

## 철근부식을 고려한 FRP Hybrid Bar 및 일반 철근을 가진 RC 보의 내력저하 평가

오경석<sup>1</sup>, 문진만<sup>2</sup>, 박기태<sup>3</sup>, 권성준<sup>4\*</sup>

# Evaluation of Load Capacity Reduction in RC Beam with Corroded FRP Hybrid Bar and Steel

Kyung-Suk, Oh<sup>1</sup>, Jin-Man, Moon<sup>2</sup>, Ki-Tae, Park<sup>3</sup>, Seung-Jun, Kwon<sup>4\*</sup>

**Abstract:** Steel corrosion is a very significant problem both to durability and structural safety since reinforcement has to support loads in tensile region in RC(Reinforced Concrete) member. In the paper, newly invented FRP Hybrid Bar and normal steel are embedded in RC beam member, and ICM (Impressed Current Method) is adopted for corrosion acceleration. Utilizing the previous theory of Faraday's Law, corrosion amount is calculated and flexural tests are performed for RC beam with FRP Hybrid Bar and steel, respectively. Corrosion amount level of 4.9~7.8% is measured in normal RC member and the related reduction of flexural capacity is measured to be -25.4~-50.8%, however there are no significant reduction of flexural capacity and corrosion initiation in RC samples with FRP Hybrid Bar due to high resistance of epoxy-coated steel to corrosion initiation. In the accelerated corrosion test, excellent performance of anti-corrosion and bonding with concrete are evaluated but durability evaluation through long-term submerged test is required for actual utilization.

**Keywords:** Durability, Steel corrosion, Steel, FRP Hybrid Bar, Flexural capacity

## 1. 서 론

콘크리트는 안정적이며 반영구적인 건설재료로 인식되어 왔지만 해양환경 및 제설제 사용과 같은 염해에 장기간 노출되었을 경우 콘크리트 내부의 철근은 부식하게 된다. 이렇게 부식된 철근은 초기에는 균열, 피복콘크리트의 박락으로 내구성 문제가 진전되지만 최종적으로는 구조물의 내력저하에 영향을 주어 구조 안정성 문제가 야기 된다(Broomfield, 1997; Park et al., 2012). 이러한 철근의 부식을 방지하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔으며, 에폭시 철근코팅(Oh et al., 1992), 용융아연도금(Bautista and Gonzalez, 1996), 해수전착기법과 같은 철근 방청 기술들이 연구되어 왔다(Lee et al., 2004; Lee and Ryu, 2004). 최근 들어 해안이나 지하 같은 염해 및 탄산화에 노출된 RC 구조물에 대하여, 철근 부식을 피하기 위해 FRP bar에 대한 연구가 수행되었다(Seo et al., 2013). FRP bar는 부식에 대한 우려가 없고 강도가 높으며, 일반 철근에 비해 자중

이 가벼워 운송비용 절감 등 많은 장점이 있다(ACI, 2006). 하지만 FRP bar는 인장강도에 비해 상대적으로 낮은 탄성계수로 인해 일반 철근보다 큰 변형이 발생하기 쉽다(Seo et al., 2013). 또한 절곡 등의 철근배근상세 및 운송시 국부적인 손상, 자외선 등에 의한 품질 저하 등이 문제시 되고 있다. 결국 RC(Reinforced Concrete)의 구조체에서는 압축응력이 작용하는 영역은 콘크리트가, 인장응력이 작용하는 영역은 주로 보강재가 담당하므로 인장영역의 보강재를 부식 및 손상으로 부터 보호하는 것은 매우 중요한 일이다. 최근에는 이러한 FRP bar의 낮은 탄성계수를 극복하고자 유리섬유와 강재를 에폭시로 일체화 시킨 FRP Hybrid Bar가 개발되어 연구되고 있다(KICT, 2013). FRP Hybrid Bar는 고탄성계수 재료인 철근과 FRP를 일체화하여 재료의 탄성계수를 보완하고 기존의 고비용 도막철근을 대체하려는 시도이다.

본 연구에서는 일반강도(24 MPa)를 가진 콘크리트 RC보 부재를 제작하고 일반철근과 FRP Hybrid Bar를 적용하여 피복두께를 변화시켰다. 이후 촉진부식실험(ICM: Impressed Current Method)을 적용하여 철근을 부식시켰으며, 휨내력 평가를 수행하여 역학적 성능을 비교하였다. FRP Hybrid Bar와 일반 철근을 ICM으로 부식을 유도하여 부식량을 산정하고, 보강재의 부식량 및 부식특성이 구조체의 휨내력에 미치는 영향이 분석될 것이다.

