

초고강도 콘크리트를 활용한 고온가열 이후의 탄소 보강근과 철근의 잔류 부착성능 평가

유선재¹, 이호진², 원천봉³, 윤영수^{4*}

Evaluation of Residual Bond Stress between Carbon-fiber Reinforced Polymer and Steel Rebar Using Ultra-High-Performance-Concrete after Elevated Temperature

Sun-Jae Yoo¹, Ho-Jin Lee², Tian-Feng Yuan³, Young-Soo Yoon^{4*}

Abstract: In this study, pull-out tests were conducted at room temperature, 150 °C and 250 °C to evaluate the residual bond strength of carbon fiber reinforcement polymer, CFRP after elevated temperature and deformed steel rebar of D10 and D13 were also evaluated after the high temperature heating for comparison. As a result of the experiment, the bond strength of the CFRP after 150 °C and 250 °C decreased by 9.94 % and 41 %, respectively. On the other hand, after thermal heating, both the steel rebar of D10 and D13 had a lower rate of reduction in bond strength than that of the CFRP. Also slip at the maximum bond strength also decreased after the heating for both the CFRP and the rebars. Through it, the correlation between the bond strength and the slip reduction due to thermal heating was confirmed and bond slip models were presented. Finally the experimental result was evaluated as relative bond strength to identify the residual bond performance of the CFRP and the rebar after the heating was confirmed by comparing with the existing test result of the bond strength after elevated temperature.

Keywords: Carbon fiber reinforced polymer, High temperature, Pull-out test, Residual strength

1. 서 론

콘크리트 내에 철근은 외부환경에 노출됨에 따라 부식이 진행되며, 이는 구조물의 성능 저하로 이어진다. 이에 많은 연구자들은 철근 대체재로 FRP (Fiber Reinforced Polymer) 보강근을 활용한 연구를 수행하였다(Benmokrane et al., 2002; Baena et al., 2009; Lee et al., 2008). 이 중에서 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)는 경량일 뿐만 아니라 부식에서 자유롭고 GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) 및 AFRP (Aramid Fiber Reinforced Polymer) 대비 높은 강도 및 탄성계수를 가져, 철근 대체재로 활용 가능성이 큰 것으로 평가되고 있다(ACI 440.1R-15, 2015; Okelo and Yuan 2005).

CFRP 보강근을 활용하기 위해 보강근과 콘크리트의 완전한 부착이 선행되어야 한다. CFRP는 높은 인장강도를 가져

부착실험 중 보강근의 조기 파괴를 방지할 수 있으며 GFRP 및 AFRP 대비 높은 부착 강도를 갖는다(Okelo et al., 2007).

하지만 CFRP는 섬유와 레진의 조합으로 제조되므로 열에 취약한 특징이 있다. 특히 철근과 달리 CFRP의 레진은 약 93~120 °C에서 녹기 시작하여 온도 증가에 따라 CFRP와 콘크리트의 부착 강도가 저하될 수 있다(Katz et al., 1999; Nigro et al., 2012). 또한, CFRP의 종방향 열팽창계수는 매우 작지만 횡방향 열팽창계수는 종방향 열팽창계수보다 8배 이상 큰 값을 갖는다(Table 1). 이러한 이유로 고온가열에 따라 CFRP는 부착성능이 저하될 수 있으며 이에 레진이 녹는점을 기준으로 이보다 높은 온도에서 CFRP의 잔류 부착성능 평가가 필요한 실정이다.

한편 현행 ACI 440.6M-08 (2008)에서는 CFRP의 부착 강

Table 1 Typical Coefficient of thermal expansion for reinforcing bars (ACI 440.1R-15)

Direction	CTE, (x 10 ⁻⁶ /°C)			
	Steel	GFRP	CFRP	Concrete
Longitudinal	11.7	6.0 to 10.0	-9.0 to 0.0	7.2 to 10.8
Transverse	11.7	21.0 to 23.0	74.0 to 104.0	7.2 to 10.8

¹정회원, 고려대학교, 건축사회환경공학부 박사과정

²정회원, 고려대학교, 건축사회환경공학부 석사과정

³정회원, 고려대학교, 건축사회환경공학부 연구교수

⁴정회원, 고려대학교, 고려대학교, 건축사회환경공학부 교수

*Corresponding author: ysyoon@korea.ac.kr

Korea University, Seoul, 02855, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2022년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2022년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

도를 9.6 MPa 이상 확보해야 한다고 규정하고 있다. 하지만 CFRP의 부착 강도는 철근 대비 낮을 뿐만 아니라 고온가열 이후 일반강도 콘크리트와 CFRP의 잔류 부착성능은 ACI 440.6M-08 (2008)에서 제시하는 기준을 만족하기 어려울 수 있다. 이에 본 연구에서는 고온가열 이후 CFRP 보강근의 잔류 부착 강도 확보를 위해 최근 개발된 No-Slump-High-Strength-High-Ductility-Concrete, NSHSDC를 활용하여(Yuan et al., 2019). CFRP 부착 시험체를 제작하였다. NSHSDC는 내부의 밀실한 구조를 갖고, 길이가 다른 강섬유(Steel Fiber)와 PE 섬유(Polyethylene Fiber)가 혼합된 배합으로 CFRP의 부착 강도를 향상시킬 수 있기 때문이다(Banthia and Gupta, 2004).

