



# 초고성능 섬유보강 콘크리트로 보강된 콘크리트의 계면 전단강도 결정을 위한 경사전단 실험

임우영<sup>1)\*</sup> · 홍성걸<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>한국건설기술연구원 건축도시연구소 <sup>2)</sup>서울대학교 건축학과

## Slant Shear Test for Determining the Interfacial Shear Strength of Concrete Strengthened with Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete

Woo-Young Lim<sup>1)\*</sup> and Sung-Gul Hong<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Building and Urban Research Institute, Korean Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Rep. of Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Architecture & Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Rep. of Korea

**ABSTRACT** In this study, slant shear tests for the prism specimens strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC), normal- and high-strength concrete were performed to evaluate the interfacial shear strength between old and new concrete substrate. Test parameters are the roughness of surface, concrete strength, and fiber volume fraction of UHPFRC. The surface of the concrete was roughened by shot blasting. Test results showed that the adhesion bond resistance of the specimen with a roughened surface was very large compared to that of the specimen with a smooth surface. In addition, the interfacial shear strength appeared to be affected by the concrete strength rather than the fiber volume fraction. For the roughened surface by shot-blasting method, interfacial shear resistance exceeded the upper limit which is presented in current design codes even if the shear-friction reinforcements are not provided. Based on the test results, it is applicable to use the current concrete design codes to achieve the shear-friction design for the interface between conventional concrete and UHPFRC. However, for the surface which is not processed, it would be appropriate to provide additional shear-friction reinforcement.

**Keywords** : ultra-high performance concrete, steel fiber, slant shear test, shot blasting, interfacial shear strength

### 1. 서 론

최근 전 세계적으로 지진과 이상기후로 인해 태풍, 폭설, 홍수, 산사태 등에 의한 건축물의 피해가 급증하고 있다.<sup>1)</sup> 특히, 지진에 의한 건축물의 피해는 막대한 인명피해와 경제적 손실을 초래한다. 이러한 피해를 방지하고자 FEMA 547<sup>2)</sup>에서는 신축건축물의 경우, 모든 건축물이 지진에 대해 안전하도록 설계하도록 하고 있으며, 내진설계가 되어 있지 않은 건축물의 경우, 지진에 취약한 부재를 대상으로 기존 건축물의 내진성능평가 및 보강기준에 따라 보수·보강하여 요구되는 성능을 만족시키도록 하고 있다. 국내의 경우, 신축건축물은 건축구조기준<sup>3)</sup>에 따라 내진설계가 이루어지도록 규정하고 있으며, 보수·보강이 필요한 경우에는 내진

성능평가 및 향상요령(개정안)<sup>4)</sup>에 의해 부재별로 적절한 보수·보강을 하도록 하고 있다.

국내외 보수·보강 기준 또는 지침에서는 기존 철근콘크리트(이하 RC) 건축물의 내진성능 향상을 위해 다양한 보수·보강 공법들이 제시되어 있으며, 주요 보수·보강 공법으로는 외부 강판 부착공법, 프리스트레싱 보강공법, 탄소 섬유쉬트를 이용한 FRP 보강공법, 단면증타 공법 등이 있다. 특히, 단면증타 공법은 기존 RC 부재에 100~500 mm 정도 두께의 콘크리트를 증타하여 보강하는 공법으로써 단면의 크기를 증가시켜 부재의 구조성능을 향상시키는 공법이다. 이 공법은 주로 RC 기둥과 벽의 보수·보강을 위해 사용되는 공법이며, 경우에 따라 RC 보에도 적용되기도 한다. 단면증타를 위해 사용되는 콘크리트는 기존 RC 부재와 동일한 강도를 가진 콘크리트를 사용할 수 있으며, 혹은 기존 부재보다 강도가 큰 콘크리트를 사용할 수도 있다. 최근 들어서는 기존 RC 부재의 보수·보강을 위해 고성능/초고성능 콘크리트를 사용한 단면증타 공법에 대한 연구가 국내외적

\*Corresponding author E-mail : wyarch97@snu.ac.kr

Received January 8, 2016, Revised August 31, 2016,

Accepted September 12, 2016

©2016 by Korea Concrete Institute

으로 활발히 진행되고 있으며 다양한 실험 연구를 통해 공법의 우수성이 입증되고 있다.<sup>5-9)</sup> 최근 연구에 의하면, 초고성능 섬유보강 콘크리트(ultra-high performance fiber reinforced concrete, 이하 UHPFRC)를 사용하여 단면증타를 한 보의 경우, 기존 콘크리트를 사용했을 때보다 보강두께가 현저히 작아지더라도 전단성능의 증대효과가 크게 나타나는 것으로 나타났다. 아울러, 기존 콘크리트 부재와 보강 콘크리트 사이에 전단연결재가 설치되지 않았음에도 부재 내력이 증가하는 것으로 나타났다. 하지만, 두 가지 콘크리트 사이의 계면에 전단연결재가 사용되지 않는 경우에는 계면에서 발생하는 전단응력에 의해 계면에서의 파괴가 선행될 수도 있다.<sup>8,9)</sup> ACI 콘크리트 보강 지침(ACI Concrete Repair Manual)<sup>10)</sup>에 따르면, 계면에서 허용되는 최소 부착강도는 6.9~12 MPa로 규정하고 있다. 이러한 기준이 마련되어 있음에도 불구하고 국내에서는 아직 기존 RC 부재와 UHPFRC 사이 계면에서 발생하는 전단응력에 대한 연구가 매우 미진한 실정이다.

이 연구에서는 UHPFRC로 보강된 RC 부재의 구조성능 평가를 위한 연구의 일환으로, 콘크리트와 UHPFRC 계면에서의 부착강도를 평가하고자 한다. 아울러 보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트로 보강된 콘크리트 계면에서의 부착강도도 추가로 평가하였다.

## 2. 기존 연구

단면증타를 통해 보강된 부재의 경우, 기존 RC 부재와 보강 콘크리트 사이에 계면이 발생하게 되며, 이종 콘크리트 사이의 계면에서 현행 기준에서 제시하고 있는 부착강도를 확보하기 위해서는 무엇보다 기존 RC 부재의 면처리 방식이 중요하다. 기존 부재에 손실을 최대한 억제하고 효율적으로 거친면을 만들기 위해 사용되는 면처리 방식으로는 샌드 블라스트(sand blast)와 와이어 브러쉬(wire brush)를 이용한 방법, 도구를 사용해 직접 흠을 내는 방법(chipping) 등 다양한 방법이 사용되고 있다.<sup>11)</sup> 여기서, 샌드 블라스트는 충분히 건조된 모래입자를 콘크리트 면에 분사하여 표면을 거칠게 만드는 기계적 처리법을 말한다. 이러한 방식으로 면처리된 보강 콘크리트는 면처리를 하지 않은 실험체에 비해 부착강도가 증가하는 것으로 나타났다.

