섬유보강 콘크리트(ECC)와 GFRP 보강근의 부착 특성

최윤철¹⁾ · 박금성²⁾ · 최창식³⁾ · 최현기^{3)*}

¹⁾청운대학교 건축설비소방학과 ²⁾한국건설기술연구원 건축도시연구본부 ³⁾한양대학교 건축공학부

Bond Properties of GFRP Rebar in Fiber Reinforced Concrete (Engineered Cementitious Composite)

Yun-Cheul Choi,¹⁾ Keum-Sung Park,²⁾ Chang-Sik Choi,³⁾ and Hyun-Ki Choi^{3)*}

¹⁾Dept. of Architectural Environmental Engineering and Building Service, ChungWoon Univ., Hongseong 350-701, Korea

²⁾Korea Institute of Construction Technology, Goyang, 411-712, Korea

³⁾Dept. of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

ABSTRACT An experimental investigations on the bond-slip properties of the steel and Glass Fiber Reinforced Polymer(GFRP) bars in engineered cementitious composite (ECC) with Polyvinyl Alcohol (PVA) fibers are presented. Total of 8 beam specimens prepared according to the Rilem procedures with 2% of PVA and PE fiber volume percentage and steel and GFRP reinforcements significantly changed the failure mechanism and slightly improved bond strength. The main objective of the tests was to evaluate the load versus displacement and load versus slip behaviors and the bond strength for the following parameters: concrete type (normal and fiber concrete) and bar diameter (10 and 13 mm). The study results showed that ordinary concrete and ECC specimens showed similar behavior for steel reinforced specimen. However, GFRP reinforced specimen showed different behavior that the steel specimen. The code analytical results showed more accuracy compared to the experimental results as expected in conservative code provisions. Based on the obtained results, it is safe to conclude that the new parameters need to be adopted to ensure safe usage of ECC for construction applications.

Keywords : bond strength, engineered cementitious composite, GFRP reinforcing bar, bond-slip, bond strength

1. 서 론

기존 콘크리트 구조물은 콘크리트가 가진 부족한 인장 강도에 대한 보강 방안으로 철근을 보강근으로 사용하였다. 그러나 철근을 보강근으로 사용한 콘크리트 구조물은 노후화 특히 콘크리트 보강재로 사용된 철근의 부식은 철근유효단면의 손실로 인한 내력의 감소, 철근마디의 손상에 의한 부착력의 저하를 발생시키며, 철근콘크리트 구조물의 내구수명을 현저히 저하시켜 유지보수비용의 증가를 가져온다. 특히, 해안에 위치한 구조물이나 지하구조물과 같이 수분 및 염화물의 영향이 큰 구조물의 경우에는 해수 혹은 화학물질 등의 침투로 인하여 철근의 부식이 쉽게 발생할 수 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 피복두께의 증가, 고성능 콘크리트의 사용, 에폭시코팅철근의 사용 등이 알려졌으나, 이는 철근부식에 대한 완벽한 대안은 되지 못하고 있다. 최근 철근 부

식문제를 해결하기 위해 새로운 대안으로 대두되고 있는 것이 FRP(fiber reinforced polymer) 복합재료를 사용하는 것이다.¹⁻⁴⁾ FRP 보강재로는 유리섬유, 아라미드섬유가 현재 널리 사용되고 있으며 큰 인장강도를 갖는 FRP bar이 철근을 대체하기 위해서는 콘크리트와 보강근사이의 계면영역에서 충분한 부착강도 및 부착성능이 발휘되어야 한다. FRP bar의 장점인 큰 인장성능을 발휘하기 위해서는 콘크리트와 FRP bar사이의 부착강도가 매우 중요하다.⁵⁻⁷⁾ 그러나 FRP bar의 특성상 심부 FRP bar과 부착성능을 증가시키기 위하여 형성된 FRP bar의 외부표면이 일체거동을 하지 않고 분리되어 충분한 부착성능을 발휘하지 못하는 경우가 있다.^{8,9)} FRP bar의 낮은 부착강도는 섬유보강근 표면을 규사로 코팅하거나 폴리머 수지 혹은 섬유를 사용하여 리브 형태를 만들어 사용한다. 그러나 이러한 방법은 FRP bar의 부착성능을 증가시키나 리브가 콘크리트에 썩기작용을 하기 때문에 할렬 균열에 의하여 파괴되는 거동을 보여주고 있다. 이에 최근에는 섬유 보강근의 할렬 균열 방지를 통한 부착성능 향상을 위해 섬유보강 콘크리트를 사용한다.^{6,10)}

