 강섬유는 섬유가 매트릭스로부터 인발되는 것보다 섬유와 매트릭스의 부착성능이 충분히 확보되어 섬유가 파단 되는 것이 인장강도, 변형능력 및 인성의 향상에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다. 따라서, 비정질 강섬유를 이용한 섬유보강 시멘트복합체의 인장성능 향상을 위해서

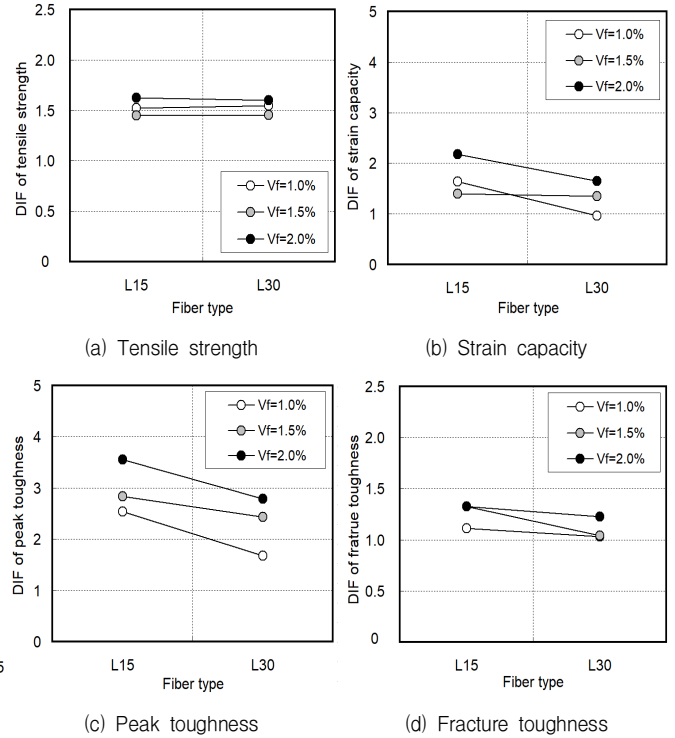


Figure 8. DIF of tensile properties according to the fiber length

는 비정질 강섬유의 혼입률과 매트릭스양을 고려한 최적 혼합비를 도출하는 것이 중요하다고 사료된다.

3.3 섬유길이에 따른 동적증가계수

Figure 8에 비정질 강섬유 길이에 따른 인장특성의 DIF를 나타내었다. 인장특성에 대한 DIF의 경우 모든 평가 요인에 대해서 길이 15mm 비정질 강섬유보강 시멘트복합체가 길이 30mm 비정질 강섬유보강 시멘트복합체 보다 큰 경향으로 나타났다. 변형속도에 따른 섬유보강 시멘트복합체의 인장거동에 관한 기존 연구에서 변형속도의 증가는 섬유-매트릭스계면의 부착특성에 큰 영향을 주는 것으로 보고되고 있다. 길이 15mm 비정질 강섬유보강 시멘트복합체는 섬유가 파단 되지 않고 인발되는 파괴 거동을 보이기 때문에 섬유와 매트릭스 계면의 부착과 섬유의 인발거동이 섬유보강 시멘트복합체의 인장거동에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 반면, 길이 30mm 비정질 강섬유보강 시멘트복합체는 섬유가 매트릭스로부터 인발되지 않고 파단 되기 때문에 섬유와 매트릭스계면의 부착보다 섬유강도에 큰 영향을 받는 것으로 판단된다. 따라서, 변형속도의 영향을 받는 섬유-매트릭스 계면의 부착 효율이 길이

15mm 비정질 강섬유보강 시멘트복합체가 길이 30mm 비정질 강섬유보강 시멘트복합체에 비해 크기 때문에 변형속도에 따른 인장특성의 증가 효과가 큰 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 변형속도에 따른 비정질 강섬유보강 시멘트복합체의 직접인장특성에 대하여 섬유길이 15mm 및 30mm로 구분하여 평가하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 정적 및 동적변형속도 조건에서 길이 15mm의 비정질 강섬유는 매트릭스로부터 인발되었으나, 길이 30mm의 비정질 강섬유는 섬유의 표면이 거칠고 비표면적이 크기 때문에 매트릭스와의 부착성능이 우수하지만, 박판형의 섬유 형상이 전단력에 취약하여 혼입섬유가 인발되지 않고 파단 되었다.
- 2) 변형속도에 관계없이 섬유의 길이가 길수록 매트릭스 내부에서의 구속력과 가교작용의 범위가 크고, 응력의 분산효과가 크기 때문에 인장강도 및 변형능력이 증가하는 것으로 판단된다.
- 3) 길이 15mm 비정질 강섬유보강 시멘트복합체는 섬유가 파단 되지 않고 인발되는 파괴 거동을 보이기 때문에 섬유와 매트릭스 계면의 부착과 섬유의 인발 거동이 섬유보강 시멘트복합체의 인장거동에 큰 영향을 준다. 반면, 길이 30mm 비정질 강섬유보강 시멘트복합체는 섬유가 매트릭스로부터 인발되지 않고 파단되기 때문에 섬유와 매트릭스계면의 부착보다 섬유강도에 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.
- 4) 변형속도의 영향을 받는 섬유-매트릭스 계면의 부착효율이 길이 15mm 비정질 강섬유보강 시멘트복합체가 길이 30mm 비정질 강섬유보강 시멘트복합체에 비해 크기 때문에 변형속도에 따른 인장특성의 증가 효과가 큰 것으로 판단된다.

