

## 강섬유 보강 철근콘크리트 전단이음부의 피로거동에 대한 실험적 연구

### A Experimental Study on Fatigue Behavior of Joints between RC and RSFC subjected to shear

강 보 순\*

Kang, Bo-Soon

---

#### ABSTRACT

Fatigue behavior of shear joints between combined reinforced concrete(RC) and reinforced steel fiber concrete(RSFC) specimens has been experimentally investigated. Experimental parameters used are the amount of steel fiber and the type of shear joint. 6 specimens have been tested under static load, and 8 specimens have been subjected to the fatigue load in a range of 50% and 5% of the ultimate static load. The purpose of this research is to propose an empirical formula for fatigue shear behavior of combined RC and RSFC structures on the basis of experimental result. It can be observed from experimental result that addition of steel fibers to concrete specimen increases the static ultimate load by approximately 25%, enhances the fatigue behavior, and also reduces vertical and lateral displacements at the shear joint for a given load cycle after the occurrence of first crack.

---

#### 1. 서론

철근콘크리트는 압축강도에 비하여 인장강도는 상대적으로 매우 작으므로 인장강도의 증진을 위한 많은 연구 수행되고 있다. 즉, 강섬유가 혼입되지 않은 일반적인 철근콘크리트에 비하여 강섬유가 혼입된 철근콘크리트의 하중하에서의 거동은 강섬유가 균열발생을 억제함은 물론 균열발생후에도 균열폭을 억제함으로써 하중전달능력을 향상시키는 데 효과가 있다.

이를 위하여 최근 강섬유보강철근콘크리트(RSFC)에 관한 연구논문이 많이 발표되고 있으며, 강섬유철근콘크리트의 특성에 관한 연구중 정적하중과 같은 단기하중에 대해서는 비교적 많은 연구논문이 발표되어 있다. 그러나, 동적하중에 대한 강섬유철근콘크리트의 강섬유의 강도증진 및 균열발전억제에 대한 효과등을 규명한 연구실적 [1,2] 도 있으나 이들 기존의 연구는 엄밀한 의미의

---

\* 경주대학교 건설환경시스템공학부 전임강사

피로하중은 아니며, 피로하중에 대한 강섬유보강철근콘크리트(RSFC)에 관한 연구는 거의 전무한 상태이다. 본 연구는 강섬유보강철근콘크리트(RSFC)의 피로하중에 대한 휨 및 전단거동의 향상 및 균열억제효과 대한 철근콘크리트(RC) 및 강섬유보강철근콘크리트(RSFC)를 혼합하여 사용한 시험편의 전단이음부의 피로전단거동에 관한 실험적 연구로서, 사용된 실험변수로는 2가지 형식의 전단이음부 및 2가지 종류의 강섬유의 혼입량을 선택하였다. 실험은 정적하중하에서의 6개의 전단시험편과 피로하중하에서의 18개의 전단시험편을 사용하였으며, 시험편의 종류는 표1과 같다. 한편, 본 연구의 궁극적인 목표로서 실험결과를 분석하여 강섬유보강철근콘크리트(RSFC)의 전단거동효과에 관한 경험식을 제시하였다.

## 2. 실험 수행

### 2.1. 시험체

본 논문에서는 피로하중에 대한 일반적인 철근콘크리트와 강섬유 철근콘크리트의 전단 이음부의 피로거동특성에 관한 실험연구로서 사용된 시험체의 상세제원은 그림1과 같으며 정적 및 피로 실험을 위한 총 24개의 시험체는 표1에 요약하였다.

반복하중 하에서도 통계학적으로 보다 확실한 실험결과를 얻기 위해서 비교적 큰 전단면을 갖는 시험편의 균열표면에 직각으로 변화될 수 있고, 정의된 인장강성 설치한 시험방법을 사용하였다. 동시에 듀벨효과를 제거하기 위해 시험전단면에 외부로 프리스트레스 및 인장을 조절할 수 있는 Tendon을 설치하였다.