<sup>1</sup>정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과

<sup>2</sup>정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과

<sup>3</sup>정회원, 한국건설기술연구원

<sup>4</sup>정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과, 교신저자

\*Corresponding author: jjuni98@hannam.ac.kr

•본 논문에 대한 토의를 2016년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 5월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

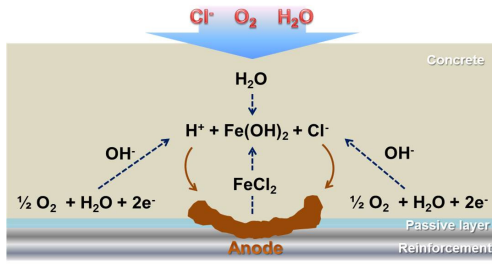


Fig. 1 Corrosion initiation mechanism(CEB, 1997)

## 2. 매립된 보강재의 부식기구 및 내부식성

### 2.1 부식 메커니즘

콘크리트의 내부는 pH 12~13의 강알칼리 상태이기 때문에 철근 주위에 부동태 피막(Passive layer)이라 불리는 보호막이 형성되어 철근의 부식을 억제한다. 콘크리트 내부에 염화물 이온이 침투해 임계값에 도달할 경우 부동태피막이 손실되어 부분적으로 부식이 진행되게 된다. 부식된 철근은 본래 체적의 약 2.5배 팽창하여 콘크리트에 팽창압으로 인한 균열이 발생하여 내구적으로 영향을 미치게 된다(Broomfield, 1997). 부식으로 인한 균열발생시 산소 및 염화물 이온의 침투가 가속화되어 부식의 진전은 더욱 빨라진다(Kwon et al., 2011(a); Park et al., 2012; Song et al., 2006(a); Song et al., 2006(b)). Fig. 1에는 철근의 부식반응을 나타내었다.

부식과정에서 염소이온( $Cl^-$ )은 소모되지 않고 부식반응 중간생성물인  $FeCl_2$ 를 형성하였다가 다시 방출되며, 수소이온 발생으로 인한 pH저하가 부식 환경을 촉진하게 된다(Broomfield, 1997; CEB, 1997).

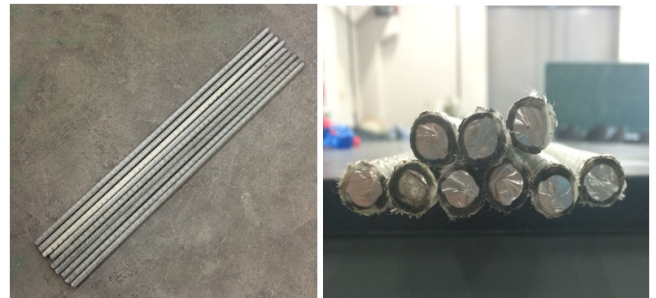
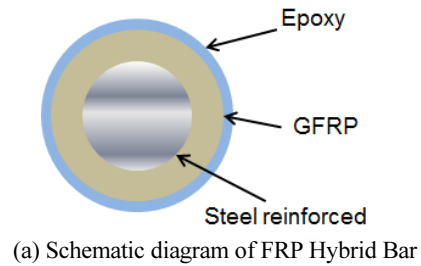
### 2.2 FRP Hybrid Bar의 내부식성

실험에 적용된 FRP Hybrid Bar는 유리섬유와 에폭시로 철근을 코팅하였으며, 부착강도를 향상시키기 위한 돌기사로 구성된다(KICT, 2013). 유리섬유와 에폭시로 철근을 보호하기 때문에 염화물 차단능력이 우수한데, 본 실험에서는 FRP Hybrid Bar를 적용한 시편과 일반 철근을 적용한 시편의 부식량 평가를 통해 FRP Hybrid Bar의 내부식 성능을 평가하였다. Fig. 2에서는 FRP Hybrid Bar의 개요도와 사진을 나타내고 있다.

## 3. 내부식성 평가를 위한 실험계획

### 3.1 실험재료 및 배합

실험에 사용된 콘크리트 배합은 Table 1과 같다. 설계기준



(b) Photo of FRP Hybrid Bar

Fig. 2 FRP Hybrid Bar

Table 1 Mix proportions for the test

W/B (%)	S/a (%)	Gmax (mm)	Slump (mm)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )					AE (g)
				W	C	S	G	Fly ash	
49.6	50.0	25	150	171	293	886	897	52	1.73

강도는 24 MPa로서 1종 보통 포틀랜드 시멘트가 사용되었으며, 하절기 사용을 위해 2종 Fly ash가 15% 치환된 레미콘 배합을 사용하였다.

실험에 사용된 강재는 항복강도 400 MPa의 D13 이형철근과 같은 외경의 FRP Hybrid Bar를 사용하였다. 실험에 사용된 배합의 압축강도 평가 결과 재령 28일에서 약 26 MPa로 실제 구조물에 적용할 수 있는 일반강도 등급의 배합으로 판단된다. Fig. 3에는 재령에 따른 압축강도 그래프를 나타내었다.

