

콘크리트구조물 중의 철근 부식 저감을 위한 FRP Hybrid Bar의 적용성 연구

이승태¹, 박광필^{1*}, 박기태², 유영준², 서동우²
¹군산대학교 토목공학과, ²한국건설기술연구원 스마트시티연구센터

A Study on the Application of FRP Hybrid Bar to Prevent Corrosion of Reinforcing Bar in Concrete Structure

Seung-Tae Lee¹, Kwang-Pil Park^{1*}, Ki-Tae Park², Young-Jun You², Dong-Woo Seo²

¹Department of Civil Engineering, Kunsan National University

²Korea Institute of Construction Technology, Smart Cities Research Center

요 약 최근 해양환경의 대형 SOC구조물 증가에 따른 구조물 내구성 증진에 관심이 증가되고 있다. 내구성 증진을 위해 개발된 FRP Hybrid Bar의 구조적 성능은 검증 되었으나 부식에 대한 저항성을 평가한 연구는 미흡하여 본 연구를 수행 하였다. 본 연구에서는 콘크리트 중의 철근 종류에 따른 철근부식 저항성을 평가하였다. 평가를 위하여 철근은 일반 철근과 FRP hybrid Bar을 사용하였다. 시험방법은 갈바닉전류(Galvanic)와 반전지법(Half-Cell)을 사용하였으며, 철근 부식 촉진을 위하여 콘크리트 내부에 염분을 0%, 1.5%, 3%, 6% 첨가하였다. 그 결과 갈바닉전류측정에서 FRP Hybrid Bar는 부식전류가 측정되지 않았다. 반면 일반철근에서는 시험 직후 부식이 발생하는 결과를 나타내었다. Half-Cell측정 결과에서도 4단계의 염분 함유량의 차이와 광물질혼화재료를 사용한 콘크리트와 일반콘크리트에 관계없이 FRP Hybrid Bar의 부식 저항성이 우수하게 나타났다. 따라서 FRP Hybrid Bar는 해양환경 및 철근부식이 예측되는 구조물 용 대체 철근으로 사용이 가능하나 부착성능, 탄성계수, 절곡부의 강선 노출에 대한 처리 방법 등이 개선되면 염해로부터 철근부식 저항성 확보를 요구하는 구조물에 사용 할 수 있는 우수한 소재로 판단된다.

Abstract Recently, the infrastructure of the marine environment has been increasing. Therefore, there has been increasing interest in increasing the durability of structures. The FRP Hybrid Bar with improved durability against corrosion was developed in recent years. On the other hand, studies that evaluate the corrosion resistance are insufficient.

In this study, the corrosion resistance according to the type of rebar in concrete was assessed and analyzed. The experiment used steel bars and FRP Hybrid Bar. The corrosion test method was a galvanic current and half-cell potential method. The accelerated corrosion test was carried out by four levels (0%, 1.5%, 3%, and 6%) of chloride added to the concrete. The galvanic current measurements revealed no corrosion current in the FRP Hybrid Bar. The half-cell measurement also showed the corrosion resistance of the FRP Hybrid Bar. Therefore, FHB can be used as an alternative steel for structures where a marine environment and steel corrosion are predicted.

Keywords : Concrete, Corrosion, FRP Hybrid Bar, Galvanic Current, Half-cell Potential

본 논문은 한국연구재단의 기본연구지원사업(후속연구) “황산염이온의 확산 및 화학반응성을 고려한 콘크리트 구조물의 내구성명 예측 및 성능 향상방안에 대한 연구” 연구과제(과제번호 16B16921350)에서 연구비를 지원받아 수행된 결과입니다. 이에 감사드립니다.

*Corresponding Author : Kwang-Pil Park(Kunsan National Univ.)

Tel: +82-63-469-4877 email: pkp0527@gmail.com

Received February 11, 2019

Revised March 5, 2019

Accepted May 3, 2019

Published May 31, 2019

1. 서론

산업발전과 함께 국토의 효율적인 활용을 위하여 해안 매립지와 해안가 구조물이 증가하고 있으며, 특히 해안가의 장대교량 및 터널과 같은 대형 SOC구조물의 신설이 증가하고 있다. 이와 같은 해안가 구조물은 유해환경에 노출되어 있어 내구수명 향상을 위한 투자와 노력이 증가하고 있다.

대부분의 구조물은 철근콘크리트 구조물로 철근콘크리트 구조물의 철근은 콘크리트의 특유 알칼리성(pH 12.5~13.6)으로 인하여 철근 표면에 부동태피막을 형성하여 부식으로부터 보호되어진다. 그러나 해안지대의 다양한 환경으로 인하여 구조물의 탄산화, 동결융해 등의 작용으로 콘크리트의 손상이 발생하게 되고 이로 인한 철근주변의 손상으로 인하여 철근 표면의 부동태 피막을 손상하여 부식이 발생하게 된다.

철근이 부식하게 되면 초기에 약 3~6배의 체적이 증가하게 되고 이로 인한 균열발생은 철근 부식을 급속하게 가속화시킴으로 구조물의 수명에 심각한 영향을 미치게 된다[1-3].

이러한 콘크리트 구조물의 내구성저하에 따른 수명저하는 지속적인 유지보수비용의 사용과 함께 교통 물류의 우회 등에 따른 간접비용의 증가로 인한 경제적, 사회적 파급은 매우 크다 할 수 있다.