서로 다른 시기에 타설된 이종 콘크리트 계면에서의 부착강도는 쪼갬전단실험(splitting prism test)과 직접전단실험(direct shear test), 그리고 경사전단 실험(slant shear test) 등 다양한 방법에 의해 구할 수 있다.<sup>11,12)</sup> 특히 경사전단 실험은 ASTM C 882<sup>13)</sup>에 제시되어 있으며, ACI 보강지침<sup>10)</sup>은 부착강도의 평가를 위해서는 이를 따르도록 하고 있다. Tayeh et al.<sup>11)</sup>은 보통강도 콘크리트와 UHPFRC의 부착특성을 알아 보기 위해 여러 가지 방식으로 면처리된 각형 실험체를 대상으로 경사전단실험을 수행하였다. 실험결과, 샌드 블라스트를 이용하여 면처리한 실험체의 부착강도가 다른 방식들에 보다 크게 나타났다. 콘크리트 면에 구멍을 낸 실험체와 와이어브러쉬를 이용한 방법으로 면처리를 한 실험체의 부착

강도는 면처리를 하지 않은 실험체의 부착강도에 비해 약 31~37.5% 정도의 강도 증가 효과가 있었으며, 흠을 낸 방식을 이용한 실험체의 부착강도는 약 64%의 강도 증진 효과가 있었다. 반면에 샌드 블라스트를 이용하여 면처리를 한 실험체의 부착강도는 약 102.7%의 강도 증진 효과를 보여주었다. 기존의 연구에 의하면 샌드 블라스트가 면처리에 가장 효과적인 방법인 것으로 나타났다.

이 연구에서는 기존 콘크리트의 면처리를 위해 샌드 블라스트와 유사한 방식의 샷블라스팅(shot blasting) 방법을 사용하였다. 샷블라스팅으로 면처리된 부재에 UHPFRC를 보강한 실험체를 대상으로 경사전단실험을 수행하였다.

## 3. 실험 프로그램

### 3.1 사용재료

UHPFRC는 초고성능 시멘트 복합체(Ultra-high performance cementitious composites)에 강섬유를 혼입하여 만든 콘크리트로서 기존의 강섬유 보강 고강도 콘크리트에 비해 압축강도, 인장강도, 휨 인성 등을 향상시킨 신개념 건설재료이다.<sup>14)</sup> UHPFRC 제작에 사용된 강섬유는 길이가 19 mm와 16 mm인 직선형 강섬유가 각각 사용되었다. 강섬유의 항복강도는 2,500 MPa, 직경은 0.2 mm이다. 길이가 서로 다른 강섬유는 전체 부피비에 대해 2(19 mm) : 1(16 mm)의 비율로 혼입하였다. Table 1은 UHPFRC의 배합비를 주요 시멘트에 대한 구성재료의 중량비로 나타내었다.

### 3.2 실험체 제작

경사전단실험은 ASTM C 882<sup>13)</sup>에서 제시하고 있는 경사전단 실험방법에 따라 수행되었다. Fig. 1은 실험체 형상을 보여준다. ASTM C 882<sup>13)</sup>에 따라 제작된 경사전단실험을 위한 실험체의 단면의 크기는 100×100 mm, 높이는 300 mm, 그리고 경사각도는 60°이다.

Table 2는 실험체 변수를 보여준다. 실험체 변수는 면의 거칠기와 기존 콘크리트 부재와 보강 부재의 콘크리트 압축강도, 그리고 UHPFRC의 강섬유 혼입률(0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%)이다. 현행 콘크리트 구조기준<sup>14,15)</sup>에 의하면, 서로 다른 시기에 타설된 콘크리트 경계면에서의 전단강도는 콘크리트 압축강도와 밀접한 관계가 있다. 특히, UHPFRC는 강섬유 혼입율이 증가함에 따라 압축강도가 증가하는 경향을 보인다.<sup>16)</sup> 실험체는 강섬유 혼입률에 따라 UHPFRC로 보강된 실험체와 보통강도와 고강도 콘크리트로 보강된 실험체

Table 1 Mix proportion (weight ratio)

Water-binder ratio	Cement	Zirconium	Filer	Fine agg.	Water-reducing admixture
0.2	1.0	0.25	0.3	1.1	0.02

로 구성되어있으며, 각 변수별로 3개씩 제작되었다.  
UHPFRC와 콘크리트로 보강된 기존 건축물 콘크리트 부

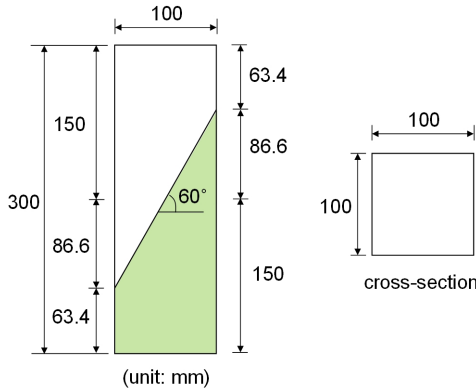


Fig. 1 Dimension of test specimen

Table 2 Test parameters

Name	No. of specimens	Roughness	$f_{c,EC}$ (MPa)	$f_{c,SC}$ (MPa)	$V_f$ (%)
NC2V0.5	3	NR	NSC	UHPFRC	0.5
NC2V1	3	NR	NSC	UHPFRC	1
NC2V1.5	3	NR	NSC	UHPFRC	1.5
NC2V2	3	NR	NSC	UHPFRC	2
NC6V0.5	3	NR	HSC	UHPFRC	0.5
NC62V1	3	NR	HSC	UHPFRC	1
NC6V1.5	3	NR	HSC	UHPFRC	1.5
NC6V2	3	NR	HSC	UHPFRC	2
SC2V0.5	3	SB	NSC	UHPFRC	0.5
SC2V1	3	SB	NSC	UHPFRC	1
SC2V1.5	3	SB	NSC	UHPFRC	1.5
SC2V2	3	SB	NSC	UHPFRC	2
SC6V0.5	3	SB	HSC	UHPFRC	0.5
SC62V1	3	SB	HSC	UHPFRC	1
SC6V1.5	3	SB	HSC	UHPFRC	1.5
SC6V2	3	SB	HSC	UHPFRC	2
NC2C2	3	NR	NSC	NSC	-
NC6C6	3	NR	HSC	HSC	-
NC2C6	3	NR	NSC	HSC	-
SC2C2	3	SB	NSC	NSC	-
SC6C6	3	SB	HSC	HSC	-
SC2C6	3	SB	NSC	HSC	-
Total	54				

Note: NR = no roughness; SB = shot-blasting;  $f_{c,EC}$  and  $f_{c,SC}$  are measured compressive strength of existing concrete member and strengthening concrete; NSC = normal strength concrete; HSC = high strength concrete; UHPFRC = ultra-high performance fiber reinforced concrete; and  $V_f$  is the fiber volume ratio, respectively.

