

# 반복하중을 받는 대각보강된 철근콘크리트 연결보의 강섬유 형상비와 혼입률에 따른 이력거동

최지윤<sup>1</sup>, 손동희<sup>2</sup>, 배백일<sup>3</sup>, 최창식<sup>4\*</sup>

## Hysteretic Behavior of Diagonally Reinforced Concrete Coupling Beams According to Aspect Ratio and Volume Fraction of Steel Fiber Under Cyclic Loading

Ji-Yoon Choi<sup>1</sup>, Dong-Hee Son<sup>2</sup>, Baek-Il Bae<sup>3</sup>, Chang-Sik Choi<sup>4\*</sup>

**Abstract:** In this study, an experimental study was conducted to analyze the hysteresis behavior according to the steel fiber aspect ratio and volume fraction of diagonally reinforced concrete coupling beams under to cyclic loading. The aspect ratio and volume fraction of the steel fibers were set as the main variables, and 4 specimens were fabricated in which the amount of transverse reinforcement of the coupling beam suggested in the domestic building structural standard was relaxed by about 53%. In the experiment, cyclic loading experiments were performed in the displacement control method in accordance with ACI 374.2R-13, and as a result of the experiment, it was found that all specimens containing steel fibers exceeded the nominal shear strength suggested by the current structural standards. As the aspect ratio of the steel fibers increased, the steel fibers prevented the buckling of the diagonal reinforcement, and the bridging effect of the steel fibers held the crack surface of the concrete. The shear strength, stiffness reduction and energy dissipation capacity of the specimens containing steel fibers were superior to those of the V<sub>f0</sub> specimens without steel fibers. Therefore, it is judged that the steel fiber reinforced concrete can relieve the details of the transverse reinforced.

**Keywords:** Coupling beams, Reinforced concrete coupling beam, Transverse reinforcement, Steel fiber, Steel fiber aspect ratio, Volume fraction

### 1. 서론

국내 구조설계기준 KDS 14 20 80 콘크리트 내진설계기준에서는 강진 지역에 속하거나 또는 높은 지진 위험도가 요구되는 특수모멘트골조, 특수 병렬전단벽 구조 등의 철근콘크리트 구조가 지진력에 저항하도록 내진상세를 제시하고 있다. 특수 병렬전단벽 구조를 연결하는 연결보는 구조물 전체의 에너지 소산능력과 강성을 증진하는 역할을 한다. 그러나 우리나라 벽식 구조의 경우 연결보의 깊이가 순경간 길이에 비해 크게 설계되어 형상비가 작은 전단지배 단면이 되는 등의 문제가 있다.

현행 구조기준에서는 연결보의 형상비( $l_n/h$ )가 2 미만이거나 계수 전단력이  $V_u > (\sqrt{f_{ck}}/3)A_{cp}$ 인 경우 경간 중앙에 대해 대칭인 대각보강근을 배근 할 것을 제시하고 있다. 그러나 전단벽과 연결보가 접하는 벽체 부분에 특수경계요소 보강상

세와 간섭되어 대각보강근을 배근하는데 큰 어려움이 있다. 이에 따라 대각보강근이 배근된 철근콘크리트 연결보의 배근상세를 완화시키려는 선행연구들이 수행되어 왔다. 대각보강근을 배근함으로써 미끌림 전단균열을 효과적으로 완화시키고 내진성능이 향상되는 것으로 나타났으며 일반 상세로 배근된 연결보보다 강도 및 강성이 개선되는 연구결과를 나타내었다 (Paulay and Binney, 1974).

현행 구조기준에서는 대각보강근을 개별적으로 구속하는 상세와 보 전체를 구속하는 상세를 제시하고 있다. 이는 개별적으로 구속하는 상세보다 보 전체를 구속하는 대체상세가 시공 가능성이 개선되는 것으로 나타났으며, 대각보강근을 개별적으로 구속하는 상세와 동일한 전단강도 및 연성을 가지는 연구 결과를 기반으로 제시하고 있다 (Naish et al., 2013). 그러나 대체상세 역시 복잡한 상세로 인해 연성과 이력곡선의 안정성을 향상시키지 못하며 대각보강근 배근이 어려운 문제가 발생한다고 나타내었다 (Fortney et al., 2008).

이를 해결하기 위하여 전단강도 증진과 이력거동의 안정성 확보를 위해 연결보의 상세 개선 및 완화에 대한 다수의 연구가 진행되었다. 특히 최근에는 철근에 대한 다양한 상세가 아닌 고성능 콘크리트를 사용하여 배근상세를 근본적으로 해결하고 철

<sup>1</sup>학생회원, 한양대학교 건축공학과 석사과정

<sup>2</sup>정회원, 한양대학교 건축공학과 박사과정

<sup>3</sup>정회원, 한양사이버대학교, 디지털건축도시공학과 교수

<sup>4</sup>정회원, 한양대학교 건축공학부 교수

\*Corresponding author: ccs5530@hanyang.ac.kr

Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

• 본 논문에 대한 토의를 2022년 7월 31일까지 학회로 보내주시면 2022년 8월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

근량을 줄이기 위한 연구가 다수 수행되었다. 그중 강섬유 보강 콘크리트는 콘크리트의 강도와 균열에 대한 저항성 향상 및 내충격성을 가지는 것으로 나타났다(Oh et al., 2015). 강섬유 보강 콘크리트에 대해 강섬유의 형상비가 강도증진에 미치는 영향 분석 연구를 수행하였고, 강섬유 형상비가 80의 경우, 강섬유 가교작용에 의해 콘크리트 부착력을 증가 시켜 휨 및 인장강도 증진에 영향을 미치는 것을 확인하였다(Lee et al., 2004). 강섬유의 혼입률이 증가할수록 상세가 완화된 실험체의 최대강도와 연성비가 증가하는 것을 실험을 통해 확인하였으며, 연구 결과에 기반하여 강섬유를 2% 혼입 시 연결보의 횡보강근 일부를 대체 할 수 있다고 보고하였다(Kim et al., 2019). 대각보강근이 배근된 연결보의 변형능력 및 전단강도를 확보하기 위해서는 강섬유로 횡보강근 전체를 대체하는 것보다 요구 변형 능력에 따라 부분적인 대체가 요구된다는 결론을 제시하였다(Jang, 2015). 특히 연결보에 배근되는 연결철근의 양을 감소시키고 강섬유 혼입률을 0.75% 혼입할 경우 대각보강근을 충분히 구속하며 연성능력을 확보하는 것으로 나타났다(Park et al., 2020).

