

슬러리 충전 고성능 섬유 보강 시멘트 복합체의 역학적 성능

Mechanical Performance of Slurry Infiltrated High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite

김 현 욱¹

이 창 준^{2*}

Kim, Hyun Wook¹ Lee, Chang Joon^{2*}

Structural Engineering Research Group, Engineering Center, POSCO E&C, Yeonsu-Gu, Incheon, 21985, Korea ¹

Department of Architectural Engineering, Chungbuk National University, Seowon-Gu, Cheongju, Chungbuk 28644, Korea ²

Abstract

This research investigated the mechanical performance of slurry infiltrated high performance fiber reinforced cementitious composite (SI-HPFRCC) with high volume blast furnace slag powder. Hooked-end steel fibers (volume fraction of 6.4%) were used for the fabrication of SI-HPFRCC. A series of mechanical performance test was conducted including strength and toughness of SI-HPFRCC in compressive and flexural mode at four different ages. Compressive and flexural strength tests of the slurry matrix at the same ages were also conducted in order to evaluate fiber reinforcing effect on the mechanical performance. The flexural response of SI-HPFRCC shows an increasing brittleness with age. The compressive response also shows an increasing brittleness with age but the degree of brittleness is much lower than the flexural case. In terms of strength, SI-HPFRCC shows about 140~190% of compressive strength improvement and 440~500% flexural strength improvement comparing to the slurry matrix.

Keywords : steel fiber, blast furnace slag, slurry infiltrated, HPFRCC

1. 서 론

최근 방호, 방폭 구조물의 필요성에 대한 인식의 증대로 방호, 방호구조물을 구축에 필요한 경제적이고 효율적인 콘크리트 재료 개발 연구가 진행되고 있다[1,2,3,4]. 방호, 방폭용 재료에 요구되는 콘크리트의 성질로서 일반 콘크리트에 비해 우수한 강도, 인성, 균열 저항성 등을 들 수 있으며, 이러한 요구 성능을 충분히 만족하는 재료 중의 하나로 슬러리 충전 고성능 섬유보강 시멘트 복합체 (SI-HPFRCC;

Slurry Infiltrated High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite)를 들 수 있다. SI-HPFRCC은 일반 강섬유 보강 콘크리트가 가지는 섬유 부피비 한계 2%를 훨씬 초과 하는 5~20%의 강섬유 사용이 가능하여 보다 향상된 역학적 성능을 기대할 수 있는 재료이다.

슬러리를 충전하는 방식의 섬유 보강 시멘트 복합체는 SIFCON (Slurry Infiltrated Fibrous Concrete) 이라는 명칭으로 Lankard에 의해 개발된 형태가 본격적인 연구의 시작점으로 알려져 있으며, 거푸집이나 몰드에 강섬유를 미리 채우고 점도가 낮은 시멘트 슬러리를 충전 시켜서 제작한다[5]. 본 논문에서는 SIFCON을 최근까지 다양한 방법으로 개발된 고성능 섬유 보강 시멘트 복합체 (HPFRCC; High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite)의 한 종류로서 정의하며 SI-HPFRCC란 용어로 대신한다.

Received : February 10, 2017

Revision received : February 17, 2017

Accepted : February 24, 2017

* Corresponding author : Lee, Chang Joon

[Tel: 82-43-261-2429, E-mail: cjlee@cbnu.ac.kr]

©2017 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

SI-HPFRCC의 충전에 사용되는 슬러리 매트릭스는 굵은 골재를 사용하지 않고 시멘트 함량이 일반 콘크리트 보다 비교적 많은 것이 특징이다. SI-HPFRCC에 사용되는 슬러리 매트릭스는 미리 채워진 강섬유 네트워크 사이를 충분히 충전 할 수 있는 유동성, 작업성, 충전성을 가짐과 동시에 고강도 특성 확보를 위해 낮은 물-결합재 비와 고성능 감수제를 사용한다[5,6,7,8].

SI-HPFRCC의 역학적 특성은 사용된 섬유의 길이, 단면 크기, 형상비, 강도, 탄성계수 등의 섬유자체의 특성에 의존적이며, 동일한 섬유를 사용할 경우 사용된 섬유의 양과 슬러리 매트릭스 성능이 재료의 역학적 특성을 결정한다. 국내 생산되는 강섬유의 형상이 한정적임을 고려할 때 SI-HPFRCC의 성능 결정을 위해서는 슬러리 매트릭스의 배합 선정이 중요하다.

일반 고성능 콘크리트와 유사하게 고성능의 슬러리 매트릭스 개발을 위해서는 실리카폼 등의 고품질의 포졸란 재료가 필요하다. 그러나 적정 수준의 성능 확보를 목표로 한다면 상대적으로 저가인 고로슬래그와 같은 잠재수경성 재료를 사용하여 SI-HPFRCC의 경제성을 확보할 수 있다.