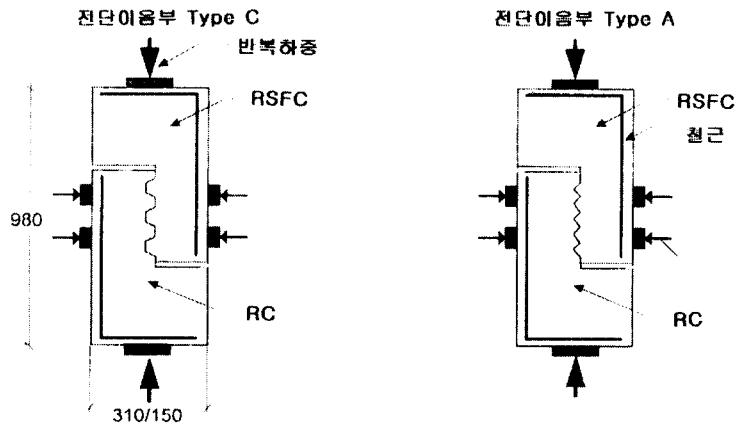


Fig.1--- Geometry of shear test specimen

실험에서 사용된 주요 실험변수는 다음과 같다.

- 작용하중: 피로하중(상하중: 최대하중, 하하중:10%×상하중)
- 사용강섬유: Dramix ZCR 50/60
- 강섬유 혼입량 : 30 kg/m<sup>3</sup>, 60 kg/m<sup>3</sup> 콘크리트
- 전단이음부의 형태: (type A: 연속삼각형, type C: 프로필형)

## 2.2. 콘크리트 배합

사용된 콘크리트의 배합은 다음과 같다.

포틀랜드 시멘트 (PZ 35F, 독일산)	305kg/m <sup>3</sup>
물- 시멘트 비	0.61
자갈골재의 최대 입경	16mm
Flowing Test영역	KR (a <sub>1</sub> 및 a <sub>2</sub> =40cm)
강섬유혼입량	30kg/m <sup>3</sup> (0.38 Vol.%), 60kg/m <sup>3</sup> (0.76 Vol.%)

위의 배합으로 만들어진 콘크리트는 DIN 1045에 따라 15\*15\*15cm Cube에 대한 28일의 압축강도를 측정하였다. 강섬유가 없는 콘크리트 350kg/cm<sup>2</sup> 이며 30kg/m<sup>3</sup>과 60kg/m<sup>3</sup>의 강섬유혼입량을 넣어 만들어진 강섬유콘크리트는 각각 360kg/cm<sup>2</sup>와 400kg/cm<sup>2</sup>의 압축강도를 나타내었다.

Table --- Detail of test specimens

Specimen		Shear Joint Type*	Static Test		Fatigue Test	
Upper part	Lower part		Specimen Designation	Nos of Specimen	Specimen Designation	Nos of Specimen
RC*	RC	A	RRAS	1	RRAF	3
RC	RC	C	RRCS	1	RRCF	3
RC	SFRC* (0.38 Vol.%)	A	RF38AS	1	RF38AF	3
RC	SFRC* (0.38 Vol.%)	C	RF76CS	1	RF38CF	3
RC	SFRC* (0.76 Vol.%)	A	RF38AS	1	RF76AF	3
RC	SFRC* (0.76 Vol.%)	C	RF76CS	1	RF76CF	3

Note \* RC and SFRC denotes reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete.

\*\* 0.38 Vol.% means 38 % in concrete volume for steel fiber.

\*\*\* Please refer to Fig.1 for Shear Joint Type

## 2.3 측정값

본 연구의 궁극적인 목적인 피로하중에 대한 강섬유로 보강된 콘크리트 전단이음부의 전단강도 및 균열향진의 경험식을 제시하는 것으로서 필요한 제반 측정값은 다음과 같다.