이를 예방하기 위하여 해안가 및 철근 부식이 예측되는 구조물에 대해서는 철근부식을 방지하기 방법으로 신규 구조물의 경우 방청제, 에폭시철근, FRP Bar, 콘크리트 표면도장 등을 하고 있고, 공용중인 구조물은 전기방식 등을 통하여 재 알칼리화 등의 공법을 적용하고 있는 실정이다[4-6].

최근 해안환경의 신규 구조물에서 FRP Bar를 적용하는 방법이 제안되고 있다. FRP Bar는 일반 구조물에 사용하는 철근에 비해 내부식성, 고내구성 등의 장점을 가지고 있는 재료이다. 국내외에서 FRP Bar를 사용한 콘크리트 구조물의 설계 및 시공 지침이 제안된 실정이다. 그러나 FRP Bar의 경우 낮은 탄성계수 및 취성파괴라는 공학적 단점을 가지고 있다[7-8].

이러한 단점을 개선하기 위하여 개발된 FRP Hybrid Bar는 FRP Bar와 다르게 중앙에 철근을 배치하고 외부에 유리섬유와 에폭시로 코팅하여 만든 복합재료로 FRP Bar의 단점인 탄성계수 값이 일반 강재와 유사한 강도를 지니고 있으며, 기존 FRP Bar의 장점을 지니고 있는 소재이다[9-10].

FRP Hybrid Bar의 공학적 안정성에 대한 부착성능, RC부재의 역학적 거동 등의 다양한 성능검증 연구는 많이 수행되었다. 그러나 FRP Hybrid Bar에 대한 내구성 검토는 표면의 에폭시 코팅으로 인한 열화가 없을 것으로 판단하여 아직까지 철근부식을 포함한 내구성 검증은 미흡한 실정이다. 특히, FRP Hybrid Bar는 내부에 철근이 자리 잡고 있어 부식에 대한 검토를 실시해야 함에도 부식에 대한 연구는 아직 보고되고 있지 않다.

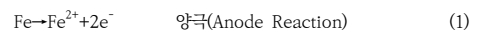
본 연구에서는 FRP Hybrid Bar의 부식에 대한 내구성 검토를 위하여 갈바닉 전류측정과 Half-Cell의 전위 측정방법을 이용하여 부식에 대한 저항성을 평가하였다.

연구에 사용된 콘크리트는 보통포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트와 최근 해안가 구조물에 많이 사용하는 고로슬래그미분말을 대체한 콘크리트를 사용하였다. 또한, 부식촉진을 위하여 콘크리트 내부에 염분을 0%, 1.5%, 3%, 6%를 함유 후 견습반복을 실시하여 부식에 대한 저항성을 평가하였다.

2. 이론적 배경

2.1 철근부식 메커니즘

콘크리트 중의 철근 부식현상은 전기화학적 반응에 의해 진행되며, 전기화학적 반응이란 콘크리트 속의 철근부식은 산화가 일어나는 양극과 환원이 일어나는 음극으로 구성된다. 이러한 반응을 나타낸 것이 식(1)과 식(2)와 같다.



콘크리트 내부는 pH가 약 12.5이상인 강알칼리 환경을 조성하고, 철근 표면에는 부동태피막(20~60Å 두께의 얇은 산화피막(γ -Fe₂O₃·nH₂O))을 형성으로 부식이 발생하지 않는다. 그러나 콘크리트의 탄산화, 균열, 화학적침식 등으로 인하여 부동태피막의 손상이 발생하게 되면 철근의 부식이 진행된다[2-3].

2.2 FRP Hybrid Bar의 특징

대형 SOC 철근·콘크리트 구조물의 해안환경 신설 증가로 구조물의 내구성 확보를 위하여 에폭시 코팅철근, FRP Bar등을 설계와 시공에 적용하고 있다. FRP Bar의 경우 낮은 탄성계수, 취성파괴 등의 단점과 내구성에 대한 검토도 미흡한 실정이다. 최근 FRP Bar의 단점을 개

선한 FRP Hybrid Bar(이하 FHB)는 Fig. 1과 같이 중심에 기존 사용하는 철근을 배치하고 FRP로 표피를 형성 후 내부식성 확보를 위해 유리섬유와 에폭시 코팅을 적용한 복합구조 재료이다.

FRP Hybrid Bar은 항복강도이후 PS tendon과 같이 인장경화가 발생하고 높은 탄성계수와 인장강도 및 우수한 내부식성 등의 장점을 가지고 있다. Fig. 2에서는 본 연구에 사용된 완성된 FRP Hybrid Bar의 단면을 나타내고 있다[10-12].



Fig. 1. FHB Production Process

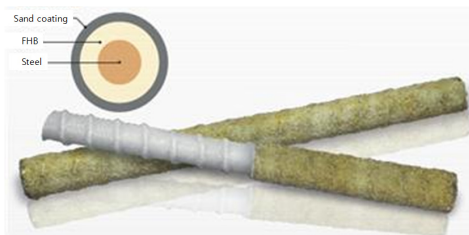


Fig. 2. FFB Configuration

3. 실험개요

3.1 배합특징

(1) 사용 재료 및 배합

본 연구에 사용한 결합재료 시멘트는 KS L 5201에

준하는 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC)와 고로슬래그미분말(이하 SGC)을 사용하였다.