그러나 횡보강근 대체를 위한 강섬유 혼입량을 정량적으로 평가하는 기존 연구결과가 부족하다. 그러므로 본 연구에서는 연결보의 횡보강근을 강섬유 보강 콘크리트로 대체하여 횡보강근 상세를 완화 시키는 데 그 목적이 있다. 이에 따라 연결보 내부 연결철근을 제거를 통해 현행 구조기준에서 제시하는 배근 상세를 완화하며, 강섬유의 형상비와 혼입률에 따른 연결보의 이력거동을 분석해보고자 한다.

## 2. 실험계획

### 2.1 실험체 계획

강섬유의 형상비와 혼입률을 주요 변수로 설정하였으며, 강섬유가 혼입되지 않은 Vf0 실험체를 기준 실험체로 선정하여 강섬유 형상비와 혼입률에 따른 이력거동의 변화를 확인하고자 하였다. 모든 실험체의 단면치수는 300mm × 600mm의 단면적과 900mm의 스패ん 길이를 갖는 형태이다. 주철근은 SD500철근을 사용하였고, 횡보강근은 SD400철근을 사용하

였다. 횡보강근 간격 산정은 다음 식 (1), (2)을 통해 계산하였다. 간격은 100mm이며 내부 연결철근 배근을 생략한 상세로 현행 구조기준에서 제시하고 있는 철근비와 비교 하였을 때 0.0068과 0.0032로 약 53% 완화 시킨 상태로 배근하였다.

$$s_h \leq A_{sh}/0.3(h_c \cdot f_{ck}/f_{yh})[(A_g/A_{ch}) - 1] \quad (1)$$

$$s_h \leq A_{sh}/0.09 \cdot h_c \cdot f_{ck}/f_{yh} \quad (2)$$

여기서,  $s_h$ 는 수평연결철근의 간격(mm),  $A_{sh}$ 는 간격이  $s_h$ 이고 치수  $h_c$ 에 수직인 횡방향 철근의 전체단면적(mm<sup>2</sup>),  $h_c$ 는 구속철근의 중심간 거리(mm),  $f_{ck}$ 는 콘크리트의 설계기준압축강도 (MPa),  $f_{yh}$ 는 횡방향 철근의 공칭항복강도(MPa),  $A_g$ 는 전체단면적(mm<sup>2</sup>),  $A_{ch}$ 는 횡방향 철근의 외곽으로 측정된 구조 부재의 단면적(mm<sup>2</sup>)이다.

모든 실험체의 공칭 전단강도는 연결보의 배근된 대각보강근의 기여분만 고려하는 식 (3)을 통하여 산정하였다.

$$V_n = 2A_{vd}f_y \sin \alpha \leq (5\sqrt{f_{ck}}/6)A_{cp} \quad (3)$$

여기서  $V_n$ 은 공칭전단강도,  $A_{vd}$ 는 대각보강근 단면적,  $f_y$ 는 철근의 항복강도,  $\alpha$ 는 대각보강근과 종 방향 철근 사이의 각도,  $f_{ck}$ 는 재료시험을 통해 나타난 압축강도,  $A_{cp}$ 는 콘크리트 단면적을 의미한다.

실험체 상세는 Fig. 1에 나타내었으며 구체적인 제원은 Table 1에 나타내었다. 실험체별 공칭전단강도는 659.49kN

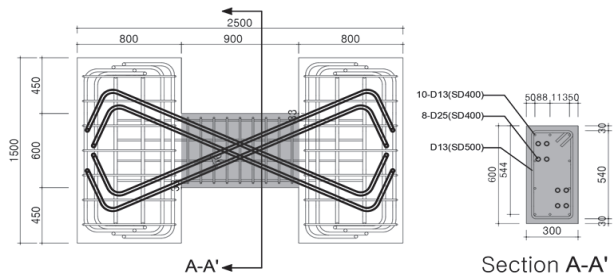


Fig. 1 Detail of specimen

Table 1 Summary of test specimens

Specimen	$D_f$ [mm]	$l_f$ [mm]	$D_f/l_f$	$V_f$ [%]	RI factor	$f_{ck}$ [MPa]	$V_n$ [kN]	Reinforcement		
								Diagonal	Transverse	Horizontal
Vf0	-	-	-	-	-					
Vf1-6030	0.5	30	60	1	60	24	659.49	8-D25	9-D13@100	10-D13@160
Vf1.5-6030	0.5	30	60	1.5	90					
Vf0.75-8060	0.75	60	80	0.75	60					

$D_f$ : Steel fiber diameter,  $l_f$ : Steel fiber length,  $V_f$ : Steel fiber volume fraction, RI factor : Reinforced Index ( $D_f/l_f \times V_f$ ),  $f_{ck}$ : Concrete compression strength,  $V_n$ : shear strength ( $2A_{vd}f_y \sin \alpha$ )

이고, 계수전단력 ( $\sqrt{f_{ck}/3}$ ) $b_w d$ 은 약 0.32이므로, 계수전단력이 0.5이상일 경우 횡보강근 간격이 좁아져 시공이 어려운 문제를 방지한다.

본 연구에서는 양단 후크형의 강섬유를 사용하였으며, 주요 변수인 강섬유의 형상비와 혼입률은 보강지수(Reinforced Index Factor, 이하 RI Factor)를 사용하여 나타내는데, RI factor는 강섬유 길이에 직경을 나눈 값에 혼입률을 곱한 값으로 산정이 된다. 콘크리트 혼합에 적당한 강섬유의 혼입률을 0.5~2.5%로 제시하고 있으며 1.5%를 초과할 경우 작업성이 현저하게 떨어진다고 보고하고 있다 (yazici et al., 2006).