### 3.2 시편의 제원 및 제작

부식 전후의 휨내력 저하를 평가하기 위해 보 시편을 제작하였으며, 부식실험 적용시 보의 유효깊이를 40 mm로 고정하고 피복두께를 20 mm(150×60×650 mm), 30 mm(150×70×650 mm), 40 mm(150×80×650 mm)의 세가지 수준으로 제작하였다. 시편의 제원 및 모식도를 Fig. 4에 나타내었다.

### 3.3 Impressed Current Method(ICM)

ICM에 대한 실험 조건은 이미 많은 문헌에서 채택되어 사용되었다(Baek et al., 2012; Sakurada et al., 2008). ICM은 매립된 철근과 구리판을 각각 Anode와 Cathode로 전극을 선택

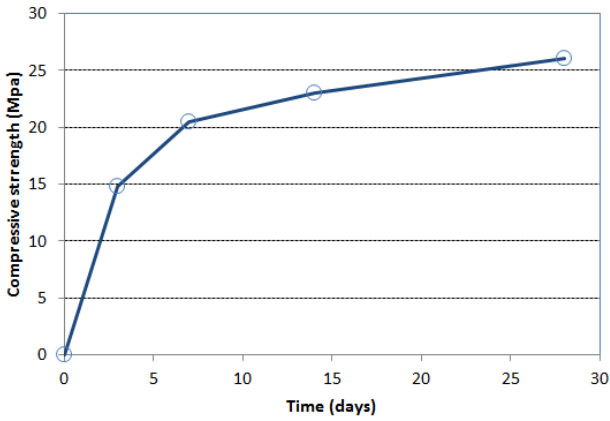


Fig. 3 Compressive strength with time

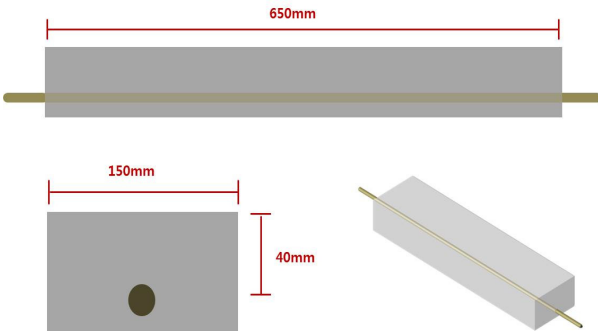


Fig. 4 Geometry of RC beam samples

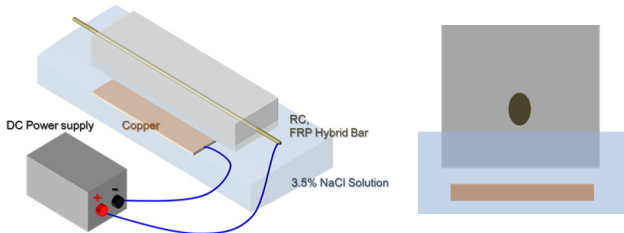


Fig. 5 Impressed Current Method(ICM)

하여 전압을 가압하고, 저항을 수분이 포화된 콘크리트로 고려하여 인위적인 부식전지를 만드는 것이다.

일반적으로 24~30 MPa 정도의 일반강도등급 콘크리트의 경우에도 내구적 성능이 우수하여 자연부식으로는 수년만에 내력저하를 기대하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 ICM을 적용해 부식 유발시기를 앞당겨 이로 인한 RC 보의 내력저하를 유도하였다. ICM 적용시 해수와 같은 염화물 농도를 고려하기 위해 3.5% NaCl 수용액을 사용하였으며, 모든 시편을 2주간에 걸쳐 10 V의 전압을 가해 부식으로 인한 내력저하를 충분히 확보할 수 있도록 하였다. 완성된 시편의 강재가 수용액에 닿지 않도록 Fig. 5와 같이 수용액에 침지시키면 침지된 시편의 모세관 현상에 따라 철근위치까지 수용액이 침투하게 된다. Fig. 5에는 ICM의 모식도를 나타내었다.



Fig. 6 Corrosion protection of the embedded steel ends

전압 인가시 시편의 양 지점에서 국부적인 부식이 발생할 수 있다. 이렇게 발생한 부식은 양 지점의 균열을 유발하고 정확한 부식량 및 휨 내력저하 평가를 어렵게 하므로 콘크리트 타설 전 몰드 안쪽 기준으로 약 30 mm 정도 에폭시를 도포하여 방청 처리를 하였으며, 절단된 철근 단부 역시 에폭시 처리를 하여 국부부식을 방지하였다. 방청 처리된 강재의 상태를 Fig. 6에 나타내었다.