따라서 본 연구에서는 NSHSDC를 통한 상온에서 CFRP의 부착 강도를 평가하였으며 레진의 용융점을 고려하여 150 °C, 250 °C 가열 이후 손상된 CFRP의 잔류 부착 강도를 평가하였다. 또한 CFRP 보강근과의 비교를 위해 철근의 부착 강도와 잔류 부착 강도도 평가하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 목표는 고온가열 이후 CFRP의 잔류 부착력을 평가하는 것이다. 이를 위해 20 °C 및 150 °C, 250 °C 가열 이후 손상된 CFRP의 부착 강도를 평가하였으며, 부착성능 비교를

위해 동일한 온도에서 가열 이후 철근의 부착 강도를 평가하였다. 또한 CFRP와 철근의 부착 슬립 모델 및 부착 강도 산정식을 비교하였으며, 실험 데이터를 기존 데이터와 비교 및 분석하였다.

2.2 사용재료

본 연구에서 사용된 콘크리트의 배합은 120 MPa급의 초고강도 콘크리트이며 사용된 재료는 다음과 같다(Table 2).

시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트(비 표면적 3,492cm³/g, 밀도 3.15g/cm³)를 사용하였으며, 사용된 섬유는 강섬유 및 PE 섬유로(Fig. 1), 재료 물성은 Table 3과 같다. 또한 고성능 감수제(Super-Plasticizer, SP)를 2 % 이상 혼입하여, 콘크리트의 배합이 원활히 진행되도록 하였다. 사용된 철근 및 CFRP의 직경과 상세한 물리적 특성은 Table 4와 같다.

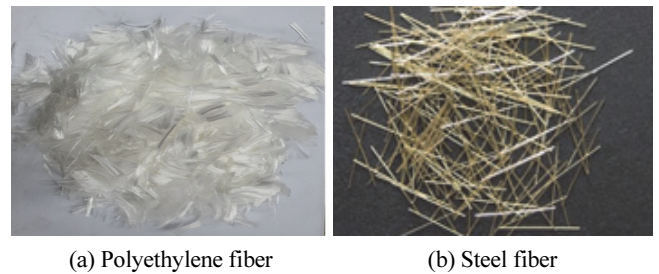


Fig. 1 Polyethylene and steel fiber

Table 2 Mixture proportions of concrete (by weight)

	W/B (%)	W	C	SS	S	F	SP (%)	Volume (%)	
								SF	PF
NSHSDC	21.5	0.215	1.00	1.10	0.25	0.30	2.4	1.0	0.5

*W/B: water to binder ratio; W: water; C: cement; SS : silica sand; S: silica fume; F: silica filler; SP: super plasticizer; SF: steel fiber; PF: polyethylene fiber

Table 3 Properties of straight steel fiber and polyethylene fiber

	Diameter, d_f	Length, l_f [mm]	Aspect ratio (l_f/d_f)	Density (g/cm^3)	Tensile strength [MPa]	Elastic modulus [GPa]
Steel fiber	0.2 mm	19.5	97.5	7.80	2,650	200
Polyethylene fiber	31 μm	12.0	387	0.97	2,900	100

Table 4 Properties of CFRP and steel rebar for pull-out specimens

	Type		d_f (mm)	A_s (mm ²)	F_y (MPa)	F_u (MPa)	ϵ_y (mm/mm)
	CFRP reinforcement	12	Sand-coated rebar	12	113.1	-	1416
Steel reinforcement	D10	Deformed bar	9.53	71.3	491	560.7	0.002455
Steel reinforcement	D13	Deformed bar	12.7	126.7	434	631.5	0.00217

2.3 시험체 제작

2.3.1 부착 시험체 제작

시험체의 제작은 ASTM C 234 (1991) 및 CSA S806-12 (2012)를 참조하여 제작하였다. 먼저 비부착 구간에 플라스틱 관을 삽입하여 비부착 구간의 콘크리트 부착을 방지하였으며, 철근의 경우 부착과괴 이전에 철근이 인장파괴 될 수 있는 점을 고려하여 철근의 매입 길이는 $2d_b$ 로 설정하였다(Kook et al., 2010; Yoo et al., 2014). 반면, CFRP의 매입 길이는 실제 보강근이 받는 응력을 철근이 받는 응력과 비교하여 CSA S806-12 (2012)의 실험방법에서 제안한 방법과 동일하게 $4d_b$ 로 설정하였다. 제작된 시편은 상온, 150 °C, 250 °C의 온도 변

Table 5 Test variables of pull-out test

Variable	Details	Notation
CFRP	No Heat Exposure	C-12-20
	Exposure to Temperature of 150 °C	C-12-150
	Exposure to Temperature of 250 °C	C-12-250
Steel	No Heat Exposure	S-10-20
	Exposure to Temperature of 150 °C	S-10-150
	Exposure to Temperature of 250 °C	S-10-250
	No Heat Exposure	S-13-20
	Exposure to Temperature of 250 °C	S-13-250