강섬유의 형상비와 혼입률이 강섬유 보강 콘크리트의 강도의 미치는 영향에 대해 수행한 재료시험 결과를 토대로 강섬유의 형상비가 증가함에 따라 인장강도 및 휨강도가 증가하는 효과를 확인하였다. 또한 콘크리트의 균열을 잡아주는 가교 작용으로 인해 부착력을 증가시켜 강도 증진에 영향을 미치는 것으로 나타내었다 (Lee, 2004). 따라서 본 연구에서는 강섬유 혼입률을 0.75%, 1%, 1.5%로 설정하였으며, 강섬유의 형상비는 60, 80으로 설정하였다.

## 2.2 실험체 세팅

횡력을 받는 연결보는 헤드와 베이스가 고정단 작용을 하며, 실험체를 90° 회전시켜 가력이 용이하게 설치하였다. 연결보 변형 시 이중 곡률을 갖도록 200ton의 Actuator를 실험체 중앙부에 위치하도록 설치하였다. 실험체 세팅은 Fig. 2에 나타내었다.

## 2.3 가력 계획

ACI 374.2R-13에서는 전단지배 부재의 경우 항복 시 Drift Ratio를 약 0.5%에서 0.75%로 제시하고 있어 본 실험에서의 항복 변위를 6.75mm, 변위각을 0.75%로 가정하였다. 또한 연결보의 초기강성 확인을 위해  $0.25\Delta_y$ ,  $0.5\Delta_y$ 를 추가적으로 가력하였다. ACI 374.2R-13에 의거하여 변위 제어 방식으로

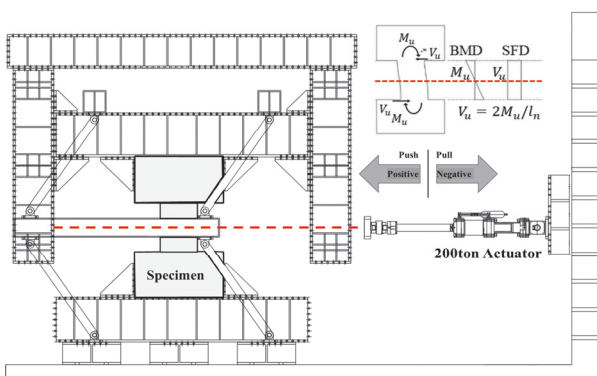


Fig. 2 Specimen setting

1Drift ratio당 3Cycle 씩 가력하여 정적 반복가력 실험을 수행하였다. 가력계획은 Fig. 3에 나타내었다.

## 2.4. 재료시험 결과

본 연구에서 사용한 강섬유는 Fig. 4에 나타내었으며, 강섬유의 제원을 Table 2에 나타내었다. 콘크리트 재료시험은 KS F 2403에 따라 지름 100mm, 높이 200mm의 원주형 공시체를 제작하여, KS F 2405와 KS F 2423에 따라 압축강도시험과 조깅인장강도시험을 수행 하였다. 또한 Fib Model code2010에

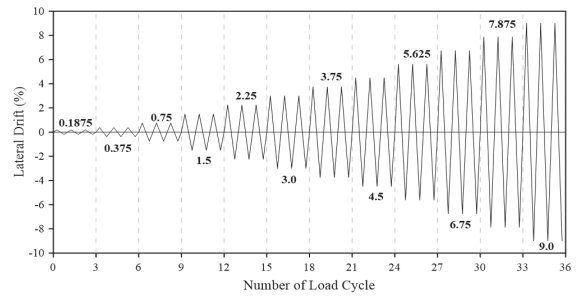


Fig. 3 Loading protocol

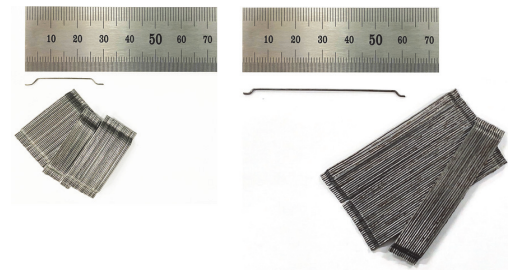


Fig. 4 Hooked-end steel fiber

Table 2 Material properties of steel fiber

Fiber Type	D (mm)	L (mm)	Aspect ratio (%)	Tensile Strength (MPa)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Hook end	0.5	30	60	1121.7	7.85
	0.75	60	80	1143.9	7.85

Table 3 Test results of concrete strength

Specimen	$f_{cu}$ (MPa)	$f_r$ (MPa)	$f_{sp}$ (MPa)
Vf0	38.88	3.43	2.95
Vf1-6030	36.22	5.51	3.27
Vf1.5-6030	29.97	7.26	3.94
Vf0.75-8060	33.00	6.67	3.82

$f_{cu}$  : compressive strength of concrete,  $f_r$  : flexural strength of concrete,  $f_{sp}$  : splitting strength of concrete

따라 150mm × 150mm × 550mm 휨인장 공시체를 제작하여 휨인장 시험을 수행하였다. 콘크리트 재료시험 결과는 Table 3에 나타내었다. 압축강도는 강섬유 혼입률이 증가할수록 강섬유를 혼입하지 않은 Vf0 실험체보다 감소하는 경향으로 나타났지만 휨인장강도 결과는 Vf0 실험체에 비해 1.6배, 2.1배, 1.9배 증가하였다. 쪼갬인장강도는 각각 1.1배, 1.3배, 1.3배 증가하는 값으로 나타났다.

본 연구에서 사용한 철근의 재료시험은 KS D 0249에 따라 일방향 인장시험을 수행하였다. 실험체에 사용된 수직, 수평 철근은 400MPa와 500MPa의 공칭항복강도를 갖는 D13 철근이고, 대각보강근은 공칭항복강도 400MPa의 D25 철근을 사용하였으며, 인장시험결과는 모두 공칭항복강도를 상회하는 결과가 나타났으며, Table 4에 나타내었다.

