

# 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 전단 전달 모델

## Shear Transfer Strength Evaluation for Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete

이 지 형\*  
Lee, Ji-Hyung

홍 성 곁\*\*  
Hong, Sung-Gul

### Abstract

Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) has a outstanding tensile hardening behaviour after a crack develops, which gives ductility to structures. Existing shear strength model for fiber reinforced concrete is entirely based on crack opening behavior(mode I) which comes from flexural-shear failure, not considering shear-slip behavior(mode II). To find out the mode I and mode II behavior on a crack in UHPFRC simultaneously, maximum shear strength of cracked UHPFRC is investigated from twenty-four push-off test results. The shear stress on a crack is derived as variable of initial crack width and fiber volume ratio. Test results show that shear slippage is proportional to crack opening, which leads to relationship between shear transfer strength and crack width. Based on the test results a hypothesis is proposed for the physical mechanics of shear transfer in UHPFRC by tensile hardening behavior in stead of aggregate interlocking in reinforced concrete. Shear transfer strength based on tensile hardening behavior in UHPFRC is suggested and this suggestion was verified by comparing direct tensile test results and push-off test results.

*Keywords : Crack width, Cracked concrete, Shear transfer strength, Push-off test, Tensile hardening behavior, UHPFRC*

## 1. 서론

강섬유 보강 초고성능 콘크리트 (Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete, UHPFRC)는 높은 압축력과 인장력을 가질 뿐만 아니라, 자기 다짐성, 충전성, 내구성 등이 뛰어나 콘크리트 재료 활용 분야에 다양성을 가져올 것으로 기대되는 차세대 재료이다. UHPFRC는 별도의 철근 배근 없이 상당한 인장력을 견디므로 두께가 얇고 형상이 자유로운 부재 적용이 가능하고 이러한 효율적인 단면형상을 통해 자중을 줄일 수 있으므로 대공간 구조의 적용에도 적합하다. 곡률을 가진 UHPFRC 패널 등의 조합을 통한 대공간 및 셸구조에의 활용에 대한 연구

는 국내·외에서 활발하게 진행되고 있다.<sup>6)</sup>

재료의 효율적인 사용을 위해 단면형상이 얇아질수록 휨 뿐만 아니라 전단에 대한 국부적인 파괴위험이 크게 증가할 우려가 있어 UHPFRC의 전단저항 기제에 대한 연구의 필요성이 크며, 주요 쟁점은 다음과 같다.

보통콘크리트에서 압축력은 콘크리트, 인장력은 철근이 부담한다고 가정하고 철근량과 철근배근을 변수로 설계하는 것과 달리 강섬유 보강 콘크리트에서는 별도의 철근배근 없이 균열면에서 강섬유의 부착응력에 의해 인장력이 발현되는 것으로 설명되는데 균열면에 작용하는 강섬유의 부착응력의 합력 혹은 인장력을 예측하는 것이 쉽지 않다.<sup>6,7)</sup>

보통콘크리트에 배근된 철근은 탄성범위 내에 있는 부재에서는 장부효과와 같은 전단저항능력이 무시할 수 있을 정도로 작아 인장력만 받는다고 가정할 수 있고, 이 인장력이 균열면에 구속력으로 작용하여 골재 맞물림 현상에 의해 전단에 저항한다.<sup>3,8)</sup> 그러나 UHPFRC의 균열면에 작용하는 전단응력 및

\* 정희원, 서울대학교 공과대학 건축학과, 박사과정  
Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University

\*\* 교신저자, 서울대학교 공과대학 건축학과, 공학박사  
Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University  
Tel: 02-880-7061 Fax: 02-874-2628  
E-mail: sglhong@snu.ac.kr

거동에 대한 기제는 규명되지 않은 상태이다.

기존 UHPFRC의 전단모델의 일반적인 가정은 재료 압축력이 인장력에 비해 매우 클 경우 균열면에서 강섬유에 의한 인장력에 의해 전단강도가 결정된다는 것이다. 하지만 이러한 모델링은 주로 휨-전단 연구에서 파생된 것<sup>1)2)</sup>으로 균열면에서의 전단응력 및 전단거동, 특히 전단면에서 미끄러짐 거동이 전혀 고려되어 있지 않다는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 균열이 있는 푸시 오프 실험을 통해 UHPFRC의 균열면에서의 수직, 수평응력 및 거동을 동시에 알아보고, 균열폭에 따른 최대전단강도 식을 제시하고자 한다.

## 2. 실험체 설계

### 2.1 재료 강도

실험에 사용된 UHPFRC의 배합은 <Table 1>과 같다. 강섬유(SF)를 제외한 나머지는 중량비로 나타낸 것이다. 매트릭스는 미세 균열이나 공극을 최소화하기 위하여 미세 입자의 입도가 균질하고 조적이 매우 치밀한 특징이 있다. 배합에 적용한 시멘트는 보통 포틀랜드시멘트(C)이며, 반응성 분체로 지르코늄(Zr)을 사용하였다. 잔골재는 입도 0.5mm 이하의 모래(S)를 사용하였으며 굵은 골재는 사용하지 않았다. 낮은 물-결합비(W/B)에 의한 작업성을 보완하기 위하여 폴리카르본산계의 고성능 감수제(SP)를 사용하였으며, 충전재(F)의 구성입자 평균입경은 10 $\mu$ m정도이다. 강섬유(SF)는 부피비로 나타내어 실험변수에 따라 0.5%, 1.0%, 1.5%를 적용하였으며, 항복강도 2,500MPa, 직경 0.2mm의 직선형상 강섬유를 19mm길이와 16mm길이를 부피비에 따라 각각 2:1의 비율로 배합하였다.

