

# 동결융해 이후의 FRP Hybrid Bar의 부식 저항성

## Resistance to Chloride Attack of FRP Hybrid Bar After Freezing and Thawing Action

류화성<sup>1</sup> · 박기태<sup>2</sup> · 윤용식<sup>3</sup> · 권성준<sup>3\*</sup>Hwa-Sung Ryu<sup>1</sup> · Ki-Tae Park<sup>2</sup> · Yong-Sik Yoon<sup>3</sup> · Seung-Jun Kwon<sup>3\*</sup>

(Received February 14, 2018 / Revised March 20, 2018 / Accepted March 20, 2018)

RC(Reinforced Concrete) structures are exposed to various exterior conditions, and the performances of both chloride resistance and freezing/thawing action are evaluated for those exposed to corrosive environment-sea shore. Recently developed FRP Hybrid Bars which is coated with glass fiber and epoxy with core steel has an engineering advantage of higher Elasticity than FRP rod. In this work, corrosion resistance, weight loss, and bond strength are evaluated for the FRP Hybrid Bar tested through freezing/thawing action for 300cycles. The double coated FRP Hybrid Bar shows the least weight loss without defection due to freezing/thawing action. Bond strength in FRP Hybrid Bar increases to 120% of normal steel through torturity effect with Si-coating. Bond strength in normal steel shows 0.86~0.89times in 3-day corrosion acceleration and 0.35~0.38times in 5-day corrosion acceleration, however, that in FRP Hybrid Bar shows little changes in bond strength before and after freezing/thawing action.

**키워드** : FRP Hybrid Bar, 부식, 동결융해, 촉진시험, 부착력, 에폭시 코팅

**Keywords** : FRP Hybrid Bar, Corrosion, Freezing and thawing action, Accelerated test, Bond strength, Epoxy-coating

### 1. 서론

콘크리트 구조(RC: Reinforced Concrete)는 기본적으로 압축 부는 콘크리트로, 인장부는 보강재로 강화하여 외력에 지지하며 구조물 또는 구조부재로 사용되어 왔다. 해수 또는 해안환경에 노출된 콘크리트 구조물은 염화물 유입에 노출되며, 매립된 철근의 부식이 발생한다(Broomfield, 1997; Song et al. 2006). 부식이 발생된 콘크리트 구조물은 초기에는 녹물이 배어나고 균열이 발생하는 등 사용성에 대한 문제가 발생하고, 나아가 피복 콘크리트의 박락, 보강재의 단면감소 등 구조적인 문제로 진전된다. 그러므로 많은 국내외 지방서 및 규격에서는 해안가의 부식 환경에 노출된 구조물에 대해 내구성 설계 및 평가를 통해 내구수명을 정의하고 이에 대한 설계 절차를 수립하고 있다(JSCE, 2007; CEN, 2000; ACI, 2008).

1990년대 이후 강재의 부식을 제어하기 위해 많은 연구들이 수

행되었고, 에폭시 코팅 또는 용융아연도금 코팅 철근 등이 개발되어 왔다(Oh et al. 1992; Bautista et al. 1996). 또한 내부의 철근을 사용하지 않고 유리섬유와 에폭시 코팅을 이용한 FRP(Fiber Reinforced Plastic) Bar는 고강도 및 고내구성을 확보할 수 있으며, 절연성 및 구조물 경량화에도 우수한 성능을 나타내고 있다(Shin et al. 2006; ACI, 2006).