**Table 4** Steel tensile test results

Rebar	$f_y$ (Mpa)	$\epsilon_y$ (mm/mm)	$f_u$ (MPa)
D13	471.77	0.00235	604.66
D13	532.25	0.00266	654.93
D25	487.09	0.00243	588.47

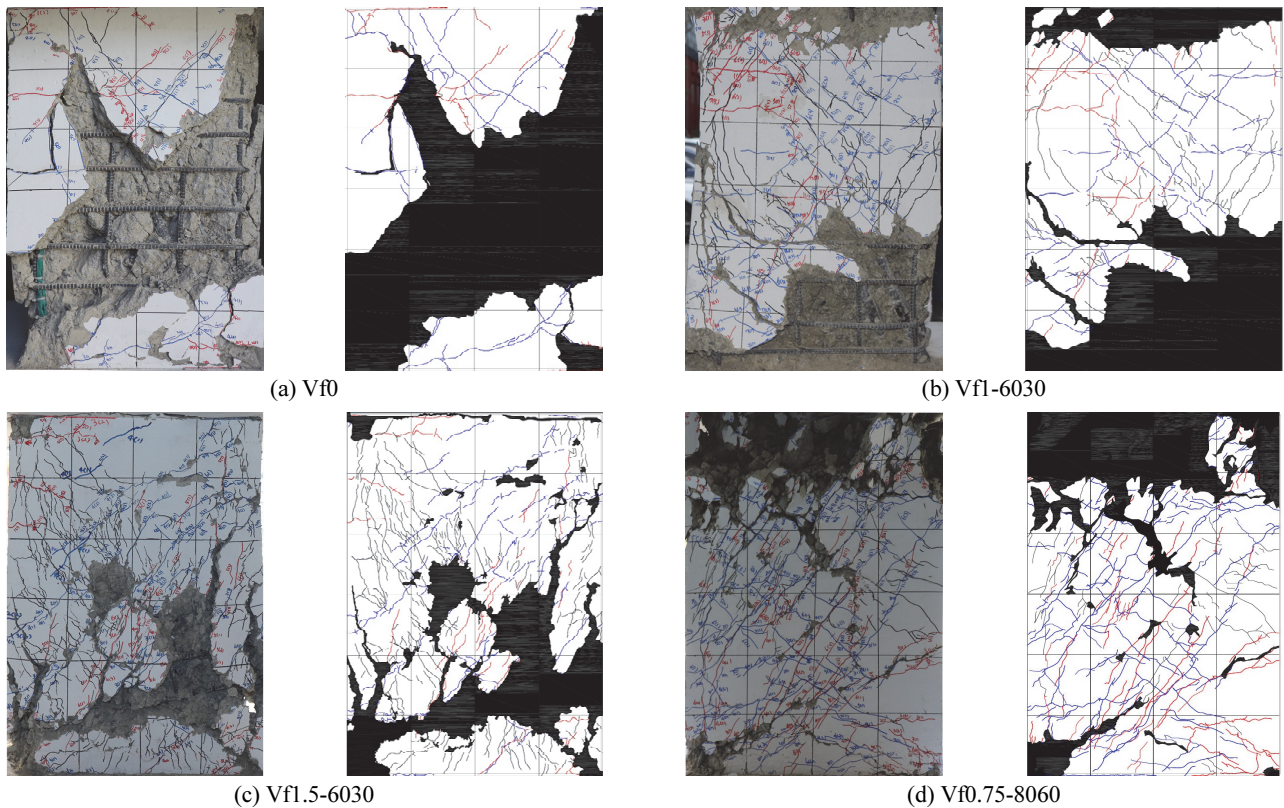
$f_y$  : yielding stress,  $\epsilon_y$  : yielding strain,  $f_u$  : tensile stress

### 3. 실험결과

#### 3.1 파괴양상

반복 횡가력 실험을 진행한 실험체의 파괴양상은 Fig. 5에 나타내었다. 실험체의 대각균열이 발생하는 시점과 최종 파괴양상의 차이를 비교하였다. 강섬유를 혼입하지 않은 Vf0 실험체는 2번째 Drift ratio( $\theta_y/2$ )에서 변위가 3.375mm일 때 대각균열이 최초로 발생하였다. 이후 하중이 증가함에 따라 다음 대각균열은 4번째 Drift ratio( $2\theta_y$ )에서 변위가 13.5mm일 때 발생하였다. 실험은 6번째 Drift ratio( $3\theta_y$ )에서 종료되었으며 최종균열은 Fig. 5(a)와 같다. 연결보의 중앙부인 북부에서 대각보강근의 좌굴이 발생하였고, 전단균열 등에 의해 실험체 북부의 콘크리트 피복이 탈락하는 현상으로 최종 균열이 나타났다. 이와 같은 결과는 대각보강근 좌굴을 방지하기 위해 연결보 전체를 횡구속 하는 상세로 설계하였지만, 철근 상세를 완화함에 따라 콘크리트를 구속하기 위한 횡보강근량이 부족하여 발생한 것으로 판단된다.

강섬유를 1% 혼입한 Vf1-6030 실험체는 Vf0 실험체와 동일하게 2번째 Drift ratio ( $\theta_y/2$ )에서 변위가 3.375mm일 때 대각균열이 최초로 발생하였고, 하중 증가에 따라 추가 균열은 4번째 Drift ratio ( $2\theta_y$ )에서 변위가 13.5mm일 때 발생하였다.



**Fig. 5** Failure mode

실험은 10번째 Drift ratio에서 종료되었으며 최종 균열 양상은 Fig. 5(b)와 같다. Vf0 실험체와 달리 연결보 복부의 콘크리트 탈락은 발생하지 않았고, 상, 하부에 콘크리트 피복이 탈락한 현상으로 최종 파괴 되었다. 단부에 소성힌지가 발생하였고, 대각보강근의 좌굴이 Vf0 실험체와 달리 연결보 복부가 아닌 단부에서 발생하였다.

