

링 형태 강섬유와 양단갈고리 선형 강섬유 보강 콘크리트 패널의 휨성능 비교

Comparative Flexural Performance of Concrete Panels Reinforced with Ring-Type Steel Fibers and with Hooked-End Straight Steel Fibers

이 차 돈*
Lee, Chadon

조 원 택**
Cho, Won-Tack

Abstract

Ring-type steel fibers (RSFs) of the closed circular shape, have different resistance mechanisms other than straight steel fibers. RSFs also maintain the same value of the orientation factor for the plane enclosed by the fiber ring perimeter. In this research, comparative studies were performed for the panels reinforced with RSFs and with straight steel fibers of $15\text{kg}/\text{m}^3$ and $30\text{kg}/\text{m}^3$, respectively. Resisting mechanisms of RSFs were identified and higher toughness indices were experimentally observed for the concrete panels reinforced with RSFs than with straight steel fibers. Orientation factor for the RSF was suggested. It was found that RSFs were more effective in increasing toughness for the panel specimens with relatively thinner thickness than beam specimens.

요 지

링 형태의 강섬유 (Ring-type steel fibers: 이하 RSF)는 원형의 폐곡선 형태를 갖는 강섬유로서 선형 강섬유와는 다른 저항 메커니즘을 가지며 폐곡선으로 둘러싸인 평면에 대하여 동일한 방향성을 가지는 특성을 갖는다. 이 연구에서는 섬유의 단위투입량 $15\text{kg}/\text{m}^3$ 과 $30\text{kg}/\text{m}^3$ 의 RSF 및 선형 강섬유를 혼입한 콘크리트 패널의 휨인성을 실험, 비교하였다. 파단면에서의 RSF의 저항 형태를 규명하였으며 RSF를 혼입한 패널이 선형 강섬유를 혼입한 패널에 비하여 우수한 인성값을 나타냄이 관찰되었다. RSF에 대한 방향성을 제시하였으며 RSF를 혼입한 실험체의 경우, 보 실험체에 비하여 두께가 상대적으로 얇은 패널 실험체에서 RSF가 더 효율적으로 인성 증가에 기여함이 관찰되었다.

Keywords : Ring-type Steel Fibers, Concrete, Experiments, Toughness Indices, Orientation Factor, Panel

핵심 용어 : 링 형태 강섬유, 콘크리트, 실험, 인성지수, 방향계수, 패널

* 정희원, 중앙대학교 건축공학부 교수

** 정희원, 중앙대학교 공학석사, (주)코팩엔지니어링 대표이사

E-mail : cdlee@cau.ac.kr 031-670-3346

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 2009년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

일반적으로 선형 강섬유는 인장응력 하에서 섬유의 항복 및 파단이 발생하기 이전에 debonding이 먼저 발생하며 그 결과 뽑힘(pull-out) 현상이 발생한다. 선형 강섬유를 인장응력 방향에 대하여 평행하게 또는 콘크리트 파단면에 대하여 수직으로 배열할 경우, 가장 이상적인 강섬유 보강효과를 기대할 수 있으나 시공성 등을 고려하여 강섬유는 콘크리트 내에 임의로 분산된다. 따라서 인장응력 방향에 대한 강섬유의 저항 효율성을 나타내는 지표인 방향계수(orientation factor) 값은 1.0보다 작은 값을 갖는다.⁽¹⁾⁻⁽³⁾ 상기와 같이 기존의 선형강섬유가 갖는 문제점인 강섬유의 파단 이전의 debonding 발생에 의한 낮은 저항효율성 및 선형강섬유의 직선성에 의한 낮은 방향성을 극복하기 위하여 최근에 링 형태의 강섬유인 RSF가 개발되었다.⁽⁴⁾ RSF는 기존의 선형강섬유와는 다르게 폐곡선을 이룬다는 점에서 차이가 있다. Fig. 1은 강섬유보강 콘크리트(SFRC) 위험단면에서 양단 갈고리형 선형강섬유(hooked-end steel fiber: 이하 HSF)와 RSF의 인장응력에 대한 대표적인 저항형태를 나타낸다.

Choi and Lee⁽⁴⁾는 ASTM C 78에 근거하여 RSF를 혼입한 SFRC에 대한 휨실험을 실시하였다. 실험 연구결과에 따르면 RSF를 혼입한 Ring-type Steel Fiber Reinforced Concrete(이하: RSFRC)의 경우, 휨인장 응력에 의하여 RSFRC 내의 RSF가 일부 항복과 함께 파단이 발생하거나 일부 RSF는 주변의 콘크리트를 원추형 형태로 인발파괴를 발생시키며 RSF 주변으로 균열을 유도하여 콘크리트가 분리되는 현상을 일으킴이 관찰되었다. RSFRC의 휨인성은 RSF의 링 직경, 강섬유 자체의 직경, 투입량의 영향을 받으며 강섬유의 직경이 작을수록 인성이 증가함이 관찰되었다. 실험 변수 범위 내에서 HSF를 혼입한 콘크리트(Hooked Steel Fiber Reinforced Concrete: 이하 HSFRC)의 가장 좋은 인성값과 RSFRC의 가장 좋은 인성값을 ASTM C 78에서 규정한 I_{20} 에 근거하여 비교한 결과 RSFRC의 인성값이 22% 우수한