그러나 에폭시 또는 아연도금 철근은 경제성 및 굽힘 등에 대한 문제가 여전히 제기되고 있으며, FRP Bar의 경우 경제성 및 낮은 탄성계수로 인한 사용성 문제가 지속적으로 야기되고 있다. 2010년 이후 취성특성 및 낮은 탄성계수를 제어하기 위해 심재는 강재로, 외부는 유리섬유와 에폭시로 일체화시킨 FRP Hybrid Bar에 대한 연구가 진행되고 있다. 많은 연구에서 기본 역학적 특성(Seo et al. 2013; KICT, 2013), 내부식성 및 부착성능(Hwang et al. 2017; Oh et al. 2016) 및 자외선 노출 저항성(Yoon et al. 2017;

\* Corresponding author E-mail: [jjuni98@hannam.ac.kr](mailto:jjuni98@hannam.ac.kr)

<sup>1</sup>한양 E&C (Hanyang Experiment and Consulting, Hanyang University ERICA, Ansan 15588, Korea)

<sup>2</sup>한국건설기술연구원 구조융합연구소 (Korea Institute of Civil engineering and building Technology, Kyeonggi-do, 10223, Korea)

<sup>3</sup>한남대학교 건설시스템공학과 (Department of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

Hwang et al. 2017) 등에 대해 연구가 수행되었으며, 구조적 및 내구적 성능이 확보되고 있는 실정이다.

해안가 또는 부식환경에 노출된 콘크리트 구조물은 항상 수분에 노출되어 있다. 동결기에 낮은 온도에 노출된 콘크리트는 일반적으로 -5 °C부터 공극수가 얼기 시작하며 이러한 동결융해작용은 콘크리트 모재를 팽창압으로 파괴시킨다(Mehta, 1993). 또한 염해와 같이 복합염화가 발생할 경우, 내부의 염화물 응축(Choi et al. 2012), 콘크리트와의 열팽창계수 차이로 인한 경계면 열화 및 온도저하에 따른 에폭시 수지의 경화 등으로 인해 표면에 결함이 발생할 수 있으며, 이에 대한 부식성능의 규명이 필요하다.

본 연구에서는 부착력을 더욱 확보하기 위하여 에폭시-규사코팅이 된 FRP Hybrid Bar를 대상으로 동결융해 시험을 수행하였으며, 동결융해에 따른 중량변화율을 평가하였다. 또한 동결융해 전후의 FRP Hybrid Bar를 대상으로 촉진부식시험(ICM: Impressed Current Method)을 차용하여 부식된 FRP Hybrid Bar의 부착강도를 평가하였다. 본 연구를 통하여 동결융해가 FRP Hybrid Bar와 그 구조체에 미치는 영향이 정량적으로 평가될 것이다.

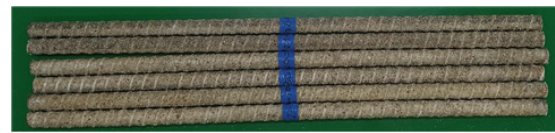
## 2. 사용재료 및 실험 방법

### 2.1 실험의 개요

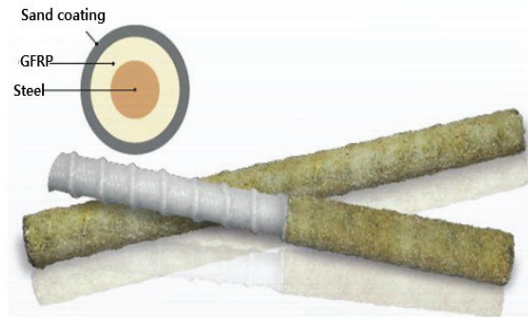
본 절에서는 에폭시-규사코팅 된 FRP Hybrid Bar에 대하여 동결융해 300 cycle 시험을 수행한 뒤 외관조사, 중량결손율을 측정한다. 또한 동결융해 전후의 FRP Hybrid Bar를 이용하여 콘크리트 인발시험용 시편을 제조하였으며, 촉진부식시험을 수행하여 부식률 및 인발강도의 변화를 분석하였다.

