

고강도 강섬유 보강 콘크리트의 장기거동 특성에 관한 실험적 연구

A experimental study on the long-term response of high-strength Steel-Fiber Reinforced Concrete

서 종 명* 김 재 기** 이 주 하*** 윤 영 수****
Seo, Jong-Myeong Kim, Jae-Ki Lee, Joo-Ha Yoon, Young-Soo

ABSTRACT

In recent days, the beneficial effects of using fiber reinforced concrete, especially Steel Fiber Reinforced Concrete, have been on the rise. However, few studies on long-term behavior of SFRC are executed in spite of great demand of SFRC. The fact that SFRC is far better than NRC in various properties such as tensile strength, ductility, flexural toughness has been certified by many researchers. And, those advantages can be also applied to decrease the structures deterioration induced by creep and shrinkage. Furthermore, even though it is fact that SFRC is generally used in joint members to distribute concentrated stresses by fibers, SFRC is treated as NRC in designing especially for long-term behavior of structures. So this paper is about a study on the long-term response of SFRC applied to HPC about 40MPa. Therefore, in this paper, the test results of eighteen high-strength concrete specimens and steel fiber-reinforced concrete specimens, with steel fiber content of 1% by volume were presented. The test result shows that SFRC is advantageous rather than NRC in long-term response.

1. 서론

1963년 미국의 Romualdi와 Baston이 강섬유 보강 콘크리트에 관한 연구결과를 발표한 이래 전세계적으로 이에 대한 활발한 연구개발이 이루어져 왔다. 그 동안의 많은 연구결과는 강섬유 보강 콘크리트가 보통 콘크리트에 비하여 휨강도 및 인장강도뿐만 아니라 에너지 흡수능력 및 균열 구속능력이 우수하며, 특히 균열 후 거동의 인성이 현저하게 증가한다는 사실을 밝히고 있다. 이러한 물리적 특성치에 관한 실험적 연구가 비교적 많이 수행되어 있음에도 불구하고 장기 거동 특성에 관한 연구는 많이 부족한 실정이다. 이에 본 연구의 목적은 고강도 강섬유 보강 콘크리트가 구조 재료로 사용됨에 있어 장기 거동시 처짐이나 변형량을 예측할 수 있는 기초 자료로 활용되도록 함에 있다. 이를 위하여 9개의 고강도 강섬유 보강 콘크리트 공시체와 동일한 강도의 보통 콘크리트 공시체 9개를 이용하여 실험을 수행하고, 그 결과를 분석하였다.

*정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

**정회원, 삼성물산(주) 건설부문 주임

***정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정

****정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수

2. 실험개요

2.1. 실험개요 및 방법

약 40MPa강도의 고강도 강섬유 보강 콘크리트와 보통 콘크리트에 대하여 다음과 같은 하중 조건에 따라 탄성계수와 크리프, 건조수축에 대한 실험을 수행하였다. 크리프 및 건조수축 실험은 ASTM C-512와 ASTM C-157 규정을 따라 온도, 습도, 재령 및 측정주기 등의 기준을 표 1과 같이 정하였고, 탄성계수는 ASTM C-469에 따라 세로방향 변형률이 5.0×10^{-5} 일 때의 하중과 극한 하중의 40%하중에서의 변형률을 측정하여 산출하였다. 단, 반복 하중의 경우 하중 재하 및 제하의 주기가 14일 이므로 변형 후 최초 7일은 ASTM의 기준에 의거하였고, 이후 7일은 3회에 걸쳐 측정하였다. 점증하중의 경우 주기가 28일 이므로 최초 14일은 반복하중과 동일한 측정기준을 적용하였고 이후 14일은 ASTM의 측정기준에 의거하였다. 크리프와 건조수축은 항온 항습실 내에서 핏트모아 스트레인 게이지를 이용하여 측정하였으며, 하중 조건은 표 2에 나타낸 바와 같다.

표 1 크리프 및 건조수축 실험 조건

종류 조건	공시체 형상 (cm)	상대습도 (%)	온도 (°C)	재령 (일)	변형 측정	하중 보정
크리프	∅15×30	50±4	23±2	7	재하직전, 직후, 2~6시간 후 처음 1주일간은 매일, 처음 1개월간은 매주, 6개월까지는 매달	설정하중에서 2%이상 변할 때
건조수축	∅15×30	50±4	23±2	7	크리프와 동일	-

표 2 크리프 실험의 하중 재하 조건

하중조건	0.4Pu	0.4Pu(도포)	0.6Pu	REP(반복하중)	INC(점증하중)
하중의 크기 (Pu)	0.4	0.4	0.6	0.2→0→0.2→0.4→0→0.4→0→0.6	0→0.2→0.3→0.4→0.5→0.6
재하기간	지속	지속	지속	14일	28일

2.2. 실험재료 및 배합

실험에 사용된 재료의 물리적 특성은 표 3에 나타내었으며 배합비는 표 4와 같다. 또한 강섬유 혼입률은 여러 연구 결과에 따라 최적 배합이 되는 1%로 결정하였다. 강섬유는 길이 30mm, 형상비(l/d) 60이고 단위 중량 7.9kg/m³인 양단 Hook 형의 것을 사용하였다.