강섬유를 1.5% 혼입한 Vf1.5-6030 실험체는 3번째 Drift ratio( $\theta_y$ )에서 변위가 6.75mm일 때, 대각균열이 복부에서 최초로 발생하였고, 타 실험체와 동일하게 추가 대각균열은 4번째 Drift ratio( $2\theta_y$ )에서 변위가 13.5mm일 때 발생 하였다. 5번째 Drift ratio 첫 번째 정가력을 진행 하였을 때 단부에 콘크리트 압괴 및 피복 탈락 현상이 발생하였으며 6번째 Drift ratio에서 좌측 상하부 콘크리트가 탈락하는 현상이 발생하였으며, 실험은 9번째 Drift ratio에서 종료되었으며 전체적으로 연성 거동을 하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 5(c)는 Vf1.5-6030 실험체의 최종 균열 사진으로 이전 두 실험체에 비해 콘크리트 탈락이 적게 발생한 것으로 나타났다. 소성힌지의 발생으로 좌측 상하부의 콘크리트 피복이 탈락하였지만, Vf1-6030 실험체와 비교하였을 때 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 대각보강근의 좌굴을 방지하고 강섬유 가교작용에 의해 콘크리

트 피복에 탈락을 방지하는 것으로 판단된다.

형상비 80의 강섬유를 0.75% 혼입한 Vf0.75-8060 실험체는 타 실험체와 동일하게 2번째 Drift ratio( $\theta_y/2$ )에서 변위가 3.375mm일 때 대각균열이 최초로 발생하였고, 4번째 Drift ratio( $2\theta_y$ )에서 좌측 상단 콘크리트 압괴가 발생하였다. 8번째 Drift ratio에서 후면에 복부에서 콘크리트 피복이 탈락하면서 횡보강근의 좌굴이 발생한 것을 확인하였다. 실험은 9번째 Drift에서 실험체의 후면 복부가 파괴된 후 종료되었다. Fig. 5(d)는 Vf0.75-8060 실험체의 최종균열 양상이다. RI factor가 60으로 동일한 Vf1-6030 실험체와 비교 하였을 때, Vf0.75-8060 실험체는 중앙부, 하단부의 대각보강근 좌굴을 방지하는 것으로 나타났다. 이는 강섬유의 형상비를 증가시키면 혼입률을 줄여도 대각보강근의 좌굴을 방지하는데 기여하는 것으로 판단된다.

### 3.2 하중-변위 관계

Fig. 6은 반복가력 실험을 수행한 4개의 실험체에 하중 및 변위 관계를 나타냈다. 실험 결과는 실험체의 항복시점, 최대 하중 시점, 극한시점으로 나누어 Table 5에 나타내었다.

4개의 실험체는 배근상세가 동일하며, 공칭 전단강도는

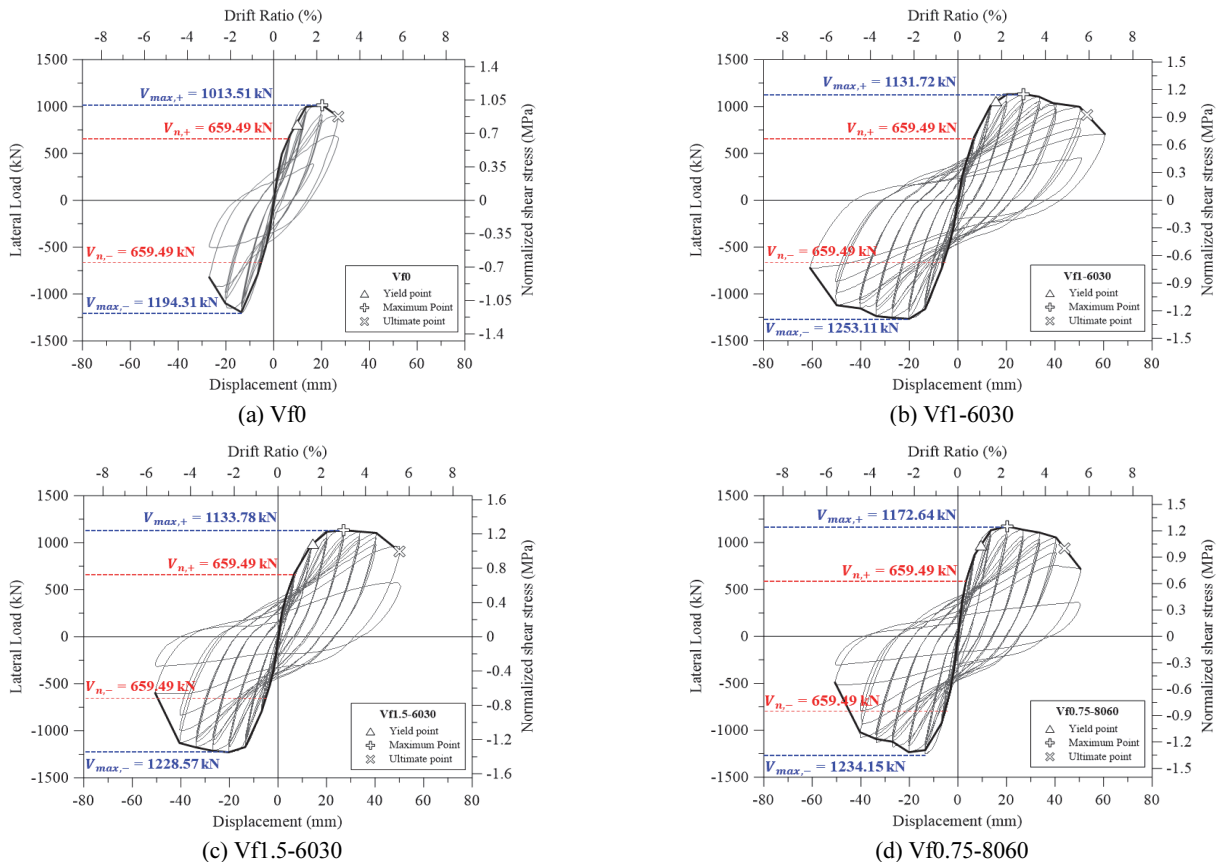


Fig. 6 Load-Displacement relationship for specimens

659.49kN 이다. 계산한 공칭강도 값보다 실험체 정가력 방향의 최대강도가 1.54배, 1.72배, 1.72배, 1.78배 상회하는 것으로 나타났다.

