

## FRP 하이브리드 보강근을 가지는 RC보의 반복하중에 대한 역학적 성능 평가

황철성<sup>1</sup>, 박재성<sup>2</sup>, 박기태<sup>3</sup>, 권성준<sup>4\*</sup>

### Mechanical Performance Evaluation of RC Beams with FRP Hybrid Bars under Cyclic Loads

Chul-Sung Hwang<sup>1</sup>, Jae-Sung Park<sup>2</sup>, Ki-Tae Park<sup>3</sup>, Seung-Jun Kwon<sup>4\*</sup>

**Abstract:** In the present work, a mechanical performances under cyclic loading in RC (Reinforced Concrete) beams with normal steel and FRPH (Fiber Reinforced Plastic Hybrid) bar are investigated. For the work, RC beam members with 200×200×2175 mm of geometry and 24 Mpa of design strength are prepared, and 4-point-bending tests are performed for evaluation of cracking, yielding, and ultimate loads. Through static loading test, 48.9kN and 36.0 kN of yielding loads are measured for normal RC and FRPH beam, respectively. They have almost same ultimate load of 50.0 kN. Typical tension hardening behavior is observed in FRPH beam, which is caused by the behavior of FRPH bar with tension hardening. In cyclic loading conditions, FRPH beam has more smaller crack width and scattered crack pattern, and it shows more elastic recovery than normal RC beam. The energy dissipation ratio in FRPH beam is 0.83, which is greater than 0.62 in normal RC beam and it shows more effective resistance to cyclic loadings.

**Keywords:** FRPH (Fiber Reinforced Plastic Hybrid) bar, Static loading, Cyclic loading, Energy dissipation ratio, Yielding load, Ultimate load

## 1. 서 론

콘크리트는 경제적이고 내구적인 건설재료이며 1900년대 초부터 다양하게 사용되어 왔다. 그러나 염해와 같은 열화환경에서는 내부의 매립된 철근은 부식하기 쉬우며, 이로 인해 RC (Reinforced Concrete) 구조물에서는 내구성저하와 역학적 성능저하가 발생하게 된다(Broomfield, 1997). 사용기간의 증가에 따른 철근의 부식방지를 위해서 다양한 연구가 수행되어 왔는데, 혼화재료를 이용한 콘크리트 구조의 염해 저항성 개선방법이 있다. 주로 고로 슬래그 미분말(GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag)이나 플라이 애쉬(FA: Fly Ash)의 사용을 통하여 염화물 확산계수의 감소를 유도하는 것이다(Song et al., 2006; Thomas and Bamforth, 1999). 일반 콘크리트를 사용한 경우는 단면 및 피복두께의 증가 없이 에폭시 코팅 철근(Oh et al., 1992), 용융아연도금철근(Bautista and

Gonzalez, 1996), FRP (Fiber Reinforced Plastic) 철근 등을 사용하여 철근의 부식을 방어하고 있다(Seo et al., 2013; ACI, 2006). 또한 해수전착기법과 같이 해수 중에 용해되어 있는 칼슘이온, 마그네슘이온을 이용하여 철근을 코팅하는 해수전착기법과 같은 특별한 기술들이 개발되기도 한다(Lee et al., 2004; Lee and Ryu, 2004).

이중 FRP 철근 또는 이를 이용한 보강공법의 경우 일반철근 및 강판보강에 비하여 자중이 가볍고 부식에 대하여 매우 안전하며 운송비의 절감 등의 장점이 있다(Nanni et al., 2001; Alkhrdaji et al., 1999; Nanni et al., 1997). 그러나 인장강도는 높지만 낮은 탄성계수로 인해 과도한 처짐을 야기할 수 있으며, 절곡시의 손상, 표면 notch 발생에 따른 손상, 자외선에 의한 표면산화(Chalking)등이 발생할 수 있다. 인장부의 응력은 콘크리트가 아닌, 보강재가 저항하고 있으며, 인장부의 보강재를 부식으로부터 보호하려는 것은 매우 중요한 일이다.