- 횡방향 변위를 억제하는 Tendon의 변위상태
- 정하중에 대한 전단변위(수직변위)와 균열폭(수평변위)
- 피로하중 횡수에 대한 전단변위(수직변위)와 수평변위

- 하중-변위의 이력곡선
- 측면의 휨균열 상태

## 2.4 실험 과정

실험 설비에서 시험체 밖으로 직경 20mm의 Tendon(독일 M8.8) 4개를 측면4개의 두꺼운 강판으로 연결하여 떨어지지 않도록 조여 설치하였다. 이와 유사한 설치방법은 White/Halley, Laible/5/ 또는 Walraven/6/의 실험 연구에서도 사용된 방법으로 인장봉의 탄성변위시 4개봉을 통해서 연결되어 있는 강판이 시험체의 균열폭을 억제하므로 균열법선응력(Crack Normal Stress)이 발생한다. 조인트의 균열폭이 증가할 경우 Tendon의 탄성계수가 증가되어 균열법선응력도 증대된다.

정적실험시에는 변위가 제어되었고, 피로실험시에는 하중이 제어되었으며, 인장봉에 작용하는 힘은 봉에 부착된 변형률계이지에 의해 측정되었다. 또한 조인트에서의 변위는 앞면과 뒷면에 각각 3곳에서 LVDT로 측정됐다(Fig.2 참조). LVDT의 측정영역은  $\pm 2\text{mm}$  이다. 시험체 측면에서는 부수적으로 휨 전단면에서의 균열상태가 관찰되었다.



Fig.2--- Loaded specimen and LVDT

첫번째 단계로 전단이음부의 최대전단하중을 얻기위해, 변위제어하에서 6시험체에 대한 정적실험이 행해졌다. 이때의 실린더의 속도는 0.2mm/min.였다. 두번째 단계는 하중제어하에서 18시험체에 대한 피로하중실험이 일정한 상한하중과 하한하중을 갖고 100만번까지 행해졌다.

## 3. 실험결과분석

### 3.1 정적실험

Fig.3 에서는 2개의 다른 형태를 갖고있는 전단 이음부의 실험을 통해 얻어진 하중-변위곡선을 나타내고 있다. 이 그림에서는 전단 이음부에 강섬유 콘크리트를 보강함으로써 첫 균열발생 후에

전단 이음부에서 강섬유가 외력에 대하여 저항하여 응력 재분배의 효과를 가져오므로 전단강도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 첫 균열발생 후, 강섬유 보강으로 인한 수직변위(전단변위)와 수평변위(균열폭)가 감소한다. 효과를 파악할 수 있다.

전단이음부의 형상에 따른 강도증가효과는, 연속삼각형 형태의 전단이음부 A는 마름모 형태 전단 이음부 C보다 균열 발생 후 높은 전단강성을 갖고있는 반면에 전단이음부 C는 전단이음부 A보다는 큰 균열전단응력을 나타내었다.

또한 전단이음부가 파괴된 후 같은 단면을 갖고있는 콘크리트 시험체의 측면의 휨균열 상태를 살펴보면 강섬유의 보강으로 균열수는 많아지고 균열간격은 좁아지는 것을 관찰할 수 있었다.

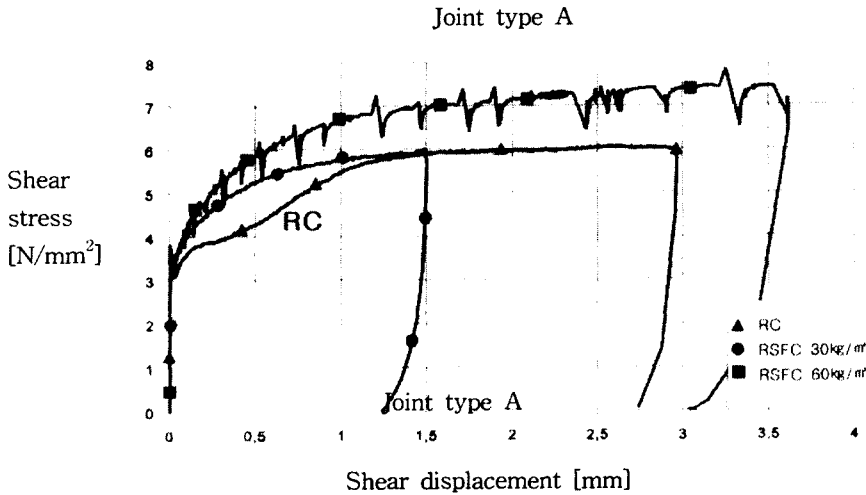


Fig.3--- Influence of steel fibers on average shear stress-shear displacement relation