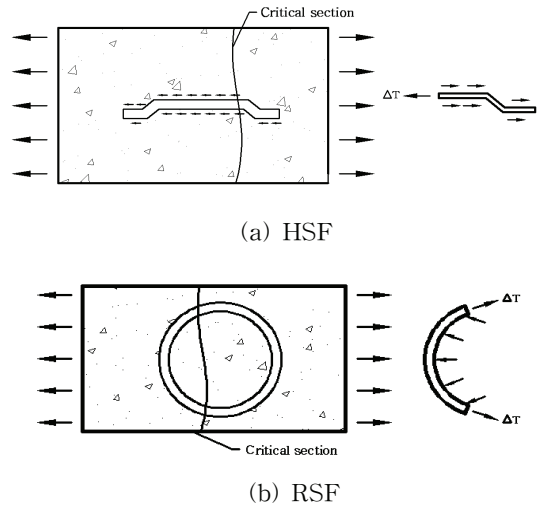


Fig. 1 HSFRC 및 RSFRC 파단면에서의 각 섬유의 저항 메카니즘

것으로 관찰되었다.

이 연구에서는 Choi and Lee⁽⁴⁾의 실험결과를 토대로 HSFRC 및 RSFRC를 적용한 패널을 제작하여 휨 실험을 실시하였다. 이 실험을 통하여 파괴면에서의 RSFRC의 파괴모드를 추가적으로 규명하고 HSFRC와 RSFRC 패널의 휨 거동을 비교, 분석하였다. 특히 서로 다른 메카니즘이 패널의 인성에 미치는 영향과 함께 두께가 제한된 패널에 혼입된 강섬유의 방향성에 따른 영향을 고찰하고자 하였다.

2. 휨 실험

2.1 실험계획

2.1.1 주요변수 및 실험체 제작

이 연구에서 채택한 강섬유의 규격은 Choi and Lee⁽⁴⁾의 실험결과를 토대로 각 섬유 형태별 우수한 인성이 확보된 규격에 근접하도록 설정하였다. 실험변수는 섬유의 단위투입량($15kg/m^3$, $30kg/m^3$)과 RSF의 강선직경 및 링 직경으로 하였다. HSF는 상용화된 양단 갈고리 선형강섬유로서 직경 0.8mm, 길이

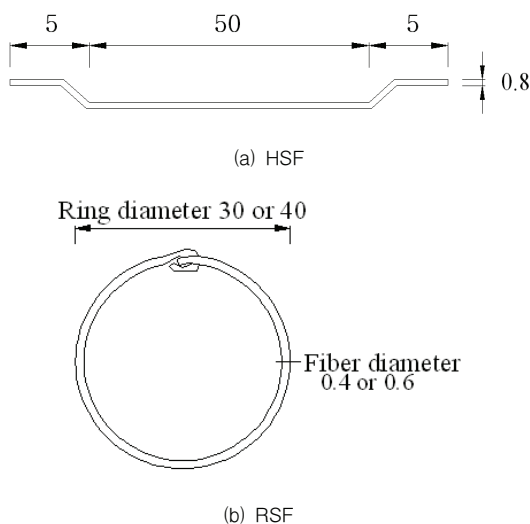


Fig. 2 실험에 적용된 HSF 및 RSF(단위: mm)

60mm인 강섬유를 사용하였으며 RSF는 강선직경 0.4mm, 링 직경 30mm인 것과 강선직경 0.6mm, 링 직경 40mm인 두 종류를 제작하여 적용하였다. Fig. 2는 실험에 사용된 HSF 및 RSF를 나타낸다.

패널의 크기는 $300\text{mm} \times 300\text{mm} \times 50\text{mm}$ 로서 실험의 정확도를 기하기 위하여 동일한 변수에 대하여 2개의 실험체를 제작하였고 초기 균열강도를 비교하기 위한 무혼입 콘크리트 패널 실험체 2개를 제작하였다.

Table 1 HSFRC 및 RSFRC 패널 실험체

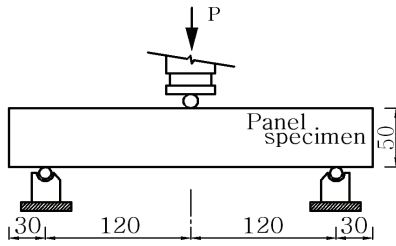
실험체명	섬유 형태	단위 투입량 (kg/m^3)	체적 혼입률 (%)	섬유 직경 (mm)	섬유 길이 (mm)	링직경 (mm)
EH 15860A	양단 갈고리 선형 강섬유	15	0.19	0.8	60	-
EH 15860B	양단 갈고리 선형 강섬유	15	0.19	0.8	60	-
EH 30860A	양단 갈고리 선형 강섬유	30	0.38	0.8	60	-
EH 30860B	양단 갈고리 선형 강섬유	30	0.38	0.8	60	-
RF 15430A	원형 폐곡선	15	0.19	0.4	-	30
RF 15430B	원형 폐곡선	15	0.19	0.4	-	30
RF 15640A	원형 폐곡선	15	0.19	0.6	-	40
RF 15640B	원형 폐곡선	15	0.19	0.6	-	40
RF 30430A	원형 폐곡선	30	0.38	0.4	-	30
RF 30430B	원형 폐곡선	30	0.38	0.4	-	30
RF 30640A	원형 폐곡선	30	0.38	0.6	-	40
RF 30640B	원형 폐곡선	30	0.38	0.6	-	40

SFRC를 적용한 실험체 명은 'FT M D L R' 형태로 명명하였다.

