



# 강섬유 보강 콘크리트와 GFRP 보강근의 부착특성에 관한 실험적 연구

최윤철 <sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>청운대학교 건축설비소방학과

## Experimental Study on the Bond Properties between GFRP Reinforcements and Steel Fiber Reinforced Concrete

Yun-Cheul Choi <sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept of Architectural Environmental Engineering and Building Service, ChungWoon University, Hongseong 350-701, Korea

**ABSTRACT** In this paper, an experimental investigation of bond properties between steel fiber reinforced concrete and glass fiber reinforced polymer reinforcements was performed. The experimental variables were diameter of reinforcements, volume fraction of steel fiber, cover thickness and compressive strength of concrete. Bond failure mainly occurred with splitting of concrete cover. Main factor for splitting of concrete is tension force occurred by the displacement difference between reinforcements and concrete. Therefore, in order to prevent the bond failure between reinforcements and concrete, capacity of tensile strength of concrete cover should be upgraded. As a results of test, volume fraction of steel fiber significantly increases the bond strength. Cover thickness changes the failure mode. Diameter of reinforcements also changes the failure mode. Generally, diameter of reinforcement also affects the bond properties but this effect is not significant as volume fraction of fiber. Increase of compressive strength increases the bond strength between concrete and reinforcement because compressive strength of concrete directly affects the tensile strength of concrete.

**Keywords** : steel fiber, compressive strength of concrete, cover thickness, diameter of reinforcements, GFRP reinforcements, bond properties

### 1. 서 론

최근 극한환경하에서의 철근콘크리트 구조물의 축조량이 증가함에 따라 해양 구조물과 같이 염해에 큰 피해를 받는 구조물에 대한 보강 방법이 다양한 방향에서 연구되고 있다. 철근콘크리트의 염해에 대한 문제점으로는 콘크리트의 중성화에 따른 철근의 부식을 들 수 있으며 이 문제는 일반적으로 재료의 성능수준 향상 및 방청제의 도포를 통해 해결되고 있다. 그러나 현행 구조설계기준<sup>1)</sup>에서 제시하는 바와 같이, 철근에 방청재료를 도포하게 될 경우 더 큰 정착길이를 요구하게 되어 일반적으로 대형부재로 구성되는 해양 구조물에서의 적용이 어려울 수 있는 단점이 있다. 이에 따라 최근 염해에 의한 철근의 내구성 문제를 해결하기 위해 원천적 해결방안의 일환으로 FRP(fiber reinforced polymer)에 대한 연구가 활발

하게 진행되고 있는 추세이다. FRP는 구성 재료가 플라스틱, 유리섬유 또는 탄소섬유로 이루어져 강재에서 발생하는 부식현상에 따른 유효단면의 손실과 철근마디의 손상과 같은 문제점들을 원천적으로 방지한 재료이다.<sup>1)</sup>

FRP보강근이 발휘할 수 있는 구조성능은 휨, 전단 등 구조물에 작용하는 다양한 하중의 형태에 대해 이미 많은 연구가 진행되어 왔으며 ACI-440<sup>2)</sup> 위원회에서는 실제 부착강도를 사용한 설계안을 제시하고 있는 실정이다. 이러한 구조성능의 확보는 기본적으로 보강근과 철근 사이의 부착강도가 발휘되었을 때를 기반으로 하고 있다. 그러나 FRP의 경우 이형철근과 달리 다양한 형태의 표면 형상을 보유하고 있으며 이형철근과 유사한 마디를 구성 하더라도 재료가 보유한 강성이 다름에 따라 부착성능에 대한 검토는 필수적으로 수행되어야 한다. 현행 설계기준들은 철근을 기반으로 제작된 것이며 이에 준하는 성능을 발휘하기 위해서는 철근과 같은 수준의 부착강도를 보유하거나 이를 반영한 정착길이를 확보해야 한다. FRP 보강근의 표면 형상 및 재료의 특성에 따른 부착강도 발현 정도에 대해서는 철근의 부착강도에 비해 작게 나타남을 여러 연구 결과에서 확인할 수 있으며, 부착특성에

\*Corresponding author E-mail : 21ycchoi@chungwoon.ac.kr

Received August 8, 2013, Revised August 28, 2013,

Accepted August 31, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

영향을 미치는 주요 변수는 콘크리트의 압축강도, 리브와 마디의 형상, 보강근의 구속정도, 피복두께, 콘크리트의 인장강도 등으로 정리할 수 있다.<sup>3,4)</sup>

콘크리트와 보강근 사이의 부착강도는 정착깊이에 직접적인 영향을 주는 요인이 된다. ACI 및 국내의 현행 구조설계기준에 따르면 기본정착깊이의 산정에 대한 주요 변수는 콘크리트의 인장강도와 철근의 항복강도 및 철근의 지름인 것으로 확인할 수 있다. 콘크리트의 인장강도는 콘크리트 압축강도의 제곱근의 함수로 표현되므로 콘크리트의 압축강도의 영향에 대한 검토가 필수적으로 요구된다. 또한 FRP 보강근은 인장 상태에서의 거동이 철근과는 극명하게 다르게 나타나므로 이에 대한 검토도 수행되어야 할 필요가 있다. 또한 철근의 지름은 피복두께와 연관이 되어 이 두 요소의 영향에 대한 평가가 동시에 수행되어야 한다.

이 연구에서는 FRP 보강근을 사용하였을 경우 부착강도의 발현에 대한 평가를 위해 위에서 언급한 요소들을 고려할 수 있는 실험을 수행하였다. 주요 변수로는 콘크리트의 인장강도에 변화를 주기 위한 콘크리트의 압축강도 변화, 콘크리트 인장강도의 증진을 위한 섬유 보강량 변화, 보강근의 특성을 반영하기 위한 보강근 재료의 종류 및 철근의 지름에 따른 영향을 판단하기 위한 철근의 지름과 피복두께로 설정하였다.

## 2. 실험계획 및 실험

이 연구의 주요 목적은 FRP 보강근이 사용될 경우 콘크리트와 보강근 사이에서의 부착특성을 판단하는 것으로서 1장에서 언급한 사항이 반영되도록 실험체를 제작하였다.

### 2.1 사용된 재료의 특성

섬유의 혼입률 및 피복두께가 FRP 보강근과 콘크리트 사이의 부착강도 변화에 미치는 영향을 측정하기 위해 이 연구에서는 섬유보강 콘크리트를 사용하였다. 1종 포틀랜드시멘트와 비중 2.6의 잔골재가 사용되었으며 굵은 골재는 실험체가 가지는 피복두께의 크기를 고려하여 13 mm로 제한되었다. 또한 강섬유 도입시 발생할 수 있는 시공 연도의 문제점 해결을 위해 AE 감수제가 모든 실험체의 제작에 사용되었다.