### 3.2 피로실험

Fig.4 에서 일정한 상한선과 하한선 갖고 있는 반복하중 하에 전단 이음부의 전단변위(수직변위)가 히스테리시스 커브 형태로 증가함을 보여주고 콘크리트에 강섬유를 보강함으로써 전단 이음부의 조직변화가 억제되며 균열 후에도 이력거동이 완만하고 서서히 변화하는 것을 발견 할 수 있다.

실험시의 상한하중은 정적인 최대하중을 전단설계안전비( $\gamma=2.1$ )로 나누어 구해진다. 전단이음부 A와 C의 상한하중은 각각 100kN과 80kN이고 강섬유 철근 콘크리트의 첫 균열 발생은 강섬유 혼입량에 따라 각각 높은 반복하중횟수에서 나타나는 것을 관찰할 수 있다. (Fig.5 참조)

이런 성향은 두 형태의 전단이음부가 같다. 전단이음부 A인 경우 강섬유가 균열이 발생한 후 콘크리트를 일체로 유지시킴으로써 피로하중 하에서 전단변위의 현저한 감소효과를 나타낸다. (Fig.5 참조)

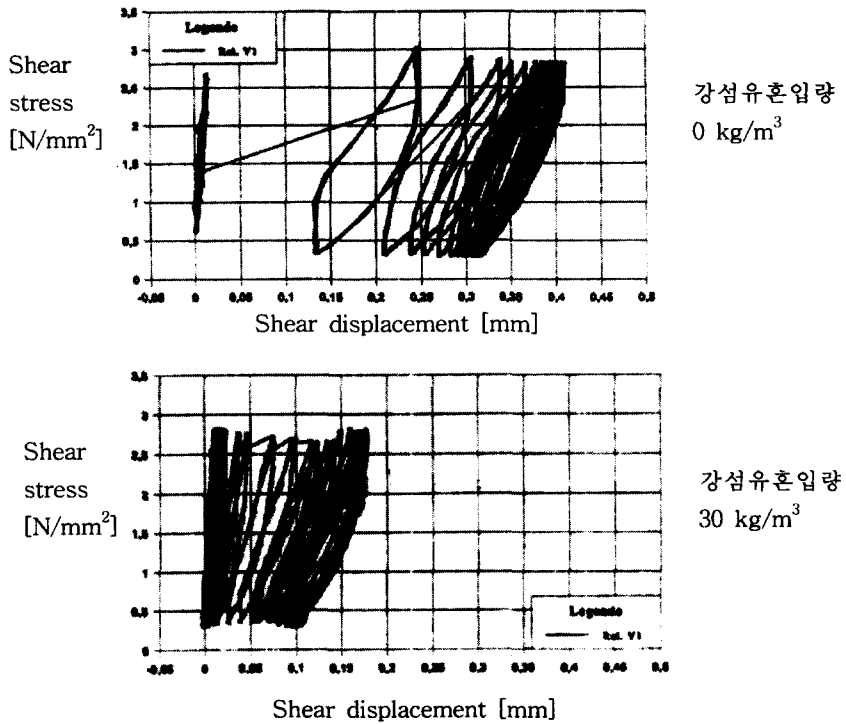


Fig.4--- Influence of steel fibers on hysteresis curves

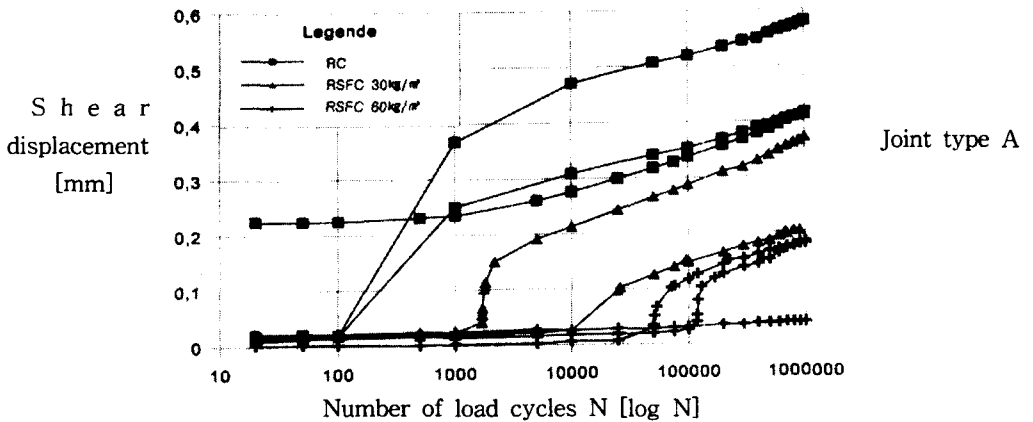


Fig.5--- Propagation of max. shear displacements

#### 4. 전단피로거동 제안식

복합적인 시스템을 위한 실제적인 전단거동을 계산방법으로 묘사하고 영향을 주는 여러 변수와 연결된 힘들을 충분히 정확히 나타내는 것이 용이하지 않으므로 대부분 실험 경험식으로 제안한다. 균열콘크리트의 전단이음부에서 내부적인 힘의 작용은 실험적인 방법으로 연구되고 아주 간편하게 안전한 측면으로 놓인 역학적 모델로 나타낸다.