재의 부착강도를 알아보기 위해 보강이 필요한 부재의 콘크리트 설계기준강도( $f_{cd}$ )가 24 MPa와 60 MPa인 콘크리트로 결정하였다. 보강 UHPFRC의 설계기준강도는 150 MPa, 그리고 보강 콘크리트의 설계기준강도는 원부재의 강도와 동일한 24 MPa와 60 MPa이다. 실험체는 설계기준강도가 24 MPa와 60 MPa인 보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트에 강섬유 혼입률(0.5~2%)에 따라 UHPFRC를 보강한 실험체가 48개이고, 보통강도 콘크리트에 보통강도 콘크리트를 보강한 실험체가 6개, 고강도 콘크리트에 고강도 콘크리트를 보강한 실험체가 6개, 그리고 보통강도 콘크리트에 고강도 콘크리트를 보강한 실험체가 6개로 실험체의 총 개수는 66개이다.

이중 콘크리트 사이의 계면 전단강도(interfacial shear strength)를 확보하기 위해서는 면처리가 중요하다. 이 연구에서는 보통강도 콘크리트에 UHPFRC를 보강하기 위해 Fig. 2와 같이 슛블라스팅(shot blasting)을 이용해 면처리를 하였다. 일반적으로 블라스팅은 압축 공기를 이용하여 모래 등을 고속으로 분사하여 표면을 마무리하는 것을 의미하며, 블라스팅에 사용하는 입자의 종류에 따라 샌드블라스팅(sand blasting)과 슛블라스팅(shot blasting)으로 분류한다. 샌드블라스팅은 모래를, 슛블라스팅은 금속입자를 분사하는 방법이다. 이 연구에서는 실험체의 표면처리를 위해서 지름이 0.6~1.0 mm인 PS 볼(PS ball, Precious Slag Ball)을 사용하였다. PS 볼은 1300°C의 용융슬래그를 금속 냉각하는 동시에 강한 바람을 불어 파괴하는 풍쇄 과정을 거쳐 화학적



(a) Shot blasting



Roughened surface ( $f_{ck}=83.8$  MPa) No roughness ( $f_{ck}=83.8$  MPa) Roughened surface ( $f_{ck}=31.5$  MPa) No roughness ( $f_{ck}=31.5$  MPa)

(b) Roughened surface

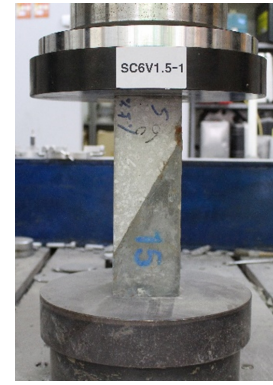
Fig. 2 Surface preparation

**Table 3** Compression test results

Concrete & UHPFRC		1 <sup>st</sup> placing (C2 and C6)		2 <sup>nd</sup> placing (C22 and C66)	
		$f_{ck}$ (MPa)	$f_{ckm}$ (MPa)	$f_{ck}$ (MPa)	$f_{ckm}$ (MPa)
Concrete	NSC $f_{cd}=24$ MPa	30.1	30.5	32.9	31.7
		31.8		28.9	
		29.6		33.4	
	HSC $f_{cd}=60$ MPa	84.4	83.8	74.6	75.3
		86.6		77.9	
		80.3		73.5	
UHPFRC	$V_f=0.5\%$	-	-	144.4 148.1 131.1	141.2
	$V_f=1.0\%$	-	-	119.0 134.5 143.1	132.2
	$V_f=1.5\%$	-	-	139.6 155.9 147.2	147.6
	$V_f=2.0\%$	-	-	132.8 128.9 138.4	133.4

Note:  $f_{ck}$  is the design compressive strength;  $f_{ck}$  is measured compressive strength of materials; and  $f_{ckm}$  is the mean value of compressive strength. NSC and HSC are normal- and high-strength concrete, respectively. C2 and C6 means normal- and high strength concrete of existing structures and C22 and C66 denote strengthening concrete.

으로 안정된 구형의 무공해 물질을 뜻한다. 실험체의 표면은 모두 약 0.3 mm 깊이로 표면처리되었다. 이 후 UHPFRC 타설을 위해 거푸집이 추가로 제작되었으며, UHPFRC는 강섬유 혼입률에 따라 한번에 타설되었다. 이미 굳은 코크리트에 새로운 콘크리트를 타설할 때 효율적인 전단전달을 위



**Fig. 3** Test setup

해 접촉면은 깨끗하고 레이턴스가 없도록 물로 세척한 후 충분히 건조한 뒤 새로운 콘크리트를 타설하였다. UHPFRC 타설 후 48시간동안  $90\pm 5^\circ\text{C}$ 에서 고온습윤양생을 실시하였으며, 이후 거푸집 탈형 후 실험 시까지 상온양생하였다.<sup>17)</sup>