### 2.2 사용재료

FRP Hybrid Bar는 외경 13 mm, 내부 심재 10 mm를 사용하였으며, 길이 600 mm로 하여 부착강도를 평가하였다. 규사가 코팅된 FRP Hybrid Bar의 경우 같은 직경에 대하여 조도가 커지므로 부착강도를 증가시킬 수 있다는 장점이 있다. 또한, FRP Hybrid Bar와 상대적 부식성능 평가를 위해 D13, SD400의 일반철근이 사용되었다. 콘크리트는 OPC(Ordinary Portland Cement)를 사용하였으며, 설계강도 24 MPa, 물-시멘트비 0.5, Slump 180 mm의 배합을 사용하였다. AE 감수제는 시멘트의 0.7 %를 첨가하여 모두 동일하게 배합하였으며 공기량은 4.5 % 이상이 되도록 고려하였다. Fig. 1에서는 FRP Hybrid Bar의 모식도와 관련 사진을 나타내었으며 Table 1에서는 부착력 평가를 위한 콘크리트 배합표를 나타내



(a) Photo for FRP Hybrid Bar



(b) Compositions

Fig. 1. Schematic diagram of FRP Hybrid Bar

Table 1. Mix proportions for concrete sample

W/C (%)	S/a (%)	G <sub>max</sub> (mm)	Slump (mm)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )				AE (kg/m <sup>3</sup> )
				W	C	S	G	
50	50	25	180	175	353	888	902	2.47

Table 2. Variables of material for this study

Case	Material	Times of Epoxy resin coating	Test name(time)
Nor	Normal rebar	-	- ICM(6) - Bond strength test(3) - Bond strength test with ICM(6)
FRP0	FRP Hybrid Bar	0	- Weight loss test(6) - F/T test(6)
FRP1		1	- Weight loss test(6) - F/T test(6)
FRP2		2	- Weight loss test(6) - F/T test(9) - Bond strength test(6) - Bond strength test with ICM(6)

고 있다. 또한, Table 2에서는 본 연구의 시편 종류에 따른 실험 변수를 나타내었다.

### 2.3 FRP Hybrid Bar의 부식저항성 평가 방법

#### 2.3.1 동결융해 시험

동결융해 저항성 실험은 KS F 2456(급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항실험 방법)의 B방법인 공기 중에서 급 동결하고 수중에



Fig. 2. Equipment of F/T action and the samples inside

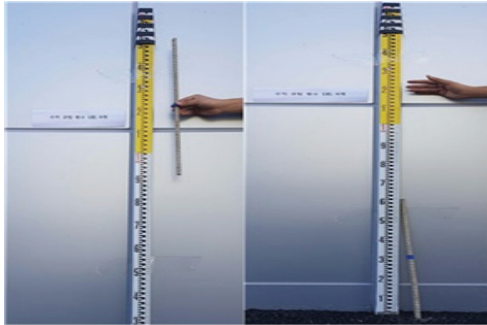


Fig. 3. Photos for free drop test

서 용해하는 시험방법을 준용하였으며, 3시간 동안 온도범위 -20 ℃ ~ +4 ℃로 동결융해 하는 것을 1 cycle로 설정하였다. 총 300 cycle 동안 실시하여 중량결손 및 외관변화를 평가하였다. Fig. 2에서는 동결융해시험기 및 존치된 시편을 나타내고 있다.

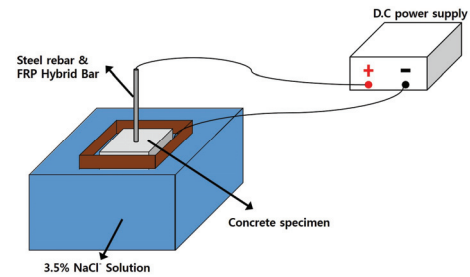
### 2.3.2 중량변화 시험

부착력 증가를 위해 FRP Hybrid Bar 표면에 규사도포 이후 수 지코팅 0회, 1회, 2회를 실시한 FRP Hybrid Bar를 대상으로 각 50 cycle마다 1.2 m의 높이에서 낙하하여 규사 탈락 전후의 중량을 측정하였다. 각 코팅에 대한 시편 수는 6개로 하여 평균값을 사용하였다. ACI Committee 544 방법을 참고하여 실험을 수행하였는데, Fig. 3에서는 자유낙하 시험사진을 나타내고 있다.