SGC는 보통포틀랜드시멘트 대비 40%를 치환하여 사용하였다. 물-결합재비는 50%로 하였고 굳지않은 콘크리트의 물성은 공기량 5%와 Slump 8cm으로 제작하였다. 사용된 골재는 시험체 크기를 고려하여 굵은골재는 최대치수 13mm, 비중 2.54의 부순골재를 사용하였으며, 잔골재는 밀도가 2.53인 부순모래를 사용하였다. 사용된 배합은 Table 1에 나타내었다.

(2) 철근

연구에 사용된 철근의 외관을 나타낸 것이 Fig. 3이다. 길이는 130mm로 고정하였고, 일반철근은 D13 마환봉(이하 Steel)을 사용하였고, FHB는 D19 FRP Hybrid Bar를 사용하였다.

철근의 양단은 부식평가에 영향이 없도록 20mm를 에폭시 코팅하였다. Steel의 경우 대기중에 노출시 부식이 바로 발생을 억제하기 위하여 연마제로 표면을 깨끗이 세척 후 아세톤에 침지시켜 부식을 방지하였다.

(a) D13 steel



(b) D19 FHB

Fig. 3. Types of bars used for Test

3.2 갈바닉 전류(Galvanic Current) 평가

갈바닉 전류측정법은 Fig. 4와 같이 전해질에서 두 금속사이에 흐르는 전류를 측정하였다. 양극에는 부식이 발생하지 않는 금속(티타늄, 스테인레스, 흑연등)을 음극에는 부식을 측정하는 금속을 설치하여 측정한다. 본 실험에서는 사용 시편에 있는 철근을 음극으로 하고 티타늄 메쉬를 양극으로 하여 그 사이에 $1K\Omega$ 저항을 연결한 다음 이때 발생하는 전압을 전압계를 통해서 측정을 하였다. 측정된 전압은 옴의 법칙을 이용하여 전류를 변환하였다.[13]

Table 1. Mix proportions of concrete

types	G_{MAX} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/B (%)	S/a (%)	unit (kg/m ³)					
						W	C	S	G	FA	BS
OPC	13	8.0± 1.5	5.0± 1.0	50	43	187	374	706	937	-	-
SGC							224	702	930	-	150

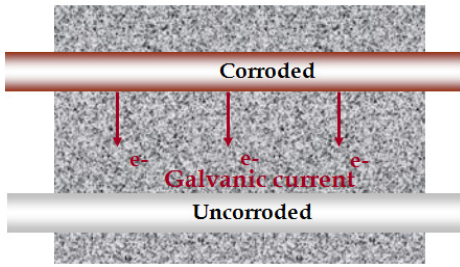


Fig. 4. Galvanic corrosion current Composition

3.3 반전지 전위법(Half-Cell Potential) 평가

시험체 제작은 Fig. 5와 같이 $\phi 100(150) \times 100\text{mm}$ 의 시험체 중심에 Steel과 FHB를 설치하고 외각에 티타늄 메쉬를 설치하여 콘크리트를 타설하였다. 부식촉진을 구성하기 위하여 시험체 제작과정에서 콘크리트배합에 염분을 함유하였다. 콘크리트중의 염분함유량은 결합재량에 0%, 1.5%, 3.0%, 6.0%를 함유하였다. 타설한 시편은 염분 용출을 방지하기 위하여 28일간 기건 양생을 진행하였다.

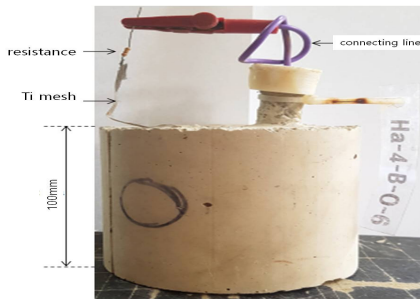


Fig. 5. Half-Cell Test Concrete Specimen

양생된 시험체의 철근 부식 촉진을 위하여 양생이후에 3일 습윤 4일 건조를 1cycle로하여 부식을 촉진시켰으며, 약 56cycle(1년) 동안 진행하였다.

철근부식의 진행 평가는 반전지 전위법(ASTM C 876)은 콘크리트 표면에 기준 전극을 접촉시켜 철근과의 전압차를 측정하는 방법으로 콘크리트 표면 위를 움직이면서 부식이 일어난 지점을 찾을 수 있는 방법이다. 기준 전극으로는 황산동 전극을 사용하였다. -350 mV 를 기준으로 부식 여부를 판단하였다.