Fig. 6(a)은 섬유를 혼입하지 않은 Vf0 실험체로 정가력 방향의 변위가 20.26mm일 때, 최대하중이 1013.51kN으로 나타났고, 부가력 방향의 변위가 13.54mm일 때, 최대하중이 1194.31kN으로 나타났다. Vf0 실험체의 경우 회전각 2%까지 하중의 급격한 감소 없이 하중-변위 그래프가 안정적인 거동을 나타내며 극한강도 시점 이후 하중이 급격하게 저하되어 회전각 3%에서 실험을 종료하였다.

Fig. 6(b)에 나타낸 Vf1-6030 실험체는 Vf0 실험체와 동일한 배근상세를 가지며, 강섬유의 형상비가 60인 강섬유를 1% 혼입한 실험체로 회전각 2.2%에서 양의 방향에 최대 하중은 1137.51kN로 Vf0 실험체의 최대하중 보다 1.1배 증가하였고, 음의 방향에 최대하중은 -1264.84kN 으로 나타났다. 회전각 3.5% 이상부터 하중이 점차 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 6(c)에 나타낸 Vf1.5-8060 실험체 또한 타 실험체와 동일한 배근상세를 가지고 있으며, 강섬유의 형상비가 60인 강섬유를 1.5% 혼입한 실험체로 양의 방향으로 변위가 26.37mm일 경우에 최대하중이 1134.21kN 으로 나타났다. 강섬유를 혼입하지 않은 기준 실험체 Vf0 실험체에 비해 1.11배 증가하였으며, 음의 방향 변위가 19.86mm일 때, 최대하중이 -1233.63kN으로 나타났다. 동일한 강섬유의 형상비를 가지고 있는 Vf1-6030 실험체와 비교 했을 경우 하중이 극한시점 이후부터 급격하게 저하하는 것을 그래프를 통해 확인하였다.

Fig. 6(d)에 나타낸 Vf0.75-8060 실험체는 타 실험체와 동일한 배근상세를 가지고 있다. Fig. 6(a), (b) 실험체와 다른 80의 강섬유의 형상비를 가지며 RI Factor는 Vf1-6030 실험체와 동일한 해당 실험체는 강섬유를 0.75% 혼입한 실험체로 타 실험체의 비해 최대하중이 높은 것으로 나타났다. 양의 방향으로

변위가 20.3 mm일 때 1172.64kN과 음의 방향으로 변위가 13.45mm일 때 1254.85kN으로 나타났다. 4개의 실험체의 하중-변위곡선을 분석한 결과 강섬유 형상비가 제일 큰 실험체의 경우 1172.64kN으로 가장 높은 전단강도를 보유하고 있다. 형상비가 동일한 Vf1-6030과 Vf1.5-6030 실험체의 강도를 비교하였을 때, 강섬유 혼입률이 높은 Vf1.5-6030 실험체가 2.06kN 더 큰 값으로 나타났다.

### 3.3 강성저하

실험체의 변위 증가 별 강성저하를 Fig. 7에 나타내었다. 강성 값은 실험 결과 값들을 기반으로 각 사이클 별 정가력과 부가력에 해당하는 최대하중 절대값의 합에 최대변위 절대값의 합을 나누는 값으로 산정되었다. 실험체 각각의 초기 강성은 순서대로 182.26 kN/mm, 157.96 kN/mm, 181.13 kN/mm, 229.43 kN/mm로 나타났다. 80의 강섬유 형상비를 갖는 Vf0.75-8060 실험체의 경우 타 실험체 보다 가장 큰 강성을 가지는 것으로 나타났다. 초기 강성에서 강섬유의 형상비가 증가하는 것이 철근콘크리트 연결보의 강성 증진에 큰 역할을 하는 것으로 판단된다.

### 3.4 에너지소산능력

에너지소산은 연결보의 내진 성능을 평가하는 지표로 소산 능력이 큰 경우 내진 성능이 우수하였다 (Jang et al., 2018). 에너지 소산량은 반복가력의 한 사이클의 면적이며 Fig. 8에 나타내었다. 강섬유를 혼입하지 않은 Vf0 실험체가 6번째 Drift ratio에서 실험이 종료되었으며 135.93kN-mm로 가장 낮은 에너지 소산능력을 보유하고 있는 것으로 나타났다. 강섬유를 혼입한 실험체는 동일한 변위각 6Drift ratio에서의 에너지소산 값은 157.59kN-mm, 157.47kN-mm, 197.96kN-mm로 강섬유를 혼입하지 않은 Vf0 실험체와 비교 시 1.16배, 1.16배, 1.45배 증가하는 값으로 나타났다.

**Table 5** Experimental results of specimens

Specimen	Yield Point			Maximum Point			Ultimate Point			Ductility Ratio	$V_{max}/V_n$	
	$P_y$ (kN)	$\Delta_y$ (mm)	$\theta_y$ (%)	$P_{max}$ (kN)	$\Delta_{max}$ (mm)	$\theta_{max}$ (%)	$P_u$ (kN)	$\Delta_u$ (mm)	$\theta_u$ (%)	$\theta_u/\theta_y$		
Vf0	(+)	884.43	11.01	1.22	1013.51	20.23	2.25	891.34	26.98	2.99	2.45	1.54
	(-)	1063.56	11.34	1.26	1194.31	13.54	1.50	955.49	23.73	2.63	2.08	1.81
Vf1-6030	(+)	1011.62	13.63	1.51	1131.72	27.00	3.00	905.38	53.38	5.93	3.93	1.72
	(-)	1151.73	13.37	1.49	1253.11	26.98	2.99	1002.49	53.13	5.90	3.96	1.92
Vf1.5-6030	(+)	987.83	14.32	1.59	1133.78	27.01	3.00	907.02	50.05	5.56	3.49	1.72
	(-)	1082.98	11.93	1.33	1228.57	20.30	2.26	982.86	42.75	4.75	3.57	1.87
Vf0.75-8060	(+)	972.45	9.50	1.06	1172.64	20.30	2.26	938.11	43.88	4.88	4.60	1.78
	(-)	1022.18	9.04	1.00	1234.15	20.25	2.25	987.32	41.01	4.56	4.56	1.87