최근 들어 이러한 FRP 보강재의 단점을 보완하기 위해 내부에 철근을 삽입하고 외부를 유리섬유와 에폭시로 코팅한 FRPH (Fiber Reinforced Plastic Hybrid) bar가 개발되었다(KICT, 2013). 개발된 FRPH bar에 대해서는 뛰어난 내부식성 및 인발특성이 규명되었으나(Oh et al., 2016; Choi et al., 2015), 이를 이용한 보의 정적하중 및 반복하중에 대한 역학적 성능은 규명되지 않았다. 많은 연구에서 철근콘크리트 구조물의 피로 및 반복하중에 대한 연구들이 진행되어 왔으나(Kang et

<sup>1</sup>정회원, 가천대학교 토목환경공학과 교수

<sup>2</sup>학생회원, 한남대학교 건설시스템공학과 석사과정

<sup>3</sup>정회원, 한국건설기술연구원 연구위원

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

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

Civil and Environmental Engineering, Hannam University, 70 Hannam-ro, Daedeok-gu, Daejeon 34430, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

al., 2001; Oh et al., 1998), FRPH bar를 사용한 RC보의 역학적 성능 평가는 현재 없는 상태이다.

본 연구에서는 동일 제원의 RC보를 제작하여 외경이 동일한 일반철근(SD 40)과 FRPH bar를 주철근으로 사용하여 정적 및 반복하중에 따른 역학적 거동을 평가하도록 한다. 본 연구를 통하여 초기 균열하중, 항복하중, 하중반복에 따른 에너지 소산, 그리고 하중 제하후의 균열 패턴 등이 분석될 것이다.

## 2. 실험계획

### 2.1 시험체

시험체의 크기는 200×200×2,175 mm로 하였고 일반철근과 FRPH bar를 적용하여 정적 및 반복하중에 대한 경우를 고려하여 제작하였다. D13 스티럽을 12@150으로 총 2,000 mm로 하여 전단 보강하였으며 주철근은 D13 2개를 사용하여 배근하였다. 주철근비는 0.0075로 인장파괴를 유도하도록 제작하였다.

Fig. 1에서는 시험체에 대한 모식도를 나타내었으며, Fig. 2에서는 주철근 및 U형 스티럽 배근 사진을 나타내고 있다.

### 2.2 사용재료

#### 2.2.1 콘크리트 배합

RC 보의 제조를 위해 총 2 가지 경우에 대한 철근 콘크리트 시험체에 대한 배합은 압축강도 24.0 MPa, 물-시멘트비(w/c: water to cement)비는 0.5, 목표 슬럼프는 180 mm로 하였고

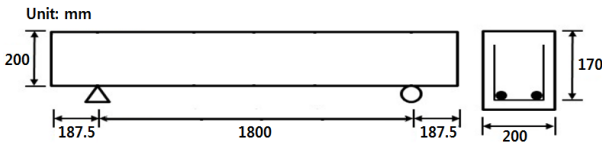


Fig. 1 Geometry of RC beam member



Fig. 2 Photos for main reinforcement and stirrup details

AE제를 시멘트 중량의 0.7%만큼 추가적으로 투입하였다.

Table 1은 본 연구를 위한 콘크리트 배합을 나타내고 있으며, Fig. 3에서는 시험체의 타설 및 탈형 후의 전경을 나타내고 있다.

