Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection
Vol. 20, No. 4, July 2016, pp.051-058
http://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2016.20.4.051
pISSN 2234-6937
eISSN 2287-6979

GGBFS 콘크리트에 매립된 Notch를 가진 FRP Hybrid Bar의 부식저항성 평가

오경석[1], 박기태[2], 권성준[3]*

Evaluation of Anti-Corrosion Performance of FRP Hybrid Bar with Notch in GGBFS Concrete

Kyeong-Seok Oh[1], Ki-Tae Park[2], Seung-Jun Kwon[3]*

Abstract: Concrete structure is a construction material with durability and cost-benefit, however the corrosion in embedded steel causes a critical problem in structural safety. This paper presents an evaluation of chloride resistance and pull-off performance with various corrosion level. For the work, OPC(Ordinary Portland Cement) concrete and GGBFS(Ground Granulated Blast Furnace Slag) concrete are prepared with normal steel. Artificially notch induced FRP Hybrid Bar is also prepared and embedded in OPC concrete and accelerated corrosion test is performed. Through the test, FRP Hybrid Bar with notch is evaluated to have insignificant effect on pull-off capacity when corroded steel shows only 21% level of pull-off capacity. Furthermore GGBFS concrete with normal steel shows over 70% level of pull-off capacity due to reduced corrosion currency.

Keywords: Durability, Corrosion, Pull-off test, GGBFS, FRP hybrid bar

1. 서 론

콘크리트는 내구성 및 경제성을 가진 건설재료로서 현재까지 많이 사용되고 있지만 사용기간 중 유해한 열화인자의 영향으로 내구적인 문제가 발생하게 된다. 대표적인 열화인자로 염화물 이온(Cl^-)에 의한 철근부식을 들 수 있는데, 이는 철근표면에 수산화물로 이루어진 얇은 부동태 피막(Passive film)을 파괴하여 철근에 국부적인 부식을 야기한다. 초기에는 작은 공식(Pitting)을 시작되지만 이후 피복 콘크리트에 균열을 야기하고 강재의 단면과 주변 콘크리트의 부착력을 감소시킴으로서 철근콘크리트 구조물의 내구성 저하를 가속화시킨다. 발생된 균열폭은 점차 넓어짐에 따라 부식은 더욱 증가되어 콘크리트가 박리되는 현상이 발생한다(Broomfiled, 1997; Sadegh et al., 2015).

염해에 대한 저항성을 개선하기 위해 철근 콘크리트의 피복두께를 늘리는 방법이나 콘크리트의 표면에 흡착제를 도포하는 방법들이 주로 사용되어 왔다. 그러나 이와 같은 방법은 염화물 이온의 침투를 지연시키는 방법이며, 피복두께를 늘리는 방법은 경제적 손실 및 균열폭의 증가를 야기한다. 따라서 매립된 보강재의 내부식성을 증가시키는 방법이 제안되었으며, 대표적인 방법 에폭시, 폴리머, 아연 등 강재에 직접 방청 코팅을 적용하여 염화물 이온에 대한 부식저항성을 높이는 연구들이 꾸준히 진행되어왔다(Bellezze et al., 2006; Choi et al., 1994; Mohammed et al., 2014; Oh et al., 1992). 또한 염해환경에 노출된 콘크리트 구조물의 부식저항성과 공학적 성능을 높이기 위해 FRP(Fiber reinforced plastic) Bar를 적용한 연구들이 제안되었다(Choi and Jung, 2013; Zhang et al., 2015). FRP Bar는 일반 강재에 비해 고내구성, 낮은 열전도성, 내부식성 등 많은 공학적 장점을 가지고 있는 재료이며, 국내외에서도 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 구조물의 설계 및 시공지침이 제안된 실정이다(ACI, 2006; KCI, 2008). 특히 경제성 및 시공성 등의 장점을 지닌 유리섬유 보강재(GFRP: Glass Fiber Reinforced Plastic)에 대한 연구들이 활발하게 진행되어 왔는데, 높은 강도 대비 낮은 중량비, 높은 인장강도, 우수한 피로 및 부식 저항의 특성을 보인다(Ahmed et al., 2015; Almusallam, 2006; Choi et al., 2015; Correia et al., 2007; Sen and Jagannatha Reddy, 2013). 그러나 이러한 FRP 보강재는 많은 공학적 장점을 가지고 있으나, 낮은 탄성계수 및 취성파괴라는 공통적인 공학적 단점을 가지고 있다.