콘크리트의 강도를 주요 변수로 하기 위해, 두 가지 콘크리트의 압축강도가 발현될 수 있도록 배합비를 결정하였다. 일반적으로 현재 국내 시공현장에서 많이 사용되었던 21 MPa의 압축강도 발현을 위해 Table 1에 나타난 바와 같은 Mix-N이 사용되었으며 고강도 콘크리트의 하한치로 대비되는 40 MPa의 압축강도 발현을 위해 Mix-H가 사용되었다. 콘크리트 압축강도의 시험을 위해 100×200 mm의 원주형 표준공시체가 제작되었다. 압축강도시

험은 KS F 2405에 따라 2000 kN의 용량을 가진 만능재료시험기(UTM)를 사용하여 수행되었다. 압축시험시 하중속도는 2 mm/min의 변위제어로 수행하여 최대강도 발현 이후의 거동을 확인할 수 있도록 수행하였다. 압축강도 시험 결과 Mix-N의 경우 평균 22.4 MPa의 압축강도를 발현하였으며 Mix-H의 경우 평균 41.5 MPa의 압축강도를 발현하는 것으로 나타났다.

인장강도가 부착특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 강섬유를 혼입한 실험체가 제작되었다. 이에 사용된 콘크리트는 각 배합비에 강섬유가 파괴비를 통해 혼입되었으며 혼입 비율은 1%와 2%로 결정하였다. 일반적으로 1%의 혼입비는 건조수축을 막기 위해 많이 사용되는 혼입비이며, 2%는 구조성능 증진에 영향을 미치는 혼입비이다.<sup>5)</sup> 사용된 강섬유는 ACI318-08<sup>6)</sup>에서 제안하고 있는 후크형 강섬유가 사용되었으며 65의 형상비를 가진 강섬유를 사용하였다. 사용된 강섬유의 제원은 Table 2 및 Fig. 1에 나타내었다. 강섬유가 보강된 콘크리트의 시험

Table 1 Mix proportion of concrete

ID	$f_{ck}$ (MPa)	W/C (%)	C	W	S	G	Admixture (%)	$V_f$ (%)
Mix-N	21	57.7	1	0.58	2.95	3.06	0.5	-
								1
								2
Mix-H	40	36.3	1	0.36	1.51	2.28	0.5	-
								1
								2

$f_{ck}$  : compressive strength, W/C : water cement ratio, C : cement, W : water, S : sand, G : coarse aggregate,  $V_f$  : volumetric ratio

Table 2 Property of steel fiber

ID	$\phi$ (mm)	$L$ (mm)	$f_{ysf}$ (MPa)	$E_{sf}$ (GPa)
Hook	0.49	31.84	1,195.5	200

$\phi$  : fiber diameter,  $L$  : fiber length,  $f_{ysf}$  : fiber yield strength,  $E_{sf}$  : fiber elastic modulus



Fig. 1 Hooked steel fiber

은 강섬유가 보강되지 않은 콘크리트와 같은 시험 기준을 적용하였다. 시험 결과 1%로 보강된 강섬유보강콘크리트의 압축강도는 평균 25.2 MPa과 42.1 MPa로 나타났으며 2%로 보강된 강섬유보강콘크리트의 압축강도는 평균 26.1 MPa과 43.1 MPa로 나타났다. 재료시험 결과 강섬유의 압축강도에 대한 영향은 크지 않은 것으로 나타나 이 연구에서는 강섬유 보강에 따른 압축강도의 변화 양상은 분석과정에서 별도로 고려하지 않았다.

이 연구에서 사용된 FRP 보강근은 유리섬유로 구성된 Glass Fiber Reinforced Polymer(GFRP)이다. GFRP의 경우 탄소섬유가 상용된 CFRP에 비해 인장강도는 낮게 나타나지만 큰 극한 변형률을 보유함에 따라 콘크리트구조물의 연성을 더 크게 확보할 수 있는 장점이 있다. 이 연구에서 사용된 GFRP 보강근은 국내에서 생산된 D13과 D16 보강근으로 보강근과 콘크리트 계면에서의 부착성능 향상을 위해 섬유를 나선형으로 부착하여 보강한 제품으로 Fig. 2에 그 특징을 나타내었다.<sup>7)</sup> GFRP 보강근의 물리적 특성으로는 유리 섬유 함유량이 70%이며 비중이 2.0으로 제조되었다. 주요 기계적 특성은 Table 3에 나타난 바와 같이 일반 철근에 비해 높은 강도와 낮은 탄성계수를 보유하고 있는 것으로 나타났다. GFRP 보강근을 사용한 실험체에 대한 대조군으로 실험체에 사용된 철근 D13의 항복강도는 576 MPa로 발현되었으며 탄성계수는 203 GPa로 측정되었다. D16은 580 MPa의 항복강도를 발현하였으며 204 GPa의 탄성계수가 측정되었다. GFRP의 기계적 성질은 Table 3, 철근의 기계적 성질은 Table 4에 나타내었다.

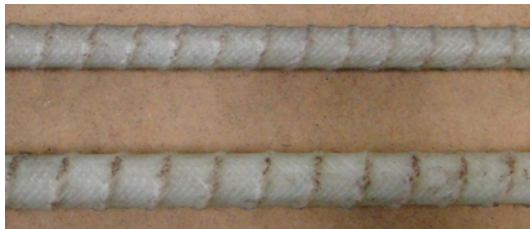


Fig. 2 Reinforced type of GFRP bar

Table 3 Mechanical property of GFRP bar

Rebar	Diameter (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Ultimate strain (%)
D13	12.7	127	741	49.3	1.503
D16	15.9	199	728	48.6	1.498

Table 4 Mechanical property of steel rebar

Rebar	Diameter (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Yield strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
D13	12.7	126.7	576	203
D16	15.9	198.6	580	204