본 연구에서는 적정수준의 역학적 성능과 경제성을 가지는 재료로서 고비율의 고로슬래그를 혼입한 슬러리 매트릭스를 고려하였다. 이를 이용하여 압축강도 50MPa, 인장강도 25MPa 이상을 가지는 고강도, 고인성 SI-HPFRCC를 개발하고 그 역학적 특성을 파악 하였다. 특히 고비율의 고로슬래그 혼입으로 인한 재령에 따른 SI-HPFRCC의 특성 발현 정도와 섬유보강 효과를 파악하기 위해 재령에 따른 역학적인 특성 변화를 평가하였다. 이를 바탕으로 개발된 SI-HPFRCC가 방호, 방폭용 콘크리트 구조 재료로서의 사용 가능성 확인을 위한 기초자료를 제공 하고자 한다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료

2.1.1 슬러리

Table 1에 본 연구에서 사용하는 슬러리의 배합표를 보인다. 연구에 사용된 배합은 물-결합재비 50%로 고로슬래그와 시멘트를 1:1 비율을 사용하였다. 시멘트는 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 고로슬래그는 S사에서 제공한 분말도 4500cm²/g의 제품을 사용하였다. Table

2에 사용된 시멘트와 고로슬래그의 화학 구성비를 보인다. 슬러리 구성을 위한 잔골재로는 6호와 8호 규사를 1:1의 비율로 사용하였으며 슬러리의 작업성 및 품질 확보를 위해 폴리카르본산계 유동화제를 소량 첨가하였다.

Table 1. Mixture proportion of slurry (unit=kg/m³)

W	S1	S2	OPC	BFS	SP
409	409	409	409	409	1.6

Note. W=Water, S1=Sand(#6), S1=Sand(#8), OPC=Ordinary Portland Cement, BFS= Blast Furnace Slag, SP=Superplasticizer.

Table 2. Chemical composition of binders (%)

Binder	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI
OPC	19.30	5.16	2.86	61.78	4.19	0.20	0.92	2.55	2.37
BFS	31.97	13.42	0.33	44.62	4.25	0.24	0.34	3.16	0.97

2.1.2 강섬유

실험체 제작에 사용된 강섬유로 국내 K사의 hooked-end 형태의 길이 60mm 직경 0.75mm를 가지는 원형단면의 제품을 사용하였다. (Table 3 참조).

Table 3. Nominal specification of steel fiber

Length (mm)	Diameter (mm)	Aspect ratio	Tensile Strength (MPa)
60	0.75	80	1000

2.2 실험체 제작

SI-HPFRCC 휨실험을 위한 실험체는 재령별로 각각 3개씩 4개 재령 실험을 위해 총 12개의 실험체를 제작하였다. SI-HPFRCC 압축실험을 위한 별도의 실험체는 제작을 하지 않고, 휨 실험이 완료된 실험체를 이용하여 압축 시험을 진행하였다.

SI-HPFRCC 실험체 제작을 위해서 100mm×100mm×400mm 강재 형틀을 이용하였다. 휨 실험체 형틀의 바닥 판 및 측면판의 경계부의 미세한 틈은 점성이 높은 그리즈 윤활유 (grease)로 매워 슬러리 충전시 미세한 틈을 통한 유출을 방지하였다. 이후 강재 형틀에 준비된 강섬유를 2kg씩 (부피비 6.4%)를 채워 넣었다.

슬러리의 혼합은 원통형 플라스틱 혼합용기와 핸드 드릴형 교반기를 이용하여 수행하였다. 먼저 물과 고성능 감수제

를 제외한 모든 건재료를 플라스틱 용기에 넣고 교반기를 이용하여 30 초간 건비빔 하였다. 이후 준비된 물과 고성능 감수제를 섞어 혼합용기에 투입하고 2 분간 비빔을 지속하였다. 비빔 후 플라스틱 용기 바닥에 쌓여 물과 배합되지 않은 일부 건재료를 긁어내어 추가적으로 2분간 비빔을 하여 슬러리 혼합작업을 완료하였다. 혼합이 완료된 슬러리는 강섬유가 채워진 휨 실험체 형틀에 충전하였다. 슬러리는 휨 몰드 단부의 고정된 위치에서 충전을 하였으며, 충전되는 슬러리는 실험체 하부부터 채워져 반대쪽 단부의 표면까지 아무런 문제없이 충전됨을 확인하였다.

슬러리 충전이 완료된 각 실험체는 비닐을 이용하여 수분 증발을 방지한 상태로 $21 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 온도에서 3일간 양생한 후 탈형하여 각 재령별 실험 시까지 $21 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 온도로 습윤 양생 하였다.

SI-HPFRCC 실험체 제작과 더불어 슬러리 매트릭스의 휨 및 압축 강도 측정을 위해 $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$ 의 형틀과 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 의 정방형 형틀을 사용하여 실험체를 제작 하였다. SI-HPFRCC 실험체 제작에 사용하고 남은 슬러리를 형틀에 채우고, SI-HPFRCC 실험체 제작에 사용된 동일한 조건과 방법으로 양생과정을 수행하였다.