최근 들어 개발되고 있는 FRP Hybrid Bar는 내부에 강재를

[1]정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과
[2]정회원, 한국건설기술연구원
[3]정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과, 교신저자
***Corresponding author:** jjuni98@hannam.ac.kr
Department of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea
•본 논문에 대한 토의를 2016년 8월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Copyright ⓒ 2016 by The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

유리섬유와 에폭시로 코팅한 보강재료 인데, 항복이후의 인장경화 특성을 가지고 있으며, 비교적 높은 탄성계수를 지니고 있다. FRP Hybrid Bar에 대한 연구는 비교적 제한적인데, 제조방법 및 기초적인 공학적 특성에 대한 연구(Seo et al., 2013), 부식을 인가한 RC 보부재의 역학적 거동에 대한 연구가 진행되었다(Choi et al., 2015). 기존 연구결과에 따르면 FRP Hybrid Bar에 대해 부식을 유도한 결과 유기코팅막인 에폭시로 인하여 부식이 거의 발생하지 않았으나(Choi et al., 2015; KICT, 2013), 이는 건전부 FRP Hybrid Bar를 대상으로 한 연구이며, 운반 또는 제작 불량에 따라 발생할 수 있는 에폭시 코팅막의 국부적인 손상을 고려한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 FRP Hybrid Bar에 Notch를 가한 이후 촉진부식실험을 수행하여 부식수준에 따른 역학적인 특성의 변화를 분석하였다. 이를 위해 FRP Hybrid Bar를 매립한 부착력평가시편을 물-시멘트비 50%인 콘크리트를 사용하여 제작하였다. 또한 염해저항성이 뛰어난 고로슬래그 미분말(GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag)을 30% 치환한 콘크리트를 제조하여 일반철근을 매립하였으며, 촉진 부식후 부착력을 상대 비교하였다. 부식을 유도하여 강재와 콘크리트의 부착성능을 평가하는 Pull-out Test는 기존에도 많이 이루어졌지만(Chung et al., 2008; Hakan et al., 2012), 노치를 가진 FRP Hybrid Bar에 대한 Pull-out 시험결과는 매우 제한적이다.

2. 촉진부식된 FRP Hybrid Bar의 부착성능평가 시험

2.1 배합특성

일반 강재 및 FRP Hybrid Bar를 매립한 콘크리트 부착성능 시험 시편을 제작하기 위해 OPC(Ordinary Portland Cement) 콘크리트와 GGBFS를 30% 치환한 콘크리트가 준비되었다. 시편의 압축강도는 24 MPa로 설정하였으며, 분말도 4,000 cm^2/g을 가진 GGBFS가 사용되었다. Table 1과 2에서는 실험에 사용된 배합표를 나타낸다.

Table 1 Mix proportions for OPC concrete

W/B (%)	S/a (%)	G_{max} (mm)	Slump (mm)	Unit weight(kg/m^3)				AE (kg/m^3)
				W	C	S	G	
50.0	50.0	25	180	175	353	888	902	2.47

Table 2 Mix proportions for GGBFS concrete

W/B (%)	S/a (%)	G_{max} (mm)	Slump (mm)	Unit weight(kg/m^3)					AE (kg/m^3)
				W	C	Slag	S	G	
50.0	50.0	25	180	175	247	175	885	892	2.47

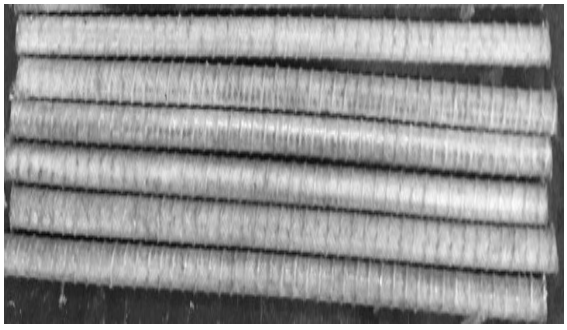
2.2 FRP Hybrid Bar 특성

기존 FRP의 문제점으로는 낮은 탄성계수와 취성파괴의 특성으로 인해 구조물 적용에 많은 제한이 있었다. 본 연구에서 사용된 FRP Hybrid Bar는 기존 철근에 FRP로 표피를 형성하고 철근의 부식을 차단하기 위해 에폭시 코팅을 적용한 재료이다. 이 보강재는 항복강도이후 PS tendon과 같이 인장경화가 발생하고 높은 탄성계수와 인장강도 및 우수한 내부식성 등의 장점을 가지고 있다(KICT, 2013; Choi et al., 2015). Fig. 1에서는 실험에 사용된 FRP Hybrid Bar와 그 단면을 사진으로 나타내고 있다.

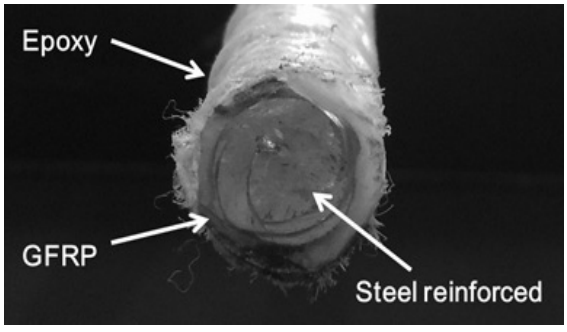
2.3 시편 제작

ASTM C234의 Full-out Test를 참고하여 100x100x100mm의 시편을 제작하였으며(ASTM C234-91a, 1991), 강재의 정착길이는 시편의 높이와 같은 100 mm로 제작하였다. 시편에 대한 모식도와 제작과정을 Fig. 2에 도시하였다. 본 연구에서는 부식에 따라 변화하는 부착력의 변화만 평가하였으므로 콘크리트내의 철근의 매립깊이는 실제 ASTM규격과 약간 다르게 고려하였다.