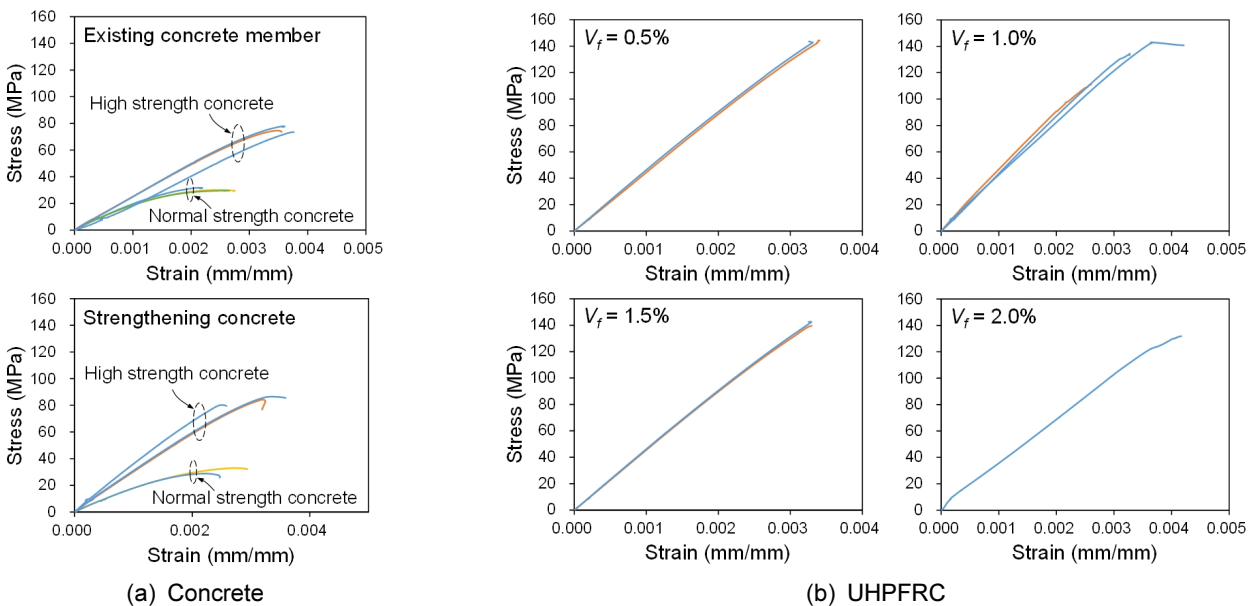
### 3.3 실험방법

Fig. 3은 실험체 셋업을 보여준다. 경사전단 실험은 2500 kN 용량의 만능시험기(UTM)을 사용하여 수행되었다. 실험체는 변위제어방식으로 0.3 mm/min의 속도로 가력되었다. 변위계와 스트레인 게이지는 설치되지 않았으며, 압축실험을 통해 강도만 측정하였다. 이중 콘크리트 사이 계면에서의 수직강도와 전단강도는 측정된 압축강도로부터 계산되었다.

### 3.4 재료실험

#### 3.4.1 압축강도

실험에 사용된 재료의 압축강도를 측정하기 위해 보통강도와 보통강도 콘크리트의 경우, 원주형 공시체를 3개씩 제



**Fig. 4** Stress-strain relationship of concrete and UHPFRC



작하였으며, UHPFRC의 경우, 강섬유 혼입률에 따라 공시체를 3개씩 제작하였다. 실험에 사용된 콘크리트의 압축변형률은 스트레인 게이지에 의해 측정되었으며, 2개의 스트레인 게이지를 시편 중앙부 양쪽에 설치하였다.

Fig. 4는 보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트, 그리고 UHPFRC의 압축응력-변형률 관계를 보여준다. 여기서, 변형률은 두 개의 스트레인 게이지 값의 평균값이다. UHPFRC는 보통강도와 고강도 콘크리트와는 달리 극한상태에 도달할 때까지 선형적인 거동을 하는 것으로 나타났으며, UHPFRC의 압축거동은 강섬유 혼입률과 상관없이 매우 유사하게 나타났다.

실험결과, 기존 콘크리트 부재를 의미하는 C2 ( $f_{ct}=24$  MPa)의 압축강도는 29.6~31.8 MPa이었으며 평균 압축강도는 30.5 MPa이었다, C6 ( $f_{ct}=60$  MPa)의 압축강도는 80.3~86.6 MPa이었으며, 평균 압축강도는 83.8 MPa로 나타났다. 보강 부재를 의미하는 C22 ( $f_{ct}=24$  MPa)의 압축강도는 29~33.4 MPa이었으며, 평균값은 31.8 MPa이었다. C66 ( $f_{ct}=60$  MPa)의 압축강도는 73.8~77.7 MPa이었으며, 평균 압축강도는 75.4 MPa로 나타났다. 강섬유 혼입률에 따른 UHPFRC의 평균 압축강도는 Table 3에 나타낸 바와 같이 0.5%는 141.2 MPa, 1%는 132.2 MPa, 1.5%는 147.6 MPa, 그리고 2%는 133.4 MPa로 나타났다.

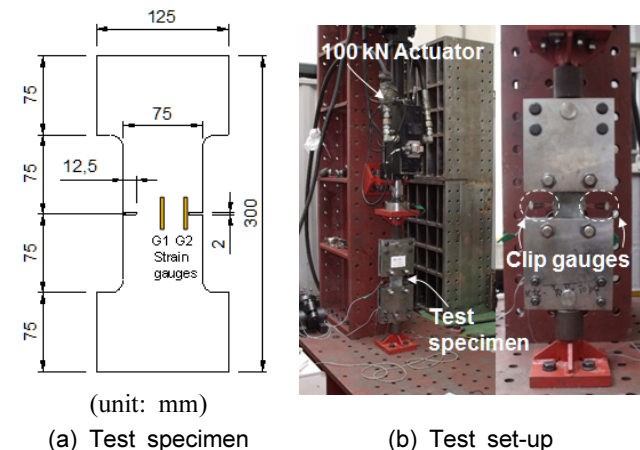


Fig. 5 Test for determining the tensile strength of UHPFRC

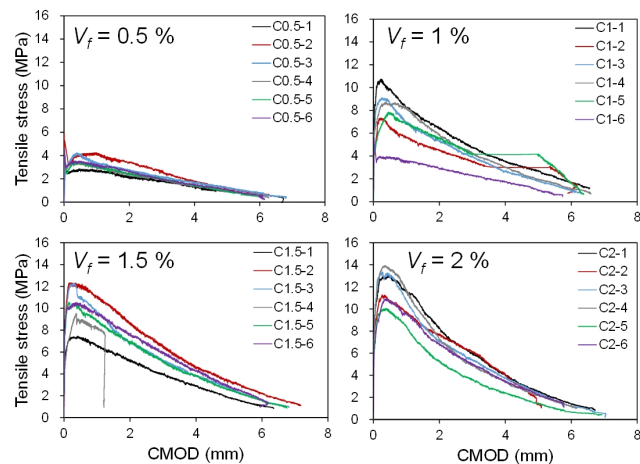


Fig. 6 Tensile stress-CMOD relationship

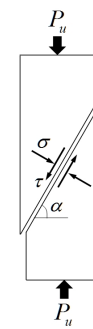


Fig. 7 Normal and shear stress at the interface

Table 4 Tensile stress of UHPFRC

Test specimens	$f_{ct}$ (MPa)	$f_{ctm}$ (MPa)
C0.5 ( $V_f=0.5\%$ )	4.5; 5.9; 4.2; 4.4; 4.1; 4.6	4.6
C1 ( $V_f=1\%$ )	10.8; 7.4; 9.1; 8.8; 7.8; 5.6	8.2
C1.5 ( $V_f=1.5\%$ )	7.5; 12.3; 12.3; 9.5; 10.5; 10.5	10.4
C2 ( $V_f=2\%$ )	13.1; 11.3; 13.4; 13.9; 10; 10.9	12.1

Note:  $f_{ct}$  is the peak tensile stress obtained from direct tension tests and  $f_{ctm}$  is the mean value of tensile stress.

### 3.4.2 인장강도

UHPFRC의 인장강도를 구하기 위해 강섬유 혼입률별로 직접인장강도 실험을 수행하였다. 직접인장강도 실험은 초고성능 콘크리트 구조설계지침<sup>17)</sup>에 따라 수행되었으며, 직접인장강도 실험용 인장시편 역시 설계지침에 제시된 방법에 따라 강섬유 혼입률별로 6개씩 제작되었다. Fig. 5(a)는 직접인장실험용 인장시편을, Fig. 5(b)는 실험체 셋업을 보여준다. 실험체는 1000 kN 액츄에이터를 사용해 변위제어 방식으로 0.3 mm/min의 속도로 가력되었으며, 균열개구변위 (crack mouth opening displacement, 이하 CMOD)를 측정하기 위해 양쪽 노치에 클립게이지(clip gauges)를 설치하였다.