콘크리트 고유 물성에 의한 영향을 최소화하기 위하여 측정 전 30분 동안 시편을 습윤 상태로 유지시켰다. 그러나 이 방법은 콘크리트의 함수량, 철근 주위의 산소량, 미

세 균열 등에 의해 많은 영향을 받는 단점을 가지고 있다. 부식전위 기준은 Table 2의 ASTM 기준에 의하여 시행하였다.[14]

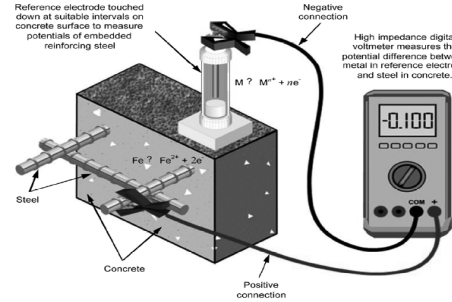


Fig. 6. Half-Cell Test Composition[14]

Table 2. Corrosion condition related to half-cell potential[14]

Corrosion Potential (E_{corr}) Values CSE(mV, CSE)	Corrosion Probability(%)
$E_{\text{corr}} > -200$	10% Low Risk of Corrosion
$-200 \leq E_{\text{corr}} \leq -350$	Intermediate
$E_{\text{corr}} < -350$	90% High risk of Corrosion

4. 실험결과 및 고찰

4.1 갈바닉 전류 특성

갈바닉 전류는 두 개의 이종금속인 티타늄 메쉬(음극) 및 철근(양극) 사이에 흐르는 전위를 측정하여 전류를 구하는 방식으로 3.5% NaCl 용액에 노출된 Steel 및 FHB의 갈바닉 부식전류를 측정하여 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다.

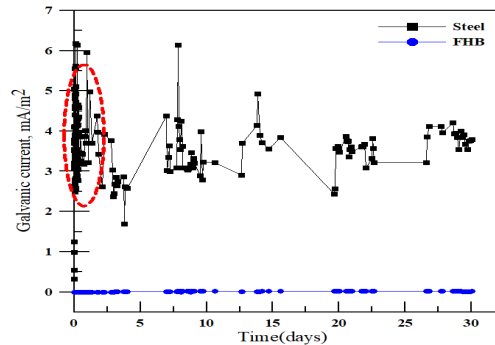


Fig. 7. Galvanic currents of Steel and FHB(3.5% NaCl, 30days)

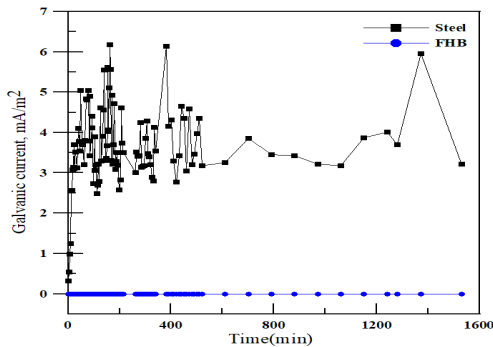


Fig. 8. Galvanic currents of Fig. 7 'O'part(3.5% NaCl, 1day)

30일간 측정된 Fig. 7에 나타난 결과와 같이 두 철근의 갈바니 부식전류는 큰 차이를 나타냄을 알 수 있다. Steel의 경우 실험 초기부터 30일까지 $2\text{mA}/\text{m}^2$ 이상의 값을 상위하고 불안정한 부식전류 값을 나타내었다. 반면, FHB의 경우 부식전류가 $0\text{mA}/\text{m}^2$ 부근에서 안정적으로 유지되는 것을 확인 할 수 있었다.

갈바니 전류는 초기에 이종금속의 전류 흐름 발생으로 부식 발생 여부를 초기에 확인 할 수 있다. Fig. 8은 Fig. 7의 24시간(1day)동안 측정된 갈바니 전류를 확대하여 나타낸 결과이다. FHB의 경우 시험 시작 직후에도 $0\text{mA}/\text{m}^2$ 를 유지하는 반면 Steel의 경우는 시작과 동시에 수분 내에 $2\text{mA}/\text{m}^2$ 이상의 값과 불안정한 전류 값을 나타내어 부식이 활성화 되어 있음을 확인 할 수 있었다.

또한, 30일간 갈바니 전류측정 이후 두 종류의 철근 외관을 나타낸 것이 Fig. 9이다. Steel의 경우 표면 전면에 붉은 녹과 검은 녹이 발생하고 있는 것을 확인 하였다. 그러나 FHB는 Steel과 같이 측면에서의 녹은 발생하지 않는 것을 확인하였다.



Fig. 9. Galvanic Current Test(3.5% NaCl, 28d)

FHB의 안정적인 전류 값과 외관상 부식이 발생하지 않은 것은 제작시 측면에 내부 강선을 감싸고 있는 유기계 수지가 부식인자의 이동을 차단하기 때문에 부식인자의 이동이 어려워 이와 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다.

4.2 철근 종류에 따른 부식평가

콘크리트 중의 철근부식을 판정하기 위해 전위측정법 가운데 자연전위 측정법은 그 원리가 단순하고 측정도 간단할 뿐만 아니라 특수한 측정 장치가 필요치 않아 가장 많이 이용되고 있으며 ASTM C 876에 규격화 되어있다.

Steel과 FHB의 콘크리트 중의 부식 발생여부를 확인하기 위하여 콘크리트 내부에 염분을 결합재량의 6%를 첨가하고 양생이후 3일 침지 4일 건조를 반복하여 1년간(56주) 철근 부식을 측정한 결과 Fig. 10에서 Fig. 12의 결과를 얻었다.

Fig. 10은 Steel에 대한 부식전류를 평가한 것으로 콘크리트 내부에 염분을 6%함유한 시험체에서는 시험 직후부터 자연전위가 -350mV 이상의 값을 나타내어 ASTM C876에서 정하는 부식 확률 90%에 해당하는 영역을 나타내었다.