콘크리트에 섬유를 보강함으로써 콘크리트와 GFRP bar

*Corresponding author E-mail: chk7796@naver.com

Received September 15, 2011, Revised November 2, 2011,

Accepted November 2, 2011

©2011 by Korea Concrete Institute

와의 부착성능 향상, 균열 성장의 억제, 파괴 후 연성의 증가는 ECC(engineered cementitious composite)를 사용하여 보다 효과적인 결과를 얻을 수 있다. ECC로 알려진 고인성 섬유 복합 모르타르는 Li¹¹⁾ 등이 제안하였으며, 섬유, 계면영역 및 매트릭스에서의 마이크로역학을 기반으로 하여 모르타르에 2%이내의 합성섬유를 혼입함으로써, 기존 콘크리트 인장변형률에 비해 수백배의 성능 향상이 가능한 고인성 재료이다.⁷⁾ ECC와 GFRP bar를 사용한 구조부재가 그 기능을 발휘하기 위해서는 GFRP bar와 ECC가 일체화 되어야 하며, 이를 위해서는 두 재료 사이의 적절한 부착응력이 확보되어야 한다. 따라서 구조 부재에 적극적으로 활용하기 위해서는 두 재료의 휨 및 전단 성능에 대한 폭넓은 검증뿐만 아니라 부착 거동에 대한 평가가 요구되고 있다.

이 연구에서는 ECC에 섬유의 표면을 친수성으로 처리한 PVA와 PE 섬유를 적용하여 철근 및 GFRP bar의 부착강도, 균열 성장 억제 및 파괴면에서의 보강섬유의 효과에 대하여 평가를 하였다.

2. 실험 계획

2.1 실험 재료

이 연구에서는 1종 포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 비중 2.6, 조립률 2.7인 강모래를 사용하였다. 굵은 골재 최대치수는 13 mm, 비중 2.44인 부순 골재를 사용하였다. 실험에 사용된 PVA 섬유는 길이 6~8 mm, 지름 39 μm , 인장강도 1,700 MPa, 탄성계수가 37 GPa인 일본 K사에서 생산하는 resin-bundle chopped PVA fiber를 사용하였다. 또한, 이 연구에 사용된 GFRP bar는 국내에서 제작된 D13 GFRP bar를 사용하였으며 보강근과 콘크리트 간의 부착을 증가시키기 위해 섬유를 나선형으로 외부에 추가로 보강된 제품이다.¹²⁾ 보강근은 직경 9 mm와 12.7 mm로, 유리섬유 함유량 70%, 비중 2.0, 파괴강도 741 GPa, 탄성계수 49.3 GPa이며, 보강근 주부재 표면에 섬유를 나선형으로 부착하여 부착강도를 증대시킨 보강근이다. 철근은 직경 10 mm, 13 mm로, 항복강도 450 MPa, 475 MPa, 인장강도 560 MPa, 580 MPa, 탄성계수 200 GPa인 이형철근을 사용하였다. 실험체에 사용된 재료의 물리적 특성은 Figs. 1, 2 및 Tables 1, 2, 3에 나타내었다.