<Table 1> UHPFRC composition

W/B	C	Zr	S	F	SP	SF
0.237	1	0.25	1.1	0.3	0.0085	1.5-0.5

재료강도 시험은 한국콘크리트학회에서 발간한

초고성능 콘크리트 구조설계지침<sup>4)</sup>에서 제시하는 시험방법에 의거하여 수행되었다. 강섬유부피비 0.5%, 1%, 1.5% 별로 각 6개의 시편을 제작하여 시험하였으며, 해당 강도는 시편 6개 중 가장 큰 값과 작은 값을 제외한 4개 값의 평균값으로 보았다. 인장시험의 경우 중앙부의 균열을 유도하기 위하여 <Fig. 1>의 오른쪽 그림과 같이 중앙부 양쪽에 폭 2mm, 깊이 12.5mm의 노치를 도입한 시편을 변위제어 방식으로 0.005mm/sec의 속도로 가력하였다. 시험체가 신장량을 나타내기 위한 변위계 사이의 바깥쪽에서 파괴된 경우에는 그 결과를 무효로 하였다. 재료시험결과는 <Table 2>와 같다. 압축강도와 탄성계수는 강섬유 부피비에 따라 소폭 증가, 인장강도는 크게 증가하는 경향을 보였다. 인장강도-균열폭의 관계에서 최대인장강도가 도달하는 시점은 시편에 따라 편차는 있으나 균열폭 0.3mm 이내에서는 안정적으로 하중이 증가하였다.



<Fig. 1> (Left) Compressive strength test and (Right) Direct Tensile strength test of UHPFRC

<Table 2> Material properties of UHPFRC

Fiber volume ratio ( $V_f$ , %)	Compressive strength ( $f_c$ , MPa)	Elastic modulus ( $E$ , GPa)	Tensile strength ( $f_t$ , MPa)
1.5	176.9	49.8	11.43
1.0	147.8	44.5	8.12
0.5	159.5	46.4	6.37

### 2.2 실험 변수 및 계획

균열이 있는 보통콘크리트는 균열면에 수직으로 배근된 철근의 장부효과와 균열면에서의 골재 맞물

림현상에 의해 지지되는 것으로 알려져 있다. 특히 골재 맞물림 효과는 강도가 크지 않은 보통콘크리트의 경우 균열이 골재를 따라 요철을 가지며 형성되는 골재의 맞물림에 의한 마찰로 설명되며 균열폭이 골재지름의 반 이하인 구간에서 상당한 크기를 가지게 된다.<sup>3),5),8),9)</sup> Walraven은 직접전단 실험체에 사전에 균열을 도입한 뒤, 푸시 오프 실험을 수행하였다. 도입된 초기 균열폭의 크기에 따라 균열면에서 받을 수 있는 최대전단강도 및 최대전단강도에 이르기까지 균열면에서의 응력과 변위관계를 이론적으로 유도하여 실험값과 비교하였다.<sup>9)</sup>

UHPC는 굵은 골재를 사용하지 않으므로 골재 맞물림 효과는 기대할 수 없으나, 균열폭에 따른 균열면에서의 수직, 수평응력 및 변위에 대한 연구라는 점에서 기존연구의 실험방법을 근거로 다음과 같이 계획하였다.

초기균열이 있는 24개의 직접전단실험체에 대해 푸시 오프 실험을 수행하였다<Fig. 2>. 균열면에서의 수직, 수평응력 및 변위관계를 알아보기 위하여 <Table 3>과 같이 강섬유 부피비와 초기 균열폭을 변수로 설정하였다. 강섬유 부피비는 재료인장강도