Table 5 Specification of specimens

No.	Concrete	Reinforced bar	Diameter (mm)	Covering thickness	V <sub>f</sub> (%)	Index	
1	Mix-N	Steel	13	1.5db	0	20-1.5d-N-S-13	
2			16			20-1.5d-N-S-16	
3			13		1	20-1.5d-F1-S-13	
4			16			20-1.5d-F1-S-16	
5			13		2	20-1.5d-F2-S-13	
6			16			20-1.5d-F2-S-16	
7		GFRP	13		1.5db	0	20-1.5d-N-G-13
8			16				20-1.5d-N-G-16
9			13			1	20-1.5d-F1-G-13
10			16				20-1.5d-F1-G-16
11			13			2	20-1.5d-F2-G-13
12			16				20-1.5d-F2-G-16
13		Steel	13	5.4db		0	20-5.4d-N-S-13
14			16				20-5.4d-N-S-16
15			13			1	20-5.4d-F1-S-13
16			16				20-5.4d-F1-S-16
17			13			2	20-5.4d-F2-S-13
18			16				20-5.4d-F2-S-16
19		GFRP	13		5.4db	0	20-5.4d-N-G-13
20			16				20-5.4d-N-G-16
21			13			1	20-5.4d-F1-G-13
22			16				20-5.4d-F1-G-16
23			13			2	20-5.4d-F2-G-13
24			16				20-5.4d-F2-G-16
25	Mix-H	Steel	13	1.5db		0	40-1.5d-N-S-13
26			16				40-1.5d-N-S-16
27			13			1	40-1.5d-F1-S-13
28			16				40-1.5d-F1-S-16
29			13			2	40-1.5d-F2-S-13
30			16				40-1.5d-F2-S-16
31		GFRP	13		1.5db	0	40-1.5d-N-G-13
32			16				40-1.5d-N-G-16
33			13			1	40-1.5d-F1-G-13
34			16				40-1.5d-F1-G-16
35			13			2	40-1.5d-F2-G-13
36			16				40-1.5d-F2-G-16
37		Steel	13	5.4db		0	40-5.4d-N-S-13
38			16				40-5.4d-N-S-16
39			13			1	40-5.4d-F1-S-13
40			16				40-5.4d-F1-S-16
41			13			2	40-5.4d-F2-S-13
42			16				40-5.4d-F2-S-16
43		GFRP	13		5.4db	0	40-5.4d-N-G-13
44			16				40-5.4d-N-G-16
45			13			1	40-5.4d-F1-G-13
46			16				40-5.4d-F1-G-16
47			13			2	40-5.4d-F2-G-13
48			16				40-5.4d-F2-G-16

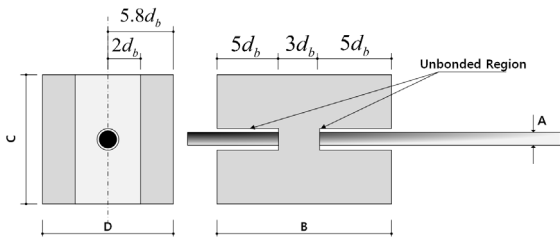


Fig. 3 Detail of specimen

## 2.2 실험 변수 및 제작

GFRP 보강근과 섬유보강콘크리트 사이의 부착특성을 평가하기 위해 이 연구에서는 콘크리트의 압축강도, 피복두께비, 강섬유의 혼입량, 보강근의 종류, 보강근의 지름을 변수로 하여 총 48개의 실험체를 제작하였다. 각 실험체의 제원 및 변수는 Table 5에 정리되어 있으며 실험체 상세는 Fig. 3에 나타내었다. GFRP 보강근의 부착강도-미끄러짐 관계의 분석을 위해 상대적으로 짧은 부착 길이로 평가되는  $3d_b$ 의 묻힘 길이를 가지도록 실험체를 계획하였다.<sup>8)</sup> GFRP 보강근의 섬유보강 콘크리트에서의 쪼개짐 파괴와 뿔힘 파괴 매커니즘 분석과 부착강도에의 피복 두께의 영향을 반영하기 위해 피복두께를  $2d_b$ 와  $5.8d_b$ 로 조정하였으며 보강근의 직경을 D13과 D16 두 가지로 설정하였다. 또한 섬유 혼입에 따른 콘크리트의 인장 파괴 지연 현상 분석을 위해 섬유의 혼입량을 0%, 1%, 2%로 설정하였다. 또한 일반 철근과의 거동에 있어서의 차이점을 분석하기 위해 일반 철근이 사용된 실험체가 제작되었다.

## 2.3 실험 방법

보강근과 콘크리트 사이의 부착특성을 파악하기 위한 실험 방법은 최근 실제 구조물에 작용하는 응력 상태를 반영한 beam-test를 주로 사용하고 있으나 보강근과 콘크리트 사이의 직접적인 부착 특성 및 부착강도-미끄러짐 관계의 규명 및 규정을 위해 Pull-out test도 병행하여 실험이 수행되고 있다. 이 연구의 주요 목적은 GFRP 보강근의 부착강도에 대한 강섬유 혼입률의 영향과 피복 두께의 영향을 파악하여 부착강도-미끄러짐 관계를 정의하기 위한 기초 자료로 사용되기 위함이므로 pull-out test를 사용하여 실험을 수행하였다.

Pull-out test는 KS F 2441<sup>9)</sup>에 의거하여 수행되었다. 가력장치는 안정적인 변위제어를 수행하기 위해 500 kN 용량의 스크류잭을 사용하였다. 가력 속도는 KS F 2441에 의거하여 0.6 mm/min을 사용하였으며 실험체 앞 뒤에서 보강근과 콘크리트의 상대변위를 측정하여 슬립을 측정하였다. 그 외 스크류잭의 변위 및 바닥판의 슬립을 측정하기 위해 네 개의 LVDT를 추가 설치하였다. 실험체 설치 상황은 Fig. 4에, 계측계획은 Fig. 5에 각각 나타내었다.

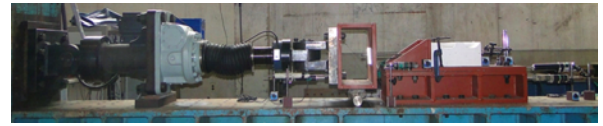


Fig. 4 Setting of specimen

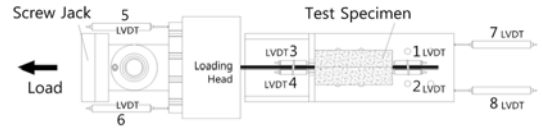


Fig. 5 Location of LVDT

## 3. 실험 결과 및 분석

GFRP 보강근과 섬유보강 콘크리트 사이의 부착특성을 규명하기 위해 총 48개 pull-out 실험체의 실험이 수행되었으며 그 결과는 다음과 같다.

