

콘크리트 패널 내 원형 강섬유의 보강 효율성

Strengthening Efficiency of Ring Type Steel Fibers in Concrete Panels

조 원 택*
Cho, Won Tack

이 차 돈**
Lee, Chadon

최 완 철***
Choi, Wan Chul

ABSTRACT

It is generally observed that steel fiber reinforced concrete with traditional straight steel fibers overcomes brittle nature of plain concrete by failure mechanisms by fiber pull-out rather than fiber rupture resulting from fiber yielding or concrete fracture at failed surface. Ring type steel fibers in concrete which is confined in concrete matrix and has better orientation, thus, lead to fiber yielding and concrete fracture as well as increase of flexural behavior of concrete more efficiently. Comparative experimental study is performed in order to measure the relative efficiencies of steel fiber reinforced concrete reinforced with two different fibers. It is found that better toughness is obtained from the ring type steel fiber reinforced concrete than from straight steel fiber reinforced concrete under flexural loading.

1. 서론

강섬유 보강 콘크리트(Steel Fiber Reinforced Concrete : SFRC)는 콘크리트가 응력을 받을때에 발생하는 콘크리트 내에 미세균열들을 강섬유들이 제어 하거나 큰 균열이 발생하였을 경우 균열된 양단 벌어짐 Bridging현상으로 제지하여 콘크리트 강도 및 특히 인성을 증가 시키게 된다.

초기의 강섬유는 원형단면 또는 직사각형 단면을 갖는 직선형태의 강섬유로서, 철선 또는 얇은 철판을 절단하여 생산되었으나, 모체 콘크리트와의 기계적 부착력을 보완하기 위해 강섬유의 끝단을 구부리거나 강섬유의 표면 전체에 굴곡 및 요철을 둔 강섬유가 생산되기 시작하였다.

선형 강섬유는 정착력 및 부착력이 강섬유의 최대 항복하중에 도달하여 항복과 함께 파단에 의한 파괴 거동이 일어나야 함에도 불구하고 그전에 정착 부위의 debonding이 먼저 발생하여 모체의 콘크리트에서 뽑힘파괴(pull-out)가 대부분 발생하게 된다. 이러한 단점을 보완하고자 최근 원형 폐곡선을 이용한 강섬유가 개발되었다. 원형 강섬유를 혼입한섬유보강 콘크리트를 휨 실험한 결과 강섬유의 항복에 의한 파단이 발생한 것이 고찰되었고 강섬유가 콘크리트를 물고 떨어짐으로 인한 강섬유와 파괴면과의 분리, 또는 강섬유 자체 콘파괴가 일부 고찰되었다.

본 연구는 폐곡선 원형 강섬유가 panel 형태의 구조물에서 방향성(orientation)을 제약 받음으로써 도리어 더 효율적임을 실험을 통해서 보고자 하였다.

* 정희원, 중앙대학교 건축공학과 석사과정, 구조기술사 *** 정희원, 숭실대학교 건축학과, 교수
** 정희원, 중앙대학교 건축공학과, 교수 P.E.(USA), 구조기술사(한국), 수학석사

2. 실험

본 패널 형태의 실험은 KSF4201에 규정된 실험 방법에 따라 실시하였다. 단, KSF 4201에 규정된 바와 같이 지지점에 고무판을 대는 경우 과도한 처짐이 발생하여 toughness 측정에 문제가 발생할 수 있으므로 고무판 없이 실험을 실시하였다.

- 1) 시험체의 크기는 300×300×50(mm)의 판형으로 하였고, 가력 방법은 판형 2등분점 하중시험(3점 휨시험)을 실시하였다.

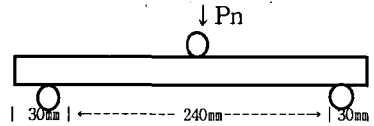


그림 1 3점 휨시험

- 2) 시험체 명은 다음과 같이 명명하였고 그림 2는 본 연구에서 적용한 원형 강섬유의 기하학적 형상을 나타내고 있다.