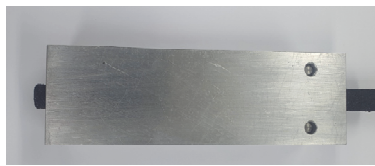


Fig. 2 Test grip for CFRP

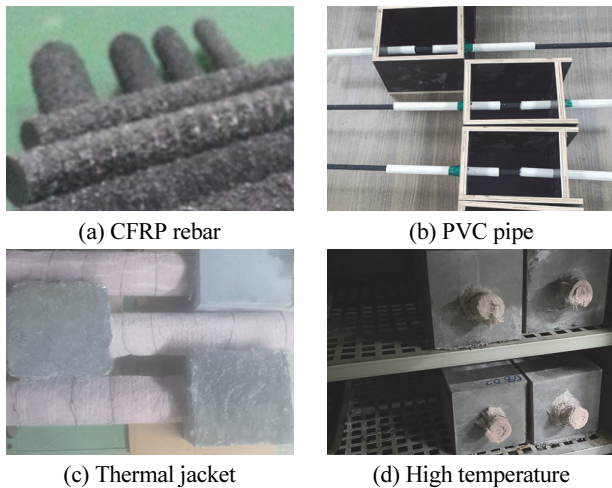


Fig. 3 Working process of pull-out test

수와 D10, D13 철근 그리고 직경 12mm의 CFRP 보강근으로 총 9개이다(Table 5). 시험체는 150mm x 150mm x 150mm의 정사각형 큐브이며 철근 및 보강근을 시험체 중앙에 배근하였다. 모든 변수는 각 3개씩 제작하였으며 하중 가력 시 보강근의 조기 파단을 고려하여 ASTM D 3916 (2002)에서 제시하는 특수그립을 제작하여 하중 가력 부분에 CFRP 보강근을 삽입하였다. 제작된 특수그립의 규격은 Fig. 2와 같으며 Fig. 3은 시공방법을 나타내고 있다.

2.3.2 전기로 가열

실험에 사용된 전기로(Furnace)는 가로 300mm, 높이 300mm 폭 2400mm 규격의 가열로이며, 가열방법은 ISO 834(1999)에서 제시하는 급속가열 조건에 따라 온도를 설정하였으며 (Fig. 4), 목표 온도 도달 후 2시간 동안 가열을 유지하여 CFRP 보강근 및 철근이 충분히 가열되도록 하였다. 노출된 CFRP 및 철근에는 단열재를 코팅하여 노출 구간에서 CFRP 및 철근의 손상을 방지하였다. 가열 이후 시험체를 꺼내어 상온에서 24시간 이상 자연 냉각시켰다.

2.4 실험방법

2.4.1 압축강도 및 휨 강도 실험

콘크리트의 압축강도는 ASTM C 39 (2007) 기준에 따라, 가력 용량 200t의 UTM $\phi 100 \times 200$ mm 원주형 공시체에 LVDT(Linear Variable Differential Transformer) 3개를 설치하여 평균 변형률을 측정하여, 탄성계수를 구하였다. 또한, 휨 인장강도는 ASTM C1609 (2012) 기준에 따라 측정하였으며, 100mm x 100mm x 400mm의 단면이다. 실험 장비로는 가력 용량 200t의 UTM을 사용하였으며 콘크리트의 압축강도 및 휨 인장강도는 Table 6과 같다.

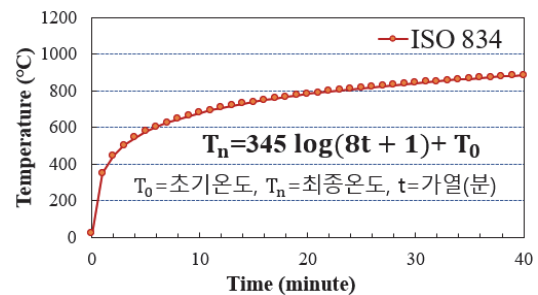


Fig. 4 ISO 834 curve

Table 6 Mechanical properties of concrete

Concrete	Compressive strength (MPa)	Flexural strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
NSHSDC	126.8	36.9	40.4

2.4.2 부착실험

제작된 시험체의 편심 방지를 위해 반구형 형태의 구좌 (Sphere Seat) 및 고무판을 설치하였고, 가력 용량 200t의 UTM 사용하였다. 하중 속도는 CSA S806-12 (2012) 기준을 참조하여 0.8mm/min로 설정하였다. 실험에 따른 변위를 측정하기 위해 자유단과 하중 가력단에 각각 2개의 LVDT를 설치하여 총 4개의 LVDT를 통해 발생한 슬립을 측정하였다. 실험 세팅은 Fig. 5와 같다.

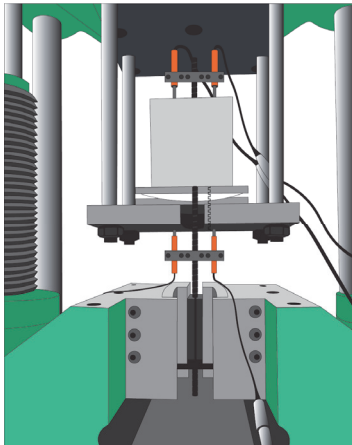


Fig. 5 Setup of pull-out test

3. 실험 결과 및 분석

3.1 부착 강도

가열 이후의 잔류 부착 강도는 Table 7과 같다. CFRP의 상온 및 150 °C, 250 °C 가열 이후 부착 강도는 각각 23.55, 21.21, 13.94 MPa이 나타났다. 150 °C, 250 °C 가열 이후의 잔류 부착