#### 2.2.2 강재 및 FRPH bar

주철근으로 사용한 일반철근은 D13 이형철근을 사용하였고, 일반철근과 직경과 길이가 같은 FRPH bar를 입수하여 시험체를 제작하였다. 본 연구에서 사용된 FRPH bar의 경우 D9의 강재를 심재로 사용하고 유리섬유를 감아서 제작한 뒤, 에폭시로 함침하여 외경을 D13으로 만든 것이다. Fig. 4에서는 FRPH bar의 제작과정을 나타내고 있으며(Seo et al., 2013), 본 실험을 통하여 도출된 일반 철근 및 FRPH bar의 응력-변형률도는 Fig. 5에 나타내었다. FRPH bar의 경우는 프리스트레스트텐던과 같이 비선형적으로 변형하므로 0.2% offset을 이용하여 항복강도를 추정하였다. 최종 파단 변형률은 하중제어로 인장시험을 수행하여 정확한 값을 도출하지 못하였다. Table 2에서는 인장시험을 통하여 도출된 일반 철근과 FRPH bar의 설계 특성치를 나타내고 있다.

Table 1 Mix proportion of Concrete in beams

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



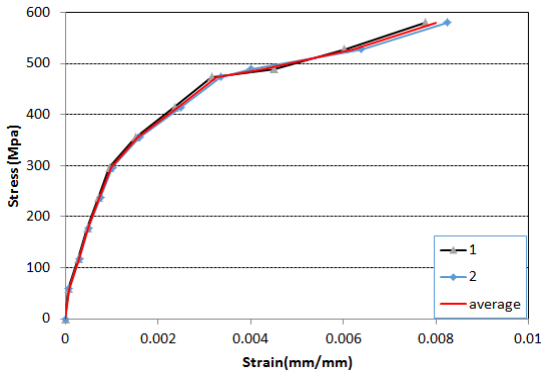
(a) Cast of Specimen

(b) Removal of forms

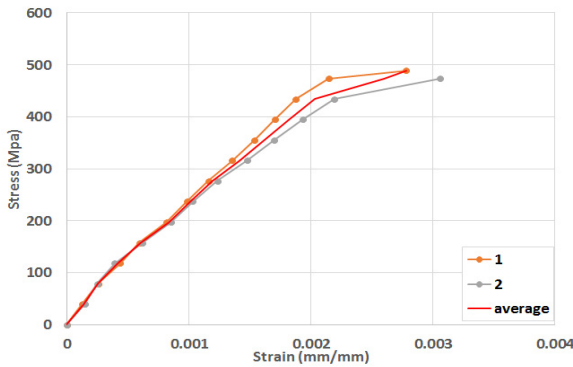
Fig. 3 View for Casting and Removal of forms



Fig. 4 Manufacturing process of FRPH bar



(a) FRPH bar



(b) Normal Steel

Fig. 5 Stress-strain curve for normal steel and FRPH bar

Table 2 Result of stress-strain curve

Type	Elasticity (GPa)	Yielding strain ( $\mu$ )	Yielding stress (MPa)
Steel	200	2,370	475
FRPH Bar	182	2,250	382

### 2.3 가력 및 측정방법

일반 RC보 및 FRPH 보의 정적 및 반복하중 거동을 평가하기 위해 4점 재하법을 이용하여 정적 및 동적 하중 재하 실험을 실시하였다. 중앙지점에서 좌우로 10 cm 이격된 프레임을 사용하여 하중을 재하하였으며, RC보와 FRPH보에 대한 초기균열 하중, 항복하중 및 보에서의 처짐량을 측정하였다. 가력범위를 설정하기 위해, 각 보에 대한 파괴하중( $P_u$ )을 정적 시험을 통하여 도출하였으며,  $0.85P_u$ 를 최대 가력하중으로 설정한 뒤, Sine 특성을 가진 1Hz의 주기로 100 Cycle을 반복하여 가력하였다. 최대하중의 90%이상을 가력한 경우 반복하중에 대하여 10회 정도에 파괴가 발생하므로 하중수준을 85%수준으로 재하하였다.