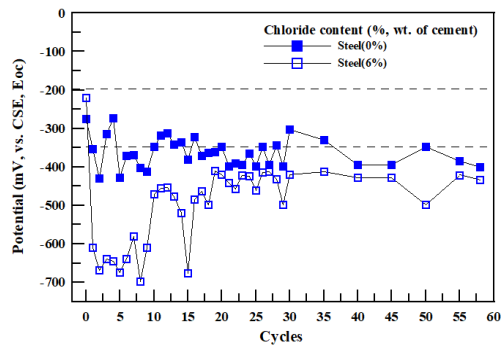


Fig. 10. Steel Comparison of half-cell potential (Chloride 0%, 6%)

하지만 염분을 함유하지 않은 콘크리트에서는 $-280 \sim -450\text{mV}$ 로 불안정한 값을 나타내어 부식 발생에 대해 판단하기 어려운 것으로 나타났다.

FHB의 경우 Fig. 11에서 보는 것과 같이 콘크리트 내부의 염분 함유량과 관계없이 모두 $-200\text{mV} \sim -350\text{mV}$ 이하 값을 나타내고 있는 것을 확인하였다. 이와 같은 측정값은 FHB의 제작 특성상 내부로 유해물질의 투수가 어렵기 때문에 FHB의 부식으로 나타난 결과가 아닌 것으로 예측되고, 이는 측정을 위한 전선의 부식으로 인하여 나타난 결과로 판단된다.

즉, 갈바니 전류 측정에서 콘크리트가 없는 상태에서도 갈바니 전류가 $0\text{mA}/\text{m}^2$ 의 값을 나타내었기 때문에 콘크리트 내부의 FHB에서도 부식전류가 발생하지 않았다고 판단 할 수 있다.

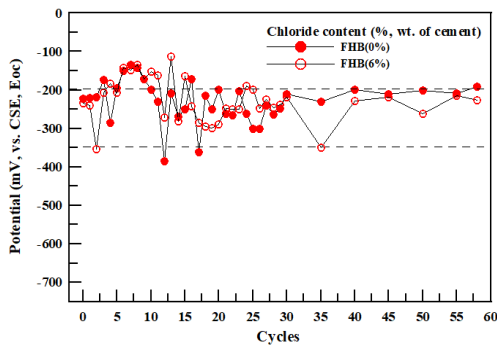


Fig. 11. FHB Comparison of half-cell potential (Chloride 0%, 6%)

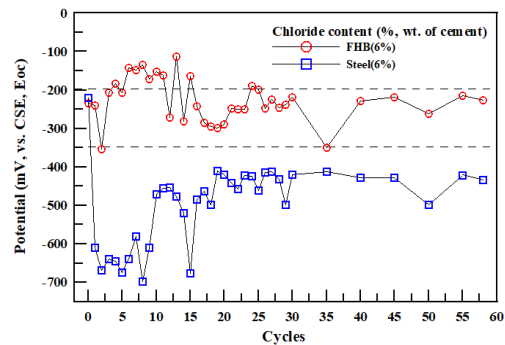
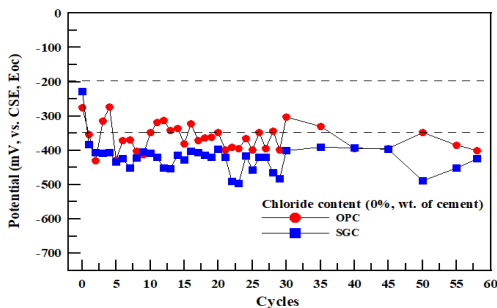
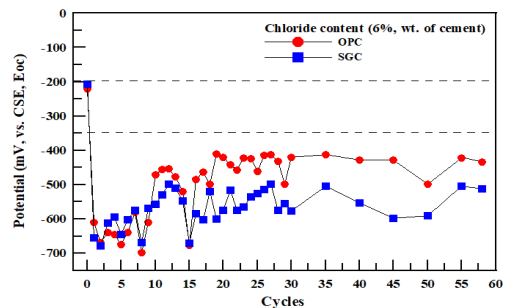


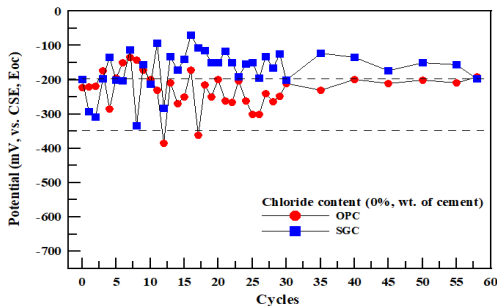
Fig. 12. FHB & Steel Comparison of half-cell potential (Chloride 6%)



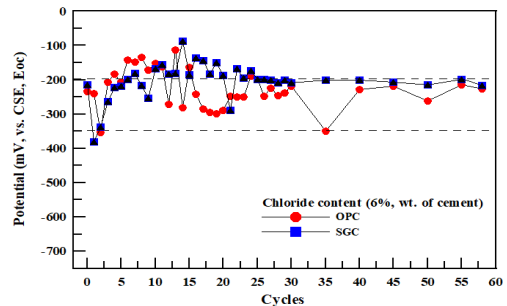
(a) Steel (Chloride content 0%)



(b) Steel (Chloride content 6%)



(c) FHB (Chloride content 0%)



(d) FHB (Chloride content 6%)

Fig. 13. Comparison of half-cell potential by binder type

4.3 결합재 종류에 따른 부식특성

OPC 및 SGC 콘크리트 중에 매입된 Steel 및 FHB의 자연전위를 약 1년(56주)측정한 결과 Fig.13에 나타내었다.