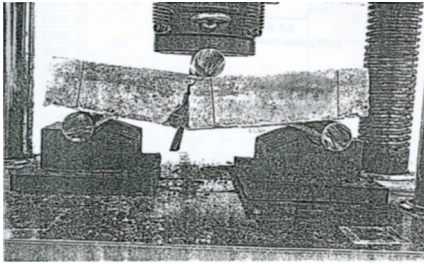
여기서 FT는 강섬유 종류(EH:양단 갈고리 선형강섬유(HSF), RF:링 형태 강섬유(RSF)), M은 강섬유 단위투입량($15:15\text{kg}/\text{m}^3$, $30:30\text{kg}/\text{m}^3$), D는 강섬유 직경(4:0.4mm, 6:0.6mm, 8:0.8mm), L은 HSF 길이 또는 RSF 직경(60:60mm, 30:30 mm, 40:40mm), R은 반복시험체(A 또는 B)를 나타낸다. 28일 콘크리트 압축강도는 35MPa 이다. 콘크리트는 동일한 배치(batch)에서 혼합하였고 강섬유는 몽침현상을 방지하기 위하여 손으로 직접 분산, 혼입하였다. 시험체는 수중 양생하였으며 28일 경과 후 휨 실험을 실시하였다. Table 1에 실험체 상세에 대하여 정리하였다.

2.1.2 가력

패널 가력실험은 KSF 4201에 규정된 실험방법에 따라 실시하였다. Fig. 3과 같이 지점 간 거리 240mm 에 대하여 3점 휨 가력하였다. 가력은 500kN 용량의 Servo-controlled UTM을 사용하였다. 하중-처짐 관계는 자동으로 입력되어 컴퓨터에 저장되었다. 하중 재하속도는 $0.15\text{mm}/\text{sec}$ 으로 하였고 처짐이 10mm 이상이 되어 균열이 하단에서 실험체 두께의 상부 4/5 깊이로 진전될 때까지 진행하였다.



(a) 가력 방법



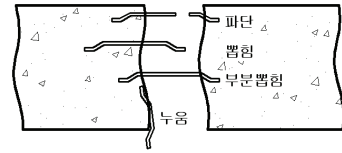
(b) 가력 종료 후 실험체 파단

Fig. 3 패널 실험체에 대한 3점 가력

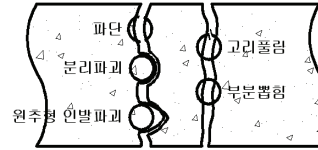
2.2 실험결과 분석

2.2.1 위험단면에서의 강섬유 저항 형태

하중재하가 끝난 후, 주 균열이 발생한 단면에서의 각 강섬유별 저항메카니즘과 이에 해당하는 개수를 관찰하였다. HSFRC의 경우, 강섬유 파단, 완전 뽑힘 (complete pull-out), 부분 뽑힘 (partial pull-out), 파단면에 대하여 누움 등으로 관찰되었다 (Fig. 4(a)). RSFRC의 경우, 강섬유의 파단, 분리파괴, 원추형 인발파괴, 링 고리 풀림, 부분 뽑힘 등으로 관찰되었다 (Fig. 4(b)). RSFRC의 경우, HSFRC의 경우와는 일부 다른 저항 메카니즘을 갖고 있음을 알 수 있다. 또한 기존의 Choi and Lee⁽⁴⁾서 고찰한 메카니즘 외에 RSF의 부분뽑힘과 링 고리 풀림 등의 추가적인 메카니즘이 관찰되었다. RSF의 항복 후 파단은 휨강도 및 인성 증가에 가장 중요한 역할을 한다. 주로 RSF의 강선직경과 링 직경이 작은 RSF에서 많이 발생함이 관찰되었다. RSF의 분리파괴는 링 원주를 따라 미세균열이 발생하고 이를 경계면으로 하여 RSF 폐곡선 내 콘크리트 전체가 같이 분리되는 저항 메카



(a) HSF



(b) RSF

Fig. 4 위험단면에서 HSF와 RSF의 저항 메카니즘

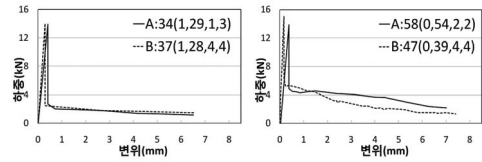
니즘이다. RSF가 2개 내지 4개 정도 한 곳에 군집하여 있는 경우에 주로 관찰되었다. RSF의 부분뽑힘은 주균열이 벌어짐에 따라 RSF의 인장변형이 발생한 것으로서 RSFRC의 인성증가에 기여한다고 판단된다. 원추형 인발파괴는 RSF가 매입된 상태로 원추형 콘크리트가 인발되는 형태로서 RSFRC의 강도 후 영역에서의 잔존강도 증가에 기여한다고 판단된다. RSF의 고리가 풀리는 것은 폐곡선의 특성을 잃어버리는 것으로서 바람직한 저항 메카니즘이라 볼 수 없다.