강도는 상온 대비 각각 90 %, 59 %로 철근 대비 큰 폭으로 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 고온가열 시 CFRP 표면의 레진 상태가 변화하게 되었지만, CFRP와 매트릭스 분자 간의 결합이 약화되어 부착 강도가 철근 대비 큰 폭으로 감소된 것으로 판단된다(Mouritz and Gibson, 2007; Ellis et al., 2018). 반면 S10-20에서는 최대부착 강도가 53.48 MPa이 나타난 반면 150 °C 가열 이후의 잔류 부착 강도는 상온 대비 약 9.89 % 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이는 PE 섬유가 녹게 되어 내부 공극의 생성으로 인한 현상으로 판단되며 하지만, 250 °C 가열 이후 잔류 부착 강도는 가장 높게 나타났으며 상온 대비 약 3 % 늘어난 것을 확인할 수 있다. 이는 실리카 섬유의 반응 활성화도로 인한 현상으로 선행연구에서는 90 °C에서 250 °C까지는 실리카 섬유의 반응의 활성화가 지속적으로 증가하는 것으로 보고하고 있으며 이에 따라 철근과 콘크리트의 부착 응력이 향상된 것으로 판단된다(Pokorny et al., 2020). S-13-20에서는 마찰면적 증가에 따라 철근의 항복이 발생하였으며 잔류 부착 강도는 S-13-150에서는 150 °C 가열 이후에 콘크리트와 철근의 부착력 감소로 인해 철근의 항복은 발생하지 않았으며 잔류 부착 강도가 60.21 MPa가 나타났다. 하지만 250 °C 가열 이후의 잔류 부착 강도는 S-10-250과 마찬가지로 가장 높게 나타났으며 상온 대비 약 6 % 증가한 수치로 부착 강도가 가장 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 D10 철근 대비 부착 강도 증가율이 10 % 이상 큰 값으로 추후 직경에 따른 잔류 부착 강도 평가가 필요할 것으로 판단된다. CFRP 및 철근 모두 자유단과 가력단에서 발생한 슬립은 가열 온도가 증가함에 따라 모두 줄어드는 경향을 보이는데, 이는 가열을 진행한 후의 초기 기울기 값이 상승한 것으로, 고온가열에 따른 최대부착 강도뿐만 아니라 초기 슬립 거동에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Table 7 Results of pull-out test

Specimens	Pull-out load		Free-end slip at max. load	Loaded slip at max. load	Normalized bond strength	Failure mode
	P_{max} [kN]	t_{max} [MPa]	s_m [mm]	s_m [mm]	t_{max}^* [MPa]	
C12-20	35.52	23.55	0.65	1.15	2.09	Pull-out
C12-150	31.98	21.21	0.15	2.83	1.84	Pull-out
C12-250	21.02	13.94	0.13	0.86	1.24	Pull-out
S10-20	30.5	53.48	1.55	3.62	4.75	Pull-out
S10-150	27.5	48.19	0.26	1.15	4.18	Pull-out
S10-250	31.52	55.24	0.69	0.82	4.92	Pull-out
S13-20	66.96	66.07	2.05	12.46	5.87	Steel yield / Pull-out
S13-150	61.02	60.21	0.49	4.01	5.30	Steel yield / Pull-out
S13-250	71.04	70.10	1.84	23.55	6.33	Steel yield / Pull-out

$$t_{max}^* = \frac{t_{max}}{\sqrt{f_c}}$$

3.2 부착 하중-미끄러짐 관계

Fig. 6은 실험에 따른 부착 하중과 자유단에서 발생한 슬립을 나타낸다. 철근 및 CFRP의 평균 부착 응력은 식 (1)과 같다.

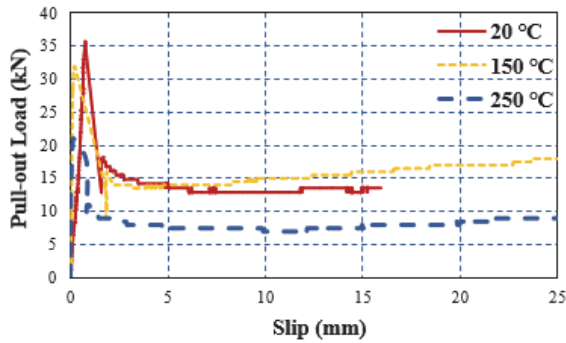
$$u = \frac{P}{\pi d_b l_d} \quad (1)$$

여기서, u 는 평균 부착 응력, P 는 최대부착 하중, d_b 는 CFRP 또는 이형 철근의 직경 그리고 l_d 는 매입 길이를 나타낸다. 가력단에서 발생한 슬립의 정밀한 계산은 아래의 식 (2)와 식 (3)을 통해 계산할 수 있다.