Steel을 사용한 두 종류의 콘크리트에 대해 자연전위를 측정한 (a),(c)에서 염분은 혼입량과 배합에 관계없이 -350mV이상의 자연전위 값을 나타내어 철근 부식의 활성영역에 있는 것으로 나타났다.

콘크리트에 고로슬래그미분말을 혼입한 경우 보통포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트보다 부식 저항성이 우수한 것으로 보고되고 있다. 그러나 콘크리트 제작시 내부에 염분을 혼입한 경우 이와 같은 결과와 일치하는 결

과가 나타나지 않는 것을 확인하였다.[15]

(b),(d)의 FHB를 사용한 콘크리트의 경우 Steel의 결과와 다르게 -350mV이하의 값을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 이는 ASTM C876의 평가 기준의 불활성영역 값을 나타내는 것을 확인하였다.

Fig. 14는 결합재료의 종류에 관계없이 두 종류의 철근에 염분을 6%함유한 콘크리트의 자연전위를 정한 결과이다. 그림에서 콘크리트 중에 많은 염분을 함유하고 있음에도 콘크리트의 배합 종류에 관계없이 FHB의 부식 발생 확률이 ASTM C 876의 평가 기준의 불활성영역 또는 10%미만의 철근부식으로 나타나는 것을 확인하였다.

반면 일반 Steel은 배합에 관계없이 90%이상 부식발생 확률이 있는 것으로 나타났다.

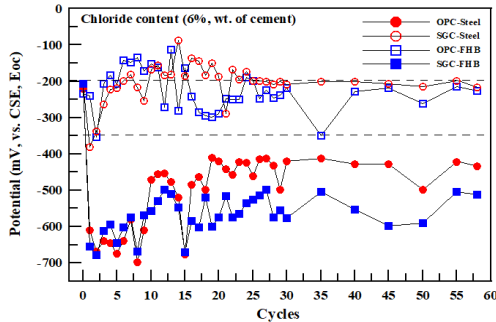


Fig. 14. Comparison of Half-cell Potential by binder type and type of rebar(Chloride content 6%)

해양환경에서의 염해에 대한 저항성을 높이고자 고로슬래그미분말을 사용하고 있지만 내부에 다량의 염분이 포함되어 있다면 고로슬래그미분말을 사용한 콘크리트에서도 철근부식을 억제하는 효과는 없는 것으로 판단된다. 이는 보통포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트의 경우도 동일한 결과를 나타내었다.[16-18]

따라서 염해환경에 노출된 콘크리트의 경우는 콘크리트의 선택도 중요하지만 내부에 염분이 침투하지 못하도록

록 콘크리트의 균열관리 및 충분한 피복 두께를 확보해야 할 것으로 판단된다.

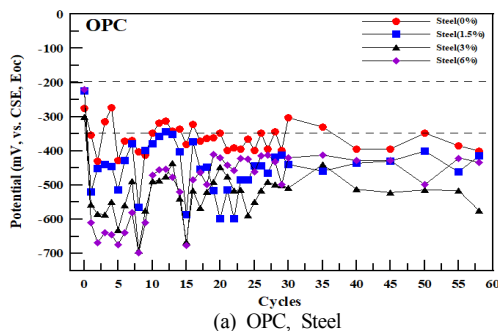
4.4 염분함유량에 따른 부식특성

철근부식 발생에 있어서 염분의 농도에 대한 영향을 평가하기 위해 Steel과 FHB를 사용한 OPC와 SGC에 결합재량에 염분을 0%, 1.5%, 3%, 6%를 혼입하여 염분의 농도에 따른 자연전위 변화를 56사이클 측정하여 Fig. 15에 정리하였다.

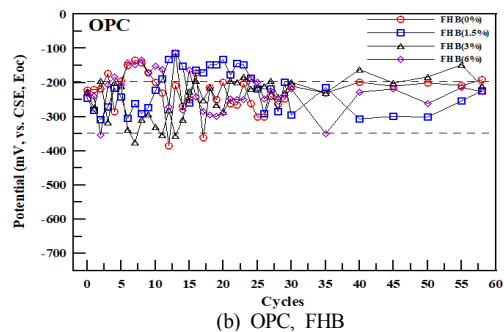
(a),(b)는 OPC 중의 Steel과 FHB철근의 부식을 56사이클 동안 평가한 결과로 염분의 함유량에 관계없이 FHB는 -350mV이상의 불활성영역 또는 90%이상 부식이 발생하지 않는 영역의 결과를 나타내는 것으로 관찰되었다. 반면 Steel의 경우 염분의 함유량과 관계없이 초기에서부터 자연전위 값이 활성영역으로 측정되어 부식이 진행이 되고 있음을 예측하였다.

고로슬래그미분말을 사용한 콘크리트의 염분 함유량에 따른 자연전위를 측정한 결과 (c),(d)와 같이 Steel과 FHB의 구분이 확실하게 나타나는 것을 확인하였다. 즉, FHB의 비활성영역과 Steel의 활성영역이 명확하게 구분되는 것을 확인하였다.