FRP Hybrid Bar의 내부식 성능을 매우 뛰어나므로 촉진 부식실험을 수행하더라도 부식량의 발생은 아주 적은 수준이다

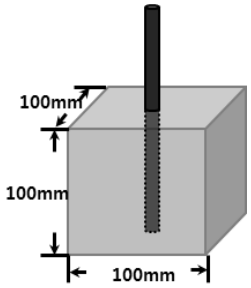


(a) Coating feature of FRP Hybrid Bar



(b) Cross section of FRP Hybrid bar

Fig. 1 Photos for FRP Hybrid bar



(a) Geometry of specimen

(b) Concrete placing

(c) Concrete curing

Fig. 2 Specimen geometry and preparations

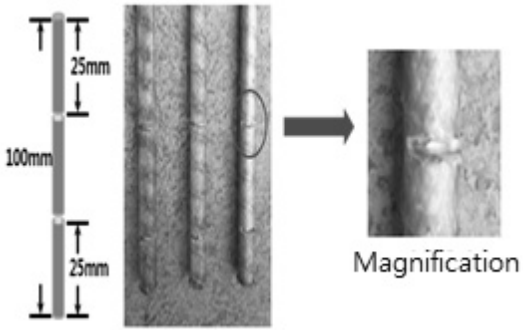


Fig. 3 Notch inducement in FRP Hybrid Bar

(Choi et al., 2015). 본 연구에서는 정착길이 100 mm에 대해 상단과 하단을 기준으로 25 mm의 간격을 두어 notch를 인위적으로 발생시켰다. 이는 운송 또는 제작 불량등으로 인해 발생할 수 있는 복합재의 손상을 고려한 것이다. Fig. 3은 FRP Hybrid Bar에 Notch를 이격한 모습 및 거리를 나타낸다.

2.4 촉진부식실험 개요

실제 해안환경에서의 자연적인 부식을 단기간에 유도하기는 매우 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 촉진부식실험(ICM: Impressive Current Method)을 적용하여 철근의 부식

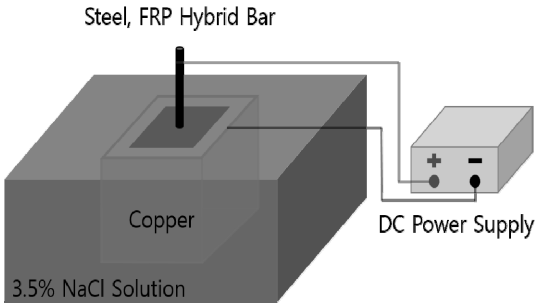


Fig. 4 Schematic diagram for ICM

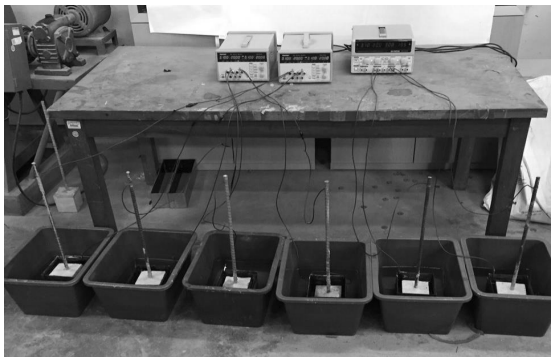


Fig. 5 Photos for IMC test

수준을 제어하였다. ICM을 적용하여 부식된 철근의 부착성능에 대한 평가는 이미 여러 논문에서 수행되어 왔다(Hakan et al., 2012; Tondolo, 2015; Lan chung et al., 2008; Choi et al., 2015). Fig. 4에서는 부식유도 실험에 적용한 ICM의 간단한 모식도를 나타내었으며, Fig. 5에서는 촉진부식실험 사진을 나타내고 있다.

수용액은 실제 해수와 같은 염화물 농도를 고려하기 위해 3.5% NaCl을 적용하였으며, 20 V의 전압을 인가하여 부식을 촉진하였다. 또한 콘크리트 시편 하부는 에폭시 코팅을 하여 측면부식을 유도하였으며 기존의 연구와는 다르게 콘크리트 시편의 노출면을 모두 구리판으로 감싸도록 고려하였다. 또한 콘크리트 상부의 철근은 국부적인 부식을 방지하기 위해 에폭시 코팅을 수행하였다.

철근 부식량 평가는 식 (1)과 같은 Faraday법칙의 계산값에 의한 부식량과 부착력 측정 후 수거한 강재의 부식량을 비교하였다.

$$M = \frac{c}{zF}\int qdt \tag{1}$$

여기서, M은 부식량(mol), z는 철의 이온수(=2), F는 Faraday의 수(=96,500 C), q는 전류(A), t는 측정시간$(\sec)$, c는 실험상수이다.