전단 이음부의 피로거동은 초기균열발생과 손상Evolution으로 구분하여 관찰할 수 있다. 강섬유

콘크리트로 전단이음부를 보강한 경우 반복되는 피로하중 하에서 초기균열 발생을 억제 할뿐만 아니라 균열발전을 제한하는 효과가 있음을 앞에서 보여준 실험결과로 입증되었다. 따라서 실험결과를 통하여 각각의 제안식을 얻을 수가 있다.

### 1) 반복하중횟수에 따른 균열발생

Fig.5에서 나타난 것처럼 강섬유로 보강된 전단 이음부는 근사적으로 반복횟수(log N)가 오른쪽으로 이동하는 현상을 즉 강섬유와 콘크리트의 부차효과로 전단외력에 대한 저항력이 증가되어 초기균열이 늦게 발생하는 것을 관찰 할 수 있다. 따라서 이 실험결과로부터 하나의 식을 제안하면 아래와 같다.

$$\log N_{Stfc} = \log N_{rc} + K_{V1} \cdot a_c \cdot V_f$$

$N_{Stfc}$  = 균열발생시 강섬유콘크리트의 반복횟수

$N_{rc}$  = 균열발생시 콘크리트의 반복횟수

$K_{V1}$  = 강섬유 형태 및  $V_f$  에 의한 계수

$a_c$  = 콘크리트 전단면에 대한 계수

전단이음부 형태 A :  $a_c \cong 0.9$ , 전단이음부 형태 C :  $a_c \cong 0.6$

$V_f$  = 강섬유 혼입량 [ Vol.% ]

### 2) 손상 Evolution

Fig.5에서 관찰한 것처럼 마크로 균열발생 후 계속 발전되는 균열이 강섬유에 의해 확실히 억제된다. 이 균열발전을 손상 Evolution으로서 나타낸다. 반복횟수(log N)와 함께 선형에 가까운 변화를 하는 손상 Evolution은 전단이음부 Type A의 모든 실험결과로부터 하나의 식을 제안 할 수 있다.