RF(EH) 30.4.40.A : RF - 강섬유 종류(Ring-Fiber, End-Hooked)
 30 - 강섬유 혼입량(15,30kgf/m³)
 4 - 강섬유 굵기(0.4,0.6mm)
 40 - 강섬유의 길이 및 원형 직경(30,40,60mm)
 A - 반복 시험체(A,B,C)

- 3) 실험변수 : 표1, 표2에서는 원형 강섬유 보강 콘크리트(RSFRC : Ring type Steel Fiber Reinforced Concrete)와 선형 강섬유 보강 콘크리트(HSFRC : Hooked end Steel Fiber Reinforced Concrete)의 기하학적 치수와 배합량을 나타낸다. 각 변수당 시험체수는 3개씩하였고 실험결과 평균치와 큰 차이를 보이는 시험체 값 1개는 통계적 처리와 실험고찰에서 제외하였다.

표1 : 원형 강섬유 보강 콘크리트 시험체

표2 : 선형 강섬유 보강 콘크리트 시험체

시험체명	섬유직경(mm)	원형직경(mm)	배합량(kgf/m ³)	시험체명	섬유직경(mm)	섬유길이(mm)	배합량(kgf/m ³)			
RF 15430 A	0.4	30	15	EH 15860 A	0.8	60	15			
RF 15430 B				EH 15860 B						
RF 15430 C				EH 15860 C						
RF 30430 A			30	0.8				60	30	
RF 30430 B										
RF 30430 C										
RF 15640 A	0.6	40	15		EH 30860 A	0.8	60			30
RF 15640 B					EH 30860 B					
RF 15640 C					EH 30860 C					
RF 30640 A			30	0.8	60			30		
RF 30640 B										
RF 30640 C										

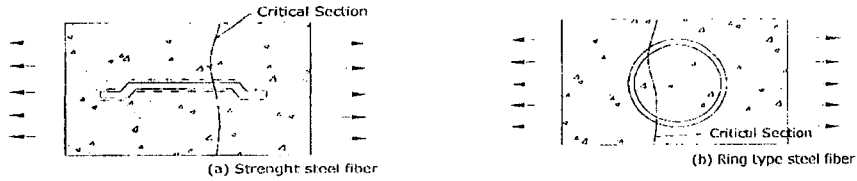


그림2 직선 강섬유와 원형강섬유의 기하학적 형상

4) 콘크리트 배합 방법

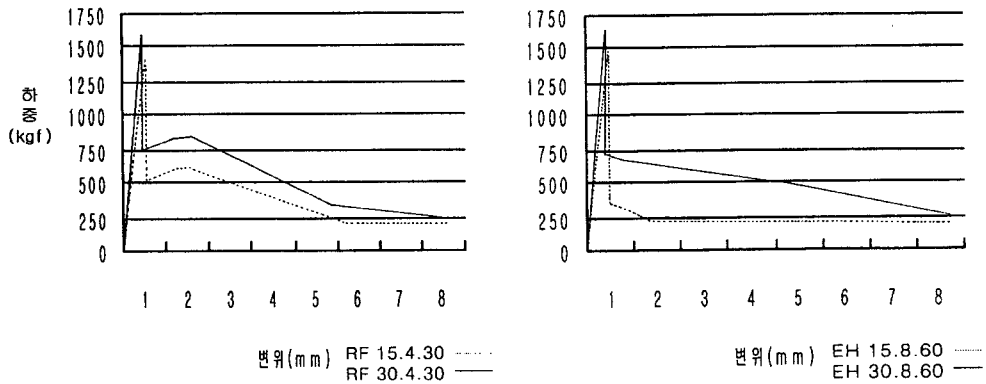
콘크리트는 한 Batch에서 혼합하였고 강섬유는 balling 현상을 방지하기 위하여 손으로 직접 훌 뿌리면서 골고루 분산혼입하였고, 휨실험체는 28일 휨시험을 실시하였고, 콘크리트 배합비는 배합강도 350(kgf/cm²), Slump 10(cm), 공기량 2.5(%), W/C 0.33(%) 와 같다. 가력은 50tf 용량의 servo-controlled UTME 사용하였고, 하중-처짐관계는 자동으로 컴퓨터로 즉시 결과가 출력가능하였다. 하중 재하속도는 0.15mm/sec으로 하였고, 하중 재하시간은 처짐이 10mm 이상이 되어 균열이 하단에서 약 상부 4/5까지 진전될때까지 실험을 진행하였다.