## 4. 부식량 및 휨강도 평가

### 4.1 부식량 평가 방법

철근의 부식량 평가는 식 (1)과 같은 Faraday 법칙을 통해 계산된 이론값과 휨강도 측정 후 수거한 강재의 부식량을 평가하여 비교하였다.

$$M = \frac{c}{zF} \int q dt \quad (1)$$

여기서,  $M$ 은 부식량( $mol$ ),  $z$ 는 철의 이온수( $=2$ ),  $F$ 는 Faraday의 수( $=96,500 C$ ),  $q$ 는 전류( $mA$ ),  $t$ 는 측정시간( $sec$ ),  $c$ 는 실험 상수이다.  $1 mol$ 의 철( $Fe$ )은  $55.847 g$ 이므로, 식 (1)을 통해 강재의 부식량을 예측할 수 있다.

### 4.2 RC 보와 FRP Hybrid Bar 보의 부식량 평가

일반 RC 시편과 FRP Hybrid Bar를 적용한 시편을 피복두께에 상관없이 2주간 10 V의 전압을 가했으며, 실험 종료 후 부식된 시편의 상태는 Fig. 7과 같다.

부식 실험 결과 일반 RC 시편의 경우 피복두께에 상관없이 모든 시편에서 부식으로 인한 균열을 육안으로도 쉽게 확인할 수 있었다. 반면 FRP Hybrid Bar를 적용한 모든 시편에서는 부식 및 균열을 확인할 수 없었는데, 이는 에폭시 수지가 도포되어 2주간의 실험동안에서는 수분의 유입이 없기 때문이다. 대표적인 시편에 대하여 부식실험 진행중 측정된 전류값을 Fig. 8에 도시하였다.

부식이 발생된 RC 시편에서는 높은 전류량이 시간에 따라 평가 되었지만 육안으로 부식 및 균열을 확인할 수 없었던



(a) 20 mm



(b) 30 mm

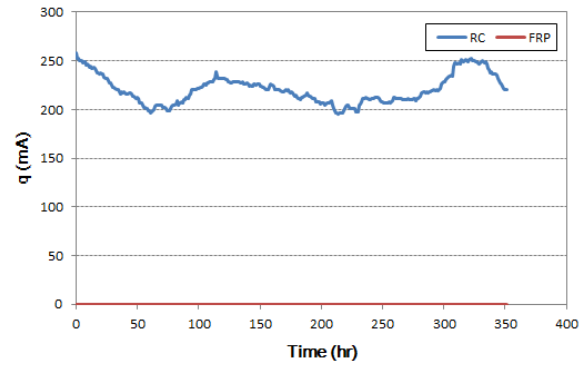


(c) 40 mm

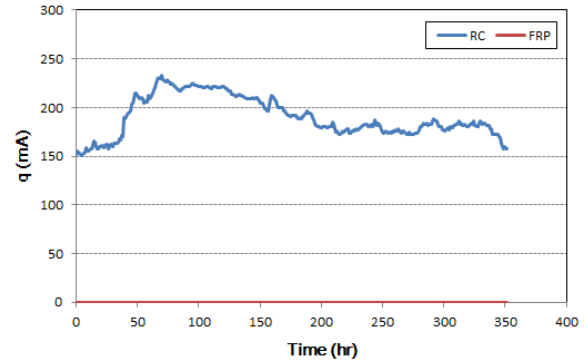
**Fig. 7** Photos for RC sample conditions after ICM(Up: RC, Down: FRP Hybrid Bar)

FRP hybrid Bar 적용 시편에서는 전류값이 거의 측정되지 않았다. 본 연구에서는 온도보정을 하지 못했으며, 증류수를 사용하지 않아서 이론값과의 차이가 발생하였는데, 실험상수  $c$  (0.6)을 적용하였다. 부식량 평가를 위해서는 1일 동안 기건 상태에서 부식된 철근을 충분히 건조시킨 뒤, 천을 사용하여 녹을 제거하고, 부식 제거제를 사용하여 2차 제거작업을 하였다. 실험 전의 중량을 미리 측정하여 두 조건의 중량차이를 부식량으로 정하였는데, 부식량 평가 결과를 Table 2에 나타내었으며, Fig. 9에 도시하였다.

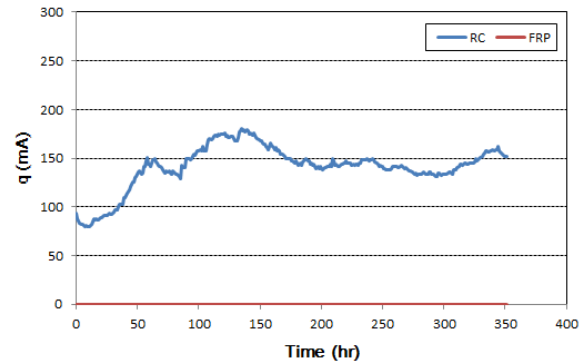
보정계수를 통한 부식량 예측값은 실험값과 비슷한 수준으로 평가되었으며, 일반 RC 시편에서 FRP Hybrid Bar 적용 시편에 비해 많은 부식이 발생했음을 확인할 수 있다. Fig. 10에는 실험값을 통한 피복두께별 부식률을 도시하였다. 일반 RC 시편에서는 4.9~7.8%의 높은 부식률을 보였지만 FRP Hybrid