3. 부식된 보강재의 부착력 특성 평가

3.1 콘크리트의 압축강도

OPC 및 GGBFS 콘크리트의 압축강도를 Fig. 6에 나타내었는데, 재령 28일을 대상으로 하였으므로, GGBFS 콘크리트의 강도는 OPC에 비하여 약간 낮게 평가되었다. GGBFS 콘크리트의 잠재수경성에 의한 장기재령증가와 염해저항성의 개선은 기존의 문헌에 다양하게 소개되어 있다(Song et al., 2003, 2006; Lee and Kwon, 2012).

3.2 부식수준 설정

본 연구에서는 일반 강재를 적용한 시편의 부식수준을 0.0, 2.0, 5.0, 10.0%을 설정하였으며, 이에 대한 전압인가시간을 알기 위하여 OPC 콘크리트를 대상으로 Control 실험을 수행하였다. Table 3에서는 Control 실험을 진행한 강재의 이론 부식률과 실험 부식률을 나타내었으며 이를 Fig. 7에 나타내었다.

부식률은 시간의 증가에 따라 비선형적으로 증가하였는데, 이는 균열발생 등으로 염화물의 유입이 증가되고 이로 인해 전류량이 증가되었기 때문이다. 5일 경과후 10% 정도의 부식률에 근접함을 알 수 있었으며, 1일, 3일, 5일을 측정기간으로 설정하였다.

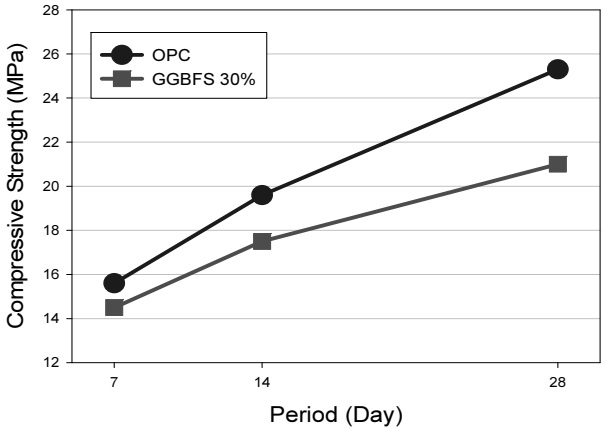


Fig. 6 Compressive strength development in OPC and GGBFS concrete

Table 3 Corrosion ratio in control test

Period(day)	Theoretical(%)	Test(%)
1	0.70	2.50
3	5.97	4.30
5	9.89	9.49
7	17.27	16.58
10	36.17	34.72

3.3 부식전후 콘크리트 부재의 부착 특성

3.3.1 시험장치

3.2절의 부식수준을 참고하여 촉진부식기간을 1~5일로 설정하였으며, 부식전후의 부착력평가시험을 수행하였다. 힘을 받는 콘크리트 면에 대한 국부적인 편심을 최소화하기 위해 시편 상부에 고무판을 설치하였는데, Fig. 8(a)와 (b)에는 시험에 적용된 시편과 부착력평가시험 전경을 나타내었다.

3.3.2 OPC 콘크리트내에서의 부식특성 비교

Table 4와 Fig. 9는 일반 강재를 적용한 OPC시편(0일~5일)과 notch가 없는 FRP Hybrid Bar(0일~10일)을 적용한 시편에 전압을 인가한 후의 부착성능평가 결과를 나타내고 있다.

OPC 시편 부착력평가 결과, 1일 전압인가시간 이후 기준조건에 비해 부착력이 1.5~1.7배로 높게 평가되었고, 전압인가시간 3일에서는 전압인가시간 0일과 비슷한 수준의 부착강도를 보였다. 초기에 부식이 발생하여 3~5%정도의 부식률을 가진 강재의 경우 부착력이 팽창압(rust swelling)으로 인해 일시적으로 상승하게 된다. 매립된 철근의 경우 부착력은 증가하지만 부식된 철근을 매립한 경우, 부착력은 감소하는 것이 일반적이다(Chung et al., 2008).

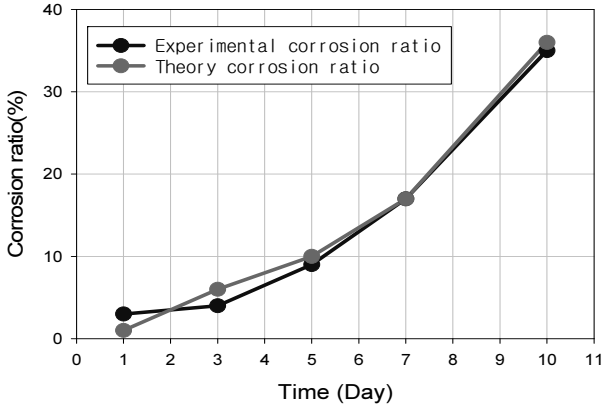
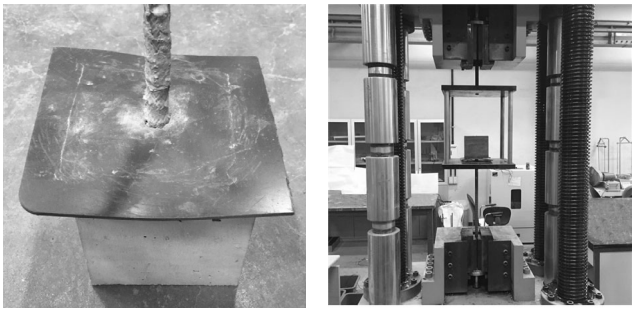