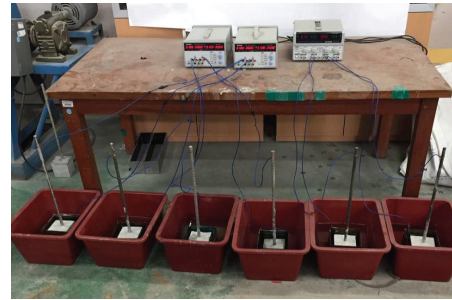
### 2.3.3 촉진부식시험(Impressed Current Method)

실제 부식 환경에서 내하력의 저하를 야기할 정도의 부식량을 수개월 내에 발생시키기는 어렵다. 본 연구에서는 ICM(Impressed Current Method)를 적용하여 촉진부식실험을 수행하였다. 또한 동결융해 시편의 적절한 전압을 설정하기 위해 존의 연구를 참고하였다(Oh et al, 2016; Choi et al, 2015). ICM를 적용하여 부착성을 평가한 연구는 다방면으로 진행되어 왔다(Song et al, 2006; Hakan et al, 2012; Chung et al, 2008).

수용액은 실제 해수와 같은 염화물 농도를 고려하기 위해 3.5 %



(a) Schematic diagram for ICM



(b) Photo of ICM test

Fig. 4. Acceleration of steel corrosion with ICM

NaCl 수용액을 사용하였고, D.C Power Supply를 사용하여 10 V ~ 20 V의 전압을 인가하여 부식을 유도하였다. 전압의 균일한 인가를 위해 멀티미터기를 이용하여 D.C Power Supply로부터 인가된 전압을 1시간 단위로 확인하였으며, 공시체의 밑면에 에폭시를 도포하여 측면에서만 부식이 발생할 수 있도록 유도하였다. Fig. 4에서는 실험개요도 및 ICM 실험사진을 나타내고 있다.

전압인가시간은 7일로 하여 부식을 10.0 % 이상을 목표로 하였다. 철근의 부식량 평가는 식 (1)과 같은 Faraday 법칙을 이용한 계산값과 부착강도 측정 후 수거한 강재의 부식량을 제거하는 실험에 의하여 평가하였다.

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

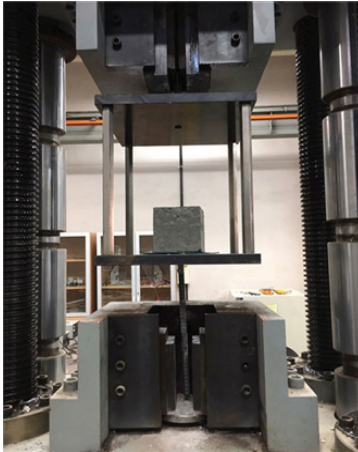
여기서,  $M$ 은 부식량(mol),  $z$ 는 철의 이온수(=2),  $F$ 는 Faraday의 수(=96,500 C),  $q$ 는 전류(A),  $t$ 는 측정시간(sec),  $c$ 는 실험상수를 나타낸다(Mehta et al, 1993).

### 2.3.4 부착력 시험

ASTM C234의 Full-out Test를 참고하여 100x100x100 mm의 정육면체 콘크리트 공시체를 제작하였으며, 콘크리트에서 강재의 정착 길이는 공시체의 높이와 같은 100 mm로 설정하였다. Fig. 5에서는 부착강도용 공시체 제작과정과 시험사진을 나타내고 있다.



(a) Concrete sample preparation



(b) Photos for bond strength

Fig. 5. Pull-out test and sample preparation

### 3. 동결융해와 부식저항성과의 상관성 평가

#### 3.1 동결융해에 따른 중량 결손

동결융해 시험 300 cycle 이후 수치코팅 0회에서는 394.66 g, 1회에서는 395.10 g, 그리고 2회에 대해서는 396.46 g으로 수치 코팅 도포가 증가할수록 초기중량을 유지하였다. 외관조사의 경우 모든 경우 양호한 상태를 나타내었다. Fig. 6에서는 cycle별 중량 결손 변화율에 대해 나타내고 있다.