2.2 배합설계 및 실험체 특성

현재 국내에서 제작 사용되는 ECC의 경우 대부분 건물의 보수 및 보강용으로 사용되며 이는 시공의 편의상

Fig. 1 Photo of GFRP rebar used in this study

Fig. 2 PVA fibers for ECC

뿔칠용으로 개량되어 사용되고 있다. 그러나 이 연구의 목적상 뿔칠용이 아닌 타설용 ECC 적용을 위해 섬유 혼입량 및 섬유의 분산제 등을 이용하여 Fig. 4와 같이 플로우 테스트 50정도로 별도의 ECC를 배합 설계하였다.

이 연구에서는 ECC로 보강된 철근 및 GFRP bar의 부착성능 및 파괴 메커니즘의 평가를 위해 PVA 및 PE 섬유가 2% 함유된 ECC를 Table 3과 같은 배합비로 제작하였다. 콘크리트는 레미콘 공장으로부터 보통강도 콘크리트를 주문하여 실험체를 제작하였으며 휨 실험 수행시 콘크리트와 ECC의 압축강도는 33~36.0 MPa로 나타났다.

GFRP bar과 ECC와의 부착 특성 평가를 위해, 실제 구

Table 2 Mechanical properties of PVA fiber

Property	PVA fiber
Density (g/mm^3)	1.3
Length (mm)	6~8
Diameter (μm)	39
Tensile strength (MPa)	1,700
Young's modulus (GPa)	29.4
Elongation (%)	3~113
Alkali resistance (-)	High

Table 1 Mechanical properties of GFRP bars

Index	Nominal diameter (mm)	Cross-section area (mm^2)	Design tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Design rupture strain (%)
GFRP-Spiral (Korea)	12.7	127	741	49.3	1.5

Table 3 Mix proportion and compressive strength of engineered cementitious composite (ECC)

Mix type	W/C (%)	Fiber volume fraction (%)	Unit materials contents (kg/m ³)					Mean compressive strength (MPa)
			Cement	Silica	Fiber	MC	Admixture	
PVA	45	1.5 (PVA-long fiber) + 0.5(PE-short fiber)	938	37	12	524.67	Viscosity agent, super plasticizer, thickening agent	35.2
PE				5	9			

Table 4 Specimen nomenclature

Specimen	Concrete type	Bar type	Design concrete compressive strength (MPa)
Con-S10-Con	Normal concrete	Steel D10	35
ECC-S10-ECC	ECC	Steel D10	
Con-F10-Con	Normal concrete	GFRP bar D10	
ECC-F10-ECC	ECC	GFRP bar D10	
Con-S13-Con	Normal concrete	Steel D13	
ECC-S10-ECC	ECC	Steel D13	
Con-F13-Con	Normal concrete	GFRP bar D13	
ECC-F13-ECC	ECC	GFRP bar D13	

조부재와 동일한 조건을 만족시켜 철근의 부착성능을 평가한 Rilem¹³⁾의 보 실험체를 이용하였다. 부착 실험용 보 제작을 위해 보 하부에 하나의 철근 및 GFRP bar를 넣고 ECC를 타설하였으며, 철근과 ECC의 정착구간은 보강근 직경의 5배로 결정하였다. 비부착 구간은 직경 30 mm의 플라스틱관을 사용하였으며 플라스틱관의 중앙에 보강근을 위치시키기 위해 플라스틱 뚜껑을 제작하여 중앙부에 정착시켰다. 실험체 일람 및 채원은 Fig. 3 및 Table 4와 같다. 실험체 가력은 5,000 kN의 용량의 변위를 조절할 수 있는 UTM을 이용하였으며, 하중 재하 속도는 2 mm/min로 하였다, 실험체 설치 상황은 Fig. 3과 같다.

3. 실험 결과

3.1 압축강도

GFRP bar의 부착강도 향상을 위해 사용된 섬유보강 콘크리트에서 섬유의 혼입에 따른 압축강도의 영향을 평가하기 위해 KS F 2405에 따라 압축강도시험을 실시하였다. 압축강도를 평가하기 위해 원주형 공시체(100 mm × 200 mm)를 사용하였으며 총 25개의 공시체를 제작하여 실온(24°C, 상대습도 50%)에서 24시간 초기 양생하였다. 1일 경과 후 공시체를 탈형 하였으며 24°C인 수중에서

Fig. 3 Test specimen details and set-up

Fig. 4 Flow test (ECC)

28일간 양생 하였다.