Fig. 7 Comparison of corrosion ratio



(a) Specimen preparation (b) Test setup for pull-off

Fig. 8 Photos for pull-off test

Table 4 Results in pull-off test in OPC and FRP Hyrid Bar

Period (Day)		0	1	3	5	7	10
Load (kN)	OPC	17.7	27.5	17.8	3.9	-	-
		18.8	29.8	19.7	4.0	-	-
	FRP	23.3	26.1	27.5	25.6	26.7	25.9
		27.5	27.2	26.5	26.8	27.8	26.0

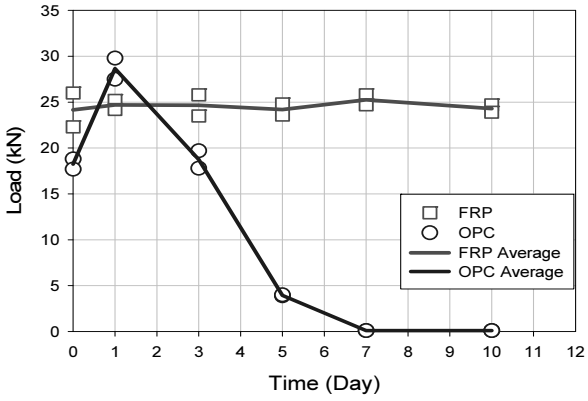


Fig. 9 Results in pull-off test in OPC and FRP Hybrid Bar

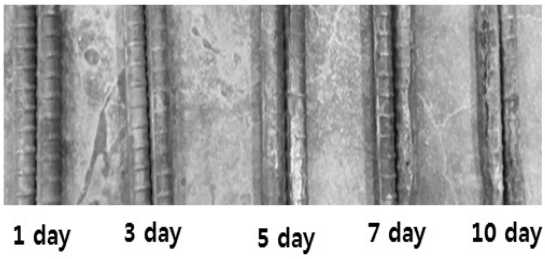


Fig. 10 Photos for corroded steel after pull-off test in OPC concrete

5일의 전압인가시간에서는 급격히 부착성능이 0.22~0.23배 수준으로 급격히 감소하는 경향을 보였으며, 7일 이후에서는 부착특성을 기대할 수 없었다.

FRP Hybrid Bar에 대해서는 전압인가시간이 증가하여도 부착력의 감소는 발생하지 않았으며, 22.3~26.0 kN 범위의 부착력 수준을 유지하였다. 이는 일반 철근의 부착력을 기대할 수 없는 수준의 부식조건에서도 FRP Hybrid Bar는 부식에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 시험경과시간에 따라 부식제거 후의 철근의 상태는 Fig. 10에 나타내었는데, 10일 경과 후 부식의 증가로 인해 단면이 크게 감소함을 알 수 있다.

3.2.3 GGBFS 콘크리트내에서의 부식특성 비교

Table 2에 제시된 30% 치환의 GGBFS 배합을 가진 콘크리트에 대해서도 동일한 시험을 수행하였다. 부식률이 10% 이상 진행시 부착력을 거의 기대할 수 없었으므로 0~10% 수준까지만 부식을 유도하였으며 부식수준에 따른 부착력을 평가하였다. 본 절에서의 FRP Hybrid Bar의 경우는 notch를 가진 것으로 실험결과는 Table 5에 나타내었으며, 이를 Fig. 11에 도시하였다. 일반 철근을 가진 OPC 콘크리트는 본 절에서 동일 시험을 반복하여 수행하였다.

Table 5 Results in pull-off test in OPC, GGBFS and FRP Hybrid Bar with notch

Corrosion ratio (%)		0	2	5	10
Load (kN)	OPC	17.7	29.1	16.6	4.3
		15.2	27.5	18.8	3.5
	FRP	23.3	26.1	27.2	28.3
		27.5	27.3	26.8	27.5
	GGBFS	17.5	22.0	17.2	13.7
		16.3	25.2	18.5	14.4

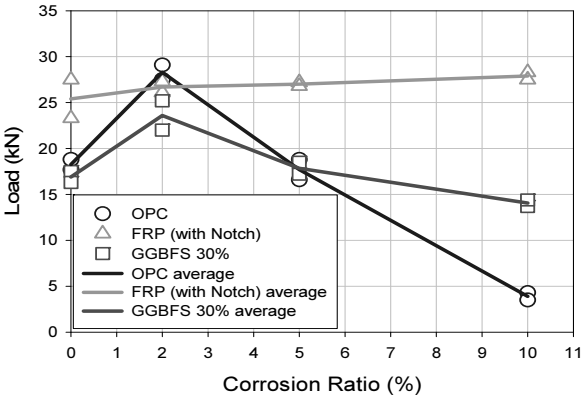


Fig. 11 Results in pull-off test with various corrosion level

OPC시편에 대해서는 부식수준 2%에서 가장 큰 부착성능을 보였으며, 부식률이 증가함에 따라 급격히 부착력이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 3.2.1절과 비슷한 경향을 나타내고 있으며, 10% 부식률에서는 부착력이 매우 낮은 수준으로 평가되었다. 부식 수준 5%에서는 초기조건과 비슷한 부착력의 경향을 보였으며, 부식수준 10%는 70~80%의 부착력 손실을 나타내었다.