보강근과 콘크리트 사이의 부착 거동은 다음과 같은 형태로 발생한다. 보강근과 콘크리트 계면에서 상대변위가 발생하며 콘크리트에 미세균열이 발생한다. 이후 균열폭의 확대와 함께 파괴가 진전된다.<sup>10)</sup> 이는 부착응력-슬립 관계를 통해 나타낼 수 있다. 초기 미세균열의 발전까지는 강성의 저하가 없는 직선형태이며 미세 균열의 진전에 따라 강성이 감소하며 이후 응력 전달 면적의 크기에 따라 부착응력 저하 형태가 쪼개짐과 뿔힘으로 나누어 규정된다. 슬립은 측정 계획에 나타난 자유단에서의 변위를 통해 측정하였으며 부착응력은 실험체에 가해진 하중을 부착면적으로 나누어 산정하였다. 콘크리트의 압축강도, 철근 직경에 대한 피복두께의 비, 섬유 혼입량(부피비), 철근의 직경에 따라 철근과 GFRP의 차이점에 대한 분석을 수행하였다.

### 3.1 파괴 형태

일반적인 부착 파괴 형태는 Fig. 6에 나타난 바와 같은 방사형 응력 분포에 의해 결정된다. 방사형 응력 형태에 대한 매트릭스의 인장강도 크기에 따라 발생 응력보다 매트릭스의 인장강도가 작을 경우 쪼개짐 파괴, 클 경우에는 뿔힘 파괴 또는 보강근의 항복이 발생하게 된다.

강섬유의 혼입량은 부착파괴시의 발생 균열 형태 및 최종 파괴 형태에 영향을 주는 것으로 나타났다. 보통강도 콘크리트가 사용된 실험체들의 대표적 최종 파괴 형태를 Fig. 7에 나타내었다. 쪼개짐 파괴에 대한 강섬유의 영향을 알아보기 위해 피복두께비가 1.5로 계획된 실험체들의 파괴 형태를 비교해 이 결과 강섬유로 보강되지 않은 경우, 철근과 GFRP 보강근 모두 철근의 길이를 따라 초기에 발생한 쪼개짐 균열이 넓어지는 형태로 나타나면서 최종 파괴되었다. 강섬유의 혼입량이 높아짐에 따라 최종 파괴시의 발생된 균열의 폭이 좁아졌으며

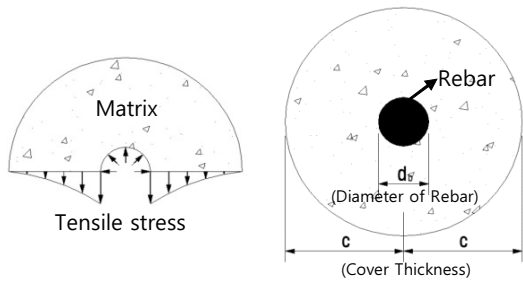


Fig. 6 Stress of matrix for pull-out of steel rebar

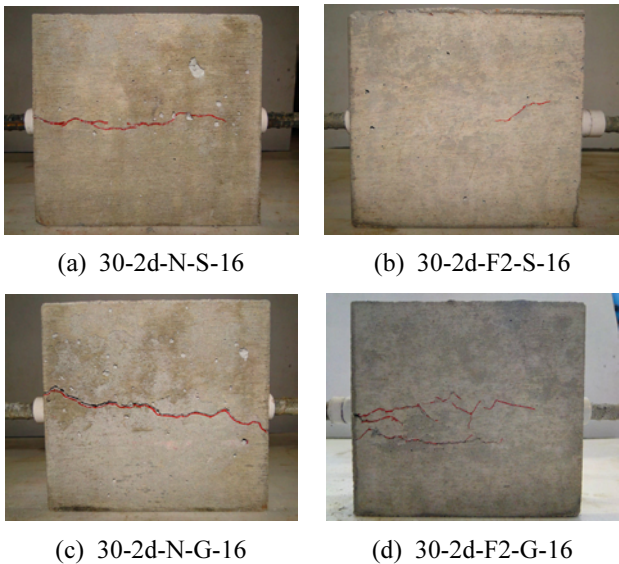
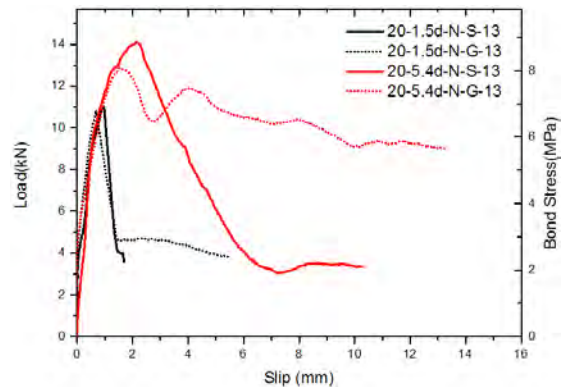


Fig. 7 Failure mode of specimens

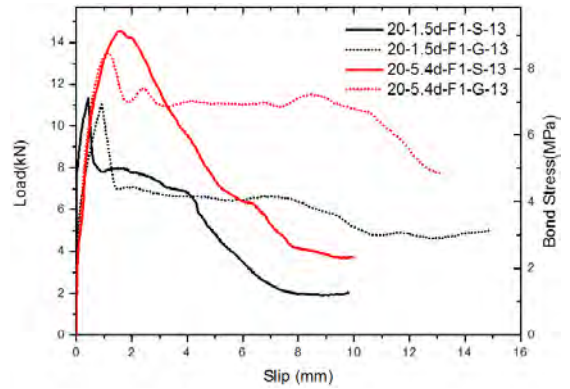
GFRP 실험체의 경우 집중되었던 균열이 분산되면서 파괴되는 형태를 보였다. 이 현상은 보통 강도 및 고강도 콘크리트에서 모두 유사하게 나타났다. 이는 곧 부착파괴를 유발하는 쪼개짐 파괴는 콘크리트의 인장강도에 크게 영향을 받으며, 콘크리트의 압축강도 증가에 따른 매트릭스의 인장강도의 증가현상보다는 균열 발생 이후 섬유와의 가교작용이 부착파괴의 파괴모드를 바꿀 수 있는 요소가 될 수 있음을 의미한다.