요 약

본 연구에서는 변형속도에 따른 비정질 강섬유보강 시멘트복합체의 직접인장특성에 대하여 평가하였다. 길이 15, 30mm의 박판형 비정질 강섬유를 각각 1.0, 1.5, 2.0%

혼입한 섬유보강 시멘트복합체를 제작하였으며, 변형속도 10^{-6} /s(정적), 10^1 /s(동적)의 조건에서 직접인장시험을 수행하였다. 그 결과, 길이 15mm의 비정질 강섬유는 섬유의 표면이 거칠고 비표면적이 크기 때문에 매트릭스와의 부착성능이 우수하지만, 박판형의 섬유 형상이 전단력에 약하기 때문에 섬유가 인발되지 않고 파단 되었다. 섬유 길이가 길수록 인장강도, 변형능력 및 인성이 큰 것으로 나타났다. 반면, 길이 30mm의 비정질 강섬유는 매트릭스로부터 인발되지 않고 파단 되지만 길이 15mm의 비정질 강섬유는 매트릭스로부터 인발되기 때문에 변형속도의 영향을 받는 섬유-매트릭스 계면의 부착효율이 크게 되어, 인장강도, 변형능력 및 인성에 대한 동적증가계수가 큰 것으로 나타났다.

키워드 : 비정질 강섬유, 직접인장특성, 변형속도, 동적증가계수

Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education (2017R1D1A1B03034776).

ORCID

Hong-Seop Kim, <http://orcid.org/0000-0003-3342-550X>

Gyu-Yong Kim, <http://orcid.org/0000-0002-8662-8899>

Sang-Kyu Lee, <http://orcid.org/0000-0003-2318-3949>

Gyeong-Cheol Choe, <http://orcid.org/0000-0001-9177-5327>

Jeong-Soo Nam, <http://orcid.org/0000-0002-9723-5994>

References

1. Naaman A, Shah S. Pull-out mechanism in steel fiber-reinforced concrete. *Journal of the Structural Division*, 1976;102(8):1537-48.
2. Chan Y, Chu S. Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. *Cement Concrete*

-
- Research, 2004;34(7):1167–72.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.023>
3. Li V, Wang Y, Backer S. Effect of inclining angle, bundling and surface treatment on synthetic fibre pull-out from a cement matrix, *Composites*, 1990;21(2):132–40.
[https://doi.org/10.1016/0010-4361\(90\)90005-H](https://doi.org/10.1016/0010-4361(90)90005-H)
 4. Kim HS, Kim GY, Lee SK, Son MJ, Choe GC, Nam JS. Strain rate effects on the compressive and tensile behavior of bundle-type polyamide fiber-reinforced cementitious composites, *Composites Part B*, 2019 mar;160:50–65.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.008>
 5. Nam JS, Shinohara Y, Atou T, Kim HS, Kim GY. Comparative assessment of failure characteristics on fiber-reinforced cementitious composite panels under high-velocity impact, *Composites Part B*, 2016 Aug;99:84–97.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.008>
 6. Won JP, Hong BT, Choi TJ, Lee SJ, Kang JW. Flexural behaviour of amorphous micro-steel fibre-reinforced cement composites, *Composite Structures*, 2012 Mar;94(4):1443–9.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.11.031>
 7. Park KW, Lee JS, Kim W, Kim DJ, Lee GY. Cracking behavior of RC tension members reinforced with amorphous steel fibers, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 2014 Aug;26(4):475–82.
<https://doi.org/10.4334/JKCI.2014.26.4.475>
 8. Ku DO, Kim SD, Kim HS, Choi KK. Flexural performance characteristics of amorphous steel fiber-reinforced concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 2014 Aug;26(4):483–9.
<https://doi.org/10.4334/JKCI.2014.26.4.483>
 9. Yoo DY, Bantia N., Yang JM, Yoon YS. Size effect in normal-and high-strength amorphous metallic and steel fiber reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials*, 2016 Sep;121:676–85.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.040>
 10. Choi SJ, Hong BT, Lee SJ, Won JP. Shrinkage and corrosion resistance of amorphous metallic fiber-reinforced cement composites, *Composite Structures*, 2014 Jan;107:537–43.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.08.010>
 11. Kim HS, Kim GY, Nam JS, Kim JH, Han SH, Lee GY. Static mechanical properties and impact resistance of amorphous metallic fiber-reinforced concrete, *Composite Structures*, 2015 Dec;134:831–44.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.128>