FRP Hybrid Bar를 적용한 시편에 대해서는 인위적인 notch를 주었음에도 불구하고 부착력의 감소가 발생하지 않았다. GGBFS 시편의 부착성능거동은 OPC시편과 비슷한 경향을 보였다. 부식수준 2%에서는 OPC 시편에 보다 15~32% 정도 부착력이 저하되었는데, 이는 부식량 생성이 작아서 팽창압이 감소한 것으로 판단된다. 부식수준 10%에 대해서는 GGBFS의 뛰어난 염해저항성으로 인하여 OPC보다 1.6배의 부착력이 향상됨을 나타내었다. 이는 시험기간동안 지속적으로 수화가 진행되어 공극률이 감소되고 염화물 이온 흡착이 OPC 콘크리트보다 크므로 부식전류가 크게 감소하기 때문이다 (Song et al., 2006). Fig. 12에서는 5일 경과(10% 부식률) 까지

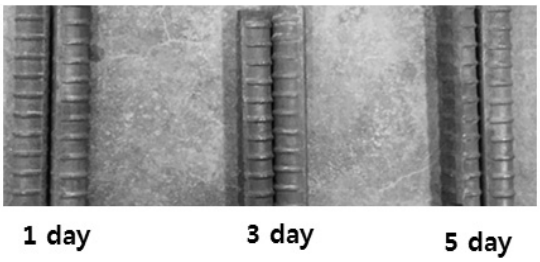
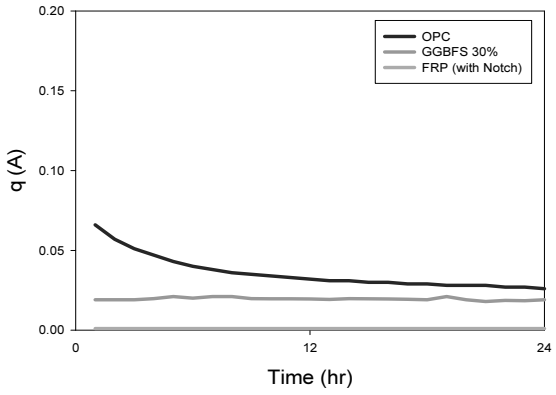
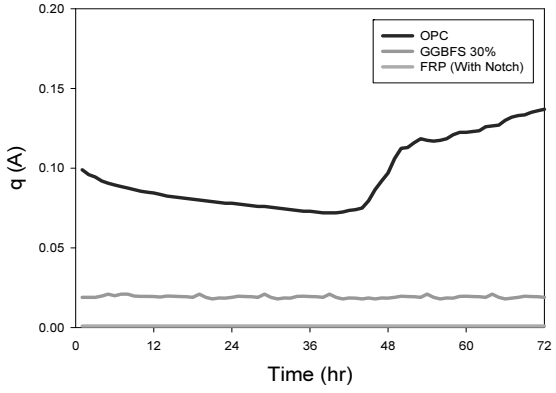


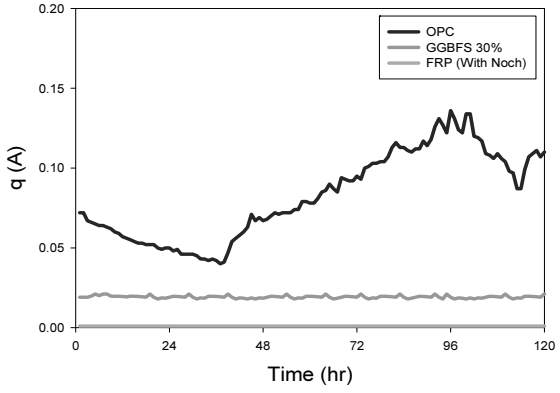
Fig. 12 Photos for corroded steel after pull-off test in GGBFS concrete



(a) Corrosion level 2%



(b) Corrosion level 5%



(c) Corrosion level 10%

Fig. 13 Measured current in OPC, GGBFS, and FRP concrete

Table 6 Normalized load to control case (OPC concrete)

Corrosion ratio (%)		0	2	5	10
Ratio of pull-off load	OPC	1.00	1.55	0.97	0.21
	FRP	1.39	1.46	1.48	1.53
	GGBFS	0.93	1.29	0.98	0.77