Fig. 6은 강섬유 혼입률에 따른 인장응력-CMOD 관계를 보여준다. 강섬유 혼입률이 증가할수록 UHPFRC의 인장강도는 증가하였다. 강섬유 혼입률이 0.5%일 경우, 최대강도 도달이후 급격하게 하중이 감소하였으며, 이후 강섬유의 가교효과로 인해 하중이 증가하였다가 서서히 감소하였다. 반면에, 강섬유 혼입률이 1% 이상 혼입된 UHPFRC의 경우, 콘크리트의 초기균열 이후 균열폭이 증가함에 따라 하중에 증가하는 인장경화현상이 발생하는 것으로 나타났다. Table 4는 직접인장실험을 통해 구한 UHPFRC의 인장강도를 정리한 것이다. 실험결과, 0.5%의 강섬유가 혼입된 UHPFRC의 평균 인장강도는 4.6 MPa, 1%는 8.2 MPa, 1.5%는 10.4 MPa 그리고 2%는 12.1 MPa이었다.

## 4. 실험 결과

### 4.1 계면 전단강도

경사전단 실험은 이중 콘크리트 사이 계면에서의 전단강도를 알아보는 실험으로써 압축 실험을 통해 경사진 계면에서의 전단강도를 산정할 수 있다. 경사진 계면에 수직하중이 작용하게 되면, Fig. 7에 나타낸 바와 같이 계면에 수직방향으로 수직응력( $\sigma$ )이 발생하며, 동시에 계면을 따라 전단응력( $\tau$ )이 발생하게 된다. 따라서 계면에서 발생하는 수직응력과 전단응력은 다음 식 (1)과 식 (2)로 구할 수 있다.

$$\sigma = (P_u \cos^2 \alpha) / A \quad (1)$$

$$\tau = (P_u \sin \alpha \cos \alpha) / A \quad (2)$$

여기서,  $P_u$ 는 최대하중,  $\alpha$ 는 경사면의 경사각, 그리고  $A$ 는 실험체 단면적이다.

Table 5는 경사전단실험을 통해 구한 실험결과를 나타내며, 각 실험체별로 평균값으로 나타냈다. 보통강도 콘크리트와 UHPFRC의 압축강도는 재료실험을 통해 구한 평균값

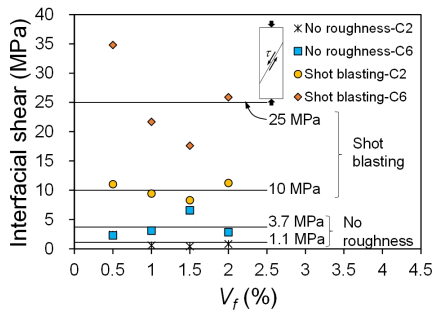


Fig. 8 Effect of fiber volume fraction on interfacial shear strength of UHPFRC

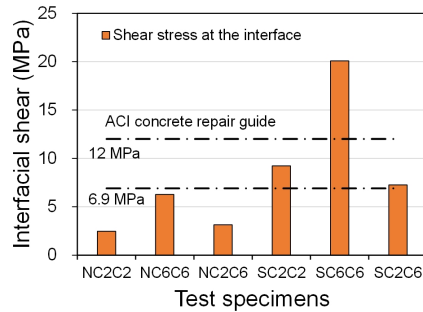


Fig. 9 Interfacial shear strength of test specimens strengthened with normal- and high-strength concrete

Table 5 Test results (in average)

Name	Roughness	$V_f$ (%)	$f_{ck-EC}$ (MPa)	$f_{ck-SC}$ (MPa)	$f_{ck-s}$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\tau/\tau_{\max}(fib)$ (MPa)
NC2V0.5	No roughness	0.5	30.5	141.2	5.6	1.4	2.4	0.44
NC2V1	No roughness	1	30.5	132.2	1.3	0.3	0.6	0.10
NC2V1.5	No roughness	1.5	30.5	147.6	1.0	0.2	0.4	0.07
NC2V2	No roughness	2	30.5	133.4	1.9	0.5	0.8	0.15
NC6V0.5	No roughness	0.5	83.8	141.2	5.3	1.3	2.3	0.21
NC62V1	No roughness	1	83.8	132.2	7.2	1.8	3.1	0.28
NC6V1.5	No roughness	1.5	83.8	147.6	15.2	3.8	6.6	0.60
NC6V2	No roughness	2	83.8	133.4	6.6	1.6	2.8	0.26
SC2V0.5	Shot-blasting	0.5	30.5	141.2	25.5	6.4	11.0	1.99
SC2V1	Shot-blasting	1	30.5	132.2	21.8	5.5	9.4	1.70
SC2V1.5	Shot-blasting	1.5	30.5	147.6	19.2	4.8	8.3	1.49
SC2V2	Shot-blasting	2	30.5	133.4	26.0	6.5	11.2	2.02
SC6V0.5	Shot-blasting	0.5	83.8	141.2	80.4	20.1	34.8	3.19
SC62V1	Shot-blasting	1	83.8	132.2	50.1	12.5	21.7	1.99
SC6V1.5	Shot-blasting	1.5	83.8	147.6	40.6	10.2	17.6	1.61
SC6V2	Shot-blasting	2	83.8	133.4	59.8	15.0	25.9	2.37
NC2C2	No roughness	-	30.5	31.7	5.7	1.4	2.5	0.44
NC6C6	No roughness	-	83.8	75.3	14.5	3.6	6.3	0.57
NC2C6	No roughness	-	30.5	75.3	7.2	1.8	3.1	0.56
SC2C2	Shot-blasting	-	30.5	31.7	21.3	5.3	9.2	1.66
SC6C6	Shot-blasting	-	83.8	75.3	46.4	11.6	20.1	1.84
SC2C6	Shot-blasting	-	30.5	75.3	16.8	4.2	7.3	1.31

Note:  $f_{ck-EC}$  and  $f_{ck-SC}$  are measured compressive strength of existing concrete member and strengthening concrete;  $f_{ck-s}$  is measured compressive strength obtained from the slant shear tests ( $=P_u/A$ );  $\sigma$  is the calculated normal stress at the interface,  $\tau$  is the calculated shear stress, and  $\tau_{\max}(fib)$  is the maximum shear strength obtained from Model Code 2010.<sup>18)</sup>

이다. Table 5에 나타난 압축강도( $f_{ck,s}$ )는 경사전단 실험을 통해 구한 압축강도로써 측정된 하중값을 실험체 단면적으로 나눈 값이다.