2.2.2 하중-처짐도

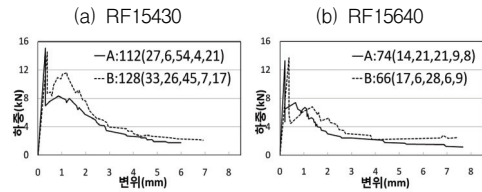
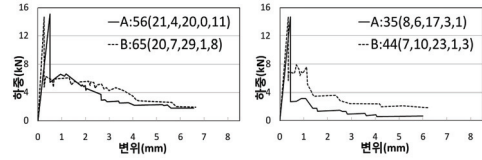
Fig. 5 및 Fig. 6은 실험결과에 따른 HSFRC와 RSFRC의 하중-처짐도를 나타낸다. 각 하중-처짐도에 실험 종료 후 위험단면에서 관찰한 섬유의 저항형태 및 갯수에 대하여 정리하여 나타내었다. 위험단면에서의 저항형태 별 섬유의 개수는 실험체 파단 양면의 저항유형별 개수의 합이다. Fig. 5와 6에서 A(또는 B)는 실험체 번호를 나타내며 괄호안의 숫자는 HSF일 경우 파단, 뽑힘, 부분뽑힘, 누움이 발생한 섬유개수를 나타내며 RSF일 경우 파단, 콘파괴, 분리파괴, 고리풀림, 부분뽑힘이 발생한 섬유개수를 나타낸다. (Table 2)에 하중-처짐도의 특성점들에 대한 값들을 정리하였다.

대부분의 실험체는 가력에 따라 휨균열이 지간 중심 부분에서 발생하였다. 하중은 초기균열 발생 전까지

처짐과 비례하여 증가하였으나 균열 발생과 동시에 취성적인 하중 저하가 발생하였다. Table 2에 나타난 바와 같이 RSFRC 및 HSFRC 실험체의 휨강도 및 초기 강성은 유사함을 알 수 있다. 그러나 균열 후 RSFRC 및 HSFRC 실험체의 거동은 Fig. 5와 Fig. 6에 나타난 바와 같이 혼입된 강섬유의 종류 및 단위투입량의 차이에 따라 상이한 하중-처짐 양상을 나타냄을 볼 수 있다. HSFRC의 경우, 최대하중 이후 영역의 하중-처짐도는 완만하게 감소하는 형태를 나타내었다 (Fig. 5). 이는 주 휨균열이 발생한 위험단면(critical section)을 가로지르는 HSF의 주요 저항 메카니즘인 뿔침저항에 따른 영향에 기인한다. RSFRC의 경우, 최대강도 후 취성적인 하중 저하가 발생함과 동시에 내력의 일부가 회복되는 경향을 나타내었다(Fig. 6). 이 후, 약간의 내력 증감 현상이 반복되면서 추가적인 내력 상실이 관찰되었다. RSFRC 시험체의 경우, 균열이 상부로 진행함에 따라 RSF의 파단음이 발생하였으며 이는 RSF의 링 직경이 작은 RSF가 혼입된 시험체에서 더 반복적이고 지속적으로 발생하였다.



(a) EH15860 (b) EH30860
Fig. 5 HSFRC 패널의 하중-처짐도



(a) RF15430 (b) RF15640
(c) RF30430 (d) RF30640
Fig. 6 RSFRC 패널의 하중-처짐도

Table 2 패널 실험체 실험 결과 및 인성지수

실험체명	최대 하중 시		휨강도 (MPa)	초기 강성 (kN/mm)	인성지수		
	하중(kN)	처짐(mm)			I_5	I_{10}	I_{20}
EH15860A	13.9	0.40	6.67	34.8	1.64	2.32	4.46
EH15860B	14.0	0.35	6.72	40.0	1.41	2.39	4.64
평균	14.0	0.38	6.72	37.4	1.53	2.36	4.55
EH30860A	13.9	0.38	6.67	36.6	2.23	4.30	8.98
EH30860B	15.1	0.17	7.25	88.8	2.28	3.72	7.44
평균	14.5	0.28	6.96	62.7	2.26	4.01	8.21
RF15430A	15.1	0.51	7.25	29.6	2.63	3.67	6.47
RF15430B	14.7	0.26	7.06	56.5	2.61	4.44	9.37
평균	14.9	0.39	7.15	43.1	2.62	4.06	7.92
RF15640A	14.7	0.44	7.06	33.4	1.80	2.34	3.46
RF15640B	14.7	0.35	7.06	42.0	3.14	4.37	8.32
평균	14.7	0.40	7.06	37.7	2.47	3.34	5.89
RF30430A	15.1	0.31	7.25	48.7	2.96	5.66	10.50
RF30430B	14.5	0.39	6.96	37.1	3.91	7.14	11.05
평균	14.8	0.35	7.10	42.9	3.44	6.40	10.78
RF30640A	13.3	0.26	6.38	51.2	2.99	5.76	10.53
RF30640B	13.7	0.38	6.58	36.1	3.01	5.40	10.01
평균	13.5	0.32	6.48	43.7	3.00	5.58	10.27

2.2.3 최대하중 및 처짐

RSFRC 및 HSFRC 실험체의 최대하중은 강섬유를 혼입하지 않은 패널의 최대하중인 $14.0kN$ 과 비교하여, $15kg/m^3$ 및 $30kg/m^3$ 단위투입량에 대하여 RSFRC의 경우 평균 $14.7kN(1.05배)$ 과 $14.2kN(1.01배)$, HSFRC의 경우, 평균 $14.0kN(1.0배)$ 과 $14.5kN(1.04배)$ 를 나타내었다(Table 2 참조). HSFRC의 경우, 단위투입량이 증가할수록 최대하중의 크기도 약간 증가하였으나 RSFRC의 경우에는 분명한 증가량을 나타내지 않았다. RSFRC의 평균 휨강도가 HSFRC 평균 휨강도보다 전체적으로 약간 더 크게 관찰되었으나 단위투입량 $30kg/m^3$ 인 RF30640 실험체의 경우 이와 상반된 결과를 나타내었다.

RSFRC의 최대하중 시 평균 처짐은 $0.32 \sim 0.40mm$ 인 반면 HSFRC의 경우는 평균 $0.28 \sim 0.38mm$ 의 처짐을 나타냄으로서 큰 차이를 나타내지 않았다.