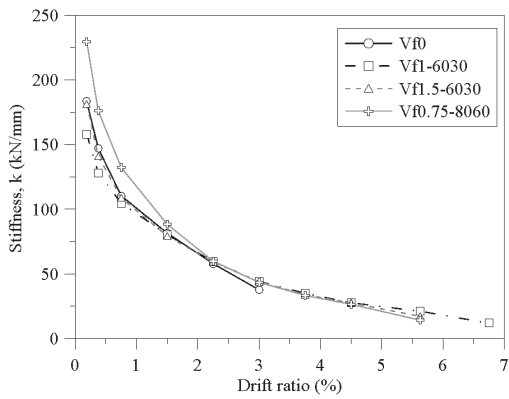


Fig. 7 Stiffness Degradation Curve

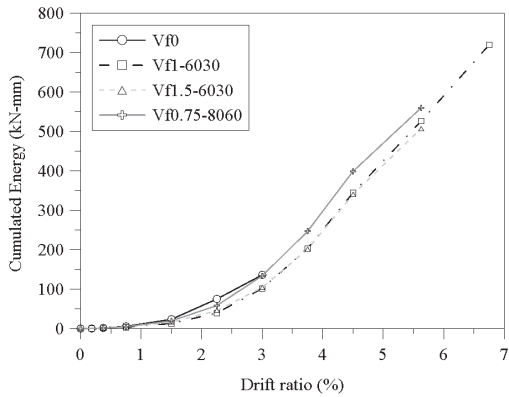


Fig. 8 Cumulated Energy Dissipation

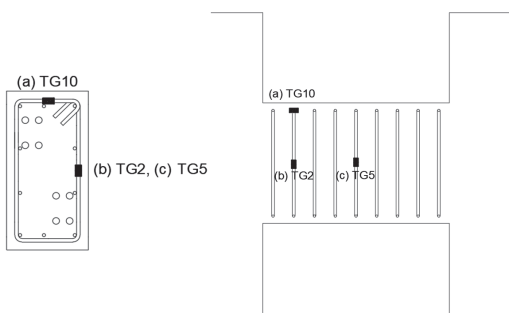
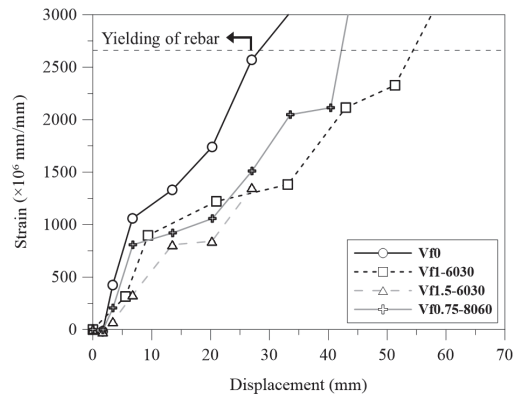
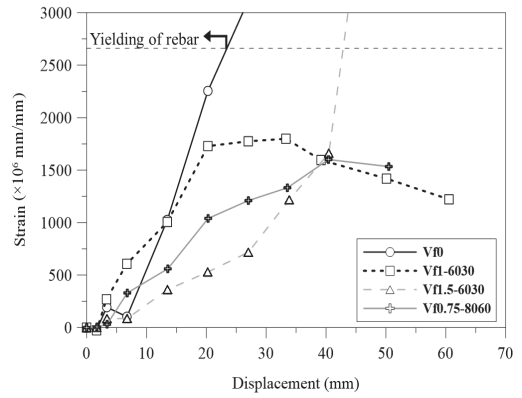


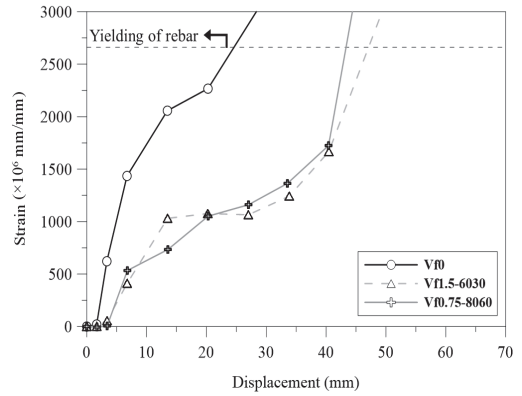
Fig. 9 Position of Strain Gauge



(a) Strain gauge of stirrups TG10



(b) Strain gauge of stirrups TG2



(c) Strain gauge of stirrups TG5

Fig. 10 Strain gauge analysis of transverse reinforcement

### 3.5 철근 변형률 분석

강섬유 혼입에 따른 횡보강근의 변형률을 분석하고자 Fig. 9와 같이 철근 게이지를 부착하였으며, 횡보강근의 변형률 분석은 Fig. 10에 나타내었다. 최대하중 시점에 Vf0 실험체의 경우 Fig. 10 순서대로 0.00174, 0.00225, 0.00226로 나타났다. Vf1.5-6030 실험체의 경우 최대하중 시점에서 0.00135, 0.00071, 0.00106으로 나타났다. 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 횡보강근의 변형률이 33%, 69%, 54% 감소하였다. 분석 결과 강섬유 혼입률이 증가되면 횡보강근의 수평요소와 수직요소 변형률이

모두 감소하는 것을 확인함에 따라 강섬유보강 콘크리트가 대각보강근을 효과적으로 구속하는 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 연결보에 강섬유 혼입률과 강섬유 형상비에 따른 이력거동을 평가하기 위해 4개의 실험체에 대한 반복가력실험을 수행하였다. 이에 따른 결론은 다음과 같다.