표 3 사용재료의 물리적 특성

	시멘트	잔골재	굵은 골재
비 중	3.17	2.50	2.59
흡수율(%)	-	0.91	1.03
최대치수(mm)	-	-	25
비표면적(m ² /kg)	3144	-	-

표 4 공시체 배합표

종류	설계기준강도 (MPa)	굵은골재 최대치수(mm)	W/C	S/a (%)	Water (kg)	Cement (kg)	공기량 (%)	SP제 (%)	강섬유 혼입률(%)
SFRC	40	25	0.42	45	175	417	3	1	1
Plain	40	25	0.42	45	175	417	3	1	-

3. 실험결과 및 분석

3.1. 탄성계수

표 5는 크리프 계수 산정을 위한 재하 재령 7일에서의 탄성계수 값이다. 표 5에서 볼 수 있는 것처럼 강섬유의 혼입이 압축 강도와 탄성계수의 증가에 기여하는 것을 알 수 있다

표 5 평균압축강도 및 탄성계수

	평균압축강도 (MPa)	증가율 (%)	탄성계수 (GPa)	증가율 (%)
SFRC	41.7	1%	26.14	3.7%
Plain	41.3	-	25.17	-

3.2. 건조수축

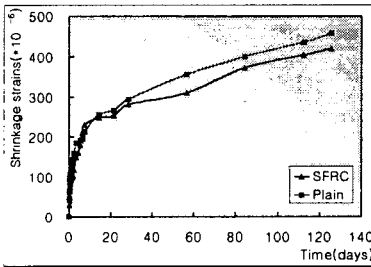


그림 1 비도포 조건 건조수축

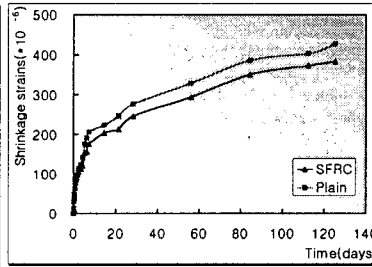


그림 2 도포 조건 건조수축

그림 1과 그림 2는 비도포 조건과 도포 조건에서의 강섬유 보강 콘크리트와 보통 콘크리트의 건조수축 변형량을 나타낸 그래프이다. 두 그래프에서 알 수 있듯이 강섬유 보강 콘크리트와 보통 콘크리트의 건조수축 변형 양상은 거의 같은 형태를 나타내며 두 가지 조건에서 모두 강섬유 보강 콘크리트의 건조 수축이 더 작게 나타남을 알 수 있다.

또한 장기 재령에서는 강섬유 보강 콘크리트의 건조수축 값이 각각 9%, 11% 적은 값을 보이고 있다. 이는 강섬유가 콘크리트 매트릭스를 구속하여 변형을 억제하기 때문인 것으로 판단된다.