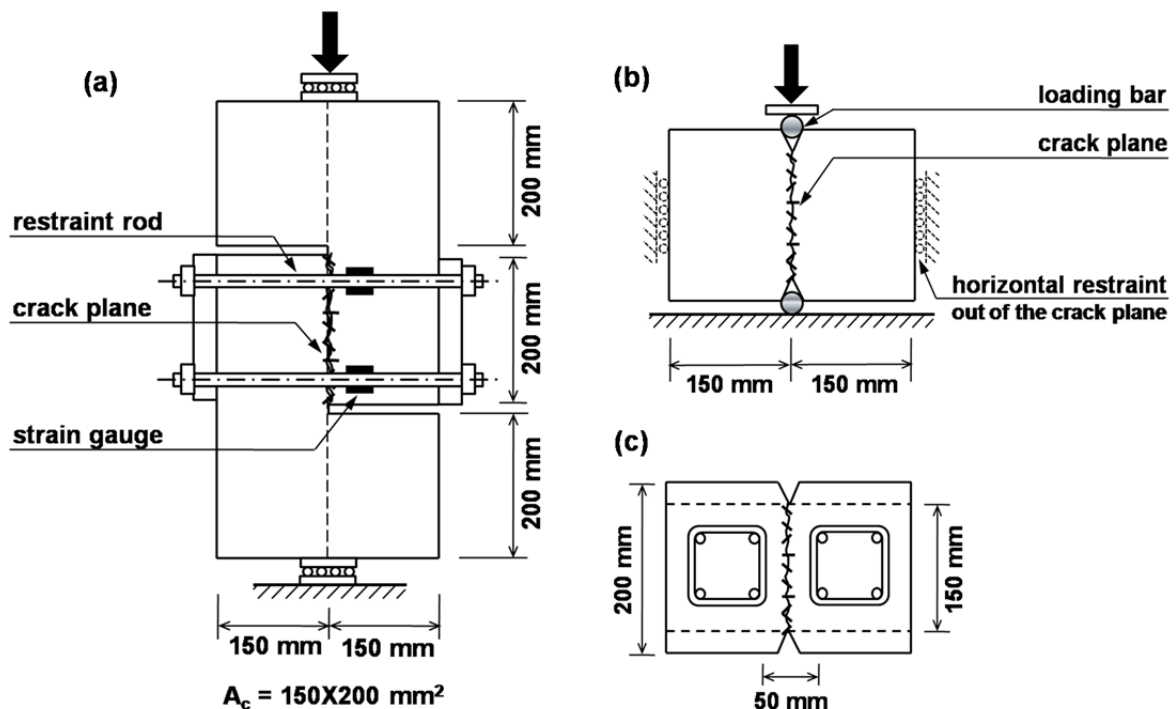
를 결정하는 주요 요인으로써 각 부피비에 따른 인장강도-균열폭이 실제 변수가 되며, 초기 균열폭은 노치를 도입한 인장강도시험에서 인장강도-균열폭 관계 시 균열폭이 약 0.3mm보다 작은 범위에서 탄성상태에 있는 것을 참고하여 0.05~0.25mm 사이의 균열폭을 변수의 범위로 도입하였다.

<Table 3> Specimen Details

Specimen No.	Initial crack width ( $w$ , mm)	Fiber volume ratio ( $V_f$ , %)
F15-1,2,3,4,5,6,7	0.05~0.20	1.5
F10-1,2,3,4,5,6,7,8,9	0.20~0.25	1.0
F05-1,2,3,4,5,6,7,8	0.03~0.20	0.5

모든 실험체의 배근형태는 동일하며, 강섬유 부피비 별로 8개씩, 총 24개 실험체를 타설하였다. 푸시 오프 실험 세팅은 <Fig. 2>의 (a)와 같으며, 실험체의 균열면을 통해서만 거동이 이루어지도록 전단면  $A_c$ 를 제외한 부분은 <Fig. 2>의 (c)와 같이 철근으로 충분히 보강하여 강체거동을 하도록 유도하였다.

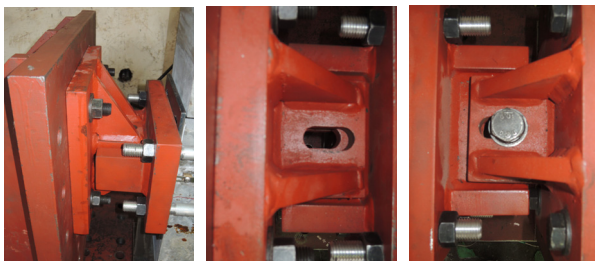
초기 균열은 본 실험에 앞서 <Fig. 2>의 (b)와 같이 전단면 가운데 V-형태 단면 노치의 앞뒷면에 가력



<Fig. 2> Specimen geometries for tests on cracks: (a) Test specimen with external restraint bars, (b) Precracking of a specimen, (c) Specimen dimension and arrangement of bar



(a) Loading configuration and measuring devices



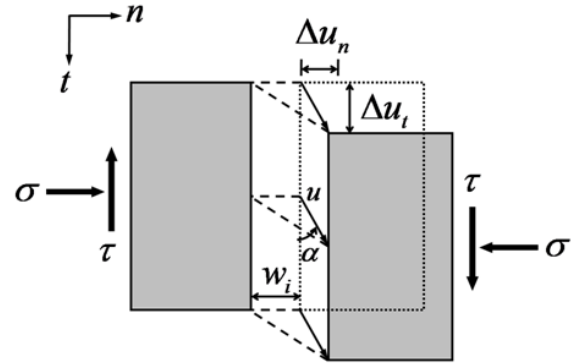
(b) Jig details for horizontal boundary condition

<Fig. 3> Test set-up

강봉을 설치하여 도입하였으며, 이 때 발생한 균열폭은 단면 중앙부의 양쪽면에 LVDT를 설치하여 상대변위로 측정하였다. 또한 실험체가 휨 거동을 하지 않도록 전단면의 양쪽면에 외부 지지강봉을 설치하여 균열면에서의 폭이 일정하도록 하였다.

주요 계측값은 전단슬립변위, 균열폭, 강봉변형률이다. 전단슬립변위는 전단면의 상, 하면에 LVDT를 설치하여 측정하였다. 균열폭은 실험체 앞, 뒤로 V-형태 단면 노치에 파이형 크랙게이지를 설치하여 측정하였다. 수직응력 및 전단응력은 액추에이터 가력강도에서, 수평응력은 강봉 4개에 게이지를 붙여 변형률을 측정하여 응력을 계산하였다.