압축강도 시험 결과 섬유혼입 유무에 따른 압축강도 변화는 없었으며, 타설용 ECC 제작을 위해 사용된 혼화제(유동화제)에 의한 압축강도 감소 효과가 나타났으나 그 크기는 매우 작게 나타났다.

3.2 부착 특성

3.2.1 부착응력과 슬립과의 관계

일반적으로 철근과 콘크리트 사이의 부착 거동은 다음과 같은 형태로 일어난다. 철근과 콘크리트 사이의 상대 위치에 차이가 발생하며 철근의 리브 위치로부터 콘크리트에 미세 균열이 발생한다. 이후 리브 상대편의 콘크리트에 압괴가 일어나기 시작하며 미세 균열의 균열폭이 확대되기 시작하며 이후 철근의 리브 사이에 있는 콘크리트의 상실과 함께 파괴가 진전된다.¹⁴⁾ 이는 slip-bond stress 관계로 나타낼 수 있다. 초기 미세 균열의 발전까지는 강성의 저하 없이 직선 형태로 응력의 크기가 증가하게 되며 균열 발생 이후 강성의 상실이 발생한다. 최대 응력의 발생 이후에는 콘크리트에 발생한 큰 균열 폭의 열림에 따른 연화 현상으로 인해 응력 저하 현상이 비선형적으로 나타나게 된다. 이 연구의 주 목적은 ECC 내의 섬유가 가교작용을 하여 균열폭의 확대를 막아 부착 응력이 유지되는 것을 확인하는데에 있다.

이 연구에서 계획된 GFRP-ECC 부착 실험에 대한 결과가 Fig. 5에 나타나있다. 섬유를 보강하지 않은 경우 일반 콘크리트에서 나타난 응력-슬립 관계는 전술한 바와 유사한 거동을 하고 있었다. ECC와 철근 사이에 나타난 응력-슬립 관계는 강성의 저하 시점 및 최대 응력, 최대 응력 발현 이후의 응력지지 능력에 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. ECC의 주요 개발 컨셉에서 드러나는 바와 같이 PE가 적절하게 미세 균열에 가교 작용을 하였으며 PVA가 확장되는 균열 사이에서 가교 작용을 하여 나타난 결과로 판단된다. 최대 응력의 발현은 ECC의 인장 응력 발현 능력이 보통 콘크리트에 비해 크게 나타나기 때문으로 판단된다.

부착응력은 실험 방법이 Rilem¹³⁾의 기준을 따랐기 때

(a) D10- steel reinforcement

(b) D10 - GFRP reinforcement

(c) D13 - steel reinforcement

(d) D13 - GFRP reinforcement

Fig. 5 Bond stress-slip relation

문에 다음과 같은 식을 통해 계산하였다.

$$\tau = \frac{\sigma_s}{40} \quad (1)$$

$$\sigma_s = k \frac{P}{A_s} \quad (2)$$

여기서, 식 (2)에 도입된 계수 “k”는 시험 대상이 되는 보 강근의 직경을 통해 결정된다. 직경이 16 mm 미만인 경우 1.25가 사용되며, 16 mm 이상인 경우 1.50을 사용한다.

위의 식을 사용하여 산정한 부착응력과 슬립과의 관계는 Fig. 5에 나타내었다. 철근에 대한 ECC의 부착력 증진 효과는 Fig. 5(a)에 나타나 있다. 초기 강성은 두 경우가 비슷하게 나타났으나 미세 균열이 발생 이후 콘크리트 실험체의 강성 감소가 ECC보다 크게 일어남을 통해 ECC의 미세 균열 발생시 가교작용 효과를 확인할 수 있었다. 이후 최대 응력의 발휘 능력도 큰 차이가 아니지만 ECC 실험체의 응력이 크게 나타나 ECC의 인장 강도 증진 효과 역시 확인할 수 있었다. 최대 응력의 발현 이후 유사한 형태로 하중 감소 현상이 발생하였으나 ECC 실험체의 경우 더 큰 응력에 저항할 수 있었다.