2.2.4 파괴양상과 하중-처짐도

Fig. 5에 의하면 HSFRC의 경우, 위험단면에서 강섬유의 파단은 거의 발생하지 않았으며 주로 강섬유의 뽑힘(pull-out) 현상이 발생하였음을 알 수 있다. EH15860A 및 B 실험체의 경우에는 강섬유 뽑힘 개수가 서로 유사하여 전체적으로 동등한 하중-처짐도를 나타내었으나(Fig. 5(a)), EH30860A 실험체의 경우 강섬유 뽑힘 개수가 58개로서 EH30860B 실험체의 47개보다 많으므로 EH30860A 실험체가 더 연성적으로 거동하였음을 알 수 있다(Fig. 5(b)). Fig. 6(a)에 의하면 RF15430A와 RF15430B 실험체의 경우, 강섬유 파단의 개수 및 원추형 인발파괴 개수가 서로 유사함을 알 수 있다. RF15640A 실험체와 RF15640B 실험체의 경우, RF15640B 실험체의 강섬유 파단 및 원추형 인발파괴 개수가 각각 7개, 10개로서 RF15640A 실험체의 8개, 6개와 비교하여 유사한 개수를 가지나 위험단면을 가로지르는 RSF의 총 개수가 RF15640B 실험체의 경우 44개로서 RF15640A 실험체의 35개보다 많음을 알 수 있다(Fig. 6(b)). Fig. 6(c)에 의하면 RF30430B 실험체가 RF30430A 실험체에 비하여 더 우수한 하중-처

짐도를 나타내고 있음을 알 수 있다. RF30430B 실험체의 경우, 파단 및 원추형 인발파괴가 발생한 RSF의 개수가 각각 33개와 26개로서 RF30430A 실험체의 27개, 6개에 비하여 더 많이 발생하였음이 관찰되었다.

한편 Fig. 6(d)에 의하면 RF30640A와 RF30640B는 유사한 하중-처짐도를 나타내었는데 이는 RF30640A의 실험체의 경우, 원추형 인발파괴가 상대적으로 많은 반면에 RSF 파단의 개수가 RF30640B의 실험체보다 작은 것을 알 수 있다. 결론적으로 위험단면을 지나는 강섬유의 저항메카니즘 양상과 단면을 가로지르는 RSF의 개수에 따라 하중-처짐도가 변화함을 알 수 있다.

HSFRC의 경우, 균열 후 강섬유 뽑힘(pull-out)으로 인한 완만한 저항력 손실에 따른 연성 거동을 보이거나 RSFRC의 경우, 강섬유의 파단, 강섬유와 콘크리트의 분리 파괴 등의 복합적인 파괴 메카니즘의 동반으로 인하여 내력의 일부 회복 후 저항력을 잃는 거동이 나타났음을 알 수 있다. 또한 RSFRC의 경우, 최대하중 이후 강섬유의 개수가 상대적으로 많은 실험체의 경우, 뚜렷한 하중회복 현상을 나타내었다. 그러나 HSFRC의 경우, 이 실험에서 선정한 단위투입량에 대하여 단면 내 HSF의 섬유개수가 증가하였어도 하중 회복은 관찰되지 않았다.

2.2.5 RSF 형상과 하중-처짐도

Fig. 7은 동일한 단위투입량을 가지나 서로 다른 RSF를 혼입한 RSFRC 실험체의 힘 거동을 나타낸다. 각 하중-처짐도는 동일 실험체 2개의 평균값이다.

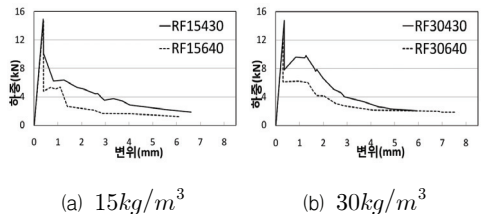


Fig. 7 RSF 종류에 따른 RSFRC 패널의 평균 하중-처짐도

RF15430 실험체가 RF15640 실험체보다 연성적 거동 및 하중 회복에서 우수함을 알 수 있다. RF30430 실험체의 경우에도 동일한 경향이 나타났다. 따라서 RSF 섬유 직경과 링의 직경이 작은 경우가 동일한 단위투입량에 대하여 더 우수한 저항 메커니즘을 갖는 것을 알 수 있다. 이는 RSF 섬유 직경과 링의 직경이 작은 경우, 동일한 단위투입량에 대하여 더 많은 RSF가 혼입됨으로써 위험단면에서 단위면적 당 더 많은 RSF가 저항하게 됨에 기인한다고 판단된다. 그러나 RSF 섬유 직경이 링의 직경에 비하여 과다하게 작을 경우, RSF의 항복에 의한 파단력이 충분하지 않을 수 있으며 링의 직경이 RSF 섬유 직경에 비하여 과다하게 작을 경우, RSF의 파단이 발생하지 않을 수 있다. 따라서 최적정 RSF 섬유직경 및 링의 직경에 대한 연구가 추후 필요하다고 사료된다.

2.2.6 단위투입량과 하중-처짐도

Fig. 8은 단위투입량의 차이에 따른 RSFRC의 평균 하중-처짐도를 나타낸다. 단위투입량이 증가함에 따라 최대강도 후의 면적이 증가함을 알 수 있다.