2.3 실험 방법

2.3.1 SI-HPFRCC의 휨강도 및 휨인성 실험

SI-HPFRCC 실험체의 휨강도 및 휨인성 실험은 Figure 1에 보이는 바와 같이 ASTM C1609[9]에서 제안하는 4점 휨시험 방법을 따라서 수행 하였다. 휨 실험체의 하단부 지간은 300mm이고 상단부 두 가력 롤러는 좌우 지점으로부터 각각 100mm씩 떨어져 있다. 휨 실험체 하부 지점 위치로부터 50mm 상부에 사진에서 보이는 Jig를 이용하여 핀고정 조건을 만들고 변위계가 설치된 중량의 강재 막대를 장착하였다. 설치된 변위계는 실험체의 중앙 상단부에 처짐 참조점 Jig와 접촉되어 실험체의 중앙부 처짐을 기록한다. 변위계는 최대 25mm 변위를 1/500mm 정밀도로 측정 가능한 제품을 사용하였다.

실험을 위해 2000kN 재료 시험기를 사용하여 분당 약 0.6mm의 중앙부 처짐 속도를 유지하도록 재하 하였으며, 중앙부 처짐이 15mm를 초과 되는 순간까지 수행하였다. 재하 하중과 중앙부 처짐은 자동화된 데이터 로거와 컴퓨터를 이용하여 초당 1회 측정을 하여 기록하였다. SI-HPFRCC의

휨 시험은 재령 3일, 7일, 14일, 28일에 각각 3개씩 시험을 수행하였다



Figure 1. Testing setup for flexural strength and toughness of SI-HPFRCC

2.3.2 SI-HPFRCC의 압축강도 및 압축인성 실험

SI-HPFRCC 실험체의 압축실험강도 및 압축인성 실험 장면을 Figure 2에 보인다. SI-HPFRCC의 압축실험은 4점 휨시험을 완료한 실험체의 손상되지 않은 단부에 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 10\text{mm}$ 강재판을 2 장씩 상하부에 설치하여 실험을 수행 하였다. 본 연구의 SI-HPFRCC 실험체의 경우 강섬유 함량이 높아 일반 콘크리트에 비해 과대한 변형(변형률 기준 10% 이상)이 발생해도 완전 파괴되지 않는다. 이로 인해 실험체 자체에 변위계를 설치할 경우 측정점 탈락 등으로 인한 측정오류가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 재료시험기 자체의 스트로크 변위를 실험체의 변위로 보고 실험을 수행 하였다.



Figure 2. Testing setup for compressive strength and toughness of SI-HPFRCC

압축 강도 및 압축 인성실험을 위해 2000kN 재료 시험기

를 사용하여 분당 약 0.6mm의 스트로크 변위속도를 유지하도록 재하 하였으며, 변위가 약 15mm가 되는 순간까지 실험을 수행하였다. 재하 하중과 스트로크 변위는 자동화된 데이터 로거와 컴퓨터를 이용하여 초당 1회 측정을 하여 기록하였다. SI-HPFRCC의 압축 실험은 재령별 3개씩 실험을 수행하여 측정결과를 획득하였다.

2.3.3 슬러리 매트릭스의 휨강도 실험

슬러리 매트릭스 실험체의 휨 강도측정을 위해 4점 휨시험을 수행하였다. 실험을 위해 100kN 재료 시험기를 사용하여 분당 약 0.6mm의 스트로크 변위 속도가 유지하도록 재하 하였으며 최대하중으로 실험체가 파괴되는 순간까지 실험을 수행하였다. 슬러리 매트릭스의 휨 실험은 재령 3일, 7일, 14일, 28일에 각각 3개씩 실험하였다.

2.3.4 슬러리 매트릭스의 압축강도 실험

슬러리 매트릭스 실험체의 압축강도 측정을 위해 2000kN 재료 시험기를 사용하여 분당 약 0.6mm의 스트로크 변위속도로 재하 하였으며 최대하중으로 실험체가 파괴되는 순간까지 실험을 수행하였다. 슬러리 매트릭스의 휨 실험은 재령 3일, 7일, 14일, 28일에 각각 3개씩 실험하였다.

3. 실험결과

3.1 재령에 따른 SI-HPFRCC의 휨특성

3.1.1 SI-HPFRCC 하중-처짐 곡선

Figure 3에 SI-HPFRCC의 실험체의 재령별 휨 시험 결과를 3개씩 나타내었다(재령 14일 실험체는 2개의 실험체에 대한 결과만을 확보함). 모든 실험체는 최대 15mm 이상의 처짐까지의 하중-처짐 곡선을 확보 하였다. 동일 재령 실험체들의 최대하중 편차는 다소 있으나 하중-처짐 곡선의 전체적인 경향은 비교적 유사하였다.

3.1.2 SI-HPFRCC의 휨강도

Figure 3의 결과를 바탕으로 각 실험체의 최대하중을 이용하여 휨강도를 계산하였으며 이를 Figure 4에 나타내었다. SI-HPFRCC의 재령별 평균 휨강도는 재령 3일, 7일, 14일, 28일에 각각 13.0MPa, 20.5MPa, 22.5MPa, 26.6MPa를 보였다.