#### 3.2 동결융해 이후 촉진부식에 따른 부착력 변화

Fig. 7에 이론 부식률과 실험 부식률의 비교를 나타내었으며, 5일 경과 후 목표 부식량인 10 % 수준에 도달하였다. 부식전류 인가시간에 따른 부착강도를 평가하기 위해 일반철근, 동결융해 전의 FRP Hybrid Bar, 동결융해 300 cycle 이후의 FRP Hybrid Bar의 부착력을 1일(2.4 %), 3일(4.8 %), 5일(9.7 %)로 분류하여 실험을 수행하였다.

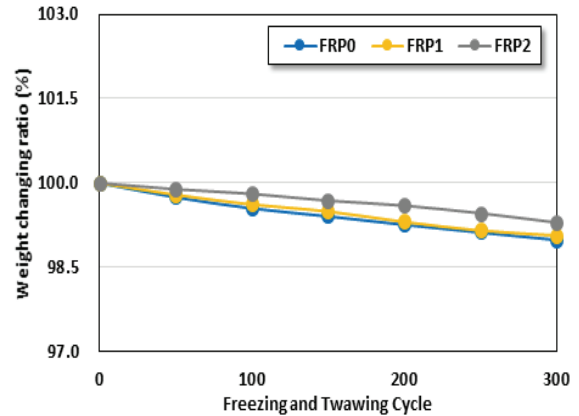


Fig. 6. Changes in weight ratio with repeated cycles

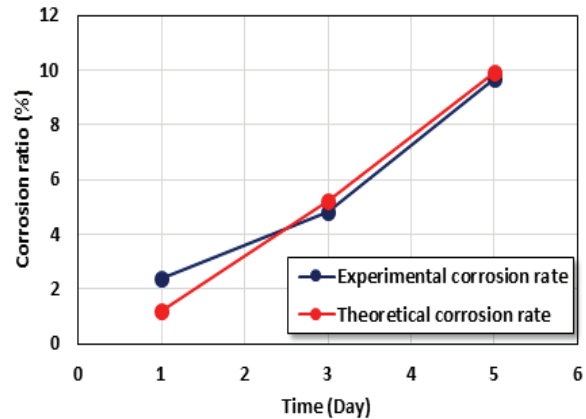
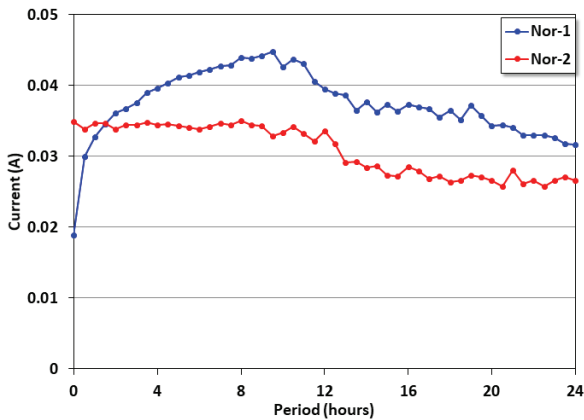


Fig. 7. Corrosion ratio with duration period

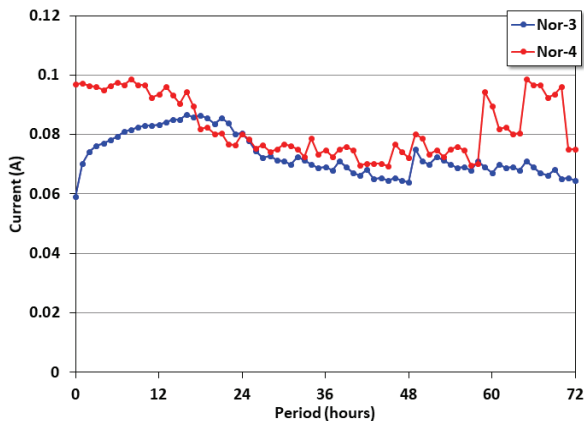
FRP Hybrid Bar의 경우 동결융해 전후의 시면에 대해 부식전류가 거의 발생하지 않았는데, 이는 동결융해 이후에도 에폭시 및 유리섬유 Layer가 외부의 염화물과 수분으로부터 내부 심재의 철근을 보호하고 있음을 의미한다. Fig. 8에서는 각 인가시간에 따른 일반철근의 부식전류의 변화를 나타내고 있으며, Fig. 9에서는 기본조건에서의 부착력 결과를 나타내고 있다.