3. 실험결과

- 1) HSFRC 와 RSFRC는 초기 균열과 함께 내력은 감소하나 연성을 유지하는 연성파괴가 일어났으며 균열 형태는 대부분 가력면 중심에서 균열이 발생하였으나 일부 시험체는 가력면과 엇비껴 사선방향으로 균열이 발생하였고, 그림3과 그림4는 RSFRC 와 HSFRC의 하중처짐 곡선이다.

그림3 RSFRC

그림4 HSFRC



2) 강섬유의 파단내 구속효과

HSFRC의 강섬유 파단내 구속효과를 1) 강섬유의 뽑힘(pull-out), 2) 강섬유의 파단(rupture), 3) 균열면과 직각방향으로 강섬유의 누움현상이 나타났으며 RSFRC의 강섬유 파단내 구속효과는 1) 강섬유의 파단, 2) 강섬유 콘크리트 구속으로 인한 분리파괴 3) 강섬유 자체 콘파괴 4) 강섬유 연 결고리 부분이 풀림등으로 나타났다.

3) 강섬유 보강 콘크리트 가력 시험 결과

단순보 3등분점 하중시험에 따라 표3-1,3-2는 초기균열 하중 및 변위와 강성비, 휨강도 등을 구하여 탄성 에너지 영역부분을 평가하는 자료로 사용하였고 표 3-3,3-4는 ASTM C1018에 의한 계산 방법으로 인성지수의 변화를 평가한다.

표3-1 원형 강섬유 보강 시험체 가력 시험 결과

강섬유 형상	시험체명	혼입량(kgf/m ³)	초기균열하중(kgf)	균열 변위(mm)	최대하중(kgf)	강성비(kgf/mm)	휨 강도(kgf/cm ²)
원 형	RF15430A	15	1418	0.52	1418	2727	68.06
	RF15430B		1490	0.32	1490	4516	76.52
	평균		1,454	0.42	1,454	3,622	72.29
	RF30430A	30	1560	0.38	1560	4105	74.88
	RF30430B		1463	0.38	1463	3850	70.22
	평균		1,511	0.38	1,511	3,977	72.55
	RF15640A	15	1503	0.47	1503	3198	72.14
	RF15640B		1582	0.43	1582	3679	75.94
	평균		1,543	0.45	1,543	3,439	74.04
	RF30640A	30	1839	0.33	1839	5573	88.27
	RF30640B		1720	0.28	1729	6146	82.61
	평균		1,780	0.31	1,784	5,860	85.44

표3-2 선형 강섬유 보강 시험체 가력시험 결과

강섬유 형상	시험체명	혼입량(kgf/m ³)	초기균열하중 (kgf)	균열 변위 (mm)	최대하중 (kgf)	강성비 (kgf/mm)	휨 강도 (kgf/cm ²)
선 형	EH15860A	15	1503	0.48	1503	3131	72.14
	EH15860B		1495	0.48	1495	3115	75.76
	평균		1,499	0.48	1,499	3,123	73.95
	EH30860A	30	1497	0.36	1497	3936	68.02
	EH30860B		1716	0.57	1716	3010	82.34
	평균		1,606	0.46	1,607	3,473	75.18