Fig. 8은 강섬유 혼입물에 따른 UHPC로 보강된 콘크리트의 전단강도를 나타낸다. 계면에서의 전단강도는 면처리 여부에 따라 그 크기가 달랐으며, 슛블라스팅으로 면처리를 한 경우, 전단강도는 증가하였다. 콘크리트의 압축강도가 커질수록 계면에서의 전단강도는 증가하였다. 면처리가 된 실험체의 경우, 1차 타설된 콘크리트의 압축강도가 30.5 MPa이고 UHPFRC로 보강된 실험체의 전단강도는 약 10 MPa로 나타났으며, 원부재의 콘크리트의 압축강도가 83.8 MPa일 경우, 전단강도는 평균 25 MPa로 나타났다. 결과적으로 슛블라스팅으로 면처리된 부재의 전단강도는 보수·보강을 위한 ACI 보강 지침<sup>10)</sup>을 만족하였다.

Fig. 9는 보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트로 보강된 실험체의 전단강도를 보여준다. 실험결과, 슛블라스팅으로 면처리된 실험체의 강도는 면처리를 하지 않은 실험체의 강도에 비해 3배 이상 크게 나타났다.

면처리를 하지 않은 실험체의 경우, ACI 보강지침<sup>10)</sup>에서 제시하고 있는 이종 콘크리트 계면에서의 허용 전단강도 기준을 만족하지 않았으며, 면처리를 한 실험체는 현행 지침을 만족하는 것으로 나타났다.

## 4.2 계면 전단강도 평가

현행 콘크리트 설계기준<sup>14,15)</sup>에서는 이종 콘크리트 계면에서의 전단강도 설계기준이 제시되어 있지 않지만, ACI 콘크리트 보강 지침<sup>10)</sup>에 따르면, 계면에서 허용되는 최소 부착강도는 6.9~12 MPa로 규정하고 있다.

이종 콘크리트 계면에서의 전단강도는 전단연결재의 설치여부를 결정하는 중요한 판단근거가 된다. ACI 318-14와 KCI 2012에 따르면, 전단마찰 계산 방법에서 모든 전단저항은 균열면 사이의 마찰에 의존한다고 가정하고 있으며, 거친 표면이 아닌 굽은 콘크리트에 새로 친 콘크리트의 경우, 전단저항은 주로 보강재의 다월작용(dowel action)에 의존하도록 하고 있다(Section 22.9.3 of ACI 318-14, Section 7.7.2 of KCI 2012). 아울러, 표면을 거칠게 만든 굽은 콘크리트에 새로 친 콘크리트의 경우 보강재가 밀집되는 것을 방지하기 위해 전단강도에 대한 상한값을 제시하고 있다. 면처리를 한 경우에도 계면 전단강도가 설계기준에서 제시하고 있는 값보다 클 경우 전단연결재의 양이 증가하게 되어 결국 보강재가 밀집되는 결과를 초래하게 된다.

### 4.2.1 ACI 318-14와 KCI 2012 의한 계면 전단강도 평가

앞서 언급한바와 같이, 계면 전단강도는 주로 보강재의 다월작용에 의존하게 되며, 이는 균열면에 배치된 철근에 의해 균열을 따라서 발생하는 상대적인 변위 저항력을 의미한다. 보강재가 전단 전달면과 수직인 경우, 공칭전단강도는  $V_n = A_v f_y \mu$ 이며, 보강재가 전단력 전달면과 경사를 이룰

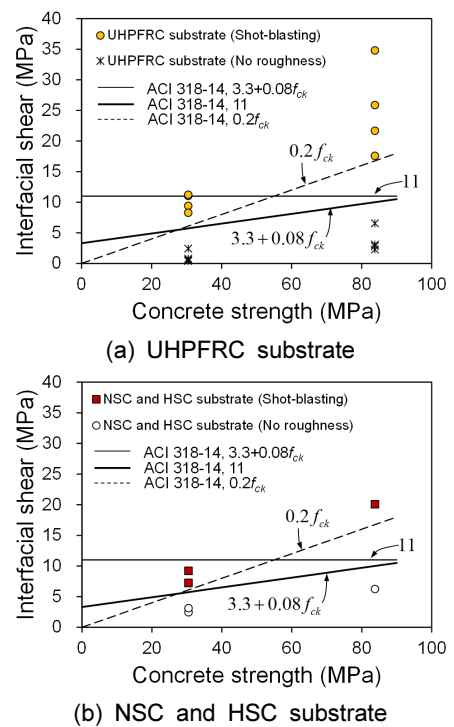


Fig. 10 Evaluation of interfacial shear in accordance with ACI 318-14<sup>13)</sup>

경우, 전단강도는  $V_n = A_v f_y (\mu \sin \alpha_f + \cos \alpha_f)$ 로 주어진다. 여기서,  $A_v$ 는 보강재의 단면적,  $f_y$ 는 보강재의 항복강도,  $\mu$ 는 마찰계수, 그리고  $\alpha_f$ 는 보강재와 전단 전달면 사이의 각도이다. ACI 318-14에 따르면, 일체로 타설된 콘크리트나 표면을 거칠게 만든 굽은 콘크리트에 새로 타설한 콘크리트의 경우, 전단강도는  $0.2f_{ck} A_c$ ,  $(3.3 + 0.08f_{ck}) A_c$ , 그리고  $11A_c$  중 가장 작은 값 이하로 하여야 한다. 여기서,  $A_c$ 는 전단력이 발생하는 단면적이며,  $f_{ck}$ 는 강도가 다른 콘크리트를 서로 다른 시기에 친 경우 낮은 콘크리트의 압축강도 값을 사용한다.

이 연구에서는 ACI 318-14와 KCI 2012에서 제시하고 있는 계면 전단강도를 사용해 면처리 유무에 따른 이종 콘크리트 사이의 계면 전단강도를 평가하고 아울러 콘크리트 구조 부재 보강을 위한 슛블라스팅의 면처리 효율성을 알아보고자 한다.

Fig. 10(a)와 (b)는 실험을 통해 구한 면처리 여부에 따른 계면 전단강도와 ACI 318-14에서 제시하고 있는 계면 전단강도의 상한값을 상호 비교한 것을 보여준다. Fig. 10에서 실선과 점선은 ACI 318-14에서 제시하고 있는 계면 전단강도 값의 상한값을 나타낸다. Fig. 10(a)에서 보이는 바와 같이, 면처리를 하지 않은 매끄러운 표면을 갖는 실험체의 전단강도는 콘크리트 강도와는 상관없이 ACI 318-14에서 제시하고 있는 전단강도의 상한값들 중 가장 작은 값보다 작은 값을 나타냈다. 반면에, 슛블라스팅으로 면처리되고 UHPFRC로 보강된 실험체의 전단강도는 강섬유 혼입물과는 상관없이 ACI 318-14에서 제시하는 전단강도 상한값들 중 가장 작은 값보다 큰 값을 나타냈다. 특히, 고강도 콘크리트(84 MPa)와 UHPFRC로 이루어진 실험체의 경우, 기준에서 제시하고

있는 계면 전단강도의 최대값보다 큰 값을 나타냈다.