$$V_{N,Stfc} = V_{N,rc} - x_{12} \cdot a_c \cdot V_f$$

$$V_{N,rc} = V_{1,rc} \cdot (1 + k_V \cdot \log N)$$

$x_{12}$  = 강섬유 형태 및  $V_f$  에 의한 계수

강섬유 혼입량  $V_f = 0.38 \text{ Vol.} \% \quad x_{12} = 60$

강섬유 혼입량  $V_f = 0.76 \text{ Vol.} \% \quad x_{12} = 60$

$a_c$  = 콘크리트 전단면에 대한 계수

전단이음부 형태 A :  $a_c \cong 0.9$ , 전단이음부 형태 C :  $a_c \cong 0.6$

$V_f$  = 강섬유 혼입량 [ Vol.% ]

$k_V$  = 상대변위에 대한 콘크리트 계수 (  $k_V = 0.217$  )

$V_{N,Stfc}$  = 반복회수 N 일 때 강섬유 콘크리트의 상대변위 [mm]

$V_{N,rc}$  = 반복회수 N 일 때 콘크리트의 상대변위 [mm]

$V_{1,ste}$  = 균열발생시 강섬유 콘크리트의 상대변위 [mm]

수행된 연구를 통해 예상된 결과와 같이 콘크리트에 강섬유를 혼입함으로써 피로하중에 대한 균열특성이 섬유 혼입량에 따라 확실히 향상되었다.

## 5. 결론 및 추후연구과제

정적실험과 동적실험결과는 각각 다음과 같다.

### (1) 정적실험

- 강섬유로 보강된 연속삼각형모양의 조인트 경우 25%의 높은 파괴하중을 갖는다.
- 강섬유는 균열발생 후 수직변위(상대변위)와 수평변위(균열폭)를 감소시킨다.
- 첫 균열 발생 후 균열틈 사이에서 강섬유는 다리를 형성하면서 현저한 조인트 Post 최대하중을 증대시키면서 유연한 변형을 주는 효과가 있다.
- 강섬유는 균열이 발생한 조인트의 잔존 전단강도를 증가시키고 섬유혼입량의 증가에 따라 그 전단강도는 증대 한다.

### (2) 피로실험

- 강섬유 보강 콘크리트의 경우 조인트 첫 균열이 훨씬 늦게 발생한다.
- 강섬유 보강 콘크리트의 경우 조인트의 강도가 현저하게 증가한다.
- 강섬유 보강 콘크리트의 히스테리시스 커브는 현저히 작은 소성변위를 보인다. 즉, 강섬유는 강한 균열 억제와 균열발생 후 콘크리트를 일체로 유지시킴으로써 피로하중에 대한 저항성을 증대시킨다.
- 실험경험식 제안

본 연구와 관련하여 추후 연구과제로서는 RC 및 SFRC 보의 피로하중에 강섬유혼입량에 따른 피로휨거동 향상효과(균열특성 및 강성의 변화)에 관한 연구가 필요하다고 사료됨.

## 참고문헌

- /1/ Stangenberg, F. : *Stahlfaserbeton als hervorragender Baustoff für stossbeanspruchte Bauteile*. Bauingenieur Nr.61, 1986, 339-345.
- /2/ Heiland, D. : *Untersuchungen zum Dämpfungsverhalten von stahlfaserverstärktem Stahlbeton bei globaler und elementweise differenzierter Betrachtungsweise*. Dissertataion, Ruhr-Universität Bochum, 1991.
- /3/ Schnütgen, B. : *Rohre aus Stahlfaserbeton*. Beton- und Stahlbetonbau 1/1989, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1989.
- /4/ Deutscher Ausschuß für Stahlbeton (DAfStb): *Richtlinie für Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen*. Ausgabe September 1992, Beuth-Verlag Berlin, 1992.
- /5/ White, R. N., and Holley, M.J. (1972). "Experimental studies of membrane shear transfer." *J. Struct. Div., ASCE*, 98(8), 1835-1852.
- /6/ Walraven, J. : "Rough Cracks Subjected to Earthquake Loading" *Journal of Structural Engineering*, ASCE Vol. 120, No. 5, May, 1994.
- /7/ Kang, B.S. : *Stahlfaserbeton und stahlfaserverstärkter Stahlbeton unter Schwellbeanspruchung*. Dissertataion, Ruhr-Universität Bochum, 1998.