표3-3 : 원형 강섬유의 인성지수, 인성지수비

시험체명	인성지수			인성지수비	
	I _s	I ₁₀	I ₂₀	I ₁₀ /I _s	I ₂₀ /I ₁₀
RF15430A	2.6	4.19	6.05	1.61	1.44
RF15430B	2.59	4.51	7.9	1.74	1.75
평균	2.59	4.35	6.98	1.68	1.6
RF30430A	3.05	5.61	9.3	1.84	1.66
RF30430B	3.79	7.38	11.13	1.95	1.51
평균	3.42	6.5	10.21	1.9	1.59
RF15640A	3.64	6.58	9.47	1.81	1.44
RF15640B	2.90	4.48	6.44	1.54	1.44
평균	3.27	5.53	7.96	1.68	1.44
RF30640A	3.0	5.4	8.26	1.8	1.53
RF30640B	3.02	6.43	9.17	1.68	1.43
평균	3.01	5.92	8.72	1.74	1.48

표3-4 : 선형 강섬유의 인성지수, 인성지수비

시험체명	인성지수			인성지수비	
	I _s	I ₁₀	I ₂₀	I ₁₀ /I _s	I ₂₀ /I ₁₀
EH15860A	1.65	2.41	3.65	1.46	1.57
EH15860B	1.64	2.3	3.63	1.4	1.58
평균	1.64	2.36	3.64	1.43	1.57
EH30860A	2.27	3.95	6.95	1.74	1.76
EH30860B	2.4	4.08	6.96	1.7	1.71
평균	2.34	4.02	6.95	1.72	1.74

4. 비교분석

균열 발생 부위가 진행정도로 균열은 대부분 지간중심에서 발생하였으나 일부 시험체에서 지간중앙에서 사선방향으로 나타났으며 이는 강섬유 혼입 분포 및 방향성에 기인 된 것으로 판단된다. 하중은 초기 균열 발생전까지 비례적으로 상승하다가 미세 균열이 발생하자 최대하중에 이른 후 하중이 급격히 감소하였고 이후 변위가 증가하면서 하중 변화량은 섬유의 혼입률 정도에 따라 그 증가 감소량에 차이로 나타내본다. 그러나 강섬유가 성능을 발휘하자 하중 회복구간이 나타나 하중의 증감현상이 반복되었다.

하중 회복구간의 에너지 면적은 강섬유 종류나 변수에 따라 다른 양상을 보였다.

1) 초기 균열 하중

강섬유를 혼입한 콘크리트는 혼입하지 않은 콘크리트보다 초기 균열 강도가 약 5%정도로 미미한 증가를 나타내었다. 혼입량이 많을수록 5~15%의 증가 추세를 보였다. 선형 강섬유보다 원형강섬유 시험체가 3~10% 높게 나타났다.

2) 휨강성

원형 강섬유 보강 콘크리트와 선형 강섬유 보강 콘크리트의 휨 강성을 비교해 보면 혼입량 15kgf/m³에서는 차이가 거의 없으나 혼입량 30kgf/m³(RF30640 V.S EH30860)에서는 13.5% 휨강성이 원형 보강 콘크리트가 증가 하였다.

원형 강섬유의 경우 원형 직경이나 혼입량이 증가할수록 휨강도가 증가함을 알 수 있었다. 이는 균열 역에 저항하는 강섬유의 상대 개수가 구속면적의 증가와 연관이 있다.

3) 강섬유 보강 콘크리트 시험체의 인성지수

3-1. 선형 강섬유 보강 콘크리트 시험체의 인성지수는 혼입량을 증가 시키면 인성지수가 I_s, I₁₀, I₂₀ 구간에서 증가하는 양상을 보였다. 이는 하중·변위곡선에서 구한 에너지 면적의 혼입량이 증가할수록 에너지 면적비인 인성이 증가하기 때문이다.