실험체 셋업은 <Fig. 3>과 같다. 100ton 액추에이터를 사용하였으며, 변위제어를 통해 0.01mm/sec의 속도로 전단슬립변위가 약 17mm가 될 때까지 수직으로 가력하였다. 실험체의 상, 하면에 전단면



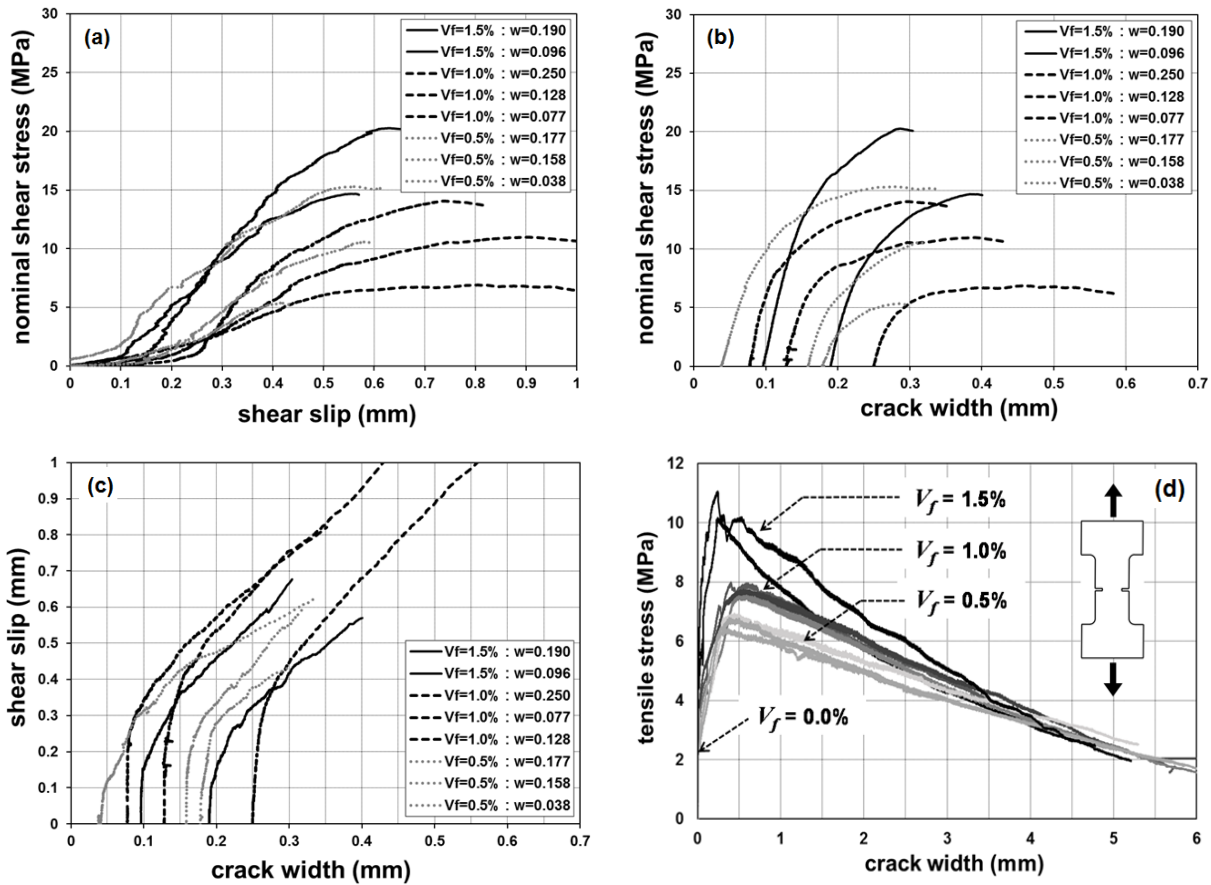
- $\tau$  : nominal shear stress on crack face
- $\sigma$  : nominal normal stress on crack face
- $w$  : initial crack width
- $w_{net}$  : net crack width ( $= w + \Delta u_n$ )
- $\Delta u_n$  : increasement of crack width
- $\Delta u_t$  : increasement of shear slippage
- $u$  : displacement vector of the crack
- $\alpha$  : angle of  $u$  ( $\cot \alpha = \Delta u_t / \Delta u_n$ )

<Fig. 4> Stresses and displacements on a crack

과 일직선이 되도록 지점제하를 하였으며 강봉은 수직방향으로는 위치가 고정되어 있고, 수평방향으로는 강봉의 변위에 의해서 이동이 가능하도록 별도의 지그를 제작하여 가이드로 사용하였으며 가이드와 실험체 사이에 마찰력이 작용하지 않도록 테프론시트를 지그와 실험체에 각각 부착하였다. 지그는 <Fig. 3>의 (b)와 같이 지그의 수직위치는 고정된 채로 수평으로는 슬롯을 통해 이동이 가능하도록 제작하였다. 가력 전 지그는 실험체에 수평력이 걸리지 않는 범위 내에서 볼트에 토크를 주지 않고 실험체와 빈틈이 없도록 고정하였다.