Fig. 9에서는 초기 조건에서 일반철근은 16.2 ~ 16.9 kN, 동결융해 전의 FRP Hybrid Bar의 경우 23.1 ~ 23.3 kN, 동결융해 이후의 FRP Hybrid Bar의 경우는 23.0 ~ 23.1 kN으로 부착강도가 평가되었으며 동결융해의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 일반 철근보다 FRP Hybrid Bar의 경우 규사코팅에 의해 조도가 증가하고 비표면적이 크므로 120 % 정도의 부착력 증가를 나타내었다. 부식인가시간에 따른 부착력의 변화는 Fig. 10에 나타내었다.

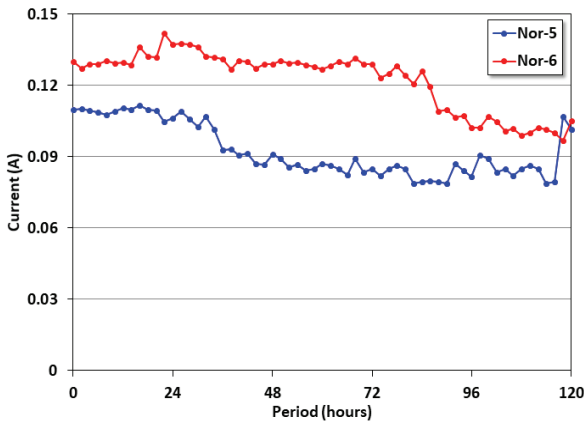
일반철근을 사용한 RC부재의 경우 부식시간 1일에서는 1.21 ~ 1.28 배 높은 수준의 부착강도가 평가되었다. 하지만 이후 부식시간 3일에서는 0.86 ~ 0.89 배, 부식시간 5일에서는 0.35 ~ 0.38



(a) Duration for 24 hours-10V



(b) Duration for 72 hours-15V



(c) Duration for 120 hours-20V

Fig. 8. Measured current with duration period

배 수준으로 부착강도가 급격히 감소하는 경향이 나타났다. 이는 부식이 진전되면서 팽창효과가 발생하여 초기에는 부착력이 증가 하지만 부식률이 5% 이상 증가하는 경우 급격한 Slip으로 인해 부착력이 감소하게 된다(Chung et al, 2008; Oh et al, 2016). FRP Hybrid Bar의 경우 부착강도는 모두  $23.0 \pm 1$  kN의 수준으로 부식 시간의 경과에 따른 부착강도의 큰 편차가 나타나지 않았으며, 동

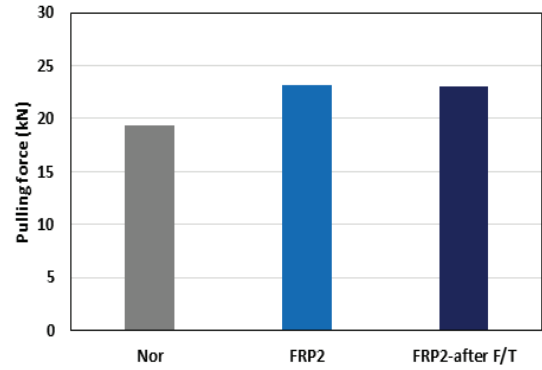


Fig. 9. Bond strength with different conditions of FRP Hybrid Bar and Steel rebar(Avg.)