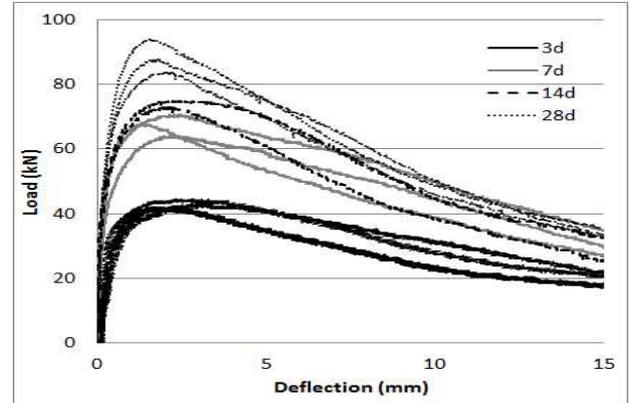


Figure 3. Load-deflection of SI-HPFRCC in bending :4-point bending test

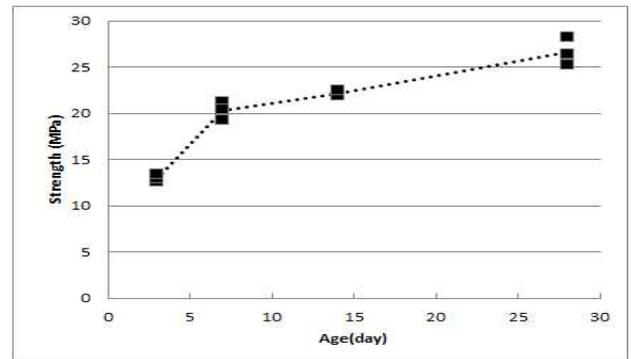


Figure 4. Evolution of flexural strength of SI-HPFRCC

3.1.3 SI-HPFRCC의 휨인성

휨인성 지수는 ASTM C1609를 근거로 Figure 3의 하중-처짐곡선을 이용하여 구할 수 있다. ASTM C1609의 휨인성 지수 산정은 4점 휨 시험의 하중-처짐 곡선의 아래쪽 면적을 이용하여 구하며, 이때 처짐이 휨 시험 시간의 1/200에 도달할 때까지의 면적으로 산정한다. 본 연구의 실험체 지간은 300mm로서 이 값의 1/200은 1.5mm이다. 이를 Figure 3에서 본다면 하중-처짐 곡선의 최대 하중조차 초과하지 못하고 있다. 휨인성 지수가 최대하중 이후의 인성을 대표하는 지수임을 고려할 때, 시간의 1/200은 SI-HPFRCC의 최대 하중 이후의 인성을 반영하기에는 한계가 있다. 이는 ASTM C1609의 경우 소량의 섬유가 첨가된 FRC를 대상으로 규정된 표준인 반면, SI-HPFRCC의 경우 다량의 강섬유(부피비 6.4%)를 사용하기 때문에 발생하는 문제이다. 따라서 본 연구에서는 인성지수를 하중-처짐 곡선의 아래쪽 면적으로 정의하되, 처짐이 휨 시험 시간의 1/20까지 도달할 때까지의 면적으로 정의하여 산정하였다.

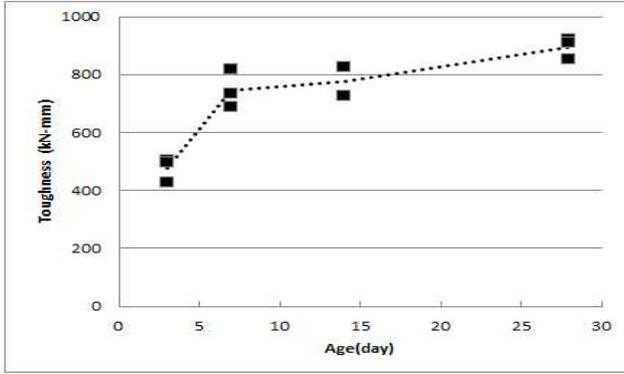


Figure 5. Evolution of flexural toughness of SI-HPFRCC

3.2 재령에 따른 SI-HPFRCC의 압축특성

3.2.1 SI-HPFRCC의 응력-변형률 곡선

SI-HPFRCC의 압축인성을 구하기 위해서는 응력-변형률 곡선이 필요하다. 본 연구에서 사용한 재료는 약 6.4%의 강섬유 부피비를 가지는 압축인성이 큰 재료이다. 이는 일반적인 콘크리트에서 보이는 미소한 변형에서 파괴되지 않고 변형률 기준 10% 이상까지 형상을 유지한다. 이 때문에 일반 콘크리트에서 사용하는 변형률 측정을 위한 표면 부착형 스트레인 게이지나 압축변위 측정 Fixture 등의 사용이 불가능하다.