### 3. 실험결과

실험체의 전단면에 작용하는 응력 및 변위는 <Fig. 4>와 같이 나타낼 수 있다.  $\tau$ 는 가력하중을 균열면의 넓이로 나눈 평균 전단강도로서 균열면에 작용하는 전단력을 직사각형 블록으로 가정한 값이다. 초기 균열폭  $w$ 는 실험변수로서 주어진 값이고,  $\Delta u_n$ 과  $\Delta u_t$ 는 가력 후 발생한 상대변위로서 계측



<Fig. 5> Stresses and displacements from test results;

- (a) Nominal shear stress and shear slip relationship, (b) Nominal shear stress and crack width relationship, (c) Shear slip and crack width relationship, (d) Tensile stress and crack width relationship

값을 나타낸다. 실험설계 시 언급했던 바와 같이 균열면의 양쪽은 강체거동을 하고 가력으로 인한 모든 변형은 균열면에서만 일어난다고 가정하였다.

$\sigma$ 는 균열면에 수직인 응력으로써 균열폭이 벌어지지 않도록 구속하는 힘이다. 이 구속력은 UHPFRC의 균열폭에 따른 인장력과 외부 지지강봉에 걸리는 인장력의 합으로 나타낼 수 있다. 외부 지지강봉에 걸리는 인장력은 최대하중에 이르기 전  $\Delta u_n$ 가 약 0.3mm 이내인 구간에서는 0.01MPa 미만으로 일정하여 그 값을 무시하였고, 따라서  $\sigma$ 는 UHPFRC의 균열폭에 따른 인장력으로 나타낼 수 있다. 균열폭에 따른 인장력은 재료인장시험의 데이터 <Fig. 5>의 (d)를 그대로 따른다고 가정하였다.

실험결과는 실험변수 강섬유부피비, 초기 균열폭에 따른 계측값들의 거동을  $\tau-\Delta u_t$  관계,  $\tau-w_{net}$  관계,  $\Delta u_t-w_{net}$  관계로 분석하였다.

### 3.1 평균전단강도-전단슬립 관계

<Fig. 5>의 (a)는 같은 초기 균열 하에서 강섬유 부피비에 따른 평균전단강도와 전단슬립의 관계를 보여주고 있다. 강섬유 부피비 1.5%의 경우 초기슬립 약 0.1mm 발생 후 최대강도에 이르기까지 전단슬립에 대하여 단조증가하였다. 강섬유 부피비 1.0%와 0.5%의 경우 초기슬립 약 0.2mm 발생 후 최대강도에 이르기까지 비선형적인 증가를 보였으며, 특히 기울기 및 최대하중의 편차가 커지는 경향을 보였다. 강섬유 부피비 1.5%와 0.5%는 전단슬립이 0.6mm 부근에서 최대하중을 나타내었으며 최대하중에 도달 후 취성적으로 파괴되었다. 반면, 강섬유 부피비 1.0%는 상대적으로 최대하중이 작고 연성적인 거동을 보였는데, 이는 균열면에서의 강섬유 방향성과 관계가 있을 가능성이 있다. 같은 강섬유 부피비를 가진 실험체에서는 초기 균열폭이 작을수

록 강도와 강성이 컸으며, 초기 균열폭이 클수록 강도와 강성이 작아지며 연성적인 거동을 보였다.

### 3.2 평균전단강도-균열폭 관계

균열폭에 대한 평균전단강도는 슬립 없이 하중이 증가하는 경향을 보였다. 특히 초기에는 뚜렷하게 선형적으로 하중이 증가하며, 최대하중에 이르러서 비선형성을 띄게 되는 경향을 보였다. 앞서 언급한 바와 같이 균열면을 수직으로 구속하는 응력  $\sigma$ 는 UHPFRC 내의 강섬유에 의한 재료 인장강도에 의한 것으로 해석될 수 있다. <Fig. 5>의 (b)에서 볼 수 있듯이 강섬유 부피비 1.5%와 0.5%인 실험체의 경우, 최대 하중은 초기 균열폭을 포함한 총 균열폭이 약 0.3mm에 이르렀을 때 도달하였으며 초기 선형구간의 기울기가 거의 일정함을 알 수 있다. 강섬유 부피비 1.0%인 실험체는 초기 선형구간의 기울기가 상대적으로 작고 최대강도 도달 후 연성적인 거동을 보였다. 균열폭은 재료 인장응력의 주요변수로서 <Fig. 5>의 (d)와 같이 나타나며 최대인장강도 역시 균열폭 약 0.3mm 이내에서 발생하는 것을 확인할 수 있다.

이러한 결과는 균열면을 따라 발생하는 전단슬립이 균열폭의 증가를 수반하고 균열폭의 증가는 결국 균열면에서 강섬유의 인장저항에 의한 수직응력을 유발한다는 가정을 뒷받침하며, 이 때 균열폭은 균열면에 작용하는 수직응력의 매개변수가 된다. 강섬유 부피비에 관계없이 모든 실험체에서 초기 균열폭이 클수록 최대전단강도가 작아지며 동시에 연성적인 파괴가 유도되는 경향을 보였다. 이는 직접인장실험에 따른 인장경화구간에서 균열폭이 커짐에 따라 접선탄성계수 값이 점차 작아지는 것으로 설명될 수 있다.