(a) 20 mm



(b) 30 mm



(c) 40 mm

**Fig. 8** Amount of current measure results

**Table 2** Evaluation of corrosion amount after test

	Types	Estimated(g)	Tested(g)
RC	20 mm	53.9	52.3
	30 mm	46.7	47.5
	40 mm	34.6	32.8
FRP Hybrid Bar	20 mm	0.0	0.0
	30 mm	0.0	0.0
	40 mm	0.0	0.0

Bar는 거의 0.0%의 부식률을 보여 FRP Hybrid Bar의 내부식 성능이 일반 철근에 비해 우수하다는 것을 확인할 수 있었다.



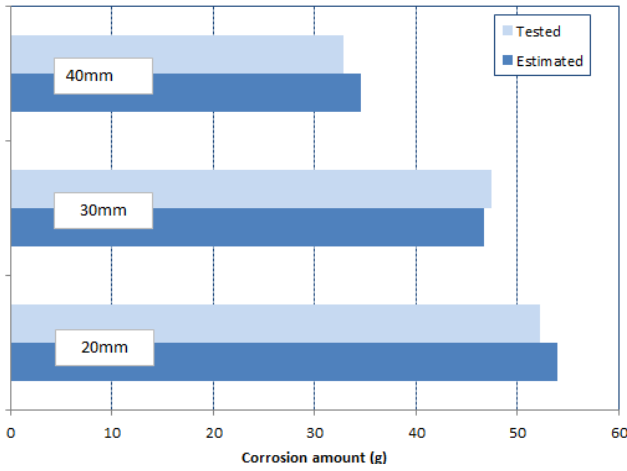


Fig. 9 Evaluation of corrosion amount after test

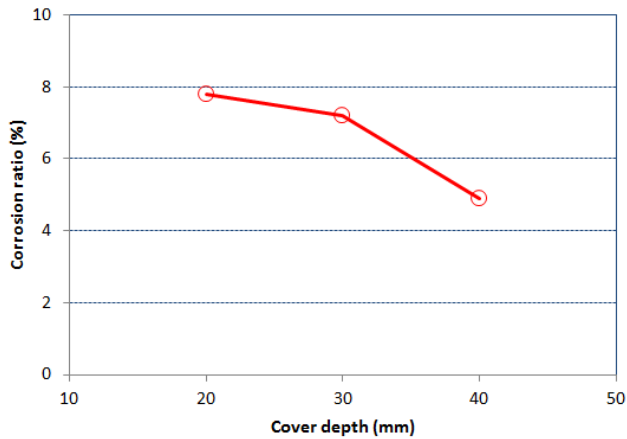


Fig. 10 Corrosion ratio with cover depth



(a) Before removal of corrosion



(b) After removal of corrosion

Fig. 11 Photos of samples after/before corrosion removal

실제로 전류가 동일하게 인가되면 피복두께 증가에 대해 선형적인 부식량이 측정되어야 하는데, 비선형적으로 감소하였다. 이는 증류수를 사용하지 않고 주기적인 침지수의 교반이

없었으므로 발생하는 국부적 염화물 농도의 차이, 콘크리트 내의 골재 영역에서의 염화물 진행 변동성, 그리고 국부적인 콘크리트 모재의 수화물 변동성(OH, pH) 등으로 예상할 수 있다. 콘크리트와 같이 국부적인 변동성이 큰 재료에서 국부적인 부식량 제어는 매우 어려운 일이다(Baek et al., 2012; Kwon et al., 2011(b); Kwon and Park, 2012).

Fig. 11에는 부식률이 7.8%인 일반 철근과 같은 피복두께에 적용된 FRP Hybrid Bar의 부식량 제거 전/후 상태를 나타내었다.

각 강재의 부식량 제거 결과, 일반 철근에서는 많은 부식이 발생하였는데, 이는 콘크리트와의 부착력 저하 및 인장강도의 감소를 야기하게 된다. 반면 FRP Hybrid Bar는 부식량 제거 전/후 상태의 차이가 없으며, 이는 부식에 대하여 우수한 저항성을 가지고 있음을 알 수 있다.

### 4.3 휨강도 평가 및 비교

각 시편의 휨 내력저하를 평가하기 위해 KS F 2408(콘크리트 휨 강도 시험방법) 규격에 따라 중앙점 재하 방법을 통해 휨 강도를 평가하였다. Fig. 4에 나타난 시편에 대하여 3 점 휨 시험을 수행하였는데, Fig. 12에 시험사진을 나타내었다.