10 mm 직경을 가진 GFRP가 사용된 시험 결과는 Fig. 5(b)에 나타내었다. 초기 거동 및 강성 감소 구간에서는 철근이 사용된 경우와 GFRP는 물리적인 미끄럼 저항 기구가 철근의 리브와 같은 강성을 가지고 있지 못하기 때문에 콘크리트 실험체의 경우 미끄럼 파괴가 일어났다. 반면에 ECC는 초기 균열의 생성을 제어해주는 역할을 하여 일반 철근의 미끄럼 현상과 유사한 결과가 나타났다.

Fig. 5(c), (d)에 나타난 바와 같이, 보강근의 직경이 커졌을 경우 부착 응력 자체의 차이는 나타나지만 일반적인 부착응력-슬립 관계는 유사하게 나타났다.

3.2.2 평균 부착 응력

Rilem¹³⁾ 따르면, 평균 부착 응력은 미끄럼이 0.01 mm($\tau_{0.01}$), 0.1 mm($\tau_{0.1}$), 1.0 mm($\tau_{1.0}$)일 경우의 응력에 대한 평균값으로 정의된다.

$$\tau_m = \frac{\tau_{0.01} + \tau_{0.1} + \tau_{1.0}}{3} \quad (3)$$

식 (3)에 표현되는 평균 응력의 개념에 대한 실험 결과를 Table 5에 정리하여 나타내었다. Rilem standard

method에서 정하고 있는 기준을 사용하여 평가한 결과 ECC를 사용한 경우 콘크리트를 사용한 경우에 비하여, 철근을 사용할 때의 평균 부착 강도는 1.2배, GFRP bar를 사용한 경우의 평균 부착 강도는 평균적으로 1.16배 크게 나타났다. 이를 통해, ECC와 GFRP bar 사이에서 발현되는 부착 강도를 평가할 경우 콘크리트-GFRP bar에서 나타난 특성값에 반영하여 보다 정확한 예측이 가능하도록 할 수 있다. 특히 GFRP에 대한 ECC의 부착강도 증진에 있어서, GFRP bar의 직경이 커짐에 따라 그 증진 비율이 감소함을 알 수 있었다. 이는 GFRP bar의 직경이 커짐에 따른 리브의 상대적 높이가 작아졌기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 최대부착응력의 크기는 평균 부착응력과 같은 뚜렷한 변화 경향을 보이지 않고 있음이 실험 결과로 나타났다. 따라서, 이 시험을 통해 부착 성능을 평가할 경우 강도의 지표로는 평균 부착 응력을 통해 사용해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 6에 Table 5에 산정되어 있는 경우에 있어 슬립량과 부착 응력에 대한 관계를 평균 응력 및 최대 응력으로 분류하여 나타내었다. 콘크리트의 경우 GFRP의 사용 여부 및 직경에 따라 슬립량에 큰 차이가 나타났으나 ECC의 경우 평균 응력 및 최대응력 모두에 대하여 콘크리트에 비해 안정된 값을 보이고 있었다. 이는 Fig. 5에

Fig. 6 Bond strength versus slip distribution

Table 5 Test results

Specimens	$\tau_{0.01}$ (MPa)	$\tau_{0.1}$ (MPa)	$\tau_{1.0}$ (MPa)	τ_m (MPa)	τ_u (MPa)	s_u (mm)
Con-S10-Con	1.76	6.17	11.16	6.36	13.93	2.53
ECC-S10-ECC	1.62	6.57	14.59	7.59	14.73	1.32
Con-F10-Con	0.89	5.83	12.00	6.24	11.80	1.26
ECC-F10-ECC	1.04	8.88	12.90	7.60	12.06	1.28
Con-S13-Con	0.53	6.78	11.29	6.20	12.16	1.93
ECC-S13-ECC	0.78	7.65	13.83	7.42	14.10	1.44
Con-F13-Con	0.57	5.33	11.08	5.66	12.16	1.14
ECC-F13-ECC	0.79	6.31	11.70	6.27	11.95	1.17