따라서 본 연구에서는 재료시험기의 스트로크 변위를 실험체의 변형으로 가정하여 실험체의 변형률을 산정하였다. 이 경우 재하 초기에 재하판과 실험체면의 밀실성을 확보하지 못하기 때문에 Figure 6에서 보이는 바와 같이 재하 초기의 하중-변형률관계가 선형이 아닌 비선형성을 보인다. 이를 그림에 나타난 것과 같이 재하 초기를 지나 나타나는 명확한 선형구간을 기준으로 직선을 연장하여 x축과 만나는 점 (A)를 기준으로 하중-변형률 관계곡선을 보정 하였다.

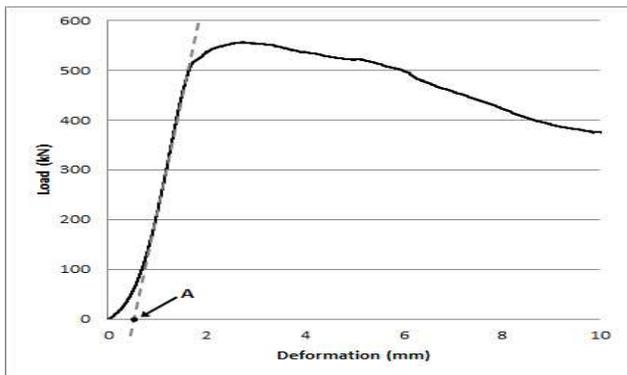


Figure 6. Adjustment of stress-strain curve of SI-HPFRCC

보정된 하중-변형률 관계곡선을 바탕으로 재령별 응력-변형률 관계곡선을 Figure 7에 나타내었다. 재령 3일의 경우 실험체별 응력-변형률 곡선의 편차가 적었으나, 그 외의 재령 실험체의 경우 동일 재령 실험체간 편차가 변형률이 증가하면서 다소 나타났다.

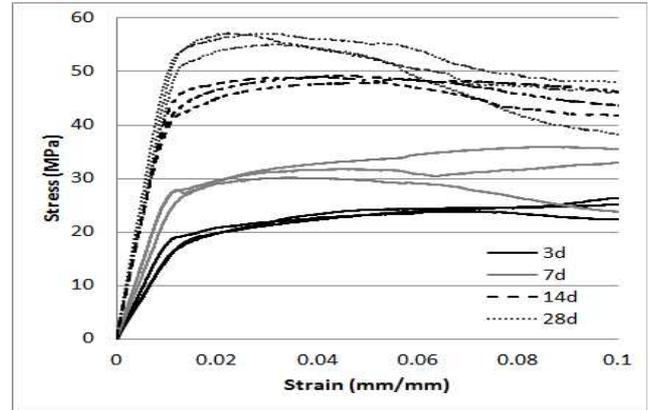


Figure 7. Compressive stress-strain curve of SI-HPFRCC

3.2.2 SI-HPFRCC의 압축강도

Figure 7의 재령별 응력-변형률 곡선을 바탕으로 각 실험체의 압축강도를 구하여 Figure 8에 나타내었다. 각 재령별 평균 압축 강도는 재령 3일, 7일, 14일, 28일에 각각 25.16MPa, 34.88MPa, 48.56MPa, 54.40MPa을 보였다.

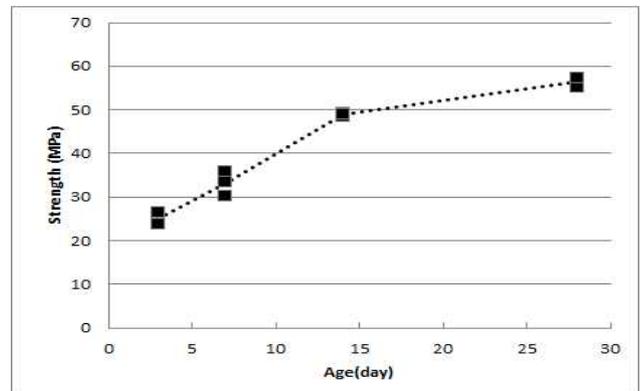


Figure 8. SI-HPFRCC compressive strength

3.2.3 SI-HPFRCC의 압축인성

압축인성 지수는 일본토목학회의 JSCE-SF5[10] 방법을 사용하여 구하였다. JSCE-SF5에서는 응력-변형률 곡선의 변형률 0.75% 까지 만의 면적을 고려한다. Figure 7에서 알

수 있듯이 변형률 0.75% (0.0075mm/mm)는 선형탄성구간에 속하며 따라서 JSCE-SF5기준의 압축인성지수는 SI-HPFRCC 재료에 적용할 경우, 최대하중 이후의 인성을 평가하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서의 압축인성 지수 산정은 압축 응력-변형률 곡선의 아래쪽 면적을 변형률 10% (0.1mm/mm)까지 구한 값으로 정의하여 사용하였다. Figure 7의 압축 응력-변형률 곡선을 바탕으로 재령별 실험체의 압축인성 지수를 계산하여 Figure 9에 보인다. SI-HPFRCC의 재령별 평균 압축 인성은 재령 3일, 7일, 14일, 28일에 각각 2.16MPa-mm, 3.45MPa-mm, 4.32MPa-mm, 4.56MPa-mm를 보였다.