하중재하 방법으로 시험을 수행하여 최대하중이 측정된 상태로 평가하였다. 3점 휨 시험시 공칭 모멘트와 하중과의 관계를 고려하여, 일반 RC보의 최대하중은 식 (2)의 관계를 고려하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{PL}{4} = A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right), \quad a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_{ck} b} \quad (2)$$

$$P = 4 \frac{A_s f_y}{L} \left[ d - \frac{1}{2} \left( \frac{A_s f_y}{0.85 f_{ck} b} \right) \right] \quad (3)$$

여기서,  $P$ 는 최대하중,  $A_s$ 는 철근의 단면적,  $f_y$ 는 철근의 인장강도,  $d$ 는 제원의 유효깊이,  $f_{ck}$ 는 콘크리트의 압축강도,  $b$ 는 제원의 유효폭을 나타낸다. 모멘트 계산시 인장영역의 콘크리트는 무시하므로, RC 보에 대한 최대하중  $P$ 는 10.93 kN으로 평가되었다.

FRP Hybrid Bar를 가진 RC 보의 공칭 모멘트에 대한 명확한 국내 규정이 없으므로 ACI 440.1R 기준과(ACI, 2006) 기존의 연구결과(Ko, 2014)를 이용하여 휨강도를 평가하였다. ACI 440.1R에서는 사용 보강비( $\rho_f$ )가 균형 보강비( $\rho_{bf}$ )보다 작을 경우와 클 경우 분류하여 식 (4a) 및 (4b)와 같이 제안하였다.



Fig. 12 Photo of flexural capacity test

$$M_n = A_f f_{fu} \left( d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) \quad (4a)$$

$$M_n = \rho_f f_f \left( 1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f_c'} \right) b d^2 \quad (4b)$$

여기서  $M_n$ 은 공칭모멘트,  $A_f$  및  $f_{fu}$ 는 보강재의 단면적과 설계인장강도,  $\beta_1$ 은 콘크리트 압축강도에 따른 압축깊이 보정 계수,  $c_b$ 는 균형 조건에서의 중립축 길이,  $\rho_f$ 는 균형 보강재비 ( $A_f/bd$ ),  $f_f$ 는 보강재의 인장응력으로 식 (5)와 같이 나타난다.

$$f_f = \sqrt{\frac{(E_f \epsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85 \beta_1 f_c'}{\rho_f} E_f \epsilon_{cu}} - 0.5 E_f \epsilon_{cu} \leq f_{fu} \quad (5)$$

본 실험에서는  $\rho_f$ (0.021)이  $\rho_{fb}$ (0.0165)보다 크므로 식 (4b)를 사용하여  $M_n$ 을 구하고 식 (6)과 같은 조건에서  $P$ 를 도출하였다.

$$P = \frac{4M}{L} \quad (6)$$

계산결과  $f_f$ 는 295.5 MPa로 평가되었으며,  $P$ 는 9.34 kN으로 평가되었다. Table 3에서는 각 설계정수의 값을 나타내고 있다.

휨강도 실험 결과와 비교해본 결과 RC 시편과 FRP Hybrid Bar 시편에서 모두 이론값보다 높은 하중이 평가 되었으며, 부식된 RC 시편에서는 이론값보다 낮은 값이 평가되어 구조물의 안정성에 영향을 미칠 것으로 판단된다. Table 4에 휨 강도 평가에 의한 결과값을 나타내었으며, Fig. 13에 이론값과 함께 결과를 도시하였다.

Fig. 13에서 FRP Hybrid Bar에서는 Control 값이 이론값에

Table 3 Mechanical properties of the test

Size	$b$ (mm)	$d$ (mm)	$L$ (mm)		
	150	40	600		
RC	$f_{ck}$ (MPa)	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	$f_y$ (MPa)		
	26	126.7	400		
GFRP	$E_f$ (MPa)	$\epsilon_{cu}$	$f_{fu}$ (MPa)	$\epsilon_f$	$A_f$ (mm <sup>2</sup> )
	49000	0.003	1130	0.023	126.7

Table 4 Test results for flexural loading for RC samples

	Cover depth (mm)	Ultimate load(kN)		Reduction ratio(%)
		Control	Corrosion	
RC	20	13.2	6.5	-50.8
	30	12.8	7.0	-45.3
	40	12.2	9.1	-25.4
FRP Hybrid Bar	20	11.3	11.9	+5.0
	30	15.8	15.7	-0.6
	40	16.4	20.9	+27.4