$\tau_{0.01}$: bond stress at 0.01 mm slippage, $\tau_{0.1}$: bond stress at 0.1 mm slippage, $\tau_{1.0}$: bond stress at 1.0 mm slippage, τ_m : mean bond stress, τ_u : peak stress, s_u : slippages at peak stress

나타난 부착응력-슬립 관계에서 나타난 바와 같은 균열 발생 이후의 강성 저하가 ECC에서는 매우 효과적으로 저항되고 있기 때문인 것으로 판단된다.

또한 ECC를 사용한 실험체의 경우, GFRP bar와 철근에 관계없이 부착 응력과 슬립량 모두 유사한 값으로 나타나고 있는데 이를 통해 ECC를 사용할 경우 GFRP bar의 부착 강도를 충분히 발현시킬 수 있어, 정착 길이의 감소와 같은 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2.3 부착 강도의 평가

보강근과 콘크리트 사이의 부착특성은 정착길이를 결정하는 주요 요소 중 하나이다. 이는 기본 정착 길이로 표현되며 평형 조건을 통해 결정할 수 있다.

GFRP bar와 ECC와 같은 일반적인 구조요소들과는 다른 특성을 가진 건축 재료는 사용하기에 앞서 정착길이를 산정하기 위한 별도의 과정을 거쳐야 할 필요가 있다. 응력이 일정한 크기로 작용할 때 보강근은 표면에 일정하게 분포하는 부착응력에 의해 저항하는 것으로 가정한다. 따라서 다음 식이 유도될 수 있다.

$$\tau \pi d_b l_{df} = A_{rebar} f_{fu \text{ or } y} \quad (4)$$

여기서, d_b 는 보강근의 직경, l_{df} : 문힘 길이(정착 길이), $f_{fu \text{ or } y}$: 보강근의 설계 강도, A_{rebar} : 보강근의 단면적이다. 식 (4)를 통해 다음과 같은 정착길이 산정식을 구할 수 있다.

$$l_{df} = \frac{A_{rebar} f_{fu \text{ or } y}}{\pi d_b \tau} = \frac{d_b f_{fu \text{ or } y}}{4 \tau} \quad (5)$$

부착에 관련된 ACI 위원회인 ACI 440¹⁵⁾ 따르면 일반적인 부착 응력은 콘크리트의 인장 강도와 보강근의 직경 그리고 특정한 계수를 통해 결정할 수 있다. 이는 다음과 같이 표현된다.

$$\tau = K_1 \sqrt{f_{ck}} \quad (6)$$

여기서, f_{ck} : 콘크리트의 강도, K_1 : 계수(철근의 경우 9.5)이다. 식 (6)을 (5)에 대입하면,

$$l_{df} = K_2 \frac{d_b^2 f_{fu \text{ or } y}}{\sqrt{f_{ck}}} \quad (7)$$

가 되어 정착길이를 산정할 수 있다. 여기서 K_2 는 FRP bar의 특성을 반영하는 계수이며 여러 연구자들이 각자 다른 계수를 제안하고 있다. 최근에 이루어진 연구 중 Okelo와 Yuan¹⁶⁾에 의해 식 (6)은 다음과 같이 제안되었으며 이 값을 통해 부착에 대한 ECC의 효과를 비교하기로 한다.