- 1) 현행기준에서 제시하는 공칭 전단강도인 659.49kN 보다

실험체별로 최대강도가 각각 1013.51kN, 1131.72kN, 1133.78kN, 1172.64kN로 나타났으며, 모든 실험체가 현행기준에서 제시하고 있는 공칭 전단강도 보다 상회하는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트에 혼입한 강섬유 형상비가 증가함에 따라 전단강도 증진에 기여하는 것으로 판단된다.

- 2) 실험결과 실험체의 파괴양상은 강섬유 혼입률이 증가할수록 취성파괴에서 연성파괴 되었으며, 복부에 콘크리트가 탈락하는 현상이 점차 감소하여 나타났다. 이는 강섬유의 가교작용으로 인해 급격한 균열폭 증가를 억제하고 대각보강근의 좌굴을 방지하는 것으로 판단된다.
- 3) 에너지소산은 변위각 3%에서 강섬유를 혼입하지 않은 실험체와 강섬유를 혼입한 3개의 실험체가 각각 135.93 kN-mm, 203.25kN-mm, 157.46kN-mm 197.96kN-mm로 강섬유를 혼입하지 않은 V<sub>f0</sub> 실험체 대비 각각 1.49배, 1.15배, 1.45배 높은 에너지소산능력을 보유하는 것으로 나타났다.
- 4) 현행기준에서 제시하고 있는 배근상세보다 횡보강근 양을 약 53% 완화한 배근상세에서 강섬유를 1.5% 혼입한 실험체의 경우 횡보강근의 변형률이 가장 낮게 나타났다. 이는 강섬유의 형상비와 혼입률이 증가할수록 강섬유 가교작용에 의해 대각보강근을 효과적으로 구속하는 것으로 판단된다.

## 감사의 글

2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2020R1A4A1019074).

## References

1. Korea Design Standard (2021). "Concrete seismic design standards", Korea construction standards center, KDS 14 20 80
2. ACI 544.4R-88. (2017). Design considerations for steel fiber reinforced concrete, ACI Committee 544, American Concrete Institute, 18.
3. ACI 374.2R-13. (2013). Guide for testing reinforced concrete structural elements under slowly applied simulated seismic load,

- ACI Committee 374, American Concrete Institute, 18.
4. Paulay, T., and Binney, J.R. (1974), "Diagonally Reinforced Coupling Beams of Shear Walls", *Shear in Reinforced Concrete*, SP-42, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, Jan 1974, pp. 579-598.
5. Naish, D., Fry, A., Klemencic, R., and Wallace, J. (2013). Reinforced concrete coupling beams-Part I: testing. *ACI Structural Journal*, 110(6), 1057.
6. Fortney, P. J., Rassati, G. A., and Shahrooz, B. M. (2008). Investigation on effect of transverse reinforcement on performance of diagonally reinforced coupling beams. *ACI Structural Journal*, 105(6), 781.
7. Oh, H. C., Lee, K.H., Han, S. W., Shin, M. S., and Jo. Y. W. (2015). Hysteretic Behavior Evaluation of a RC Coupling Beam using a Steel Fiber and Diagonal Reinforcement. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 27(3), 288-295.
8. Lee, H. H., Lee, H. J. (2004). Characteristic Strength and Deformation of SFRC Considering Steel Fiber Factor and Volume Fraction. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 16(6), 759-766.
9. Kim, J. S., Bae, B. I., Choi, C. S. (2019). A Study on the Effect of Steel Fiber in Reinforced Concrete Coupling Beam Subjected to Cyclic Loading. *JOURNAL OF THE ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA Structure & Construction*, 35(10), 181-190.
10. Park, W. S., Kang, T. H., Kim, S., & Yun, H. D. (2020). Seismic performance of moderately short concrete coupling beams with various reinforcements. *ACI Structural Journal*, 117(3), 141-152.
11. Yazıcı, Ş., İnan, G., and Tabak, V. (2007). Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1250-1253.
12. Jang, S. J., Jeong, G. Y., & Yun, H. D. (2018). Use of steel fibers as transverse reinforcement in diagonally reinforced coupling beams with normal-and high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 187, 1020-1030.
13. Jang, S. J., Kang, D. H., Ahn, K. L., Park, W. S., Kim, S. W., and Yun, H. D. (2015). Feasibility of using high-performance steel fibre reinforced concrete for simplifying reinforcement details of critical members. *International Journal of Polymer Science*, 1-13
14. Jang, S. J., Kim, S. W., Park, W. S., and Yun, H. D. (2013). Application of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) for Detail Simplification of Diagonally Reinforced Concrete Coupling Beam. Proceedings of the Korean Concrete Association Conference, 619-620.

Received : 04/07/2022

Revised : 06/16/2022

Accepted : 06/24/2022

**요 지** : 본 연구에서는 반복하중을 받는 대각선 철근콘크리트 커플링 보의 강섬유 형상비와 혼입률에 따른 이력거동을 분석하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 강섬유의 형상비와 혼입률을 주요변수로 설정하였으며, 국내 건축구조기준에서 제시한 연결보의 횡방향 보강률이 약 53% 완화된 4개의 실험체를 제작하였다. 실험에서는 ACI 374.2R-13에 따른 변위제어법으로 반복하중 실험을 수행하였으며, 실험 결과 강섬유가 혼입된 모든 실험체가 현행 구조기준에서 제시하는 공칭전단강도를 상회함을 확인하였다. 강섬유의 형상비가 증가할수록 대각선 철근의 좌굴을 방지하고 강섬유의 브리징 효과로 콘크리트의 균열면 증가를 방지하였다. 강섬유가 혼입된 실험체의 전단강도, 강성감소 및 에너지 소산능력은 강섬유가 혼입되지 않은 V<sub>f0</sub> 실험체보다 우수하였다. 따라서 강섬유 철근콘크리트가 횡철근의 디테일을 완화할 수 있다고 판단된다.

**핵심용어** : 연결보, 철근콘크리트 연결보, 횡보강근, 강섬유, 강섬유 형상비, 혼입률