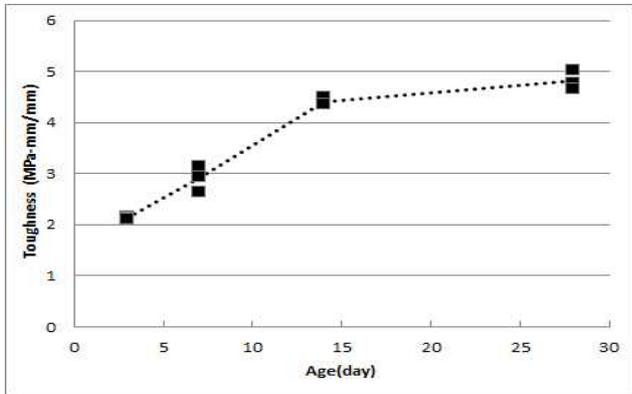


Figure 9. SI-HPFRCC compressive toughness

3.3 재령에 따른 슬러리 매트릭스의 휨 강도

Figure 10에 재령에 따른 충전용 슬러리의 휨강도 측정결과를 나타내었다. 충전용 슬러리의 재령에 따른 평균 휨강도는 재령 3일, 7일, 14일, 28일에 각각 2.97MPa, 4.29MPa, 4.78MPa, 5.38MPa 을 보였다.

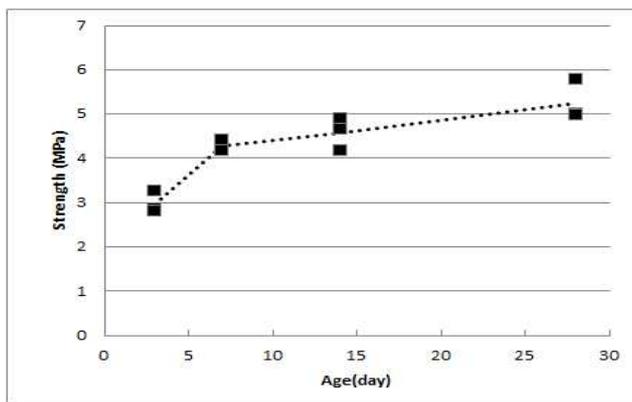


Figure 10. Flexural strength of slurry matrix

3.4 재령에 따른 슬러리 매트릭스의 압축 강도

Figure 11에 충전용 슬러리 실험체의 재령별 압축강도 측정결과를 나타내었다. 재령별 평균 압축강도는 재령 3일, 7일, 14일, 28일에 각각 13.78MPa, 23.58MPa, 28.03MPa, 41.20MPa을 보였다.

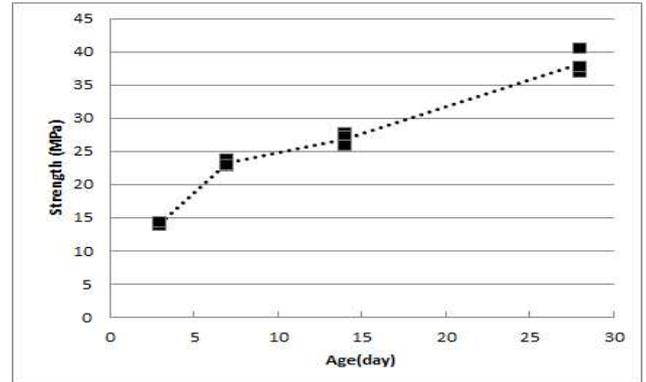


Figure 11. Slurry matrix compressive strength

4. 고 찰

4.1 SI-HPFRCC의 재령에 따른 하중-변형 거동 변화

Figure 3에 보이는 SI-HPFRCC의 재령에 따른 휨거동을 보면, 재령 증가에 최대 하중은 증가하며 최대하중 이후 하중저감 정도 (기울기)가 급해짐을 알 수 있다. 즉 재령이 증가함에 따라 강도는 증가하는 반면 취성적인 재료로 변하고 있다. 실험체 내부의 섬유 특성변화는 없다고 볼 때 이는 섬유를 잡고 있는 슬러리 매트릭스의 부착성능의 취성적인 특성 발현을 그 원인으로 이해 할 수 있다.

Figure 7에서 보인 재령에 따른 SI-HPFRCC의 압축거동은 휨거동과는 다소 다르게 나타나고 있다. 재령 3일 실험체의 경우 응력-변형률 관계의 초기 선형구간 이후 변형률 증가와 더불어 응력이 증가하는 변형경화 현상을 다소 보인다. 반면 재령 28일 실험체의 경우 초기 선형구간 이후 변형률에 증가함에 따라 응력이 감소하는 변형연화 현상을 다소 보이고 있다.