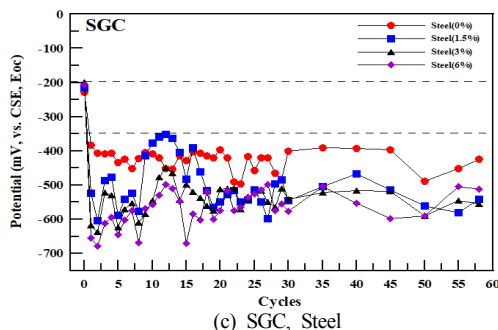
Fig. 16은 OPC와 SGC의 염분 함유량에 따른 자연전위를 모두 정리한 결과로 FHB의 포인트들이 대부분 불



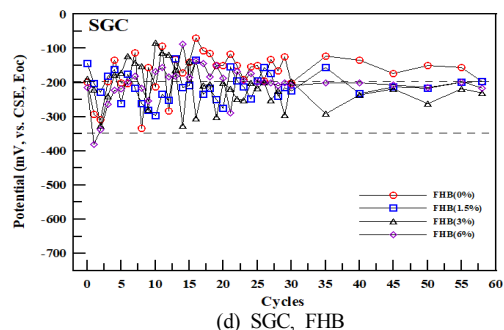
(a) OPC, Steel



(b) OPC, FHB



(c) SGC, Steel



(d) SGC, FHB

Fig. 15. Comparison of half-cell potential by Chloride content

활성영역에 있는 것으로 나타난 반면 Steel의 포인트 경우는 염분의 함유량에 관계없이 모두 부식 활성영역에 존재하는 것을 확인하였다.

이와 같은 결과는 갈바닉 전류측정에서 나타난 FHB의 부식전류 미발생과 유사한 결과를 나타내었으며, 이는 FHB 제조시 사용되는 예폭시계 수지가 철근 표면의 염분 및 수분의 침투를 억제하여 부식환경에 필요한 산소, 수분, 염분의 이동이 어려워 부식이 발생하지 않은 것으로 생각된다.

따라서 해양환경 및 철근의 부식이 예상되는 구조물에 대해서는 구조물용 대체철근으로써, FHB의 사용이 방식 측면에서 매우 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있으며, 부착성능, 탄성계수 등 철근의 역학적 특성이 개선된다면 우수한 해양철근용 소재로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

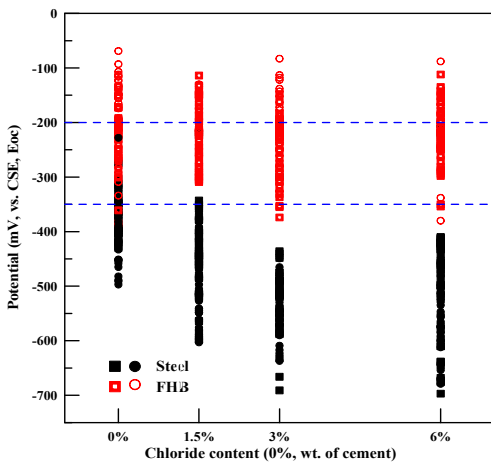


Fig. 16. Result of half-cell potential by Chloride content (OPC&SGC)

5. 결론

본 연구는 해양환경에 건설되는 구조물의 철근부식 예방을 위한 철근 대체 재료로 사용이 가능한 철근과 FRP Bar의 개념을 복합하여 개발된 FRP Hybrid Bar에 대한 부식에 저항성을 평가한 것으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Steel과 FHB의 부식발생 갈바닉 전류를 측정 결과 Steel의 시험 직후 $2\text{mA}/\text{m}^2$ 이상의 불안한 전류를 나타내며 부식이 발생하였으나 FHB는

$0\text{mA}/\text{m}^2$ 을 시험 초기부터 종료시점까지 유지하여 부식이 발생하지 않는 것을 확인하였다.

2. Steel과 FHB의 반전위법에 의한 자연전위측정 결과 염분의 유·무에 관계없이 Steel은 시험 시작부터 -350mV 이하 부식 확률 90%이상을 나타내었고, FHB는 -350mV 이상의 값을 보여 비활성영역 또는 10%미만의 부식 확률 상태를 나타내었다.
3. 결합재의 종류에 따른 철근부식을 활성영역에 대한 평가에서는 결합재의 종류에 관계없이 염분을 함유한 Steel은 자연전위가 -350mV 이하로 나타났으며, FHB는 불활성영역으로 측정되었다.
4. 염분의 함유량에 따른 철근부식을 평가한 결과 결합재의 종류와 염분의 함유량에 관계없이 FHB에서는 자연전위가 비활성영역으로 측정되는 것을 알 수 있었다. 이는 철근 내부에 염분이 존재하여도 철근표면에 부식인자가 투과되지 않으면 부식이 발생하지 않는 것을 확인하였다.

이상의 결과를 종합하면 FHB는 해양환경 및 철근부식이 예측되는 구조물용 대체 철근으로 사용이 가능하나 부착성능, 탄성계수, 절곡부의 강선 노출에 대한 처리 방법 등이 개선되면 염해로부터 철근부식 저항성 확보를 요구하는 구조물에 사용 할 수 있는 우수한 소재로 판단된다.