이러한 결과는 슛블라스팅으로 면처리를 할 경우, 거칠어진 전단 전달면이 충분한 전단저항능력을 발휘하는 것을 의미한다. 반면에, 면처리를 하지 않을 경우에는 전단 보강재 설치が必要할 것으로 보인다.

#### 4.2.2 MC2010<sup>18)</sup>에 의한 계면 전단강도 평가

이중 콘크리트 경계면에서 전단마찰 철근이 없는 경우, MC2010<sup>18)</sup>에서 제시하고 있는 콘크리트와 콘크리트 사이의 전단강도는  $\tau_{Rd} = c_w f_{ctd} + \mu \sigma$ 으로부터 구할 수 있으며, 이 식으로부터 구해진 계면 전단강도는  $0.5v f_{cd}$ 을 초과해서는 안된다(Section 7.3.3.6). 여기서,  $c_w$ 는 부착 계수(매끄러운 표면일 경우=0.2, 거친 표면일 경우=0.4),  $f_{ctd}$ 는 설계 인장강도( $=f_{ct}/\gamma_c$ ),  $f_{cd}$ 는 콘크리트 인장강도,  $\gamma_c$ 는 안전계수(=1.5),  $\mu$ 는 마찰계수(매끄러운 표면일 경우=0.6, 거친 표면일 경우=0.7),  $\sigma$ 는 계면에서 발생하는 수직응력,  $v$ 는 콘크리트 강도감소 계수( $=0.55(30/f_{ck})^{1/3} < 0.55$ ),  $f_{cd}$ 는 설계 압축강도( $=f_{ck}/\gamma_c$ )이다.

Fig. 11은 MC2010에서 제시하고 있는 계면 전단강도의 상한값과 실험값의 비교를 나타낸다. UHPFRC로 보강되고,

면처리를 하지 않은, 즉 매끄러운 계면에서의 부착강도는 Fig. 11(a)에서 보이는 바와 같이 MC2010의 상한값의 부착강도에 비해 7~60% 수준으로 나타났다. 반면에, 거칠게 면처리를 한 실험체의 경우, 실험값은 상한값보다 최소 1.49배, 최대 3.19배 큰 값을 나타냈다(Fig. 11(b) 참조). 보통강도 또는 고강도 콘크리트로 보강된 실험체의 경우, 면처리를 하지 않은 실험체의 전단강도는 상한값의 44~57% 수준으로 나타났으며, 면처리를 한 실험체의 전단강도는 1.31~1.84배 정도 더 큰 값을 나타냈다.

이러한 결과는 ACI 318-14에 의한 평가 결과와 매우 유사하다. MC2010에 의해 계면 전단강도를 평가한 결과, 슛블라스팅에 의해 면처리된 경우, 비록 전단마찰 철근이 없더라도 전단력 전달면에서의 하중저항능력이 상당한 것으로 나타났다. 이는 실험을 통해 구한 전단강도가 전단마찰 철근의 다월작용을 고려한 현행 설계기준의 최대값보다 크기 때문이다.

## 5. 실험결과 분석

### 5.1 콘크리트 강도에 따른 계면 전단강도

콘크리트 강도는 계면 전단강도를 결정하는 주요 인자 중 하나이다. 현행 콘크리트 구조기준에서는 서로 다른 시기에 친 콘크리트 사이에서 발생하는 계면 전단강도는 두 콘크리트 압축강도 중 작은 값을 사용하여 구한다. 아울러, 전단강도의 상한값은 대부분 콘크리트 압축강도의 함수로 나타내고 있다.

실험결과, 면처리된 기존 콘크리트에 UHPFRC를 사용하여 보강할 경우, 기존 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 계면 전단강도는 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 8 참조). 기존 콘크리트의 압축강도가 75.3 MPa인 실험체의 계면 전단강도는 31.7 MPa인 실험체보다 2.1~3.2배 정도 큰 값을 나타내었다. 면처리가 되지 않은 실험체의 경우에도 기존 콘크리트의 압축강도는 계면 전단강도에 영향을 끼치는 것으로 나타났으며, 기존 콘크리트의 강도가 증가할수록 전단강도도 증가하였다. 이러한 결과는 계면에서의 미끄러짐이 발생하기 전까지 콘크리트 표면에서의 압축파괴가 억제되었기 때문으로 판단된다.

### 5.2 면처리 여부에 따른 계면 전단강도

약 0.3 mm 깊이로 슛블라스팅에 의해 표면 처리를 할 경우, 전단 전달면에서 저항하는 전단강도는 전단마찰 철근이 없더라도 현행 기준에서 제시하고 있는 이중 콘크리트 사이의 전단강도 상한값을 초과하는 것으로 나타났다.

따라서, 슛블라스팅을 사용하여 면처리를 할 경우, 전단마찰 철근의 유무와 상관없이 기존의 콘크리트와 UHPFRC 사이의 전단마찰 설계는 현행 콘크리트 구조기준을 사용해도 무방할 것으로 판단된다. 다만, 면처리를 하지 않은 경우에는

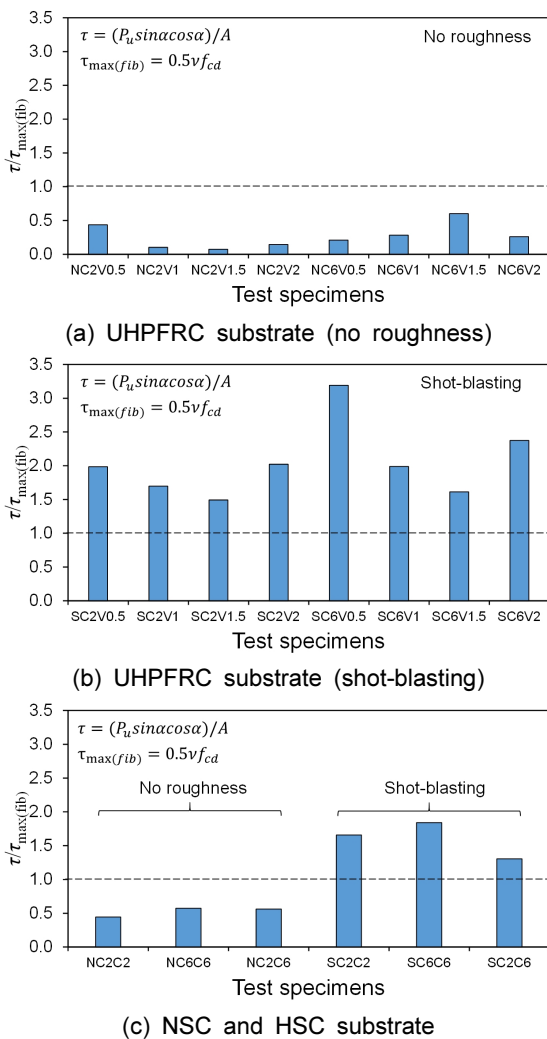


Fig. 11 Evaluation of interfacial shear in accordance with MC2010



적절한 전단 보강재가 추가 설치하여야 할 것으로 보인다.