정적 및 동적 하중에 대한 거동 분석을 위해 주철근인 일반 철근과 FRPH Bar의 중앙에 각 2개씩 총 4개의 철근게이지를

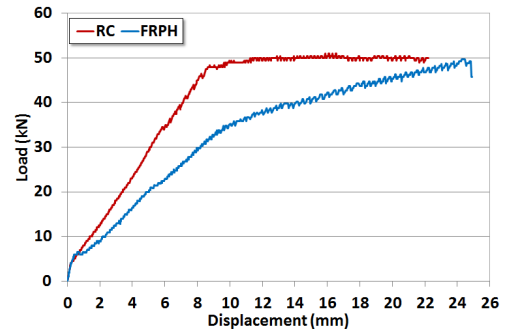


Fig. 6 Load-displacement in static loading test

부착하였으며, 100 mm 측정 가능한 변위센서를 콘크리트 지간에 대해 중앙에 설치하여 처짐을 측정하였다. 정적하중 및 반복하중에 대한 시험은 각 RC 보와 FRPH 보의 경우에 1가지로, 총 4개의 보부재가 제조되었다.

## 3. 정적 및 반복하중에 대한 역학적 성능 평가

### 3.1 정적하중 재하실험

정적하중 재하실험은 반복하중 재하실험에 앞서 각 보에 대한 항복하중 및 파괴하중을 알아보기 위해 선행하여 실시하였다. 각 보의 초기 균열하중은 RC보에서는 6.0 kN으로 FRPH 보의 5.5 kN과 큰 차이를 나타내지 않았다. 항복하중은 RC보에서는 48.9 kN으로, FRPH 보에서는 36.0 kN으로 평가되어 1.35배 정도 크게 측정되었다. 하중-변위 거동을 고려하여 초기균열하중 이후의 선형구간을 분류하여 항복하중을 평가하였다. 최종 파괴하중은 RC보, FRPH 보 모두 50.0 kN 수준을 보이고 있었다. 실제로 RC보에 사용된 일반 철근은 외경이 13.0 mm이지만 FRPH에서는 내부 철근(Core)의 지름은 9.0 mm에 불과하므로 이를 사용한 RC보에서는 항복하중이 감소하게 된다.

RC보의 경우 중앙에 대한 처짐은 항복조건에서 8.6 mm, 파괴조건에서 22.2 mm로 측정되었고 FRPH 보는 항복조건에서 11.3 mm, 파괴조건에서 25 mm까지 측정되었다. Fig. 6에서는 정적하중에 대한 하중-처짐 결과를 나타내고 있다.

Fig. 6에서 알 수 있듯이 일반 RC보의 경우 철근의 항복하중 이후 전형적인 RC보의 항복거동을 나타내고 있다. 그러나 FRPH의 경우 항복하중 이후 명확하게 인장경화(Tension Hardening) 특성을 보여주고 있는데, 이는 FRPH bar가 항복이후 Fig. 5와 같이 인장경화특성을 가지기 때문이다(Seo et al., 2013).

균열패턴은 두 개의 RC 부재에 대하여 큰 차이는 발생하지 않았으며, Table 3에 정적하중 재하실험으로부터 얻은 실험 결과를 요약하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 RC보와 FRPH 보의 정

**Table 3** Result of static loading test

Beam	Yielding		Ultimate	
	Load (kN)	Displacement (mm)	Load (kN)	Displacement (mm)
RC Beam	48.9	8.6	50.0	22.2
FRPH Beam	36.0	11.3	50.0	25.0