Fig. 7 Comparison of bond stress

$$\tau = 9.5 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{d_b} \quad (\text{for steel reinforcement}) \quad (8)$$

$$\tau = 14.7 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{d_b} \quad (\text{for FRP bar}) \quad (9)$$

실험 결과와 식 (8), (9)를 통해 산정한 부착응력에 대한 비교 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

ACI 위원회에서 제시한 부착 강도 산정 방법을 철근이 사용된 경우 비교해 본 결과, 콘크리트가 사용되었을 경우 보수적으로 평가하고 있었으며, ECC와 같이 인장 강도가 높은 콘크리트가 사용될 경우 더 보수적인 결과가 나타났다. 반면 GFRP bar의 부착강도를 평가하기 위한 식 (9)는 연구자가 제안한 재료와 이 연구에서 사용된 실험체의 제작에 사용된 재료에서 차이가 있어 부착 강도를 과대평가 하고있었다. 또한 앞선 절에서 기술한 바와 같이 최대 강도를 통한 평가 방법은 설계상의 제한 사항 및 연구 결과의 부재 등으로 인해 구조물의 설계에는 사용하지 않는 것이 좋을 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 연구에서는 최근 사용량이 급증하고 있는 FRP bar의 부착 특성을 파악하기 위한 실험을 수행하였으며 이를 현재 사용되고 있는 평가 방안을 통해 검증하는 과정을 수행하였다.

기존에 사용하던 보통 강도 콘크리트를 사용할 경우 GFRP와 콘크리트 사이의 부착 강도는 기존의 철근을 사용할 때에 대비하여 낮게 나타나며 최대 강도 발현 이후의 거동에서 뿔힘 현상에 의한 하중지지 능력의 급격한 감소도 나타났다. 이에 대한 해결 방안의 일환으로 이 연구에서는 섬유 보강 콘크리트 중 하나인 ECC를 사용하여 실험을 수행하였으며 이에 대한 기존 연구 결과와의 비교를 통해 강도 산정법의 유효성을 평가하였다.

1) 실험 연구에 사용된 ECC는 fiber ball 현상이 일어나지 않았으며, 적절한 flow를 가지고 원활한 타설

이 이루어졌다.

- 2) 재료 시험 결과 섬유유 보강에 따른 압축강도의 증가 또는 감소 현상은 나타나지 않았으며 실험 결과 ECC에서는 인장 강도의 증진을 확인할 수 있었다.
- 3) 보강근의 리브에 의한 콘크리트 매트릭스의 미세균열의 발생에 따른 강성의 감소는 콘크리트가 사용된 모든 실험체에서 나타났으며, 최대 하중 경험 이후 나타나는 연화 현상도 나타났다. 반면 FRP bar의 경우 기존의 철근과는 달리 리브 부분의 강성이 낮았기 때문에 뿔힘 현상이 나타났다.
- 4) ECC를 사용할 경우 철근이 같이 사용된 실험체의 경우 부착강도가 근소한 차이이지만 상승하는 현상이 나타났다. 이는 ECC가 가진 높은 인장강도와 가교작용에 의한 것으로 판단된다.
- 5) 콘크리트를 매트릭스로 가진 GFRP bar 실험체에서와는 다르게 ECC를 매트릭스로 가진 GFRP bar 실험체에서는 뿔힘 현상이 나타나지 않았으며 철근이 사용된 실험체와 유사한 최대 하중 이후의 부착응력-미끄럼 관계가 관찰되었다.
- 6) ACI 위원회의 정착강도 평가 방법을 적용할 경우 매우 보수적인 평가를 하는 것으로 나타났으며, Pkelo의 연구 결과에 따라 평가할 경우 부착강도를 과대평가하는 것으로 나타났다. 따라서 ECC 및 더 넓은 범위의 GFRP bar가 사용된 실험체를 수집하여 회기분석을 수행할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이다(2011-0003588).