## 6. 결 론

이 연구에서는 콘크리트와 UHPFRC 계면에서의 전단강도를 평가하기 위한 경사전단실험을 수행하였다. 실험변수는 콘크리트 강도와 면처리 유무, 그리고 UHPFRC의 강섬유 혼입률이다. 실험연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 슛블라스팅으로 면처리된 실험체의 계면 전단강도는 면처리를 하지 않은, 즉 매끄러운 표면을 가지고 있는 실험체의 부착강도에 비해 C2 계열의 실험체( $f_{ct}=24$  MPa)의 경우, 약 9.6배, C6 계열의 실험체( $f_{ct}=60$  MPa)의 경우, 약 6.8배 정도 크게 나타났다. 실험결과, 거친면을 만들기 위한 슛블라스팅 방법은 매우 효과적인 것으로 판단된다.
- 2) 면처리된 기존 콘크리트에 UHPFRC를 사용하여 보강할 경우, 기존 콘크리트의 압축강도는 계면 전단강도 증가에 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 실험결과, 기존 콘크리트의 압축강도가 2.4배 정도 증가하면 전단강도 역시 2.1~3.2배 정도 증가하였다. 이러한 결과는 계면에서의 미끄러짐이 발생하기 전까지 콘크리트 표면에서의 압축과괴가 억제되었기 때문으로 판단된다.
- 3) 슛블라스팅으로 표면처리를 할 경우, 전단마찰 철근이 없더라도 콘크리트 계면에서 저항하는 전단강도는 현행 기준에서 제시하고 전단강도 상한값을 초과하는 것으로 나타났다. 따라서, 기존의 콘크리트와 UHPFRC 사이의 전단마찰 설계는 전단마찰 철근의 유무와 상관없이 현행 콘크리트 구조기준을 사용해도 무방할 것으로 판단된다. 다만, 면처리를 하지 않은 경우에는 적절한 전단 보강재가 추가 설치하여야 할 것으로 보인다.

## 감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구A02)에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Korea Meteorological Administration (KMA), "http://www.kma.go.kr/weather/earthquake/report.jsp", 2014.
2. FEMA547, *Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*, 2006.
3. Architectural Institute of Korea, *Korean Building Code and Commentary*, 2009.
4. Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation, *Seismic Performance Evaluation and Improvement of Existing Buildings*, 2011.
5. Cheng, H. K., and MacAlevey, N., "Experimental Behavior of Jacketed Reinforced Concrete Beams," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 6, 2000, pp. 692-699.
6. Martinola, G., Meda, A., Plizzari, G. A., and Rinaldi, Z., "Strengthening and Repair of RC Beams with Fiber Reinforced Concrete," *Cement & Concrete Composites*, Vol. 32, No. 9, 2010, pp. 731-739.
7. Meda, A., Mostosi, S., and Riva, P., "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beam with High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composite Jacketing," *ACI Structural Journal*, Vol. 111, No. 5, 2014, pp. 1059-1067.
8. Choi, J. T., *Strengthening of RC Beams with Ultra High Performance Concrete*, Master's Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 2016, p. 123
9. Choi, J. T., Lim, W. Y., and Hong, S. G., "Strengthening T-shaped RC beams with UHPC," *4th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials (HiPerMat 2016)*, Kassel, Germany, 2016.
10. ACI Committee, *Concrete Repair Manual*, ACI, Farmington Hills, 1996, pp. 287-327.
11. Tayeh, B. A., Abu Bakar, B. H., and Megat Johari, M. A., "Characterization of the Interfacial Bond between Old Concrete Substrate and Ultra High Performance Fiber Concrete Repair Composite," *Materials and Structures*, Vol. 46, No. 5, 2013, pp. 743-753.
12. Harris, D. K., Sarkar, J., and Ahlborn, T. M., "Characterization of Interface Bond of Ultra-High-Performance Concrete Bridge Deck Overlays," *Journal of the Transportation Research Board*, No. 2240, 2011, pp. 40-49.
13. ASTM C882, *Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems used with Concrete by Slant Shear*, ASTM, West Conshohocken, 1999.
14. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural concrete (ACI 318M-14) and Commentary*, ACI 318-14, 2015. p. 519
15. Korea Concrete Institute, *Concrete Design Code and Commentary*, Kimoondang Publishing Company, Seoul, Korea, 2012, p. 599
16. Lim, W. Y., and Hong, S. G., "Compressive Behavior of Hybrid Steel Fiber Reinforced Ultra-High Performance Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 28, No. 2, 2016, pp. 213-221.
17. Korea Concrete Institute, *Design Recommendations for Ultra-High Performance Concrete K-UHPC*, KCI-M-12-003, 2012 (in Korean).
18. fib, 2010. *Model Code 2010 Final draft - Volumes 1 and 2, fib Bulletin 55 and 56*, Fédération Internationale du béton (fib), Lausanne, Switzerland, 2012.

---

**요 약** 이 연구에서는 강섬유 보강 초고성능 콘크리트(Ultra-high performance fiber reinforced concrete, 이하 UHPFRC)로 보강된 콘크리트 계면에서의 전단강도 평가를 위한 경사전단실험을 수행하였다. 실험변수는 면처리 유무와 콘크리트 강도, 그리고 UHPFRC의 강섬유 혼입률이다. 콘크리트의 계면은 슛블라스팅으로 면처리되었다. 실험결과, 슛블라스팅으로 면처리된 실험체의 계면 전단강도는 매끄러운 표면을 가진 실험체의 부착강도에 비해 매우 크게 나타났으며, 거친면을 만들기 위한 슛블라스팅 방법은 매우 효과적인 방법인 것으로 나타났다. 슛블라스팅으로 표면처리를 할 경우, 전단마찰 철근이 없더라도 콘크리트 계면에서 저항하는 전단강도는 현행 기준에서 제시하고 전단강도 상한값을 초과하는 것으로 나타났다. 기존의 콘크리트와 UHPFRC 사이의 전단마찰 설계는 전단마찰 철근의 유무와 상관없이 현행 콘크리트 구조기준을 사용해도 무방할 것으로 판단된다. 다만, 면처리를 하지 않은 경우에는 적절한 전단 보강재가 추가 설치하여야 할 것이다.

**핵심용어** : 초고성능 콘크리트, 강섬유, 경사전단실험, 슛블라스팅, 계면 전단강도