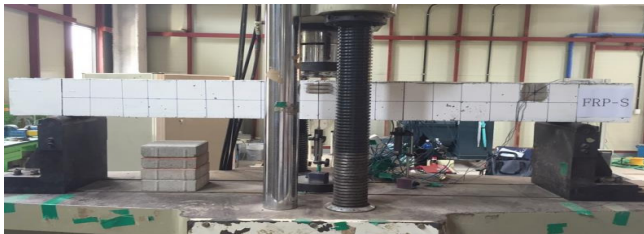


(a) Before static loading test

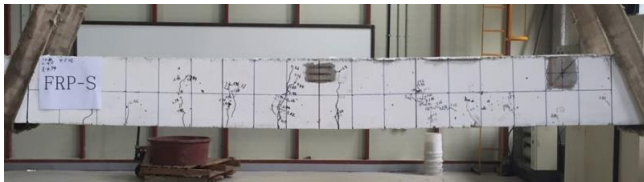


(b) After static loading test

**Fig. 7** Photos for static loading test in RC beam with normal steel



(a) Before static loading test



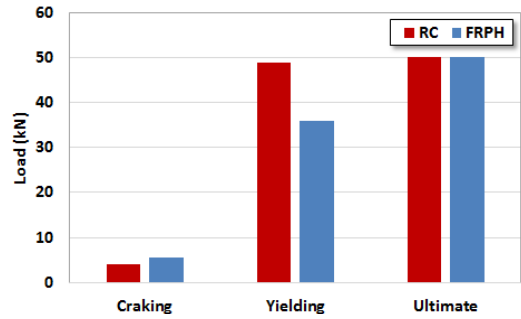
(b) After static loading test

**Fig. 8** Photos for static loading test in RC beam with FRPH bar

적하중 재하실험 전/후의 사진을 나타내었다. 또한 Fig. 9에서는 각 시편에 대한 균열하중, 항복하중, 파괴하중 실험 결과를 도시하였다.

### 3.2 반복하중 재하실험

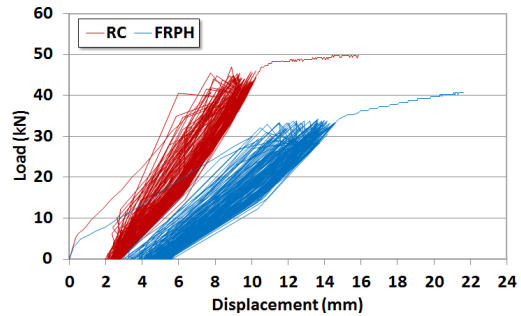
정적하중 재하실험에서 얻은 RC보, FRPH보의 항복강도 ( $P_y$ )를 고려하여 반복하중 100 Cycle을 실시하였다. Table 4



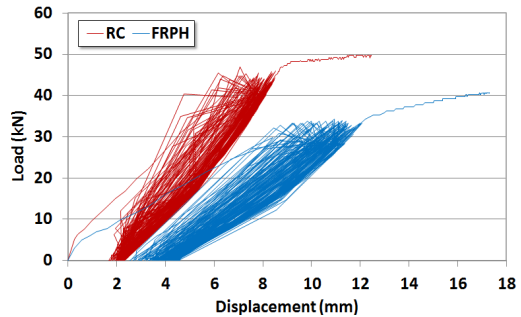
**Fig. 9** Results of cracking, yielding, and ultimate load with normal RC and FRPH beam

**Table 4** Each of Minimum and Maximum Strength in beams for cyclic loading test

Beam	$P_{y_{min}}$ (kN)	$P_{y_{max}}$ (kN)
RC Beam	0	42.5
FRPH Beam	0	30.6



(a) in mid span

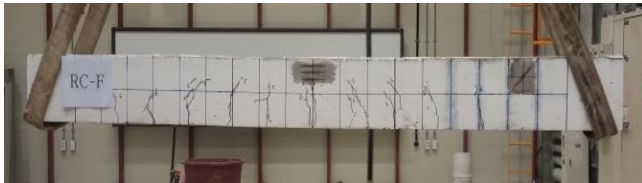


(b) 100 mm from the mid span

**Fig. 10** Load-displacement in dynamic loading test

에는 반복하중의 최대·최소하중을 나타내었고, Fig. 10에는 각 보의 반복하중에 대한 하중-변위를 도시하였다.