### 3.3 전단슬립-균열폭 관계

<Fig. 5>의 (c)에서 강섬유 부피비 1.0%의 일부례 제외한 대부분 실험체에서 균열폭 약 0.3mm 내에서 전단슬립과 균열폭이 일정한 비율로 증가하는

것을 볼 수 있다. 즉, 하중증가를 수반하는 전단슬립 발생 구간에서의 균열면에서 변위벡터 각도  $\alpha$ 는 일정한 값을 가진다고 가정할 수 있다.  $\alpha$ 가 일정하다는 가정은 <Fig. 5>의 (d)로 대표되는 모드 I 거동과 <Fig. 5>의 (a)로 대표되는 모드 II 거동이 서로 결합(Coupling)되어 있으며 전단강도를 균열폭에 대한 식으로 모델링할 수 있음을 시사한다. 또한 변위벡터 각도  $\alpha$ 는 수직응력  $\sigma$ 와 수평전단응력  $\tau$ 의 각도, 재료마찰계수  $\mu$ 와 같은 의미로써 본 실험의 거동 및 파괴모드가 미끄럼파괴(Sliding failure)라는 사실을 뒷받침한다.

## 4. 균열폭에 따른 최대전단강도

### 4.1 보통콘크리트에서 균열폭에 따른 최대전단강도

균열이 발생한 철근콘크리트 부재에서 철근 뿐 아니라 콘크리트가 내력에 전단다는 사실은 잘 알려져 있다. 특히 골재 맞물림 효과는 철근의 구속력 하에서 균열면에 발생하는 직접 전단력을 잘 설명해준다. Vecchio와 Collins는 Walraven의 실험데이터를 근거로 평면응력(Plane stress)상태의 철근 콘크리트 면 부재에서 균열폭  $w$ 일 때 균열면에서의 수직응력  $\sigma$ 와 수평응력  $\tau$ 의 관계를 식 (1)과 같이 제시하였다.<sup>8)</sup> 균열폭은 균열면 전체에 걸친 평균값이고 골재 맞물림이 전단강도의 주요기제로 이러한 저항이 일어나는 균열폭  $w$ 의 범위는 골재최대치수  $D_{max}$ 에 의해 결정된다.  $\tau_{max}$ 는 균열폭  $w$ 인 균열면에서의 잔류전단강도(Residual shear stress)로도 해석될 수 있다.

$$\frac{\tau}{\tau_{max}} = 0.18 + 0.64 \frac{\sigma}{\tau_{max}} - 0.82 \left( \frac{\sigma}{\tau_{max}} \right)^2 \quad (1)$$

$$\text{where, } \tau_{max} = \sqrt{f_c'} / (0.3 + 24w / (D_{max} + 16))$$

$\tau_{max}$  : 균열폭  $w$ 인 균열면의 최대전단강도

$D_{max}$  : 골재최대치수

<Table 4> Comparison with shear transfer mechanism of RC and UHPFRC

	RC	UHPFRC
Physical mechanism to resist shear	aggregate interlocking by compressive stress due to steel fiber	tensile hardening by reinforced steel fiber
Applicable crack width range	0~D <sub>max</sub> /2 (usually 0~8mm)	0~w <sub>u</sub> (usually 0~0.3mm)
Main parameter (Substitutive value)	aggregate diameter D <sub>max</sub>	ultimate crack width w <sub>u</sub>
	yielding strength of rebar ρf <sub>y</sub>	maximum tensile strength f <sub>t</sub>
	initial crack width w	initial crack width w
Maximum shear stress evaluation	Eq. (1), Eq. (2)	Eq. (3)

골재 맞물림효과에 의한 전단 전달 모델은 전단 보강근이 없는 보통콘크리트 전단부재에 관해서도 제시되었는데, Muttoni는 위험전단균열모델(Critical Shear Crack Theory)을 통해 스테럽이 없는 보통콘크리트 부재의 전단강도를 균열폭에 대해 식 (2)와 같이 전단강도를 정의하였다.<sup>5)</sup> 위험 균열폭은 εd에 비례한다고 가정하였으며, 이 균열폭은 식 (1)과 마찬가지로 골재최대치수에 의해 제한된다.

$$\frac{V_R}{bd\sqrt{f_c}} = \frac{1}{6} \frac{2}{1 + 120 \frac{\epsilon d}{16 + d_g}} \quad (2)$$

V<sub>R</sub> : 단면크기bd, 압축강도f<sub>c</sub>(<60MPa)인 부재의 설계전단강도

ε : 기준높이(=0.6d)에서의 휨 변형률

d<sub>g</sub> : 골재최대치수

상기 두 모델은 다음과 같은 공통점을 갖는다.

(1) 보통콘크리트의 경우 균열이 발생한 후에도 인장철근이 균열면에 구속력을 주고 이로 인해 골재최대치수에 따른 일정 균열폭 내에서는 골재 맞물림에 의해 전단강도가 발현되며, (2) 이 때 최대전단강도를 결정하는 주요 변수는 균열폭w이다.