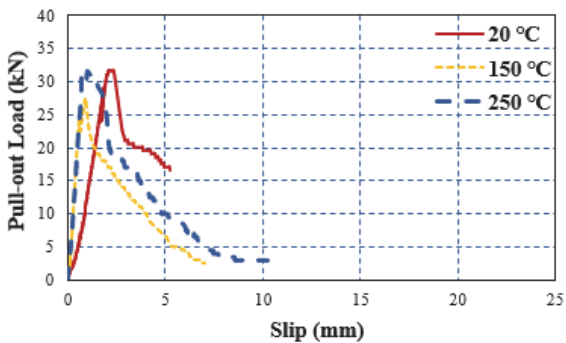
$$\delta_a = \delta_m - \delta_c \quad (2)$$

$$\delta_c = \frac{PL}{EA} \quad (3)$$

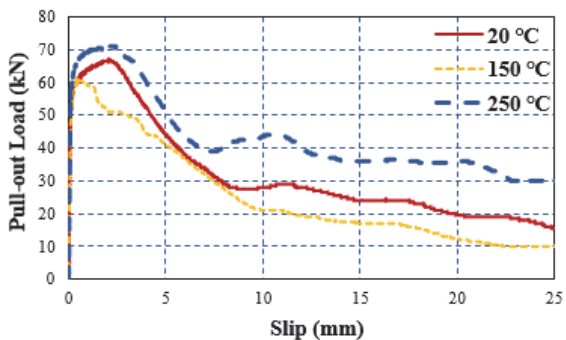
여기서, δ_m 는 가력단에서 발생한 슬립, δ_a 는 실제로 발생한 슬립, δ_c 는 탄성변형에 의한 슬립, P 는 최대부착 하중, L 은 문힘 길이부터 가력단 LVDT까지의 거리, E 는 이형 철근 및 CFRP의 탄성계수, A 는 이형 철근 및 CFRP의 단면적이다. 실험 결과 모든 시험에서는 초기에 하중증가에 따른 슬립이 거의 발생하지 않았다. 모든 시험체에서 하중단의 슬립은 자유단의 슬립보다 큰 값을 보이는데, 이는 하중이 가력단에서 시작하여



(a) CFRP series before and after heating



(b) D10 series before and after heating



(c) D13 series before and after heating

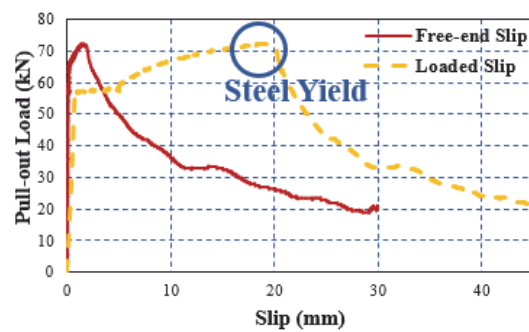


Fig. 6 Load-slip curves and failure modes of CFRP and steel rebar

점차 늘어나며 자유단으로 이동하면서 나타난 현상으로 기존의 연구와 일치하는 결과를 보인다(Lee et al., 2008). CFRP 보강근은 초기에 화학적 부착력에 의해 최대부착 하중까지 증가하였으며, 최대하중 시 발생한 슬립은 CFRP의 화학적 접착력에 의해 철근 대비 적게 발생한 것을 확인할 수 있다(Moon et al., 2006). 최대하중 이후에는 부착 응력이 급격히 감소한 후 슬립이 계속 발생하면서 잔류 부착 응력이 일정하게 유지되었다. 이때 발생한 CFRP의 잔류 부착 응력은 최대부착 응력 대비 약 60 %의 수치로 철근 대비 높게 나타났다. 면 20, S-10-150, S-10-250은 최대부착 하중까지 급격히 상승한 후 부착 응력의 급격히 감소와 함께 슬립이 발생하면서 잔류 응력 없이 뿔뿔히 파괴가 발생하였다. 하지만 S-13-20 및 S-13-250에서는 마찰면적의 증가에 따른 철근의 항복이 발생하였으며 가력단에서 발생한 슬립이 항복점을 지나 다소 상승한 후 부착 응력이 줄어들었는데 이는 가력단에 설치된 LVDT를 통해 확인할 수 있다.

3.3 부착 강도 산정 식 검토

Table 8은 철근과 CFRP의 부착 강도를 검토한 것이다. 철근의 경우 ACI-408R-03 (2003) 및 CEB-FIP (2010)에서 제시하는 식을 통해 최대부착 응력과 예상 부착 응력을 비교하였다. 반면에 CFRP에 사용된 식은 ACI 440.1R-15 (2015) 및 CSA S806-12 (2012)에서 제시하고 있는 식이다. ACI-408R-03 (2003) 및 CEB-FIP(2010)는 철근의 부착 강도를 과소평가하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 철근의 예상 부착 강도가 일반강도 콘크리트로부터 산정된 식이기 때문이다. 이에 고강도 콘크리트에서는 예상 부착 강도에 대한 식의 수정이 필요할 것으로 판단된다. 반면 CFRP의 경우 ACI 440.1R-15 (2015)와 CSA S806-12 (2012)식을 통한 예측값과 실험값을 비교하였다. ACI 440.1R-15 (2015)로부터 계산된 최대부착 강도는 약 32.26 MPa으로 실험 결과값보다 약 37% 높은 것을 확인할 수 있으며 CSA에서 제시한 식은 FRP 보강근의 외피 형상 및 콘크리트의 밀도 계수를 고려하여 실험값과 예측값이 유사하였다. 즉, ACI 440.1R-15 (2015)식은 CFRP 보강근의 부착 강도를 과대평가하고 있으며 반면 CSA S806-12 (2012)에서 제시한 식의 경우 CFRP의 부착 강도를 비교적 잘 예측하는 것으로 판단된다.