전체적인 거동 측면에서는 압축거동이 휨 거동과는 다르게 나타나고 있으나, 재령 증가에 따른 취성 증가란 측면에서는 유사성을 보이고 있으며 이는 마찬가지로 슬러리 매트릭스의 섬유 부착성능의 취성적인 특성발현을 그 원인으로 이해 할 수 있다.

4.2 SI-HPFRCC의 재령에 따른 강도 및 인성 변화

Figure 4와 Figure 5 에는 각각 SI-HPFRCC의 재령에 따른 휨강도 변화와 휨인성 변화를 보인다. 전체 재령에 대한 변화를 보았을 때 재령 3일~7일 구간에서 휨강도 및 휨인성의 증가가 크며, 이후 재령 구간에서의 변화는 상대적으로 작게 나타났다. 재령에 따른 SI-HPFRCC의 휨강도와 휨인성 증가 형태는 슬러리 매트릭스의 휨강도(Figure 10) 및 압축강도(Figure 11)의 증가 경향과 거의 유사함을 알 수 있다. 매트릭스의 역학적 강도가 슬러리 매트릭스의 섬유 부착성능과 비례하기 때문에, 슬러리 매트릭스의 강도 변화가 SI-HPFRCC의 휨강도와 휨인성 변화에 직접적으로 영향을 준 결과로 볼 수 있다.

Figure 8과 Figure 9에 보인 재령에 따른 SI-HPFRCC의 압축강도와 압축인성의 변화 경향은 휨거동의 경우와 다소 차이가 있다. SI-HPFRCC의 휨강도와 휨인성은 재령 7일~14일 구간의 성능 변화가 크지 않았으나, SI-HPFRCC의 압축강도와 압축인성은 이 구간에서 상대적으로 큰 성능 향상이 일어났다. 이는 Figure 7에 보인 SI-HPFRCC의 재령에 따른 응력-변형률 관계에서도 파악할 수 있다. 재령 7일~14일 구간에서 슬러리 매트릭스의 강도(Figure 10과 Figure 11 참조) 증가가 크지 않음을 고려할 때 이는 예상과 다소 벗어난 결과이다. 이 결과에 대해 현상적으로 판단할 수 있는 고찰은 고함량(6.4%)의 강섬유가 포함된 SI-HPFRCC의 휨 및 압축 파괴 모드 모두에서 섬유의 역할에 영향을 주는 핵심 요소는 슬러리 매트릭스의 강도이나 압축 파괴 모드의 경우 특정한 강도 근처에서 섬유의 역할이 좀 더 활성화 된다는 것이다. 이러한 현상의 구체적인 원인에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4.3 SI-HPFRCC 강섬유의 강도 증진효과

Figure 12에는 슬러리 매트릭스의 강도 대비 SI-HPFRCC 강도의 증진 정도를 백분율로 나타내었다. 강도 증진은 SI-HPFRCC의 강도를 슬러리 매트릭스의 강도로 나눈 값으로 정의 하였다. 섬유로 인한 휨강도 증진은 약 440~500% 정도이며 재령이 증가함에 따라 다소 증가한다. 이에 비해 압축강도 증진은 140~190%정도이며 재령에 따른 경향은 볼 수 없다.

섬유에 의한 강도 증진은 휨강도가 압축강도보다 2배 이상 크게 나타난다. 이는 슬러리 매트릭스의 인장강도 자체가 압축강도에 비해 상대적으로 매우 낮고, 섬유가 실험체의

휨거동에서 기인한 인장균열의 발달을 직접적이고 좀 더 효율적으로 저항하고 있기 때문으로 판단된다.

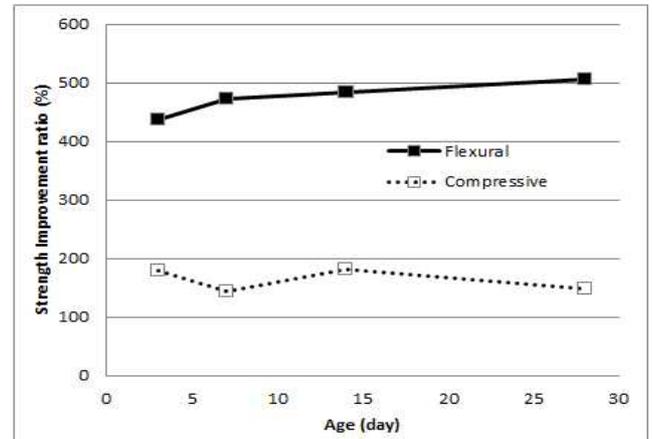


Figure 12. Strength improvement of SI-HPFRCC in compressive and flexural

5. 결 론

고함량의 강섬유 부피비(6.4%)를 가지는 SI-HPFRCC의 재령에 따른 역학적 특성 파악을 위한 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