HSFRC의 경우와 마찬가지로 단위투입량이 증가함에 따라 최대강도 후 영역에서의 면적이 증가함을 알 수 있다. 특히 단위투입량이 증가할 경우, 최대응력 직후의 내력 회복구간이 더욱 커짐을 알 수 있으며 이는 RSF 섬유 직경이 4mm이고 RSF 링의 직경이 30mm인 경우에 더 두드러지게 관찰되었다.

2.2.7 섬유종류에 따른 하중-처짐도

Fig. 9는 동일한 단위투입량을 갖는 경우, RSFRC와 HSFRC 패널의 하중-처짐도를 나타낸다. 단위투

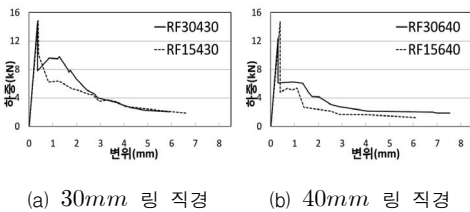


Fig. 8 단위투입량의 차이에 따른 RSFRC 패널의 평균 하중-처짐도

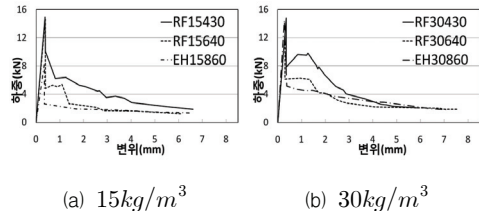


Fig. 9 HSFRC와 RSFRC 패널의 평균 하중-처짐도

입량 $15kg/m^3$ 과 $30kg/m^3$ 의 두 경우 모두, 전반적으로 RSFRC가 HSFRC보다 우수한 연성을 확보함을 알 수 있다.

2.3 인성지수

ASTM C 1018의 인성지수 정의에 기초하여 실험체들의 인성지수값들을 산정하였다.

2.3.1 단위투입량 증가에 따른 SFRC 인성의 상대 증가

Fig. 10은 RSFRC 및 HSFRC에 대하여 단위투입량이 $15kg/m^3$ 에서 $30kg/m^3$ 로 증가할 경우에 대한 상대적인 인성 증가비를 나타내었다. 섬유의 종류에 상관없이 단위투입량이 증가함에 따라 인성값이 증가함이 관찰되었다. RF30430/RF15430 인성비의 증가비가 I_{20} 에서 감소한 것은 RF30430 실험체의 경우 최대하중 후 처짐이 크게 발생한 영역 ($0.32 \sim 0.40mm$)에서 잔존내력이 급격히 감소함에 기인한다.

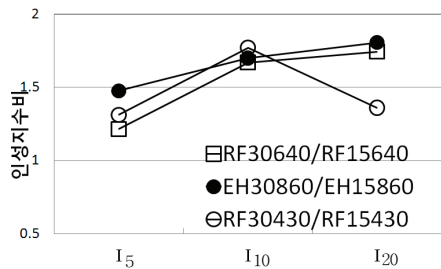


Fig. 10 단위투입량 증가에 따른 RSFRC 및 HSFRC 패널의 상대 인성비

2.3.2 동일 단위투입량의 경우, HSFRC와 RSFRC의 인성 비교

Table 2의 인성값에 의하면 RSFRC의 인성이 HSFRC의 인성보다 모든 경우 우수함을 알 수 있다. 또한 동일한 단위투입량을 적용한 RSFRC의 경우, RSF 직경과 링 직경이 작은 경우에 더 우수한 인성이 확보됨을 알 수 있다.

Fig. 11에 의하면 HSFRC보다 RSFRC가 더 우수한 인성을 확보함을 알 수 있다. 또한 단위투입량이 적은 경우에, HSFRC의 인성에 비하여 RSFRC의 인성 증가량이 더 우수함을 알 수 있다. 단위투입량 $15kg/m^3$ 일 경우, I_5 , I_{10} , I_{20} 에서 인성비는 최대 1.71, 1.72, 1.74배로 증가하였고 $30kg/m^3$ 일 경우, 최대 각각 1.52, 1.60, 1.31배 증가하였다. HSFRC에 비하여 RSFRC의 인성은 I_5 과 I_{10} 까지는 상대적으로 증가하지만 I_{20} 에 이르러 그 증가가 감소함을 알 수 있다. 이는 Fig. 9에서 나타난 바와 같이 처짐이 많이 발생한 강도 후 영역에서 HSFRC가 RSFRC와 유사한 잔존 휨내력을 나타내는 것에 기인한다.

2.3.3 보 실험체와 패널 실험체-방향성 비교

HSF와 같이 그 저항 메카니즘이 주로 섬유 뽑힘(pull-out)에 의존하고 있는 경우, 모재 콘크리트 내 직선 강섬유가 인장 응력 방향에 대하여 평균적으로 어느 정도 일치하는가에 따라 그 효율성이 결정지어진다. Fig. 12(a)와 같이 3차원 공간에 임의로 분산된 직선 강섬유가 평균적으로 인장응력 방향에 대하여 평

행한 방향을 갖는 정도를 나타내는 방향계수(orientation factor)를 수식으로 표현하면 다음과 같다.^(1,5)

$$\alpha_{HSF} = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} l_f \cdot \cos\theta \cos\phi d\theta d\phi}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} l_f \cdot d\theta d\phi} = 0.405 \quad (1)$$

여기서 l_f = HSF 길이

한편 폐곡선 내 콘크리트 응력과 이를 둘러싼 섬유의 인장응력의 평형으로 주요 저항 메카니즘을 형성하는 RSF의 효율성은 폐곡선 내 면적으로 결정된다. 따라서 Fig. 12(b)에 근거하여 RSFRC 내의 RSF에 대한 방향성을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\alpha_{RSF} = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} A_{RSF} \cdot \cos\phi \cdot d\phi}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} A_{RSF} d\phi} = 0.64 \quad (2)$$