3.4 상대부착 강도

콘크리트 강도는 부착 강도에 영향을 끼치며, 이에 관한 영향을 줄이기 위해 Xiao, J and Falkner (2007)은 최대부착 강도에서 콘크리트 강도의 제곱근을 나눈 값으로 다음의 식을 제시하여 부착 강도에서 콘크리트 강도에 관한 영향을 배제하고자 하였다.

$$\tau^* = \frac{\tau_{\max}}{\sqrt{f_c}} \quad (4)$$

여기서 τ^* 는 상대 부착응력, τ_{\max} 는 발생한 최대 부착응력, 그리고 $\sqrt{f_c}$ 는 콘크리트의 압축강도를 나타낸다. S-10-20과 S-13-20에서의 상대부착 강도는 각각 4.75, 5.87을 나타내었다(Fig. 7). C-12-20의 경우 상대부착 강도는 약 2.09로 S-10-20과 S-13-20 대비 36%, 44% 정도이다. CFRP의 경우 콘크리트 강도증가에 따른 부착 강도 증진이 비례하지 않는 것을 확인할 수 있으며, 기존 연구결과보다 작게 나타났다(Lee et al., 2008; Davalos et al., 2008). 이는 콘크리트가 고강도로 뒀에 따라, 철근 주변의 콘크리트에서 파괴가 발생하지 않아 부착강도가 증가한 것으로 판단된다. 반면 고강도 콘크리트에서 CFRP는 레진의 벗겨짐이 발생하여 부착강도 증진이 철근 대비 효과적이지 않은 것으로 나타났으며 추후 CFRP의 표면형상 및 레진의 성능개선에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다(Yoo et al., 2017).

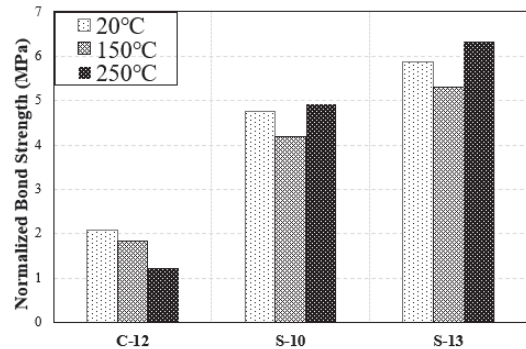


Fig. 7 Normalized bond strength

Table 8 Summary of the predicted bond strength using code equations

Specimen	Experimental results t_{max} (MPa)	Predictions (CFRP)		Predictions (Steel)		Experimental results / Predictions			
		ACI 440.1R (MPa)	CSA S806 (MPa)	ACI 408R (MPa)	CEB-FIP (MPa)	CFRP		Steel	
						ACI 440.1R	CSA S806	ACI 408R	CEB-FIP
S10-20	53.48	-	-	23.27	27.83	-	-	2.18	1.83
S13-20	66.07	-	-	17.47	27.83	-	-	3.78	2.37
C12-20	23.55	32.26	22.06	-	-	0.73	1.07	-	-

반면 150 °C 가열 이후의 상대부착 강도는 모두 감소한 것을 알 수 있는데, 이는 가열에 따른 부착력의 감소를 의미한다. 하지만, 250 °C 가열 이후에서는 CFRP는 상대부착 강도가 약 40 % 감소하였지만, D13 철근에서는 상대부착 강도가 가장 높게 나타났으며 이는 고강도 콘크리트에서의 철근과 콘크리트의 부착력이 강화된 현상으로 추후 보다 높은 가열 온도에서의 가열 이후 부착 평가에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.5 기존연구 결과 비교

Fig. 8은 고온 가열 이후의 부착 실험을 수행한 선행연구 데이터(Hamad et al., 2017; Ellis et al., 2018; Ozkal et al., 2018)를 참조하여 실험 결과와 비교한 것이다. ACI 440.1R-15 (2015)에서는 250 °C에서 가열이후 탄소 보강근의 잔류 인장 강도는 상온 대비 약 50 %로 GFRP 및 철근 대비 취약하다고 보고하고 있다. 하지만 고온가열 이후 CFRP의 잔류 부착 응력을 선행연구 데이터와 비교한 결과 150 °C에서 상온 대비 약 10 % 수준으로 부착응력의 감소를 보였으며 250 °C에서는 약 41 % 감소한 것으로 나타났다. 이는 Hamad et al., 2017에서 수행한 BFRP 및 GFRP 대비 부착 강도의 감소 비율이 적은 것을 알 수 있으며, 이는 ACI 440.1R-15 (2015)에서 제시하는 고온가열 이후의 인장강도 감소율 보다는 낮은 수치이지만 선행연구와의 비교 시 가열 이후 부착 강도가 크게 감소한 것을 확인할 수 있다. 한편, 선행연구에서는 가열 이후 GFRP의 잔류 부착 응력이 다소 차이를 보이는데 이는 콘크리트가 단열재 역할을 하여 GFRP 보강근에 손상이 다르게 나타난 것으로 판단된다. 한편 고온가열 이후 철근의 잔류 부착 응력은 철근의 경우 150 °C에서 일시적으로 줄었다가 250 °C에서 다소 증가하였는데, 이는 가열에 따른 UHPC 내부밀실화 및 실리카 폼의 반응 활성화로 인한 현상으로 잔류 부착 강도가 상승하였으며 이는 Pokorny et al. 2020에서 수행한 연구 결과와 유사하였다. 이를 통해 철근의 잔류 부착 응력은 250 °C까지는 큰 차이가 없는 것으로 나타났고 CFRP는 가열에 따라 부착응력이 크게 감소하였으며 150 °C까지는 유사하지만, 250