FRPH보에서는 하중 재하-제거를 반복했을 시 처짐 폭은 약 3~14 mm 정도로 RC보의 2~10 mm보다 높은 복원력을 보였는데, 이는 FRPH 부재에서 높은 탄성 회복을 갖고 있음을 알 수 있다. Fig. 11에서는 RC보와 FRPH 부재의 반복하중 재하실험 전/후의 균열형상을 나타내고 있다. 균열 폭은 RC보



(a) RC beam with normal steel



(b) RC beam with FRPH bar

Fig. 11 Photos for dynamic loading test in RC beam with FRPH bar

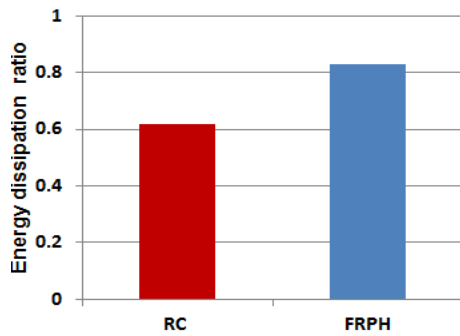


Fig. 12 Energy dissipation ratio for RC and FRPH beams

Table 5 Energy dissipation of beams

Beam	Energy dissipation ratio
RC Beam	0.62
FRPH Beam	0.83

에서 간격이 좁고 많이 생겼으며 비교적 넓게 분산되고 있음을 알 수 있다.

### 3.3 정적·동적 에너지 비율

앞선 정적하중 재하실험결과에서 보여준 각 보에 대한 항복강도가 다르므로 직접적인 에너지 소산을 비교할 수 없으므로, 정적에너지와 동적에너지의 비율을 이용해 부재 내의 반복하중에 대한 특성을 비교하였다. 반복하중에 따른 하중변위 그래프에서 포락선 면적을 도출하였는데, 이를 이용하여 소산된 에너지 비율을 도출할 수 있다. 소산된 에너지비율은 구조 요소의 손상을 계산하는 지표가 될 수 있고, 반복하중 재하 시 하중 증가부의 곡선과 하중 감소부의 곡선의 면적을 통해 식 (1)로 계산할 수 있다(Oh et al., 1998).

$$R = \frac{\text{area of load-displacement (cyclic)}}{\text{area of load-displacement (static)}} \quad (1)$$

식 (1)을 이용해 계산한 결과 값을 Table 5에 나타내었으며 Fig. 12에 그래프로 도시하였다. FRPH bar를 가진 보의 경우 일반 RC보 대비 약 21%정도 큰 에너지 소산 비율을 보였다.

## 4. 결론

본 연구에서는 각각 일반철근과 FRPH bar를 주철근으로 사용하여 전단 보강된 철근 콘크리트 시험체를 제작하였다. 이후 정적·동적 하중을 재하해 구조성능과 각 시험체에 대한 하중거동 특성과 에너지 소산 비율을 비교·분석하였으며, 이를 통한 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) FRPH bar를 가진 RC보에서는 항복단계에서의 하중이 36.0 kN으로 일반 RC보의 약 73%수준의 강도를 보였으나, 정적·동적 재하 실험 모두 철근 항복 이후에서도 하중이 증가하는 인장경화 발생하였다. 이는 주철근으로 사용된 FRPH bar의 인장 경화특성에 기인한다.
- 2) 정적하중 재하 시, 파괴시의 FRPH보의 처짐은 25.0 mm로 RC의 22.0 mm보다 크게 측정되었다. 반복하중 재하 시, 처짐 폭은 RC보에서 2.0~10.0 mm, FRPH보에서는 3.0~14.0 mm 정도로 높은 탄성회복력을 나타내었다.
- 3) 반복하중에 대한 소산된 에너지비율은 RC보에서는 0.62, FRPH보에서는 0.83으로 측정되는데, 이는 처짐이 증가하면서도 하중을 지속적으로 저항할 수 있는 FRPH bar의 장점이라고 할 수 있다. FRPH bar를 가진 보의 경우 큰 연성 특성과 인장경화특성을 이용하여 지진과 같은 반복하중 또는 피로에 대해 효과적으로 저항할 수 있음을 알 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업(FRP hybrid Bar를 활용한 해양항만 구조물 수명향상기술 개발)의 지원으로 수행되었으며, 이에 저자는 감사드립니다.