#### 4.2 UHPFRC의 균열폭에 따른 최대전단강도

보통콘크리트에서 균열면에 배근된 철근의 구속력에 의한 골재 맞물림 현상에 의해 전단력이 발생하는 것과 달리, UHPFRC는 굵은 골재가 없고 재료의 인장력을 강섬유가 담당하고 있다는 점에 차이가 있다. 균열폭의 한계는 <Fig. 5>의 (d)에서 최대

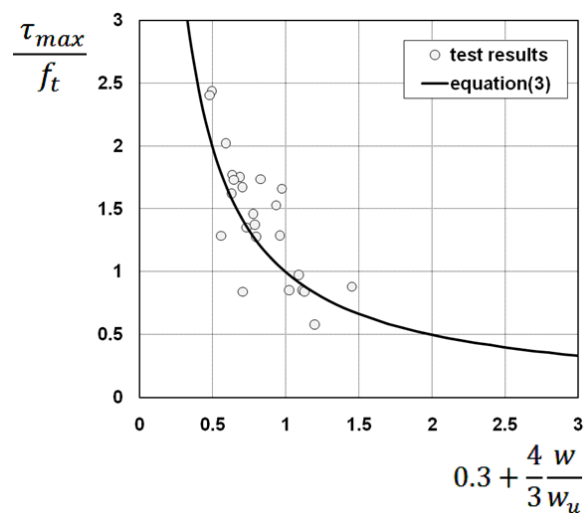
인장강도에 이르는 인장경화구간의 한계 균열폭w<sub>u</sub> 이내로 보통콘크리트의 D<sub>max</sub>/2보다 훨씬 작고 물리적인 저항 기제는 다르지만, 균열면에 작용하는 수직 구속력에 의한 균열폭w을 변수로 강도가 결정된다는 점에서 균열면에서의 응력τ-σ간의 관계가 유사하다는 것을 알 수 있다. 따라서 균열면에 작용하는 수직응력σ으로써 보통콘크리트에서는 철근인장강도ρf<sub>y</sub> 대신 재료인장강도f<sub>t</sub>를 균열에 작용하는 구속력으로 나타낼 수 있다<Table 4>.

<Table 5> Maximum shear stresses

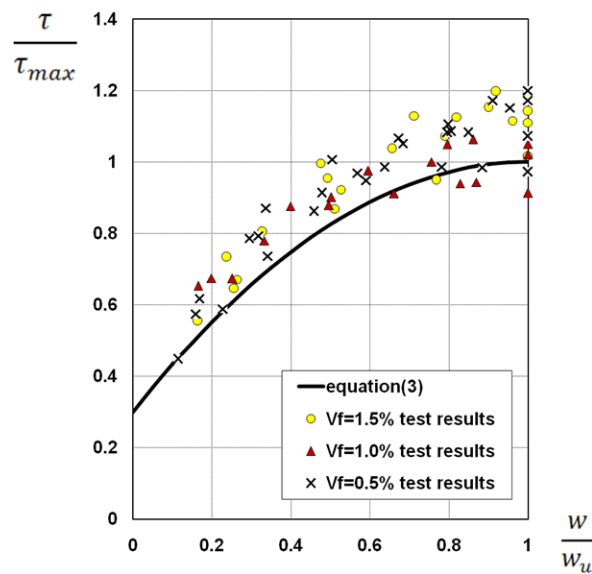
Tensile strength (f <sub>t</sub> , MPa)	Initial crack width (w, mm)	Net crack width (w <sub>net</sub> , mm)	Maximum shear stress (τ <sub>max</sub> , MPa)
11.43	0.192	0.481	19.86
11.43	0.112	0.386	20.01
11.43	0.190	0.383	14.68
11.43	0.102	0.284	16.65
11.43	0.096	0.383	20.27
11.43	0.064	0.259	18.49
11.43	0.184	0.387	17.49
8.12	0.250	0.458	6.89
8.12	0.064	0.293	16.38
8.12	0.109	0.354	6.84
8.12	0.077	0.294	14.06
8.12	0.120	0.319	10.34
8.12	0.052	0.265	10.46
8.12	0.126	0.146	7.17
8.12	0.267	0.435	6.91
8.12	0.128	0.391	10.99
6.37	0.078	0.211	8.73
6.37	0.143	0.211	3.67
6.37	0.177	0.284	5.36
6.37	0.158	0.313	10.58
6.37	0.075	0.514	15.49
6.37	0.136	0.450	10.64
6.37	0.038	0.277	15.32
6.37	0.138	0.232	6.18

### 4.3 UHPFRC의 전단강도식 제안

UHPFRC의 최대전단강도를 결정하는 주요변수는 균열폭  $w$ , 최대인장강도가 발생하는 한계 균열폭  $w_u$ 와 균열폭에 구속력으로 작용하는 재료인장강도  $f_t$ 이다.  $w_u$ 는 재료특성값이고  $f_t$ 는 균열폭  $w$ 로 나타낼 수 있다. UHPFRC의 균열폭  $w$ 인 균열면에서 부담할 수 있는 최대전단강도를 알아보기 위하여 실험 결과값을 <Table 5>와 같이 정리하였다.



(Fig. 6) Maximum shear stress transmissible across a crack



(Fig. 7) Relationship between shear stress transmitted crack and crack width on the crack

본 연구에서는  $w/w_u$ 를 주요 변수로 나타낼 것을 제안하였다. 한계 균열폭에 대한 균열폭의 비 ( $w/w_u$ )는 직접인장실험에서 균열발생 후 미세균열 구간에서의 접선탄성계수와 유사한 의미를 가지는 것으로 해석될 수 있다.