### 3.2 피복두께의 영향

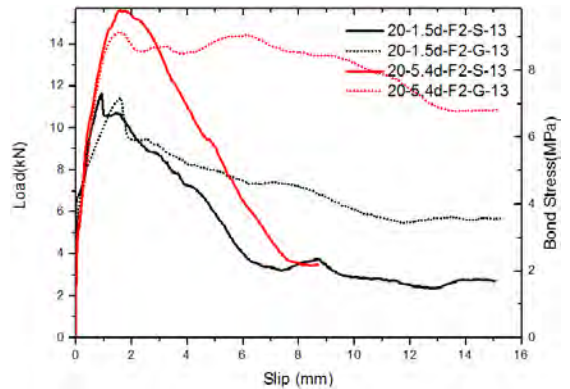
부착강도의 발현에 있어서 피복두께는 쪼개짐 파괴와 뿔힘 파괴를 구분하는데 있어서 주요 변수가 된다. 특히 CEB-FIP model Code 2010<sup>11)</sup>에서는 철근의 부착응력-슬립 관계를 정의함에 있어 뿔힘 파괴시와 쪼개짐 파괴시의 거동을 구분하여 사용하도록 제안되고 있을 정도로 피복두께의 영향은 부착 강도의 발현에 큰 영향을 주게 된다. 따라서 이 연구에서는 쪼개짐 파괴가 발생할 수 있도록  $c/d_b$ 가 1.5인 실험체와 뿔힘 파괴가 일어날 수 있는 5.4인 실험체로 구성하였다. D13 철근이 사용된 실험체와 D13 GFRP 보강근이 사용된 실험체들의 피복두께에 따른 부착응력-슬립 관계의 차이점을 Fig. 8에 나타내었다.



(a) NSC (D13)



(b) NSC-FRC-1% (D13)



(c) NSC-FRC-2% (D13)

Fig. 8 The relationship of bond stress-slip for cover thickness

강섬유가 혼입되지 않은 콘크리트에서의 철근과 GFRP 보강근의 피복두께에 의한 거동을 요약하면, 철근이 사용된 경우에는 피복두께의 확보를 통해 쪼개짐 파괴에서 뿔힘 파괴로의 거동 변화가 나타났으며 GFRP 보강근이 사용된 경우에도 피복두께의 증가로 인해 뿔힘 파괴의 형태가 나타났다. 다만 GFRP 보강근의 최대 응력 이후 슬립의 형태는 콘크리트와 보강근 계면의 탈락에 의한 효과와 함께 GFRP 보강근 자체의 파괴가 동시에 진행되어 콘크리트의 압피로 인한 점진적 파괴 형태보다 더 느린 강도감소현상을 보임을 알 수 있었다. 그러나 부착강도는 철근보다 낮게 나타남을 확인할 수 있었다. 부착강도의 저하 문제는 강섬유를 사용함으로써 극복되는 것을 Fig. 8을 통해서 확인할 수 있다. 또한, 강섬유의 혼입은

피복두께에 의한 거동의 차이를 완화시켜주는 역할을 하고 있음이 GFRP 보강근을 사용한 실험체에서 드러나고 있음을 알 수 있었다.

이는 피복두께가 작을 때 나타나는 쪼개짐 파괴시, 파괴면 사이에서 강섬유가 가교작용을 함에 따라 발생하는 현상으로 판단된다. 1% 부피비의 강섬유가 보강되었을 때에는 명백한 강도의 증가현상을 확인할 수 없었으나, 2% 부피비의 강섬유가 보강되었을 때에는 명백한 최대 강도의 증가를 확인할 수 있었다.

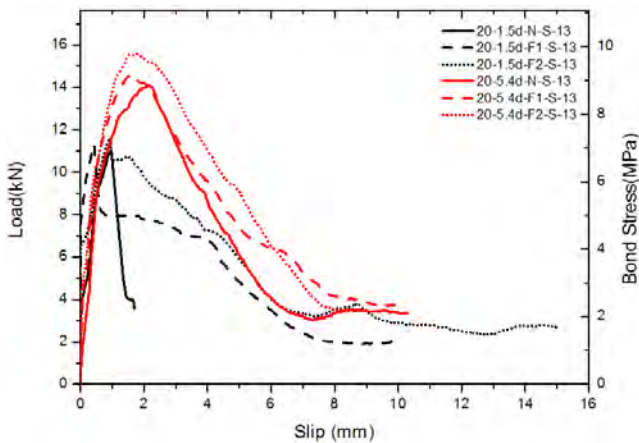
### 3.3 섬유혼입량의 영향

강섬유의 혼입이 철근과 GFRP 보강근의 부착성능에 미치는 영향을 파악하기 위해 혼입량을 변수로 한 실험체에 대한 분석을 실시하였다. Fig. 9에 강섬유 혼입률에 따른 실험체의 부착응력-미끄러짐 관계를 보강근의 종류와 피복두께로 구분하여 나타내었다.

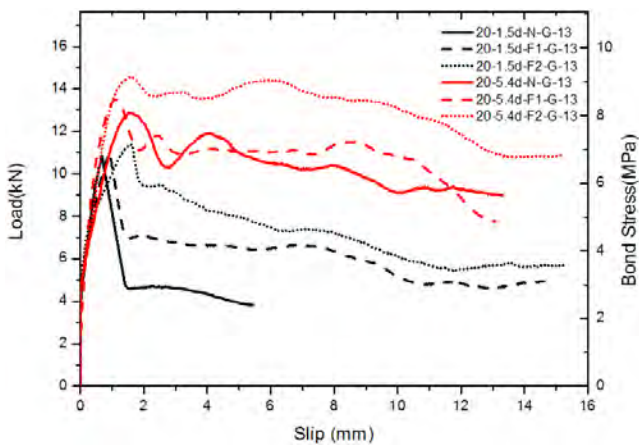
Fig. 9에서 공통적으로 나타나는 경향은 강섬유 혼입에 따른 부착강도의 상승 현상이었다. 1%의 혼입률이 사용된 때에는 큰 영향을 미치지 못하지만 2%의 혼입률이 사