°C 가열 이후에는 CFRP의 잔류 부착 응력에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 CFRP와 철근의 부착실험을 수행하였고 150 °C 가열 이후의 잔류 부착성능을 평가하였다. 또한, 가열 전후의 CFRP와 철근의 부착-슬립 곡선을 나타내었으며 기존 제안식과의 비교를 통해 예상 부착 강도와와의 차이를 비교하였다. 본 연구의 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 상온과 150 °C로 가열한 이후의 CFRP와 철근의 잔류 부착 감소율은 모두 유사하게 나타났으나, CFRP는 레진과 매트릭스 간의 분자 간 결합의 약화로 부착 강도가 철근 대비 감소 폭이 큰 것을 확인할 수 있다.
- 2) 현행 부착 강도 산정식을 비교해본 결과 ACI 440.1R-15 (2015)의 FRP 부착 강도 산정식은 과대평가가 되었으며, ACI 408R (2003) 및 CEB-FIP(2010)에서 제시하는 철근의 부착 강도 평가식은 부착 강도를 과소평가하고 있다. 따라서 추후 연구를 통해 기존식에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.
- 3) 상대 부착 강도에 따른 영향을 비교한 경우, 상온에서 C-12-20은 약 2.09의 값을 보였으며 S-10-20과 S-13-20 모두 4.7 이상으로 CFRP 대비 2배 이상 큰 값을 보였다. 이는 CFRP 보강근의 화학적 부착력을 상실한 후 계면의 부착성능이 떨어졌기 때문이다.
- 4) 선행연구 결과와의 비교 시 고온가열 이후의 잔류 부착 강도는 CFRP가 취약한 것을 알 수 있으며, 초고강도 콘크리트에서 잔류 부착 강도가 높게 나타났다. 또한 250 °C 가열 이후 잔류 부착 강도가 오히려 상온 보다 높게 나타났는데, 이는 UHPC 내부 압력 상승으로 인해 잔류 부착 강도가 상승한 것으로 판단된다.

이상을 종합하여 볼 때, 150 °C 및 250 °C 가열 이후 CFRP의 잔류 부착 강도가 철근 대비 큰 폭으로 줄어든 것을 확인할 수 있으며 현행 부착 강도 산정 식에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21CFRP-C163381-01).