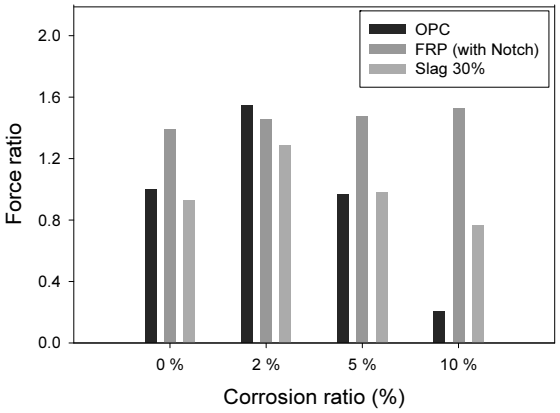


Fig. 14 Ratio of pull-off load with various corrosion level

의 GGBFS에매립된 철근의 부식 모습을 나타내고 있는데, Fig. 10과 비교할 경우 비교적 양호함을 알 수 있다.

3.3 OPC 및 GGBFS 콘크리트의 부식특성 비교

부착력의 변화는 통과된 전류량과 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 부식수준 2%, 5%, 10%에 해당하는 전류량을 도시하면 Fig. 13과 같이 나타낼 수 있다. 각 결과에서 FRP Hybrid Bar의 전류밀도는 notch를 가졌음에도 불구하고 매우 낮은 수준으로 평가되었으며, GGBFS를 혼입한 콘크리트에서는 균열이 발생하지 않았으므로 비교적 균일한 전류밀도가 관측되었다.

Table 6과 Fig. 14는 부식수준 0%의 OPC 콘크리트를 기주 기준으로, notch를 가진 FRP Hybrid Bar와 GGBFS 30% 혼입한 시편의 평균 부착력을 비교한 것이다.

GGBFS를 가진 콘크리트의 염해 저항성은 OPC 콘크리트에 비하여 뛰어나며 FRP Hybrid Bar는 notch를 가졌다하더라도 극심한 환경에서 부착력의 변화가 없음을 보여주고 있다.

4. 결 론

1) 일반 강재를 매립한 OPC 콘크리트 시편의 경우 부식수준 2%에서 기준값에 비해 1.5~1.7배의 높은 부착력이 평가되었는데, 이는 부식된 철근의 팽창압에 기인한 것이다. 3%의 부식수준에서는 1.0~1.1배로 기준조건과 비슷하였으

나, 부식수준 5%에서는 0.22~0.23배로 부착성능이 급격하게 저하되었다.

2) FRP Hybrid Bar를 가진 시편의 경우 인위적인 notch를 유도하였음에도 불구하고 전압인가시간에 따라 부식이 발생하지 않았으며, 부착력 역시 부식수준에 따라 22.3~26.0 kN의 일정한 수준을 나타내었다. 이는 notch를 가진다 하더라도 부식량 생성이 매우 작으며 일반 강재의 극심한 부식량을 야기하는 조건에 노출되더라도 부착력에는 큰 차이가 발생하지 않음을 알 수 있다.
3) 일반 강재를 적용한 GGBFS 콘크리트에서는 OPC 콘크리트에서 균열이 발생할 만큼 부식이 진전되더라도 기준조건의 77% 수준으로 부착력을 확보하고 있었다.

감사의 글

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

References

ACI Committee 440 (2006), Guide for the Design and Construction of concrete reinforce with FRP bars.

Ahmed, E. R., Farid, A., and Abdullah, A. R. (2015), Structural performance and Serviceability of Concrete Beams Reinforced with Hybrid (GFRP and Steel) Bars, Construction and Building Materials, 96, 519-529.

Almusallam, T. H. (2006), Load-deflection Behavior RC Beams Strengthened with GFRP Sheets Subjected to Different Environmental Conditions, Cement and Concrete Composites, 28, 879-889.

Arribas, I., Vegas, I., San-José, J. T., and Manso, J. (2014), Durability Studies on steelmaking slag concretes, Materials and Design, 63, 168-176.

ASTM C234-91a (1991), Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel, American Society for Testing and Materials annual book of standards.

Bellezze, T., Malavolta, M., Quaranta, A., and Roventi, G. (2006), Corrosion Behaviour in Concrete of Three Differently Galvanized Steel Bar, Cement and Concrete Composites, 28, 246-255.

Broomfiled, J. P. (1997), Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair, E&FN, 1-15.

Choi, I. C., and Jung, D. J. (2013), Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced With FRP Bar, *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, 19(4), 403-409.

Choi, O. C., Kim, C. H., Shin, Y. S., and Hong, G. S. (1994), Performance Tests of Epoxy-Coated Reinforcing Bars: Mecharical Properties, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 6(3), 173-179.

Choi, S. J., Mun, J. M., Park, K. T., Park, C. W., and Kwon, S.-J. (2015), Characteristics of Flexural Capacity and Ultrasonic in RC member with Corroded Steel and FRP Hybrid Bar, The Korea Contents Society, 15(8), 397-407.