Table 6 Test result

Specimen ID	$\tau_{max}$ (MPa) (maximum bond stress)	$s_{max}$ (mm) (slip corresponding to $\tau_{max}$ )
20-1.5d-N-S-13	7.23	0.955
20-1.5d-N-S-16	9.87	0.458
20-1.5d-F1-S-13	7.14	0.68
20-1.5d-F1-S-16	6.44	0.75
20-1.5d-F2-S-13	7.45	0.43
20-1.5d-F2-S-16	10.27	0.51
20-1.5d-N-G-13	7.25	0.92
20-1.5d-N-G-16	6.74	1.31
20-1.5d-F1-G-13	7.65	0.92
20-1.5d-F1-G-16	12.12	0.69
20-1.5d-F2-G-13	7.51	1.57
20-1.5d-F2-G-16	7.32	0.64
20-5.4d-N-S-13	9.23	2.20
20-5.4d-N-S-16	12.36	1.16
20-5.4d-F1-S-13	8.46	1.61
20-5.4d-F1-S-16	6.04	2.46
20-5.4d-F2-S-13	9.55	1.56
20-5.4d-F2-S-16	15.26	0.95
20-5.4d-N-G-13	8.87	1.14
20-5.4d-N-G-16	7.80	2.01
20-5.4d-F1-G-13	17.1	0.95
20-5.4d-F1-G-16	10.24	1.78
20-5.4d-F2-G-13	9.56	1.61
20-5.4d-F2-G-16	9.13	0.84
40-1.5d-N-S-13	8.92	0.22
40-1.5d-N-S-16	20.14	0.13
40-1.5d-F1-S-13	8.93	0.11
40-1.5d-F1-S-16	20.81	0.13
40-1.5d-F2-S-13	13.92	0.16
40-1.5d-F2-S-16	21.00	0.13
40-1.5d-N-G-13	21.55	1.37
40-1.5d-N-G-16	16.75	1.08
40-1.5d-F1-G-13	9.05	0.68
40-1.5d-F1-G-16	17.98	0.83
40-1.5d-F2-G-13	10.47	0.61
40-1.5d-F2-G-16	20.38	0.33
40-5.4d-N-S-13	22.91	0.75
40-5.4d-N-S-16	28.08	0.74
40-5.4d-F1-S-13	24.20	1.15
40-5.4d-F1-S-16	34.55	0.70
40-5.4d-F2-S-13	16.20	1.97
40-5.4d-F2-S-16	47.11	1.18
40-5.4d-N-G-13	9.18	3.49
40-5.4d-N-G-16	12.87	1.44
40-5.4d-F1-G-13	7.94	0.95
40-5.4d-F1-G-16	19.34	0.79
40-5.4d-F2-G-13	11.02	4.30
40-5.4d-F2-G-16	18.72	0.55



(a) Steel reinforcement



(b) GFRP reinforcement

Fig. 9 The relationship of bond stress-slip for volume fraction of steel fiber

용될 경우 부착강도가 최소 5%에서 최대 15%까지 증가하는 현상이 나타났다. 특히, Fig. 9(a)의 쪼개짐 파괴가 일어나는 작은 피복두께비를 가진 실험체들의 실험 결과를 분석한 결과 강섬유의 혼입은 최대 부착강도의 발현뿐만 아니라 부착강도 발현 이후의 연화 거동에도 영향을 미치는 것으로 나타났다.

GFRP의 강섬유보강 콘크리트 내에서 혼입률에 따른 부착 거동의 변화 경향은 강섬유의 혼입에 따른 철근의 부착거동 변화와 유사하게 변화함을 확인할 수 있었다. GFRP 보강근의 계면 파괴에 의한 미끄러짐 현상은 강섬유 보강에 의한 콘크리트 계면의 압괴 지연에 의해 연화시 감소현상이 철근과 같이 극명하게 나타나지 않는 현상이 관찰되었다.

### 3.4 보강근 직경의 영향

보강근의 직경은 콘크리트구조물을 설계할 때 정착길이 결정하는 데 있어 중요한 변수가 된다. 이에 따라 이 연구에서는 보강근의 직경에 따른 부착강도 및 부착강도 발현 이후의 거동에 대해 분석을 수행하였다.

직경의 차는 부착면적의 차이를 유발하여 하중의 크기로는 직접적으로 비교할 수 없기 때문에 다음 식 (1)을 사용한 평균 부착응력을 통해 각 직경에 따른 성능의 차이를 비교하였다.

$$\tau = \frac{P_{\max}}{d_b \pi L_e} \quad (1)$$

여기서,  $\tau$ 는 부착응력,  $P_{\max}$ 는 실험결과로 알 수 있는 최대 하중,  $d_b$ 는 보강근의 직경,  $L_e$ 는 부착길이이다.

각 실험체의 부착응력-슬립 관계를 실험체를 구성하는 재료를 통해 구분하여 Fig. 10에 나타내었으며 각 실험체의 최대 강도 및 최대 강도 발현시의 슬립량을 Table 6에 나타내었다.

실험 결과 보강근 직경에 따른 부착응력-슬립 관계의 변화는 철근과 GFRP 보강근에 따라 다른 거동을 나타내었다. 철근이 사용된 경우 강섬유로 보강되지 않은 경우와 강섬유로 보강된 경우 모두 유사한 비율의 차이를 보이고 있음을 관찰할 수 있었다. 또한 최대 부착응력의 차이는 철근의 직경이 커짐에 따라 극명한 차이가 나는 것을 확인할 수 있었으며 콘크리트 압축강도의 증가는 이 현상을 더 명백하게 나타나게 하는 것으로 관찰되었다.

반면, GFRP 보강근이 사용된 경우에는 강섬유로 보강이 되지 않은 경우 또는 1%의 낮은 혼입률을 가진 경우에는 직경에 따른 차이가 크지 않은 것으로 나타났으나 강섬유의 보강 효과가 나타나기 시작하는 2% 혼입률을 가진 섬유보강 콘크리트 실험체에서는 직경에 따른 차이가 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 전술한 바와 같이, 강섬유가 매트릭스의 파괴 강도를 상승시켜 내부의 미세 균열 발생 시점을 지연시키고 균열 발생 이후 가교작용을 통한 균열폭 확장의 지연 현상에 의한 것으로 판단된다.