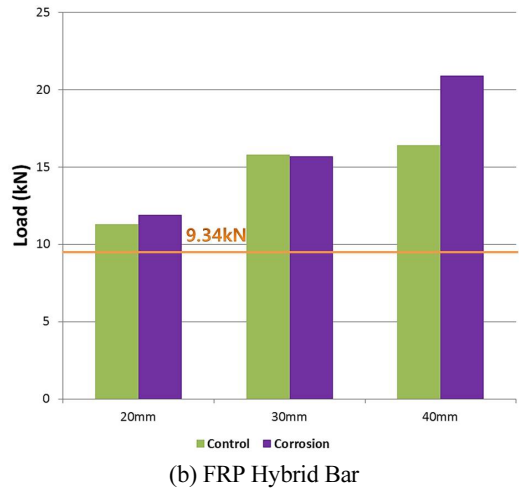
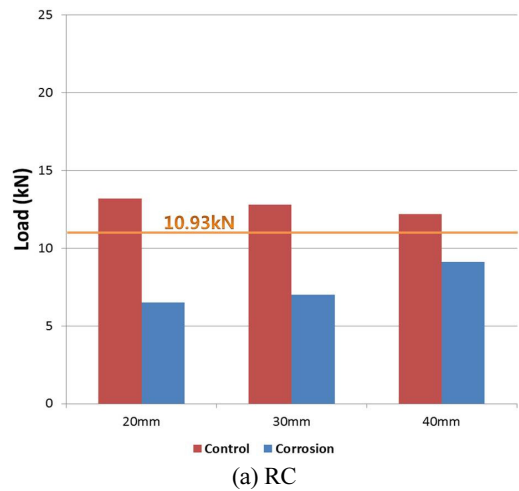


Fig.13 Comparison of the ultimate load

비하여 피복두께가 클수록 크게 평가되었는데, 이는 인공해수에 2주간 침지하면서 부식촉진동안 구체의 수화작용에 따라 콘크리트 강도가 증가하였기 때문이다. 그러나 주된 휨모멘트 증가 원인은 FRP Hybrid Bar의 경우 일반철근과 달리 항복이 발생하지 않고 인장경화가 발생하므로(Seo et al., 2013), 피복두께가 증가할수록 인장부 저항력이 증가하여 최대하중이 크게 평가되었다(Ko, 2014). 인장경화가 발생할 경우 인장부 콘크리트가 저항할 수 있으므로 피복두께의 증가에 따라 RC 보의 항복강도가 증가하게 된다. 전반적으로 촉진부식시험 이후 부식이 전혀 발생하지 않아 구조적으로 우수함을 알 수 있다.

휨 강도 평가 결과 일반 RC 시편에서 -25.4~-50.8%의 내력 저하가 발생했으며, FRP Hybrid Bar 적용 시편에서는 부식으로 휨 내력저하를 확인할 수 없었다. 이는 부식으로 인해 부착성능이 저하된 RC 시편에 비해 부식이 발생하지 않은 FRP Hybrid Bar의 부착성능에 큰 변화가 없기 때문이다. 5% 이상 부식이 발생할 경우 RC 보부재의 급격한 내력저하는 기존의 연구와 일치하게 평가되었다(Chung, 2004). FRP Hybrid Bar를 가진 RC 보부재에서는 높은 부식 저항성능으로 인해 구조적/내구적으로 우수한 성능을 가지고 있는 것으로 평가되었다.

그러나 본 실험은 2주간의 촉진실험이며, 장기 침지시 국소적인 수분포화가 에폭시 코팅에서 발생할 수 있다. 또한 FRP Hybrid Bar의 표면조도 등이 장기간 침지시 부정적인 영향을 줄 수 있으므로 실용화를 위해서는 장기적인 침지 실험을 통한 부재 저항력의 정량화가 필요하다.

## 5. 결 론

- 1) 일반 RC 와 FRP Hybrid Bar를 적용한 장기간 보 시편의 내부식성 및 휨강도 평가 결과 일반 철근을 적용한 RC 시편의 경우 피복두께와는 상관없이 모두 4.9~7.8%의 부식이 발생하였으며, 부식으로 인한 균열을 육안으로도 확인할 수 있을 정도로 높은 내구성 저하를 나타내었다. 반면, FRP Hybrid Bar를 적용한 시편의 경우 부식으로 인한 균열이 육안으로 확인되지 않았으며, 전류량 평가 및 부식량 평가에서도 부식이 발생하지 않았음을 확인할 수 있었다.
- 2) 휨 강도 평가 결과 높은 부식률을 보인 일반 RC 시편에서는 -25.4~-50.8%의 강도 감소가 나타났지만 부식이 발생하지 않은 FRP Hybrid Bar 시편에서는 휨 내력저하가 발생하지 않았다. 이는 부식으로 인한 강재의 부착성능이 감소하지 않아 휨 내력저하가 발생하지 않은 것임을 확인할 수 있었다.
- 3) 단기촉진 실험에서는 우수한 내력저하 방지를 FRP Hybrid

Bar에서 확인할 수 있었으나 장기간 수중침지 실험을 통한 내력평가가 수행되어야 보부재로서의 실용화가 가능할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업(FRP Hybrid Bar를 활용한 해양항만구조물 수명향상기술 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