References

1. ACI 408R-03. (2003), Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension, American Concrete Institute.

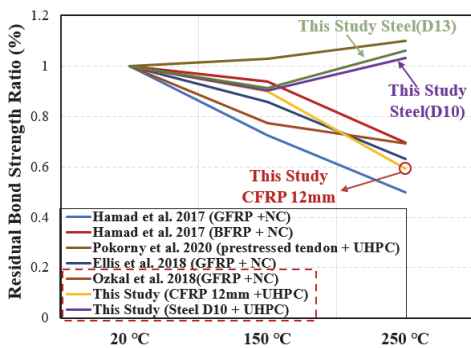


Fig. 8 Residual bond strength ratio after elevated temperature

2. ACI 440.1R-15. (2015), Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars, American Concrete Institute.
3. ACI 440.6M-08. (2008), Specification for Carbon and Glass Fiber-Reinforced Polymer Bar Materials for Concrete Reinforcement, American Concrete Institute.
4. ASTM, C. 39. (2007), Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, West Conshohocken, PA; ASTM International
5. ASTM C. 1609. (2012), Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading). ASTM International.
6. ASTM D 3916-02. (2002), Standard Test Method for Tensile Properties of Pultruded Glass-Fiber-Reinforced-Plastic Rods. West Conshohocken, PA; ASTM International
7. Baena, M., Torres, L., Turon, A., and Barris, C. (2009), Experimental Study of Bond Behaviour between Concrete and FRP Bars Using a Pull-out Test, *Composites Part B: Engineering*, 40(8), 784-797.
8. Banthia, N and Gupta, R. (2004), Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC): Fiber Synergy in High Strength Matrices, *Materials and Structures*, 37(10), 707-716.
9. Benmokrane, B., Wang, P., Ton-That, T. M., Rahman, H., and Robert, J.-F. (2002), Durability of Glass Fiber Reinforced Polymer Reinforcing Bars in Concrete Environment, *Journal of Composites for Construction* 6(3), 143-155.
10. CEB-FIP Model. (2010), CEB-FIB Model Code, *Comite Euro-International Du Beton*, Thomas Telford, London.
11. CSA S806-12. (2017), Canadian Standards Association. Design and Construction of Building Structures with Fibre-Reinforced Polymers, *Canadian Standards Association*. Mississauga, ON, Canada.
12. Davalos, J. F., Chen, Y., and Ray, I. (2008), Effect of FRP Bar Degradation on Interface Bond with High Strength Concrete, *Cement and Concrete Composites* 30(8), 722-730.
13. Ellis, D. S., Tabatabai, H., and Nabizadeh, A. (2018), Residual Tensile Strength and Bond Properties of GFRP Bars after Exposure to Elevated Temperatures, *Materials*, 11(3), 346-359.
14. Hamad, R. J., Johari, M. M., and Haddad, R. H. (2017), Mechanical Properties and Bond Characteristics of Different Fiber Reinforced Polymer Rebars at Elevated Temperatures, *Construction and Building Materials*, 142, 521-535.
15. ISO 834. (1999), Fire-Resistance Tests: Elements of Building Construction-part 1.1: General Requirements for Fire Resistance Testing, *INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION*.
16. Katz, A., Berman, N., and Bank, L. C. (1999), Effect of High Temperature on the Bond Strength of FRP Rebars, *Journal of Composites for Construction*, 3(2), 73-81.
17. Kook, K.H., Shin, H.O., Kwahk, I.J., and Yoon, Y.S. (2010), Bond Characteristics of Ultra High Performance Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 22(6), 753-760.
18. Lee, J. Y., Kim, T. Y., Kim, T. J., Yi, C. K., Park, J. S., You, Y. C., and Park, Y. H. (2008), Interfacial Bond Strength of Glass Fiber Reinforced Polymer Bars in High-Strength Concrete, *Composites Part B: Engineering*, 39(2), 258-270.
19. Lee, Y.H., Choi, J.H., Kim, H.C., Kim, D.H., and Na, S.J. (2008), Experimental Study on Bond Strength of CFRP Rebar in Concrete, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction*, 24(11), 53-60.
20. Moon, D. Y., Sim, J., and Oh, H. (2006), A Study on Methodology for Improvement of Bond of FRP reinforcement to Concrete, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, 26(4A), 775-785.
21. Mouritz, A.P and Gibson, A. G. (2007), Fire Properties of Polymer Composite Materials, *Springer Science & Business Media* 143
22. Nigro, E., Bilotta, A., Cefarelli, G., Manfredi, G., and Cosenza, E. (2012), Performance under Fire Situations of Concrete Members Reinforced with FRP Rods : Bond Models and Design Nomograms, *Journal of Composites for Construction*, 16(4), 395-406.
23. Okelo, R and Yuan, R. L. (2005), Bond Strength of Fiber Reinforced Polymer Rebars in Normal Strength Concrete, *Journal of Composites for Construction*, 9(3), 203-213.
24. Okelo, R. (2007), Realistic Bond Strength of FRP Rebars in NSC from Beam Specimens, *Journal of Aerospace Engineering*, 20(3), 133-140.
25. Özkal, F. M., Polat, M., Yağan, M., and Öztürk, M. O. (2018), Mechanical Properties and Bond Strength Degradation of GFRP and Steel Rebars at Elevated Temperatures, *Construction and Building Materials*, 184, 45-57.
26. Pokorný, P., Kolísko, J., Čítek, D., and Kostelecká, M. (2020), Effect of Elevated Temperature on the Bond Strength of Prestressing Reinforcement in UHPC, *Materials*, 13(21), 4990-5010.
27. Yoo, D.Y., Park, J.J., Kim, S.W., and Yoon, Y.S. (2014), Influence of Reinforcing Bar Type on Autogenous Shrinkage Stress and Bond Behavior of Ultra High Performance Concrete, *Journal of the Cement Concrete Composite*, 48, 150-161.
27. Yoo, D. Y and Yoon, Y. S. (2017), Bond behavior of GFRP and Steel Bars in Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. *Advanced Composite Materials*, 26(6), 493-510.
28. Yuan, T.F., Lee, J.Y., Min, K.H., and Yoon, Y.S. (2019), Experimental Investigation on Mechanical Properties of Hybrid Steel and Polyethylene Fiber-Reinforced No Slump High-Strength Concrete, *International Journal of Polymer Science*, 2019, 1-11.
29. Xiao, J and Falkner, H. (2007), Bond Behaviour between Recycled Aggregate Concrete and Steel Rebars, *Construction and Building Materials*, 21(2), 395-401.

Received : 10/21/2021

Revised : 11/04/2021

Accepted : 11/07/2021

요 지 : 본 연구에서는 고온가열 이후의 탄소 보강근의 잔류 부착 강도 평가를 위하여 상온, 150℃에 따른 부착실험을 수행하였으며, 탄소 보강근과의 비교를 위한 D10 및 D13 철근도 고온 가열한 이후 잔류 부착 강도를 평가하였다. 실험 결과, 150℃ 가열 이후 탄소 보강근의 부착 강도는 상온 대비 약 9.94% 감소하였다. 반면 가열 이후 D10 철근 및 D13 철근 모두 탄소 보강근 대비 부착 강도 감소율이 적게 나타났다. 또한 온도 가열 이후 최대부착 강도에서 발생한 슬립도 탄소 보강근과 철근 모두 줄어드는 경향을 보였다. 이를 통해 고온가열에 따른 부착 강도와 슬립 감소의 상관관계를 확인하였으며, 부착-슬립 곡선을 나타내었다. 최종적으로는 실험 결과값을 상대부착 강도로 나타냄으로써 가열 이후 탄소 보강근 및 철근의 잔류 부착성능을 확인하고자 하였다.

핵심용어 : 탄소 섬유 보강근, 고온, 노 슬립프 고강도 고연성 콘크리트, 직접 인발 실험, 잔류 부착 강도