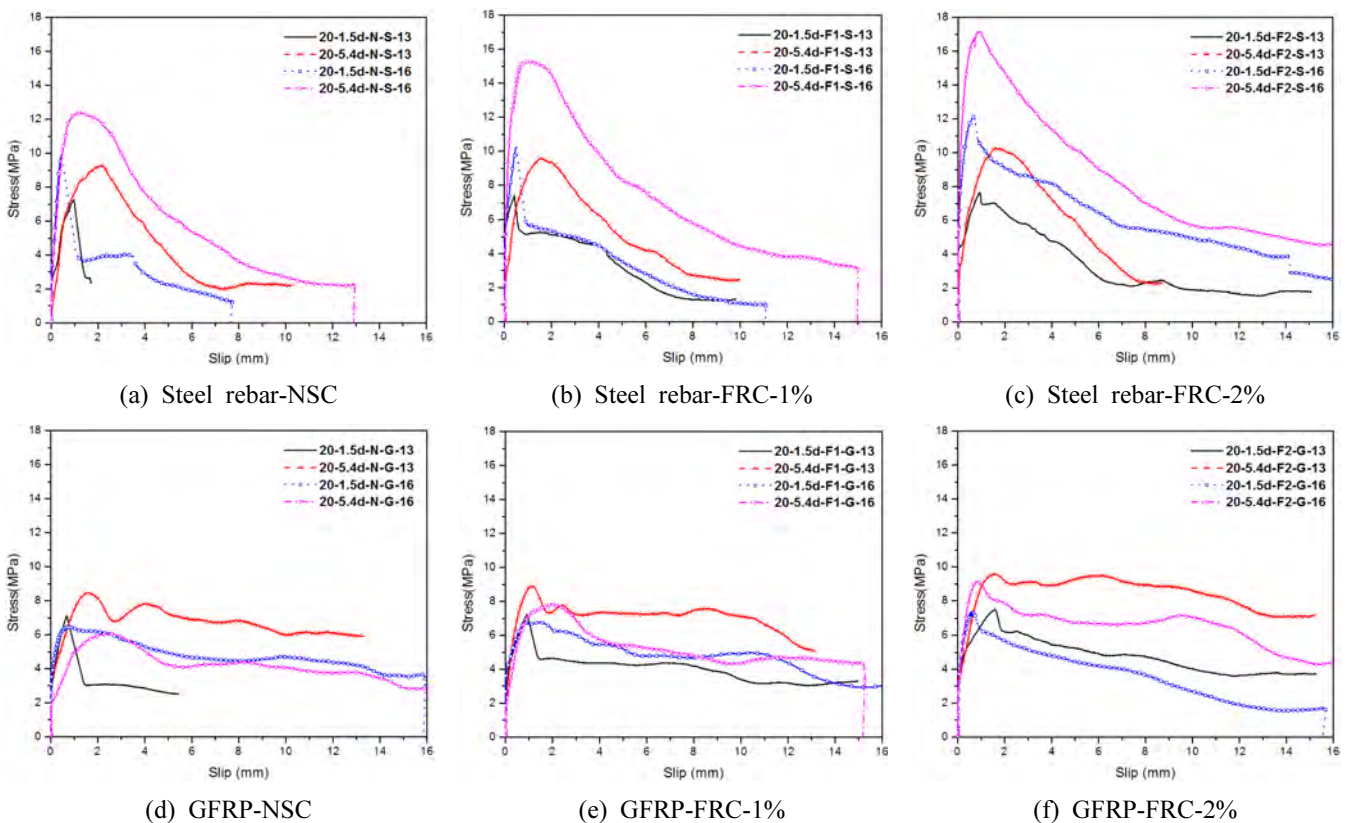


Fig. 10 The relationship of bond stress-slip for type of bar

### 3.5 콘크리트 압축강도의 영향

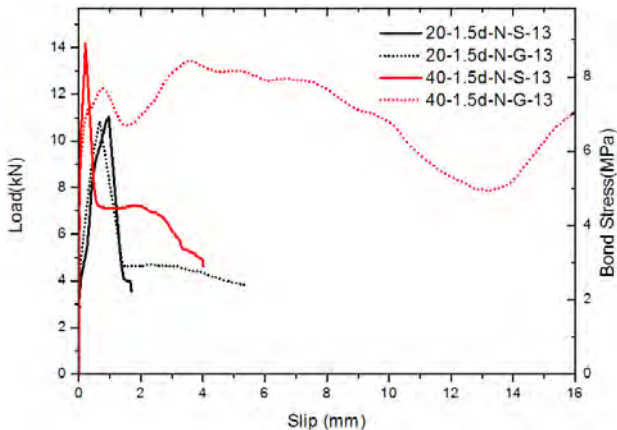
부착강도 발현에 대한 압축강도의 영향을 평가하기 위해 압축강도가 다르며 쪼갬 파괴가 유발될 것으로 판단되는 실험체들을 대상으로 비교 평가가 수행되었다. 강섬유의 보강 정도에 따라 철근 및 GFRP에 대한 영향을 Fig. 11에 나타내었다. 강섬유가 보강되지 않은 경우인 Fig. 11(a)로부터 고강도 콘크리트 사용시 초기 강성의 증가를 기대할 수 있으며 매트릭스의 인장강도 증가에 따

른 균열 발생 시점의 지연을 확인할 수 있었다. 저강도일 경우 GFRP와 철근의 거동에 큰 차이가 없는 것으로 나타났으나, 고강도 콘크리트가 사용될 경우 GFRP의 표면 파괴를 발생시켜 뽀뽀 함 파괴가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 강섬유의 보강효과는 보통강도 콘크리트와 유사한 형태의 증가 경향을 나타내었다. 1%의 부피비로 혼입된 콘크리트가 사용되었을 경우 부착강도의 증가는 크게 나타나지 않았다. 다만 균열 발생 및 최대 부착응력 발현 이후 잔류응력의 크기가 섬유가 보강되어 있지 않은 경우보다 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 2%의 섬유 혼입률이 적용되었을 경우, 보통강도 콘크리트가 사용된 경우에 비해 큰 폭의 강도 상승률을 확인할 수 있는 바, 콘크리트 강도의 증가가 부착강도의 증가에는 크게 기여하는 요소가 될 수 있는 것으로 판단할 수 있다.

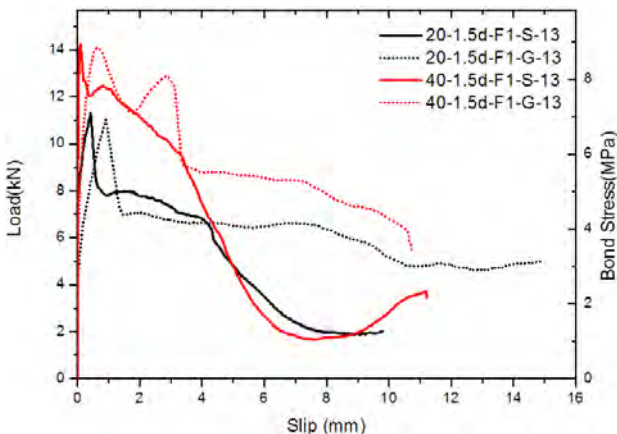
### 4. 결 론

최근 고성능 재료로 분류되고 있는 강섬유보강 콘크리트와 고내구성 재료로 분류되는 GFRP 보강근의 부착 거동에 대한 pull-out test를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