## References

- ACI 440.1R-06 (2006), Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforce with FRP Bars, ACI Committee 440.

- Alkhrdaji, T., Nanni, A., Chen, G., and Barker, M. (1999), Upgrading the transportation Infrastructure : Solid RC Decks Strengthened with FRP, *Concrete International*, ACI, 21(10), 37-41.
- 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.
- 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., and Kwon, S.-J. (2015), Characteristics of Flexural Capacity and Ultrasonic in RC Member with Corroded Steel and FRP Hybrid Bar, *Journal of Contents Institute*, 15(8), 397-407.
- Kang, B. S., Shim, H. S., and Hwang, S. C. (2001), Fatigue Behavior of RC Elements under High Cyclic Loading, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 2001(11), 1161-1166.
- KICT (2013), Development of Enhancing Life Span Technology for Waterfront Structures using FRP Hybrid Bars.
- 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.
- 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.
- Nanni, A., Micelli, F., and La-Tegola, A. (2001), Durability of GFRP Bars Subjected to Aggressive Environment, *Proceeding of 22nd International SAMPLE Europe Conference*, Paris, 431-443.
- Nanni, A., Nenninger, J., Ash, K., and Liu, J. (1997), Experimental Bond Behavior of Hybrid Rods for Concrete Reinforcement, *Structural Engineering and Mechanics*, 5(4), 339-354.
- Oh, B. H., Han, S. H., Lee, H. J., Kim, J. S., and Shin, H. S. (1998), Shear Damage Behavior of Reinforced Concrete Beams under Fatigue Loads, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 10(1), 143-151.
- 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.
- Oh, K. S., Mun, J. M., Park, K. T., and 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.
- 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, 865-869.
- Song, H. W., Back, S. J., Lee C. H., and 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.
- Thomas, M. D. A., and Bamforth, P. B. (1999), Modeling Chloride Diffusion in Concrete: Effect of Fly Ash and Slag, *Cement and Concrete Research*, 29, 487-495.

Received : 08/16/2016

Revised : 09/29/2016

Accepted : 10/20/2016

---

**요 지** : 본 연구는 일반철근과 FRPH Bar를 주철근으로 한 철근 콘크리트 보부재를 대상으로 정적실험 및 반복하중 재하실험을 수행하여 에너지 소산성능 및 반복하중 저항성능을 분석하였다. 실험을 위하여 24MPa의 설계강도를 가진 콘크리트 보부재(200×200×2175mm)를 제작하였으며, 4점 휨 시험을 수행하여 초기균열하중, 항복하중, 파괴하중을 측정하였다. 정적하중 재하실험을 통해 각 시험체에 대한 항복하중과 파괴강도를 측정하였는데, 항복하중은 RC보에서는 48.9kN, FRPH 보에서는 36kN으로 평가되었으며, 파괴하중은 두 시험체 모두 50kN의 강도를 보였다. 정적하중-처짐 결과에서는 FRPH 보는 RC보에 비하여 인장경화특성을 나타내는데, 이는 FRPH bar의 인장경화 특성에 기인한다. 반복하중하에서 FRPH bar를 가진 보에서는 일반 RC보와는 다르게 작은 폭의 균열이 넓게 발생하였으며, 우수한 처짐 복원력을 나타내었다. 정적·동적 에너지 비율을 이용한 에너지 소산능력에서는 RC보에서는 0.62, FRPH 보에서는 0.83으로 평가되었으며, 이를 통해 FRPH를 가진 보부재에서 효과적으로 반복하중에 대하여 저항함을 알 수 있다.

**핵심용어** : FRPH bar, 정적하중, 반복하중, 에너지소산비율, 항복하중, 파괴하중

---