여기서 $A_{RSF} = \frac{\pi}{2} \cdot r_f^2$, r_f = RSF 링의 반경

식(1)과 식(2)로부터 RSF 섬유 방향성이 HSF 섬유 방향성보다 $0.64/0.405=1.58$ 배 만큼 우수한 것을 알 수 있다. RSF 섬유의 방향성이 우수한 일례로서 Fig. 12(b)에 나타난 바와 같이 $x-z$ 평면 내에 위치한 RSF일 경우, y -축에 대한 섬유의 회전에 상관없이 $x-z$ 평면 내의 모든 RSF가 x -방향 인장응력에 대하여 최적적인 상태로 동일하게 저항할 수 있는 반면, HSF의 경우에는 x -방향 인장응력에 대하여 전혀 저항할 수 없는 z -방향의 섬유들도 함께 고려하여야 하기 때문이다.

부재단면의 크기가 제한된 경우, 부재의 경계면에서의 기하학적 제약조건에 의하여 방향성에 변화가 올 수 있다.⁽⁵⁾ 따라서 RSF의 경우, 실제 구조물의 두께 등이 제한될 경우, 구조물의 경계조건에 따라 HSF보다 더 유리한 방향성을 가질 수 있다.

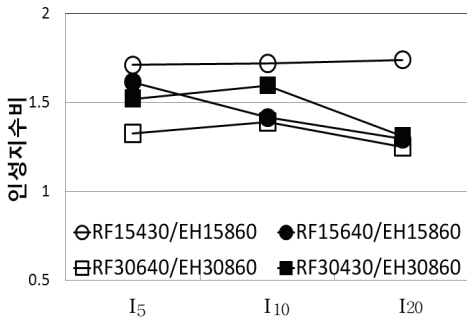
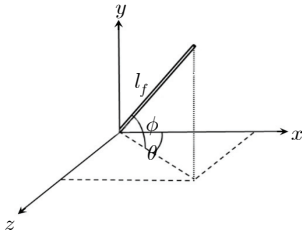
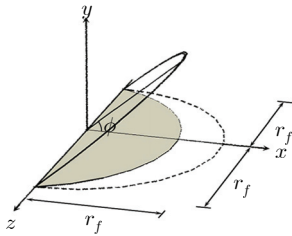


Fig. 11 동일 단위투입량을 갖는 경우, HSFRC에 대한 RSFRC의 인성 비



(a) HSF



(b) RSF

Fig. 12 HSFRC 및 RSFRC 내 각 섬유 방향계수(orientation factor)

한 예로서 만일 실험체가 평면의 형태를 가짐으로서 두께가 거의 없는 경우(즉, Fig. 12에서 $y \approx 0$), 이 실험체 내에서의 HSF 및 RSF의 방향계수값은 다음과 같다.

$$\alpha_{HSF} = \frac{\int_0^{\pi/2} l_f \cdot \cos\theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} l_f \cdot d\theta} = 0.64 \quad (3)$$

$$\alpha_{RSF} = \frac{\int_0^{\pi/2} A_{RSF} \cdot \cos\theta}{\int_0^{\pi/2} A_{RSF}} = 1.00 \quad (4)$$

RSF 및 HSF의 방향계수값 증가량을 각각 $\Delta\alpha_{RSF}$ 와 $\Delta\alpha_{HSF}$ 라고 하면 $\Delta\alpha_{RSF}/\Delta\alpha_{HSF} = (1.0 - 0.64)/(0.64 - 0.45) = 1.53$ 을 갖는다. 즉, 실험체의 두께가 제한됨으로 인하여 RSF의 경우, HSF에 비하여 방향성이 상대적으로 53% 향상된다.

Table 3 및 Fig. 13은 기존의 Choi and Lee⁽⁴⁾에

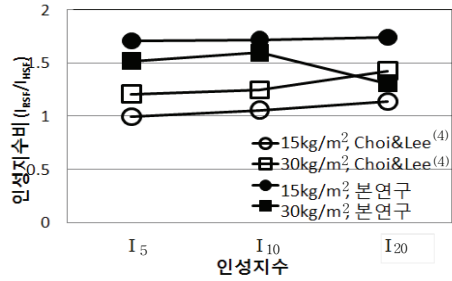


Fig. 13 보 실험체 인성지수에 대한 패널 실험체 인성지수 비

Table 3 실험체 종류 및 섬유 종류에 따른 인성지수 값 비교

연구자	실험체	인성지수	인성지수값				인성지수 비	
			HSF		RSF		인성지수 비	
			단위투입량 (kg/m ²)	단위투입량 (kg/m ²)	단위투입량 (kg/m ²)	단위투입량 (kg/m ²)	단위투입량 (kg/m ²)	단위투입량 (kg/m ²)
		15 (1)	30 (2)	15 (3)	30 (4)	15 (3)/(1)	30 (4)/(2)	
Choi and Lee ⁽⁴⁾	보	I ₅	4.6	3.8	4.6	4.6	1.00	1.21
		I ₁₀	8.5	7.2	9.0	9.0	1.06	1.25
		I ₂₀	15.7	14.0	17.9	20.0	1.14	1.43
본연구	패널	I ₅	1.53	2.26	2.62	3.44	1.71	1.52
		I ₁₀	2.36	4.01	4.06	6.40	1.72	1.60
		I ₂₀	4.55	8.21	7.92	10.78	1.74	1.31

의한 100mm × 100mm × 350mm 보 실험체로부터 산정한 인성지수값과 본 연구의 300mm × 300mm 50mm 패널 실험체로부터 산정한 인성지수값을 비교하고 있다. Table 3 및 Fig. 13에 의하면 패널 실험체의 경우, 각 섬유별 인성값이 보 실험체의 인성값보다 우수함을 알 수 있다. 또한 보 실험체에 대한 패널 실험체의 인성값 증가율은 HSFRC 보다 RSFRC에서 더 두드러짐을 알 수 있다. 이는 RSF의 방향성이 실험체 두께가 감소함에 따라 더 증가함을 의미한다.