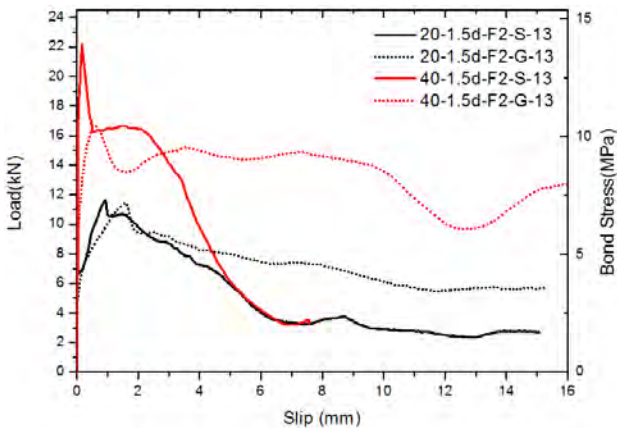
- 1) 강섬유의 보강효과는 부착파괴시의 최종 파괴 형태 및 전체적인 거동을 변화시키는 것으로 나타났다. 섬유가 보강되어 있지 않은 경우 초기 균열의 발생 이후 균열 폭 확장에 따른 최종 쪼개짐 파괴가 발생하였으나 섬유로 보강된 경우 균열폭이 작게 유지됨을 확인할 수 있었으며 GFRP 보강근이 사용된 경우 균열이 분산됨을 확인할 수 있었다.
- 2) 피복두께가 작은 경우 쪼개짐 파괴가 극명하게 나타났으나 강섬유의 보강효과에 의해 쪼개짐 파괴가 지연되어 나타나며 최대 부착응력의 발현 이후 연화구간에서 강도 감소 비율이 작아짐을 확인할 수 있었다. 이는 계면에서의 파괴가 더 많이 발생하는 GFRP 보강근의 부착응력-슬립 관계의 거동 변화에 대해서는 영향을 크게 미치지 못함을 알 수 있다.
- 3) 강섬유로 보강되지 않은 매트릭스가 사용되었을 때에는 철근이 사용된 경우 보강근의 직경이 커짐에 따라 더 큰 부착응력을 발생시킬 수 있는 것으로 나타났으며 GFRP의 경우 보강근의 직경에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 강섬유의 혼입량이 커짐에 따라 GFRP 보강근과 매트릭스 사이의 부착응력은 보강근 직경이 커짐에 따라 증가하는 경향을 보임을 확인할 수 있었다.
- 4) 높은 부착강도는 콘크리트의 압축강도 증가로 인한 균열 발생 시점의 지연을 통해 발현시킬 수 있다. 그러나 고강도 파괴 직전까지 흡수된 높은 에너지량의 급작스러운 해방에 의한 취성 파괴를 막기 위해서는 강섬유를 통한 균열확대 현상을 지연시켜주어야 할 필요가 있다.



(a) NSC-HSC (D13)



(b) NSC-HSC-FRC-1% (D13)



(c) NSC-HSC-FRC-2% (D13)

Fig. 11 The relationship of bond stress-slip for type of concrete



## 참고문헌

1. Benmokrane, B., Chaallal, O., and Masmoudi, R., "Flexural Response of Concrete Beams Reinforced with FRP Reinforcing Bars," *ACI Structural Journal*, Vol. 93, No. 1, 1996, pp. 46-55.
2. American Concrete Institute, "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars," ACI 440.1R-01, 2001, pp. 440.1R-16-17.
3. Ha, S. S. and Yoon, J. S., "Comparison of Development Length Equation of Bottom and Top GFRP Bars with Splitting Failure," *Journal of KIC*, Vol. 9, No. 6, 2009, pp. 141-149.
4. Park, C. G., Won, J. P., and Kang, J. W., "Recommendations of Environmental Reduction Factor of FRP Rebar for Durability Design of Concrete Structure," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 16, No. 4, 2004, pp. 529-539.
5. Li, V. C., "Engineered Cementitious Composites (ECC)-Tailored Composites Through Micromechanical Modeling," *Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future*, Canadian Society for Civil Engineering, pp. 64-97.
6. ACI Report 440H, *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars*, American Concrete Institute Committee 440, 2000, pp. 10-30.
7. Won, J. P., Park, C. G., Kim, H. H., Lee, S. W., and Won, C., "Bond Behavior of FRP Reinforcing Bars in High-Strength Steel Fibre-Reinforced Concrete," *Polymers & Polymer Composites*, Vol. 15, No. 7, 2007, pp. 569-578.
8. Park, J. S., Yoo, Y. J., Park, Y. H., and Kim, G. W., "An Experimental Study on the Bond Characteristics of GFRP Rebars with Bond Length," *Proceeding of KSCE*, Vol. 10, No. 10, 2007, pp. 2326-2329.
9. Korean Agency for Technology and Standard, *Test Method for Comparing Concrete on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel (KS F2441)*, 2010, pp. 1-12.
10. Soroushian, P., Mirza, F., and Alhozaimy, A., "Bonding of Confined Steel Fiber Reinforced Concrete to Deformed Bar," *ACI Material Journal*, Vol. 91, No. 2, 1994, pp. 141-148.
11. CEB-FIP, *fib Model Code 2010*, First Complete Draft Volume 1, fib Bulletins 55, 2010, 318 pp.

**요약** 이 논문은 강섬유보강콘크리트와 GFRP (glass fiber reinforced polymer)사이의 부착 특성을 조사하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 실험 주요 변수로는 보강근 지름, 섬유혼입량, 피복두께 및 콘크리트의 압축강도를 설정하였다. 부착파괴는 주로 콘크리트 피복에서의 쪼갬으로 인하여 유발되며, 이러한 콘크리트의 쪼갬파괴는 보강근과 콘크리트 사이의 변형 차이로 유발되는 인장력때문에 발생한다. 따라서, 보강근과 콘크리트 사이의 부착파괴를 방지하기 위하여, 콘크리트 피복부위의 인장강도를 향상시켜야 한다. 실험결과를 살펴보면, 섬유혼입량 증가는 부착강도를 크게 향상시키고 있으며, 피복두께는 최종 파괴모드를 변화시킴을 확인할 수 있었다. 보강근의 지름 또한 최종 파괴모드를 변화시킴을 확인할 수 있었다. 일반적으로 보강근의 지름은 부착 특성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으나, 섬유혼입량은 부착특성에 큰 영향이 없는 것으로 알려져 있다. 콘크리트 압축강도의 증가는 보강근과 콘크리트 사이의 부착강도를 증가시켰으며, 이는 압축강도의 증가가 직접적으로 인장강도의 증가를 유발하기 때문이라고 판단된다.

**핵심용어** : 강섬유, 콘크리트 압축강도, 피복 두께, 철근의 지름, GFRP 보강근, 부착 특성