- 1) SI-HPFRCC의 재령에 따른 휨거동은 재령이 증가함에 따라 강도는 증가하였으며 동시에 최대 하중 이후의 취성적인 성질도 함께 증가한다.
- 2) SI-HPFRCC의 재령에 따른 압축거동은 조기재령에서 응력-변형률 관계의 초기 선형구간 이후 약간의 변형경화 현상을 보이는 반면 후기재령에서는 초기 선형구간 이후 약간의 변형연화 현상을 보인다.
- 3) SI-HPFRCC의 재령에 따른 휨강도와 휨인성 변화는 슬러리 매트릭스 강도의 증가 경향과 유사하다. 반면 압축강도와 압축인성의 변화는 슬러리 매트릭스 강도의 증가 경향과 전체적으로는 유사하나, 특정 재령구간(7일~14일)에서 슬러리 매트릭스 강도증가 정도보다 뛰어난 성능향상을 보인다.
- 4) SI-HPFRCC의 강섬유에 의한 휨강도 증진은 약 440~500% 정도로 재령에 따라 그 효과가 더 커지는 경향을 보인다. 반면 압축강도 증진은 약 140~190% 정도로 재령에 따른 경향은 볼 수 없다.

SI-HPFRCC가 보여주는 뚜렷한 강도 및 인성 증진은 연구에 사용된 6.4%의 고비율 강섬유 부피비에 따른 것이다. 슬러리 매트릭스에 사용된 고비율의 고로슬래그 혼입율과 비교적 높은 물-결합재 비(0.5)에도 불구하고 25MPa 이상의 휨강도와 50MPa 이상의 압축강도를 보여줌으로서 방호, 방폭용 콘크리트 구조재료로서 충분한 역할을 할 것으로 판단된다.

요 약

고비율의 고로슬래그를 사용한 슬러리 충전 고성능 섬유 보강 시멘트 복합체(SI-HPFRCC)의 역학적 성능을 평가하였다. SI-HPFRCC 실험체 제작을 위해 hooked-end 형의 강섬유를 6.4% 사용하였다. 재령에 따른 압축강도 및 압축 인성과 휨강도 및 휨인성 실험을 통해 SI-HPFRCC의 역학적 성능을 평가하였다. 또한 섬유보강 효과를 평가하기 위해 SI-HPFRCC 실험체 제작에 사용된 슬러리 매트릭스의 압축강도 및 휨강도를 측정하였다. 실험결과 SI-HPFRCC의 휨거동이 재령에 따라 취성이 증가함을 확인하였다. 압축거동의 경우에도 재령에 따른 취성 증가를 볼 수 있었으나 그 정도는 미미하였다. 강도측면에서 볼 때 SI-HPFRCC는 슬러리 매트릭스에 비해 약 140~190%의 압축강도 증가와 440~500%의 휨강도 증가를 보였다.

키워드 : 강섬유, 고로슬래그, 슬러리 충전, HPFRCC

Acknowledgement

This research was supported by a grant from a Construction Technology Research Project (Development of impact/blast resistant HPFRCC and evaluation technique thereof, 13SCIPS02) funded by the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport.

References

1. Park YJ, Kim DG, Mun GS, Han SH, Kim GY, Han CG. Impact resistance characteristics of HPFRCC depending on various fiber replacing ratio. Proceeding of Korea Institute of Building Construction; 2015 May 28-29; Yeosu, Korea, Seoul (Korea):

2. Korea Institute of Building Construction; 2015. p. 209-10.
2. Kim SW, Lee JY, Bang JW, Kim KY, Park CW. Tensile strength characteristics of slurry infiltrated HPFRCC according to the fiber volume fraction, Proceeding of the Korea Concrete Institute; 2015 Oct 21-23; Gyeongju, Korea, Seoul (Korea): The Korea Concrete Institute; 2015. p. 83-4.
3. Cheong SH, Kim HW, Lee CJ. Flexural strength properties of slurry infiltrated HPFRCC according to steel fiber change, Proceeding of the Korea Concrete Institute; 2015 May 13-15; Gwangju, Korea, Seoul (Korea): The Korea Concrete Institute; 2015. p. 327-28.
4. Nam JS, Kim HS, Lee IC, Miyauchi H, Kim GY. Evaluation on the impact resistant performance of fiber reinforced concrete by high-velocity projectile and contacted explosion, Journal of the Korea Concrete Institute, 2013 Feb;25(1):107-14.
5. Lankard DR. Properties, application: slurry infiltrated fiber concrete (SIFCON). Concrete International, 1984 Dec;6(12): 44-7.
6. Naaman AE, Homrich JR. Tensile stress-strain properties of sifcon. ACI Material Journal, 1989 May;86(3):244-51.
7. Naaman AE, Otter D, Najm H. Elastic modulus of SIFCON in tension and compression, ACI Material Journal, 1992 Nov;88(6):603-31.
8. Rao HS, Ramana NV. Behaviour of slurry infiltrated fibrous concrete (SIFCON) simply supported two-way slab in flexure, Indian Journal of Engineering & Material Sciences, 2005 Oct;12(5):427-33.
9. ASTM C1609/C1609M-12. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
10. JSCE-SF5. Method of Test for Compressive Strength and Compressive Toughness of Steel Fibre-Reinforced Concrete, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, 1984.