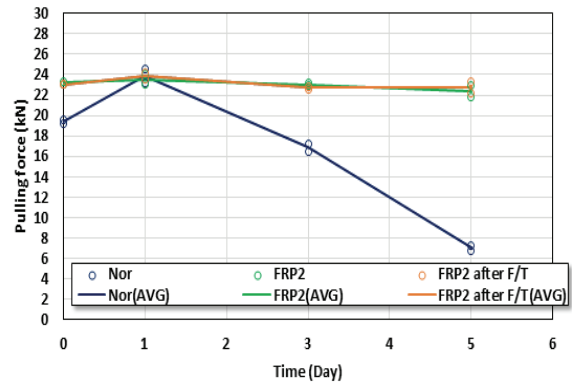


Fig. 10. Bond strength with duration period

결융해를 거친 FRP Hybrid Bar에서도 FRP Hybrid Bar와 비슷한 수준의 부착강도가 평가되었다.

#### 4. 결론

동결융해 이후의 FRP Hybrid Bar의 부식 저항성을 평가하여 도출된 결과는 다음과 같다.

1. 동결융해에 따른 FRP Hybrid Bar의 중량결손 평가결과, cycle의 진행에 따라 중량의 변화는 약 1% 이하로 변화가 크게 나타나지 않았으며 수지를 2회 도포한 경우 가장 우수한 중량 감소율을 나타내었다. 외관변화 분석에서도 동결융해 cycle이 진행됨에 따라 FRP Hybrid Bar 사이의 특별한 외관변화는 나타나지 않았다. 그러나 운송 및 충격으로 인해 시공 전에 규사의 박락을 최소화할 수 있는 방법이 필요하다.
2. 각 철근을 가진 콘크리트 공시체의 부착강도 평가 결과, 일 반철근은 평균 19.4 kN의 부착강도가 평가되었지만, 동결융해 실험 전후의 FRP Hybrid Bar는 각각 평균 23.2 kN 및



23.1 kN로 약 120 % 개선된 부착강도를 나타내었다. 이는 FRP Hybrid Bar의 표면에 규사코팅으로 인해 표면의 조도가 증가하고 그에 따라 비표면적의 증가로 인한 영향이라고 판단된다.

3. 일반철근을 가진 시편의 부착력은 부식시간 1일에서는 약 1.21 ~ 1.28 배 증가한 부착강도가 평가되었지만, 이후 부식시간 3일에서는 0.86 ~ 0.89 배, 부식시간 5일에서는 0.35 ~ 0.38 배로 부식시간이 증가함에 따라 급격한 부착강도의 감소를 보였다. 반면, FRP Hybrid Bar를 가진 콘크리트 공시체의 경우, 매우 낮은 수준의 부식전류가 측정되었다. 또한 동결 융해 전후의 FRP Hybrid Bar를 가진 콘크리트 공시체는 부식기간의 증가에 따라 23.0 ± 1 kN 수준으로 부착강도의 큰 편차가 나타나지 않았다.