3-2. 원형 강섬유 보강 콘크리트 시험체의 인성지수 혼입량(15kgf/m³, 30kgf/m³)에 따른 인성지수는 RF15430 V.S RF30430에서는 30~49% 증가세를 나타냈으나 RF15640 V.S RF30640에서는 8% 정도의 증가세에 그쳤다. 혼입량이 많을수록 강도 회복 증가세는 뚜렷하였으며 같은량의 원형 강섬유를 혼입 하였어도 강섬유의 분포도에 따라 강도 회복 증가세 차이가 많았다. 이는 상대개수가 많을지라도 일정 혼입량 이상은 성능의 중복 현상으로 인성의 증가 현상이 둔화 되는 것으로 판단된다.

5. 결론

- (1) 초기 균열 하중은 무혼입 콘크리트 시험체와 비슷하나 선형 및 원형 섬유 혼입량의 증가에 따라 다소 증가 추세를 보였으나 큰 차이는 없는 것으로 나타났다.(5%)
- (2) 휨인성 시험결과 원형 강섬유의 파괴 양상은 크게 4가지 형태로 나타났다. 1) 강섬유 재료적 성능을 다하는 강섬유 파단 2) 모재인 콘크리트가 재료적 성능을 다하고 강섬유 정착력에 의해 파괴되는 콘파괴 3) 섬유 계면을 따라 형성되는 분리파괴 4) 원형강섬유 연결고리가 풀리는 유형으로 나타났으며 선형 강섬유는 1) 재료적 성능이 제한적인 강섬유 뽑힘 현상 2) 일부 극히 제한적인 파단현상 3) 재료적 성능을 거의 발휘하지 못하는 균열면과 직각으로 누움으로 나타났다. 따라서 선형 강섬유 보강 콘크리트와 원형 강섬유 보강 콘크리트는 서로 다른 파괴 메커니즘을 가지고 있었다. 휨인성(강도)은 강섬유의 형태에 관계없이 혼입량이 많고 섬유직경이 큰 시험체에서 크게 나타났다.
- (3) 초기 균열 변위는 선형 및 원형 강섬유 보강 콘크리트 시험체가 0.28mm - 0.59mm 범위로 비슷하였다.
- (4) 인성지수는 원형 강섬유 보강 콘크리트가 선형 강섬유 보강 콘크리트보다 1.25배 ~1.9배 정도 크게 나타났다.
- (5) 원형 강섬유 보강 콘크리트에서 원형직경($\phi 30$ V.S $\phi 40$)과 섬유직경 ($\phi 0.3$ V.S $\phi 0.4$)이 작은 경우 즉 강섬유의 상대 개수가 많을수록 우수한 인성을 발휘하는 것으로 나타났으며, 강섬유가 서로 뭉치지 않고 골고루 분산되는 혼입 분포도가 중요한 것으로 나타났다.
- (6) 동일한 혼입량($30\text{kgf}/\text{m}^3$)에서 원형직경 30mm와 원형직경 40mm를 비교해 보면 원형직경 30mm의 강섬유 보강 콘크리트의 인성지수가 I_5, I_{10}, I_{20} 구간에서 대략 1.13, 1.1, 1.17배 우수하였다.
- (7) 선형 강섬유보다는 원형 강섬유의 인성지수가 좋고 원형 강섬유내 에서는 원형직경이 작고 강 섬유 혼입 상대개수가 많은 것이 보다 효율적으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Parviz Soroushian, Ph.D.P.E, Lee, C.D., "Constitutive Modelling of Steel Fiber Reinforced Concrete under Direct Tension and Compression", Department of Civil and Environmental Engineering Michigan State University, East Lansing, Michigan 48824.
2. ASTM C 1018 - 94, "Standard Test Methode for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete(using Beam with Third Point Loading)"
ASTMC 1018-94, 1994
3. "강섬유 보강 콘크리트의 설계 및 적용", 한국 구조 기술사회, 세미나 자료실, "1998.9"
4. 정의정 "강섬유 보강 콘크리트의 인성", 숭실대학교 대학원 석사학위 논문 1999.12