Chung, L., Jay kim, J. H., and Yi, S. T. (2008), Bond Strength Prediction for Reinforced Concrete Members with Highly Corroded Reinforcing Bars, Cement and Cocncrete Composites, 30(7), 603-611.

Correia, J. R., Branco, F. A., and Ferreira, J. G. (2007), Flexural Behaviour of GFRP-Concrete Hybrid Beams with Interconnection Slip, Composite Structures, 77, 66-78.

Hakan, Y., Ozgur, E., and Serhan, S. (2012), An Experimental Study on the Bond Strength between Reinforcement Bars and Concrete as a Function of Concrete Cover, Strength and Corrosion Level, *Cement and Concrete Research*, 42(5), 643-655.

KCI (2008), Design and Construction Guide of Concrete Structures with Reinforcement of FRP, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Korea Concrete Institute, 20(1), 67.

KICT (2013), Development of Enhancing Life Span Technology for Waterfront Structures using FRP Hybrid Bar, Korea Institute of Engineering and Building Technology.

Kim, E. K., Kim, J. K., Lee, D. H., Kim, Y. U., and Kim, Y. C. (2004), A Study on Corrosion Resistance of the Reinforcement in Concrete Using Blast-Furnace Slag Powder, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 16(1), 1-9.

Lee, S. H., and Kwon, S. J. (2012), Experimental Study on the Relationship between Time-Dependent Chloride Diffusion Coefficient and Compressive Strengt, *Jounal of Korea Concrete Institute*, 24(6), 715-726.

Lee, S. S., and Song, H, Y. (2007), An Experimental Study on the Durability and Mechanical Properties of High Performance Concrete using Blast-Furnace Slag Powder, *Journal of The Archtectural Institute of Korea Structure and Construction*, 23(11), 119-126.

Mohammed, M., Hussein, A. T., Abul, K. A., and Shamsad, A. (2014), A Comparative Study of Corrosion Resistance of Different Coatings for Mortar-Embedded Steel Plates, Construction and Building Materials, 56, 74-80.

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.

Sadegh, P. A., Chan, D., and Ali, K. (2015), Corrosion Protection of the Reinforceing Steels in Chloride-Laden Concrete Environment Through Expoy/polyniline-camphorsulfonate, Corrosion Science, 90, 239-247.

Sen, T., and Jagannatha Reddy, H. N. (2013), Strengthening of RC Beams in Flexure using Natural Jute Fibre Textile Reinforced Composite System and its Comparative Study with CFRP and GFRP Strengthening Systems, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2(1), 41-55.

Seo, D. W., Park, K. T., You, Y. J., and Kim, H. Y. (2013), Enhancement in Elastic Modulus of GFRP Bars by Material Hybridization, *Enginerring*, 5, 685-869.

Song, H. W., Kwon, S. J., Lee, S. W., Byun, K. J. (2003), A Study on Resistance of Chloride Ion Penetration in Ground Granulated Blast-Furnace Slag Concrete, *Jounal of the Korea Concrete Institute*, 15(3), 400-408.

Song, H. W., Pack, S. W., Lee, S. H., and Kwon, S.-J. (2006), Service Life Prediction of Concrete Structures under Marine Environmnet Considering Coupled Deterioration, *Journal of Restoration of Building*

and Monument, 12(1), 265-284.
Tondolo, F. (2015), Bond Behaviour with reinforcement corrosion, Construction and Building Materials, 93, 929-932.
Zhang, H., He, L., and Li, G. (2015), Bond Failure Performances between Near-Surface Mounted FRP Bars and Concrete for Flexural Strengthening Concrete Structures, Engineering Failure Analysis, 56, 39-50.

Received : 02/25/2016
Revised : 03/02/2016
Accepted : 03/09/2016

요 지 : 콘크리트 구조물은 내구성과 경제성이 확보된 건설재료이지만, 매립된 철근의 부식은 내구적인 문제뿐 아니라 구조물의 안전성에 큰 영향을 준다. 본 연구는 유리섬유와 강재를 에폭시로 일체화 시킨 FRP Hybrid Bar를 적용한 콘크리트에 대해 염해 침투 저항성과 부식수준에 따른 부착성능을 평가하였다. 이를 위해 일반 강재를 적용한 OPC(Ordinary Portland Cement)시편과 GGBFS를 30% 혼입한 시편에 대하여 부식을 0~10% 촉진하여 부착력을 평가하였다. 또한 FRP Hybrid Bar는 에폭시 코팅으로 인해 보통 상태에서는 부식 진전이 매우 작으므로 notch를 인위적으로 가하여 OPC 콘크리트에 매립시켰으며, 이후 부식실험을 수행하였다. 실험 결과, 부식된 철근의 부착력이 21% 수준으로 감소해도 FRP Hybrid Bar에 발생된 notch는 부착력에 큰 영향이 없는 것으로 평가되었다. 또한 GGBFS 콘크리트를 사용한 부재의 경우, 통과전류가 감소하여 일반철근을 사용해도 70%이상의 부착력을 유지하고 있었다.

핵심용어 : 내구성, 부식, 인발시험, 고로슬래그미분말, FRP Hybrid Bar