$\tau_{max}$ 는 균열폭  $w$ 일 때 잔류전단강도로서, 균열폭  $w$ 에 반비례하며 재료인장강도  $f_t$ 에는 비례한다.  $\tau_{max}$ 를 두 변수에 대해 나타내기 위하여 <Fig. 6>과 같이  $\tau_{max}/f_t$ 와  $a(w/w_u)+b$ 를 상수 1에 대한 반비례 관계로 나타내었다. <Table 5>의 실험값을 근거로 반비례 관계가 최적이 되는 상수를 구하면  $a = 4/3, b = 0.3$ 이 된다. 한계 균열폭  $w_u$ 는 총 균열폭  $w_{net}$ 와 같다고 가정하였다.

균열면에서의 전단강도  $\tau$ 와 수직구속강도  $\sigma$ 는  $\tau/\tau_{max}$ 와  $w/w_u$ 에 대해 표현하였으며 앞서 정의된  $\tau_{max}$ 를 근거로 동일 실험체의 특정 균열폭에서의 값을 데이터로 사용하여 관계를 나타내면 <Fig. 7>과 같다. 그래프에 나타난 관계를 근거로 식 (3)과 같이 UHPFRC의 전단강도식을 정의할 수 있다.

$$\frac{\tau}{\tau_{max}} = 0.3 + 1.4 \frac{w}{w_u} - 0.7 \left( \frac{w}{w_u} \right)^2 \quad (3)$$

where,  $\tau_{max} = f_t / (0.3 + 4w / (3w_u))$

$\tau_{max}$  : 균열폭  $w$ 인 균열면에서 부담할 수 있는 최대전단강도  
 $D_{max}$  : 골재최대치수

### 5. 결론

본 연구에서는 초기 균열이 있는 직접전단실험체의 푸시오프 실험을 통해 균열면에서의 수직, 수평 강도 및 변위관계에 대하여 분석하였다.

1) 강섬유 부피비가 클수록 최대전단강도는 커지고 초기 균열폭이 클수록 최대전단강도는 줄어든다. 외부 지지강봉의 구속력은 무시할 수 있을 정도로 작으므로 균열은 강섬유에 의해 구속된다고 볼 수



있으며 그 구속력은 재료인장강도로 표현할 수 있다. 균열폭  $w$  일 때  $\tau_{max}$  는 잔류전단강도로써 균열폭  $w$  에 반비례하며 재료인장강도  $f_t$  에는 비례한다.

2)  $\tau_{max}$  에 도달하기까지의 구간은 인장경화가 발생하는 균열폭 0.3mm 내 구간과 일치하였으며, 이는 균열면에서의 전단강도  $\tau$  와 구속인장강도  $\sigma (= f_t)$  를 한계 균열폭에 대한 균열폭의 비 ( $w/w_u$ ) 에 대한 함수로 나타낼 수 있는 근거가 된다.

3) 균열폭  $w$  인 균열면에서 부담할 수 있는 최대전단강도와 전단강도를  $w/w_u$  에 대한 함수로 정의하여 제시하였으며, 실험결과와 비교하여 제시된 식을 검증하였다. 제시된 식은 전단보강근이 없는 부재나 뿔림전단파괴와 같은 국소파괴의 강도 예측식에 이용될 수 있다.

### 감사의 글

이 연구는 2014년 국토교통과학기술진흥원 도시건축연구사업(SUPER structure 2020)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

### References

1. Casanova P. and Rossi P., "Analysis and Design of Steel Fiber-Freinforced Concrete Beams", ACI Structural Journal, Vol. 94, No. 5, pp. 595-602, 1997
2. Casanova P., Rossi P. and Schaller I., "Can Steel Fiber Replace Transverse Reinforcements in Reinforced Concrete Beams?", ACI Material Journal, Vol. 94, No. 5, pp. 341-351, 1997
3. Duthinh, D., "Sensitivity of Shear Strength of Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Beams to Shear Friction and Concrete Softening According to Modified Compression Field Theory", ACI Structural Journal, Vol. 96, No. 4, pp. 495-508, 1999
4. Korea Concrete Institute, "Design Guidelines for Ultra High Performance Concrete (K-UHPC) Structure", Korea Concrete Institute, pp. 75, 2014
5. Muttoni A. and Ruiz M. F., "Shear Strength of Members without Transverse Reinforcement as Function of Critical Shear Crack Width", ACI Journal, Proceedings, Vol.105, No.2, pp. 163-172, 2008
6. Toutlemonde F. and Resplendino J., "Designing and building with UHPFRC : State of the Art and Development", ISTE Ltd. and Wiley & Sons, Inc., 814 pp, 2011
7. Sokhwan Choi, Bubmook Lim, Chang Kook Oh, and Changbin Joh, "Technique for the Measurement of Crack Widths at Notched / Unnotched Regions and Local Strains", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.24, No. 2, pp. 205-214, 2012
8. Vecchio, F. J. and Collins, M. P., "The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete", ACI Journal, Proceedings, Vol. 83, No.2, pp. 219-231, 1986
9. Walraven, J. C., "Aggregate Interlock: A Theoretical and Experimental Analysis", Delft University Press, 197 pp, 1980

- Received : February 23, 2015
- Revised : March 23, 2015
- Accepted : March 23, 2015