## 감사의 글

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

## References

- ACI 440.1R-06. (2006). Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforce with FRP Bars, ACI Committee 440.
- American Concrete Institute(ACI) Committee-201. (2008). Guide to Durable Concrete ACI 201R-08; American Concrete Institute (ACI): Detroit, MI, USA.
- Baek, S.H., William, X., Maria, Q.F., Kwon, S.J. (2012). Nondestructive corrosion detection in RC through integrated heat induction and IR thermography, *Journal of Nondestructive Evaluation*, **31**, 181-190.
- Bautista, A., 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.
- Broomfield, J.P. (1997). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*, E&FN, London, 1-15.
- Choi, S.J., Mun, J.M., Park, K.T., Park, C.W., Kwon, S.J. (2015). Characteristics of flexural capacity and ultrasonic in RC member with corroded steel and FRP hybrid bar, *The Journal of the Korea Contents Association*, **15(8)**, 397-407 [in Korean].
- Choi, Y.S., Won, M.S., Yi, S.T., Yang, E.I. (2012). Characteristics of pore structure and chloride penetration resistance of concrete exposed to freezing-thawing, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **16(6)**, 73-81 [in Korean].
- Chung, L., Jay kim, J.H., Yi, S.T. (2008). Bond strength prediction for reinforced concrete members with highly corroded reinforcing bars, *Cement and Concrete Composites*, **30(7)**, 603-611.
- European Committee for Standardization(Comité Européen de Normalisation, CEN). (2000). Eurocode 1: Basis of Design and Actions on Structures; EN-1991; European Committee for Standardization(Comité Européen de Normalization, CEN): Brussels, Belgium.
- Hakan, Y., Ozgur, E., 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.
- Hwang, C.S., Park, J.S., Park, K.T., Kwon, S.J. (2017). Mechanical performance evaluation of RC beams with FRP hybrid bars under cyclic loads, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **21(1)**, 9-14 [in Korean].
- Japan Society of Civil Engineering(JSCE). (2007). Standard Specification for Concrete Structures—Design JSCE Guidelines for Concrete 15; Japan Society of Civil Engineering(JSCE): Tokyo, Japan.
- KICT. (2013). Development of Enhancing Life Span Technology for Waterfront Structures using FRP Hybrid Bars.
- Mehta, P.K., Monterio J.M. (1993). *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Oh, B.H., Um, J.Y., Kwon, J.H. (1992). An experimental study on corrosion resistance of epoxy coated reinforcements, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **4(4)**, 161-170 [in Korean].
- Oh, K.S., Moon, J.M., Park, K.T., Kwon, S.J. (2016). Evaluation of load capacity reduction in RC beam with corroded FRP hybrid bar and steel, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **20(2)**, 10-17 [in Korean].
- Oh, K.S., Park, K.T., Kwon, S.J. (2016). Evaluation of Anti-corrosion performance of FRP hybrid bar with notch in GGBFS concrete, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **20(4)**, 51-58 [in Korean].

- Seo, D.W., Park, K.T., You, Y.J., Kim, H.Y. (2013). Enhancement in elastic modulus of GFRP bars by material hybridization, *Engineering*, **5**, 865–869.
- Shin, S.W., Ahn, J.M., Han, B.S., Seo, D.W. (2006). Effects of reinforcement ratio on concrete beams reinforced with FRP re-bars, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, **22(2)**, 19–26 [in Korean].
- Song, H.W., Back, S.J., Lee, C.H., Kwon, S.J. (2006). Service life prediction of concrete structures under marine environment considering coupled deterioration, *Restoration of Buildings and Monuments*, **12(4)**, 265–284.
- Yoon, Y.S., Park, J.S., Park, K.T., Kwon, S.J. (2017). Evaluation of tension behavior in FRP hybrid bar affected by UV exposure and freezing/thawing tests, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **5(2)**, 130–136 [in Korean].

### 동결융해 이후의 FRP Hybrid Bar의 부식 저항성

콘크리트 구조물은 다양한 환경에 노출되며, 부식환경인 해안가에서는 매립 보강재의 부식저항성 및 동결융해 저항성이 함께 평가되어야 한다. 최근 개발된 FRP Hybrid Bar는 내부에 강재가 있으며 유리섬유와 에폭시가 코팅된 보강재인데, 기존 FRP Bar보다 탄성계수가 높은 장점이 있다. 본 연구에서는 FRP Hybrid Bar에 대하여 동결융해 300 cycle 시험을 수행한 뒤, 내부식특성과 중량결손율, 및 부착특성을 평가하였다. 300 cycle 이후 2번 에폭시를 코팅한 경우에 규사의 손실이 가장 적었으며, 외관의 결함이 관측되지 않았다. 부착강도는 규사코팅에 따른 조도의 증가로 FRP Hybrid Bar의 경우 일반철근의 120 % 수준을 나타내었다. 또한 일반철근을 가진 시편의 부착력은 부식시간 3일에서는 0.86 ~ 0.89 배, 5일에서는 0.35 ~ 0.38 배로 크게 감소하였으나, 동결융해 전후의 FRP Hybrid Bar를 가진 콘크리트 공시체는 부착강도의 감소가 발생하지 않았다.