1. ACI 440.1R-06 (2006), Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforce with FRP Bars, ACI Committee 440.
2. Baek, S. H., Wiliam, X., Maria, Q., and Kwon, S. J. (2012), Non-destructive Corrosion Detection in RC Through Integrated Heat Induction and IR Thermography, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 31(2), 181-190.
3. Bautista, A., and Gonzalez, J. A. (1996), Analysis of the Protective Efficiency of Galvanizing against Corrosion of Reinforcements Embedded in Chloride Contaminated Concrete, *Cement and Concrete Research*, 26(2), 215-224.
4. Broomfield, J. P. (1997), Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair, E&FN, London, 1-15.
5. CEB, New Approach to Durability Design, 1997.
6. Chung, L., Won, J. H., and Cho, S. H. (2004), Structural Performance of Reinforced Concrete Columns due to Corroded Main and Hoop Bars, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 3(10), 3-10.
7. KICT (2013), Development of Enhancing Life Span Technology for Waterfront Structures using FRP Hybrid Bars.
8. Ko, S. H. (2014), Experimental Study for GFRP Reinforced Concrete Beams without Stirrups, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 18(2), 21-29.
9. Kwon, S. J., and Na, U. J. (2011(a)), Prediction of Durability for RC Columns with Crack and Joint under Carbonation Based on Probabilistic Approach, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 5(1), 11-18.
10. Kwon, S. J., Henry, X., and Maria, Q. (2011(b)), Nondestructive corrosion detection in concrete through integrated heat induction and IR thermography, *Published in SPIE Proceedings*, 1-11.
11. Kwon, S.-J., and Park, S.S., (2012), Non Destructive Technique for Steel Corrosion Detection Using Heat Induction and IR Thermography, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 16(2), 40-48.
12. Lee, C. S., Bae, I. Y., Kim, K. J., Moon, K. M., and Lee, M.H. (2004), Properties Analysis of Environment Friendly Electrodeposit Films Formed at Various Current Density Conditions in Natural Seawater, *Journal of Korea Institute of Surface Engineering*, 37(5), 253-262.

13. Lee, M. H., and Ryu, H. J. (2004), Surface Coating Method of Environment-Friendly Calcareous Deposit formed in Natural Seawater, *Fourth International Symposium on Biomimetic Materials Processing*, 4, 94.
14. Oh, B. H., Um, J. Y., and Kwon, J. H. (1992), An Experimental Study on Corrosion Resistance of Epoxy Coated Reinforcements, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 4(4), 161-170.
15. Park, S. S., Kwon, S. J., and Jung, S. H. (2012), Analysis technique for chloride penetration in cracked concrete using equivalent diffusion and permeation. *Construction and Building Materials*, 29, 183-192.
16. Sakurada, S., Irie H., and Yoshida, Y. (2008), Development of Reinforced Concrete Corrosion Amount Presumption Method by Ultrasonic Method, *17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai*, China, 1-6.
17. Seo, D. W., Park, K. T., You, Y. J., and Kim, H. Y. (2013), Enhancement in Elastic Modulus of GFRP Bars by Material Hybridization, *Engineering*, 5, 685-869.
18. Song, H. W., Back, S. J., Lee C. H. and Kwon, S. J. (2006(a)), Service life prediction of concrete structures under marine environment considering coupled deterioration, *Restoration of Buildings and Monuments*, 12(4), 265-284.
19. Song, H. W., Kwon, S. J., Byun, K. J., and Park, C. K. (2006(b)), Predicting carbonation in early-aged cracked concrete, *Cement and Concrete Research*, 26(5), 979-989.

Received : 07/28/2015  
 Revised : 10/22/2015  
 Accepted : 10/25/2015

---

**요 지 :** RC(Reinforced Concrete) 부재는 인장영역에서 보강재가 하중을 지지해야 하므로, 철근부식은 내구성 뿐 아니라 안전성에서도 매우 중요하다. 본 연구에서는 최근 개발된 FRP Hybrid Bar와 일반 철근을 매립한 RC 보부재를 제작하였으며, ICM(Impressed Current Method)를 적용하여 철근부식을 촉진시켰다. 기존의 이론적인 Faraday 법칙을 이용하여 부식량을 평가하였으며, 일반철계강도를 가진 콘크리트 보부재에 대하여 휨시험을 수행하였다. 일반 철근에서는 부식량이 4.9~7.8% 수준으로 평가되었으며 이에 따른 휨 저항능력은 -25.4~-50.8% 수준으로 감소하였다. FRP Hybrid Bar를 매립한 RC 보에서는 부식과 휨 저항 감소가 평가되지 않았는데, 이는 예폭시 도료로 코팅된 철근의 우수한 내부식성에 기인한다. 촉진 부식실험에서는 FRP Hybrid Bar의 우수한 내부식성 및 부착성능을 확인하였는데, 실용화를 위해서는 장기적인 침지를 통한 내구성 평가가 필요하다고 판단된다.

**핵심용어 :** 내구성, 철근부식, 철근, FRP Hybrid Bar, 휨저항성

---