References

- [1] M. Makita, K. Takewaka, "Application of Cathodic Protection for Reinforced Concrete Structure", The First KCI-JCI Seminar on Evaluation, Repair and Rehabilitation of Concrete Structures, pp.93~106, 1994
- [2] Sadegh, P. A., Chan, D., Ali, K., "Corrosion Protection of the Reinforcing Steels in Chloride-Laden Concrete Environment Through Expoy / polyniline - camphorsulfonate", Corrosion Science, Vol.90, pp.239-247, 2015
DOI:https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.10.015
- [3] Kim, J. P., Park, K. P., Kim, S. S., Jung, H. S., Lee, S. T., "Effect for Steel Corrosion Protection in Concrete applying Surface Coating Anode and Solar Battery", Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute, Vol.18, No. 4. pp.44-51, 2009
- [4] Bellezze, T., Malavolta, M., Quaranta, A., and Roventi,

- G., "Corrosion Behaviour in Concrete of Three Differently Galvanized Steel Bar", Cement and Concrete Composites, Vol.28, pp.246-255, 2006
DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.01.011
- [5] Oh., K. S., Park, K. T., Kwon, S. J., "Corrosion Protection of the Reinforcing Steels in Chloride-Laden Concrete Environment Through Expoy/polyniline-camphorsulfonate", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol.20, No.4, pp.51-58, 2016
- [6] Mohammed, M., Hussein, A. T., Abul, K. A., and Shamsad, A., "A Comparative Study of Corrosion Resistance of Different Coatings for Mortar-Embedded Steel Plates", Construction and Building Materials, Vol.56, pp.74-80, 2014
DOI:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.059
- [7] ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of concrete reinforce with FRP bars", 2006
- [8] KCI, "Design and Construction Guide of Concrete Structures with Reinforcement of FRP", Proceedings of the Korea Concrete Institute, Korea Concrete Institute, Vol.20, No.1, pp.67, 2008
- [9] Ahmed, E. R., Farid, A., Abdullah, A. R., "Structural performance and Serviceability of Concrete Beams Reinforced with Hybrid (GFRP and Steel) Bars", Construction and Building Materials, Vol.96, pp.519-529, 2015
DOI:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.063
- [10] Choi, S. J., Mun, J. M., Park, K. T., Park, C. W., and Kwon, S.-J., "Characteristics of Flexural Capacity and Ultrasonic in RC member with Corroded Steel and FRP Hybrid Bar", The Korea Contents Society, Vol.15, No.8, pp.397-407, 2015
- [11] Seo, D. W., Park, K. T., You, Y. J., Kim, H. Y., "Enhancement in Elastic Modulus of GFRP Bars by Material Hybridization", Enginerring, Vol.5, pp.685-869, 2013
- [12] Choi, I. C., Jung, D. J., "Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced With FRP Bar", Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety, Vol. 19, No. 4, 403-409., 2013
- [13] ASTM G 109, "Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments", 2013
- [14] ASTM C 876, "Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete", 2009
- [15] Ilker, B. T., Ahmet, R. B., "Effect of ground granulate blast-furnace slag on corrosion performance of steel embedded in concrete", Materials and Design, Vol.7(3), pp.3358-3365, 2009
DOI:https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.01.057
- [16] Lee, S. T., "Evaluation on the Deterioration and Durability of Cement Matrix Subjected to Seawater Attack", Ph. D. Dissertation, Hanyang Univ., Korea., 2003
- [17] Lee, B. K., Kim, G. Y., Kim G. T., Shin, K. S., Nam, J. N., "Chloride Ion Penetration Resistance of Slag-replaced Concrete andCementless Slag Concrete by Marine Environmental Exposure", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 29, No. 3 pp. 299-306, 2017
- [18] Lee, B. K., Kim, G. Y., Koo, K. M., Shin, K. S., "Properties of Compressive Strength of Mortar Based on High-activated Blast Furnace Slag using the Slag by-product as an Activator", Journal of the Korea Institute of Building Construction, Vol. 14, No. 1, pp. 37-44, 2014

이 승 태(Seung-Tae Lee)

[정회원]



- 1999년 8월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 군산대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

건설재료, 콘크리트 구조, 콘크리트 포장

박 광 필(Kwang-Pil Park)

[정회원]



- 2003년 3월 : 대전대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2010년 8월 : 대전대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2015년 5월 ~ 현재 : 군산대학교 토목공학과 연구교수

<관심분야>

건설재료, 콘크리트 내구성, 콘크리트 유지보수

박 기 태(Park Ki Tae)

[정회원]



- 1992년 2월 : 연세대학교 토목공학과 (공학사)
- 1994년 2월 : 연세대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2006년 2월 : 연세대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 선임연구위원

〈관심분야〉

유지관리, 건설-IT

유 영 준(Young-Jun You)

[정회원]



- 1998년 8월 : 연세대학교 한국대학원 토목공학 (구조공학 석사)
- 2015년 8월 : 연세대학교 한국대학원 토목공학 (구조공학 박사)
- 1998년8월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구위원

〈관심분야〉

유지관리, 건설-IT

서 동 우(Dong-Woo Seo)

[정회원]



- 2008년 5월 : Bucknell Univ. 토목환경공학과 (구조공학 석사)
- 2013년 2월 : Northeastern Univ. 토목환경공학과 (구조공학 박사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

〈관심분야〉

내풍공학, 구조물 유지관리, 구조물 SHM