3. 결론

- 1) 위험단면에서의 저항 메커니즘으로서 HSFRC는 강섬유의 파단, 완전 뽑힘(complete pull-out), 부분 뽑힘(partial pull-out), 파단면에 대하여 누움 등이 관찰되었으며 RSFRC는 강섬유의 파단, 분리파괴, 원추형 인발파괴, 링 고리 풀림, 부분 뽑힘 등이 관찰되었다.

- 2) RSFRC 및 HSFRC 시험체의 최대하중 증가율은 강섬유를 혼입하지 않은 콘크리트 패널 최대하중값에 비하여 최대 5% 내로서 기본적으로 큰 차이가 없었으며 최대하중 시 처짐도 큰 차이를 나타내지 않았다.
- 3) RSFRC의 경우, 동일한 단위투입량을 적용한 경우 일지라도 위험단면을 가로지르는 RSF의 파단 및 원추형 인발파괴 개수가 많을수록 인성이 증가하는 경향을 나타내었다.
- 4) HSFRC의 경우, 최대 강도 후 영역에서 강섬유 뽑힘(pull-out)으로 인한 완전한 저항력 손실에 따른 연성적인 거동을 보이나 RSFRC의 경우, 복합적인 파괴 메카니즘의 동반으로 인하여 내력의 일부를 회복하는 경향을 나타내었다.
- 5) RSF 섬유 직경과 링 직경이 작은 경우가 동일한 단위투입량에 대하여 더 우수한 저항 메카니즘을 나타내었다. 이는 RSF 섬유 직경과 링의 직경이 작은 경우, 동일한 단위투입량에 대하여 더 많은 RSF가 혼입됨으로써 위험단면에서 단위면적 당 더 많은 RSF가 저항하게 됨에 기인한다고 판단된다. 그러나 링의 직경이 RSF 섬유 직경에 비하여 과다하게 작을 경우, RSF의 파단이 발생하지 않을 수 있으므로 최적정 RSF 섬유직경 및 링의 직경에 대한 연구가 추후 필요하다고 사료된다.
- 6) HSFRC의 경우와 마찬가지로 RSFRC의 경우에도 단위투입량이 증가함에 따라 최대강도 후 영역에서의 연성이 증가하였다. 특히 단위투입량이 증가할 경우, 최대응력 직후의 내력 회복구간이 더욱 커짐을 알 수 있으며 이는 RSF 섬유 직경이 4mm이고 RSF 링 직경이 30mm인 경우에 더 두드러지게 관찰되었다.
- 7) 단위투입량 $15\text{kg}/\text{m}^3$ 과 $30\text{kg}/\text{m}^3$ 의 두 경우 모두 전반적으로 RSFRC 패널이 HSFRC의 패널보다 우수한 인성을 확보하였다. HSF에 대한 RSF를 혼입한 패널의 인성값의 비는 단위투입량 $15\text{kg}/\text{m}^3$ 일 경우, I_5 , I_{10} , I_{20} 에서 최대 1.71, 1.72, 1.74 배로 증가하였고 $30\text{kg}/\text{m}^3$ 일 경우, 각각 1.52,

1.60, 1.31배 증가하였다.

- 8) RSF 섬유의 방향성은 0.65로서 HSF 섬유의 방향계수값보다 1.58배 만큼 우수한 것으로 산정되었다. 보 실험체에 대한 패널 실험체의 인성값 증가는 HSFRC 보다 RSFRC에서 더 두드러짐을 알 수 있다. 이는 실험체 두께가 감소함에 따른 RSF의 방향성이 HSF의 방향성에 비하여 더 효율적으로 증가하였음을 의미한다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 중앙대학교 우수연구자연구비 지원에 의한 것으로서 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Romualdi, J.P. and Mandel, J.A., "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Length of Wire Reinforcement," ACI Journal, Proceedings V. 61, No. 6, June 1964, pp. 657-671.
2. Soroushian, P. and Bayasi, Z., "Prediction of the Tensile Strength of Fiber Reinforced Concrete: A Critique of the Composite Material Concept," Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications, SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987, pp. 71-84.
3. Naaman, A.E., Moavenzadeh, F., and McGarry, F.J., "Probabilistic Analysis of Fiber-Reinforced Concrete," Proceedings, ASCE, V.100, EM2, Apr. 1974, pp. 397-413.
4. Choi, O.C. and Lee, C., "Flexural Performance of Ring-Type Steel Fiber-Reinforced Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 33, 2003, pp. 841-849.
5. Soroushian, P. and C. Lee, "Distribution and Orientation of Fibers in Steel Fiber Reinforced Concrete," ACI Materials Journal, V. 87, No. 5, September-October 1990, pp. 433-439.

(접수일자 : 2008년 10월 10일)

(심사완료일자 : 2008년 11월 17일)