참고문헌

1. Pecce, M., Manfredi, G., and Cosenza, E., "Experimental Response and Code Models of GFRP RC Beams in Bending," *J. Composite Structures*, Issue 44, 2000, pp. 182~190.
2. Abdalla, H. A., "Evaluation of Deflection in Concrete Members Reinforced with Fibre Reinforced Polymer (FRP) Bars," *Composite Structures*, Vol. 56, Issue 1, 2002, pp. 63~71.
3. Benmokrane, B., Chaallal, O., and Masmoudi, R., "Flexural Response of Concrete Beams Reinforced with FRP Rein-

- forcing Bars," *Composite Structures*, Vol. 93, No. 1, 1996, pp. 46~55.
4. 신성우, 안중문, 한범석, 서대원, "FRP 보강근을 주근으로 사용한 콘크리트보의 보강비효과," 대한건축학회논문집, 22권, 2호, 2006, pp. 16~19.
5. 이정윤, 이종구, 김태영, 박지선, 박영환, "GFRP 보강근의 부착과괴면," 콘크리트학회 논문집, 20권, 3호, 2008, pp. 383~391.
6. 박찬기, 원종필, 차상선, "보강섬유의 표면처리에 따른 섬유보강 고강도콘크리트와 GFRP 보강근의 부착특성," 콘크리트학회 논문집, 21권, 3호, 2009, pp. 275~282.
7. 김병일, "철근 및 GFRP 보강근의 부착계면에서 할렬균열의 성장억제에 대한 ECC의 효과," 대한건축학회 논문집, 26권, 12호, pp. 133~140.
8. ACI Report 440H, *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars*, American Concrete Institute Committee 440, 2000, pp. 10~30.
9. Somboonsong, W., Harris, H. G., and Ko, K., "Ductile Hybrid Fibre Reinforced Plastic Reinforcing Bar for Concrete Structures: Design Methodology," *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 6, 1998, pp. 655~666.
10. 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.
11. Li, V. C. and Wu, H. C., "Conditions for Pseudo Strain-Hardening in Fiber Reinforced Brittle Matrix Composite," *Journal Applied Mechanics*, Vol. 45, No. 8, 1992, pp. 390~398.
12. 유영찬, 박지선, 유영준, 박영환, 김공환, "GFRP 보강근의 설계 인장강도 발현을 위한 적정 그림시스템 개발," 콘크리트학회 논문집, 17권, 6호, 2005, pp. 947~953.
13. Rilem-Fip-Ceb, "Bond Test for Reinforcing Steel: 1-Beam Test (7-II-28 D). 2-Pullout Test (7-II-128): Tentative Recommendations," *Materials and Structures*, Vol. 6, No. 32, 1973, pp. 96~105.
14. 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. 141~149.
15. American Concrete Institute (ACI), *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars*, ACI 440.1R-06, 2010, pp. 28~30.
16. Okelo, R. and Yuan, R. L., "Bond Strength of Fiber Reinforced Polymer Rebars in Normal Strength Concrete," *Journal of Composite Construction*, Vol. 9, No. 3, 2005, pp. 203~213.

요약 철근과 GFRP bar의 콘크리트 및 PVA가 사용된 ECC에서의 부착-미끄럼 관계를 실험을 통해 평가하였다. 총 8개의 최대하중 발현 이후 파괴 모드가 크게 변경되고 부착강도의 증진을 예상할 수 있는 PVA 및 PE가 2% 부피비로 혼입된 ECC로 제작된 RILEM 기준에 따른 실험체가 제작되었다. 이 연구의 목적은 ECC 및 GFRP가 사용되었을 경우 하중-변위 관계 및 부착응력-미끄럼 관계를 다음과 같은 변수에 따라 파악하는 것이다. 1) 콘크리트의 종류(보통 콘크리트, 섬유보강 콘크리트), 2) 보강근의 직경(10 mm, 13 mm) 실험 결과 콘크리트와 ECC는 철근에 대한 실험체는 유사한 거동을 하였지만 GFRP에 대해서는 서로 다른 거동을 보였다. 기존 연구로 제안된 평가 방법은 실험 결과와 유사한 값을 나타내었지만 부착강도를 과대평가하는 경향을 보였으며 설계기준으로도 사용되는 ACI 위원회 제안식은 보수적인 결과를 타나내었다.

핵심어 : 부착응력, 섬유복합체, GFRP bar, 부착-미끄럼, 부착 강도