3.3. 크리프

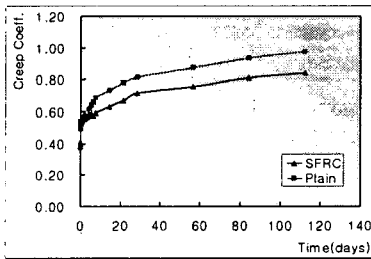


그림 3 0.4Pu에서의 크리프

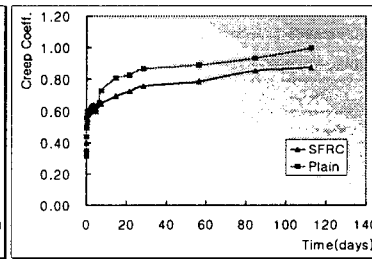


그림 4 0.4Pu(도포)에서의 크리프

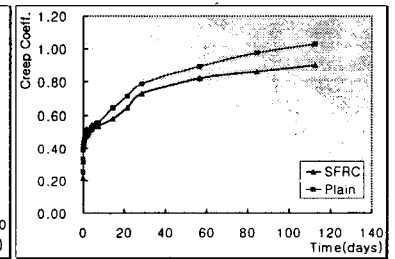


그림 5 0.6Pu에서의 크리프

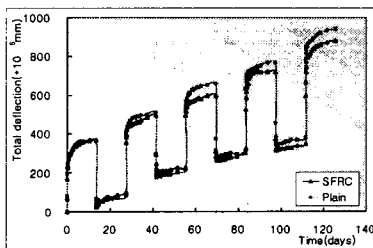


그림 6 반복하중에서의 크리프

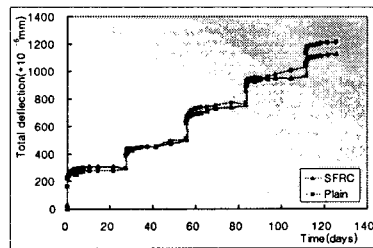


그림 7 점중하중에서의 크리프

그림 3과 그림 4 그리고 그림 5에서는 크리프 량에서 같은 시각에 측정된 건조수축량을 제외하고 산출해 낸 크리프 계수값을 그래프로 나타낸 것이다. 그림 3과 그림 4 모두 0.4Pu에 해당하는 하중에 의한 크리프 계수값 임에도 불구하고 도포한 공시체의 크리프 계수가 조금씩 크게 나타나는 이유는 도포한 공시체의 전체 크리프 량이 비도포 시험체의 98%에 해당할 정도로 비슷함에도 불구하고 도포 시험체의 건조 수축량이 비도포 시험체의 건조 수축량의 92%정도 밖에 되지 않기 때문이다. 그림 5의 0.6Pu 하중의 크리프 계수 그래프 역시 앞의 두 그래프와 유사한 형태를 띠며 0.4Pu의 값들에 비해 가파른 상승을 보인다. 이는 지속하중의 크기가 커짐에 따라 비선형 크리프의 성격을 강하게 나타내기 때문인 것으로 판단된다. 세 그래프 모두 강섬유 보강 콘크리트의 크리프 계수가 보통 콘크리트의 크리프 계수보다 적은 값을 나타낸다. 이는 양단 Hook 형 강섬유가 시멘트 매트릭스 내에서 변형을 구속하기 때문인 것으로 보인다. 그림 6과 그림 7은 크리프 량으로 그래프를 표시하였다. 반복하중과 점증하중의 크리프 역시 전체적으로 강섬유 보강 콘크리트의 크리프 값이 보통 콘크리트의 크리프 양보다 적게 나타났지만 지속하중의 크리프 감소효과가 14.9%~15.9%인 것에 비교했을 때 그 감소량이 6.8%~8%로 작게 나타났다.

표 6 건조수축과 크리프 측정 결과

	건조수축($\times 10^{-6}$ mm)		크리프($\times 10^{-6}$ mm)				
	비도포	도포	0.4Pu	0.4Pu(도포)	0.6Pu	반복	점증
Plain	458	425	1100	1080	1470	940	1215
SFRC	420	383	955	940	1280	880	1125
감소율(%)	9.05	10.97	15.18	14.90	14.84	6.82	8.00

4. 결 론

- (1) 강섬유 보강 콘크리트의 탄성계수는 보통 콘크리트의 탄성계수보다 크게 나타난다. 즉, 강섬유 보강 콘크리트는 하중 재하로 인한 탄성 처짐의 양을 줄여줄 수 있다.
- (2) 강섬유 보강 콘크리트는 건조수축에서 보통 콘크리트보다 우수한 특성을 가진다.
- (3) 1%의 강섬유가 혼입된 강섬유 보강 콘크리트는 보통 콘크리트에 비해 크리프 계수가 약 15%정도 작게 나타난다. 즉, 강섬유는 건조수축이나 크리프로 인한 장기처짐을 제어함에 있어 좋은 성능을 발휘한다.
- (4) 도포 조건 시험체의 크리프 계수가 비도포 조건에 비해 크게 나타나는 것으로 보아 크리프는 건조수축에 의한 요인보다 하중에 의한 요인 주된 것임을 알 수 있다.
- (5) 반복하중이나 점증하중의 경우 지속하중과 비슷한 양상의 장기 처짐을 나타내고 강섬유 보강 콘크리트에 의한 장기처짐의 감소효과가 지속하중과 비교해 적은 것으로 나타났다.

5. 참고문헌

1. Tan K. H., Paramasivam P., Tan K.C Instantaneous and long-term deflections of steel fiber reinforced concrete beams. ACI Structural Journal 1994;91(4):384-393
2. 최한태, 윤영수, 이만섭, "PSC 박스거더 교량에 사용된 세그먼트 콘크리트의 크리프 및 건조수축에 관한 실험적 연구", 콘크리트학회 논문집 제 11권 3호, 1999.6., pp.23-34
3. Neville, A. M., "Property of Concrete," Pitman, London and Marshfield, Mass., 1981, pp. 359-432.
4. Zdeněk P. Bazant, "Prediction of concrete creep and shrinkage: past, present and future", Nuclear Engineering and Design 203,2003, pp.27 - 38