지속하중과 환경영향을 받은 MF-FRP 보강보의 구조건전성 평가

Structural Integrity Evaluation of Mechanically Fastened FRP Beams Under the Effects of Sustained Loads and Environments

이 재 하¹⁾

Jae-Ha Lee

김 우 석^{2)*}

Woo-Seok Kim

Abstract

Mechanically fastening FRP (MF-FRP) strips using nails and anchors, has been shown to provide a more ductile behavior to the strengthened structural element than using bonded FRP. To further advance the state of the knowledge on this strengthening method, the current study examined environmental effects for six months on MF-FRP beams. Reinforced concrete beams strengthened with mechanically fastened FRP strips and subjected to sustained loads for six months were exposed to outdoor weather and constant high temperatures (40°C). For comparison, the behavior of RC beam with and without sustained loads was evaluated. Results from flexural tests did not show any significant degradation or change of failure mode as a result of sustained load and of environmental effects such as high temperatures and outdoor weather over a period of six months. Failure of the beams was governed by FRP delamination followed by concrete crushing as not much load applied to the nail and anchors because of slip effects.

Keywords : FRP strengthening, Environmental effects, Sustained load, Flexural Test, MF-FRP beam

1. 서 론

섬유보강폴리머 (Fiber Reinforced Polymer)는 철근콘크리트 구조물의 보강재로서 새롭게 각광을 받고 있는 재료이다. 최근까지는 주로 시트 (Sheet) 형태의 FRP를 에폭시 (Epoxy)를 이용하여 콘크리트의 외부에 부착하는 공법 (Externally bonded FRP system)이 사용되어 왔다. 그러나 이 공법은 몇 가지 단점들이 확인되었다. 에폭시의 부착 특성상 양생에 많은 시간이 걸리는 단점 등을 보여 왔으며 특별히 에폭시로 FRP를 부착하는 경우 발생하는 파괴모드는 콘크리트와 FRP의 부착파괴로 발생하면서 취성에 가까운 파괴를 나타내는 것으로 확인되었다 (ACI 440, 2002; Buyukozturk, 1998). 이러한 취성의 부착파괴문제를 해결하고 또한 장시간 소요되는 에폭시의 양생과정을 생략할 수 있는 방법인 MF-FRP 보강공법이 미국에서 개발되었다 (Lamanna et al., 2001).

MF는 “Mechanically Fastened”의 준말로 FRP를 철근콘크리트에 부착함에 있어서 못 (nail), 볼트, 앵커 등을 이용하여 에폭시 없이 철근콘크리트 구조물 밑단에 부착시키는 공법을 뜻한다. 다음 Fig. 1은 MF-FRP 스트립을 철근콘크리트

Fig. 1 Installing MF-FRP strips (Bank et al., 2004)

1) 정회원, 한국해양대학교 건설공학과 조교수
2) 정회원, 충남대학교 토목공학과 조교수, 교신저자

* Corresponding author : wooseok@cnu.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2014년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

구조물에 설치하는 방법을 보여주는 것으로 작업자가 못 총 (Powder actuated nail gun)을 이용하여 빠르고 쉽게 FRP 스트립을 콘크리트 구조물에 부착시킬 수 있다.

위 공법은 에폭시의 사용이 없으므로 양생과정을 생략하여 빠르게 구조물을 보강할 수 있다. 못이나 앵커가 FRP를 관통한 상태에서 응력이 FRP에 전달될 수 있도록 FRP 스트립은 길이방향 뿐만이 아닌 가로방향에 대해서도 섬유보강이 되어 있는 복합 재료 (유리섬유, 탄소섬유, 매트 등)의 형태로 개발되어졌다. 2000년대에 들어와 MF-FRP공법에 대한 연구는 북미를 중심으로 발전되어 왔다 (Lamanna et al., 2001; Ekenel et al., 2006; Lee et al., 2009; Elsayed et al., 2009). 초창기에는 주로 실험적인 연구가 이루어 졌으나 최근에는 해석적인 방법에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. MF-FRP공법에 대한 자세한 최신 기술동향에 대해서는 Brown et al. (2011)을 통해 확인할 수 있다. 최근의 연구가 MF-FRP 보강보의 휨거동에 대한 실험적 접근 및 해석방법에 집중되는 동안 MF-FRP 공법의 환경 영향에 대한 평가와 관련된 연구는 전무한 상황이다. 따라서 본 연구에서 MF-FRP 공법의 환경영향에 대한 평가를 실시하였다. 지속하중을 고려한 상태에서 MF-FRP 보에 외기 조건인 한중 (Outdoor) 및 한서 (40℃)조건을 고려하여 발생할 수 있는 구조성능 감소를 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 시험체 형상 및 실험 조건

실험을 수행하기 위하여 폭 15 cm, 높이 20 cm 및 길이 152 cm의 철근콘크리트 보를 Fig. 2와 같이 제작하였다.

실험 중 전단파괴를 방지하기 위하여 개방형의 스트립을 9cm 간격으로 배치하였다. 철근콘크리트 보는 MF-FRP시스템에 의해 보강되어질 것을 고려하여 미국 콘크리트학회 318-05기준에 따라 저보강보의 형태로 설계되었으며 보강이 되기 전 인위적인 균열 (Precracked)을 가하였다. 균열을 발생시키기 위해서 사용한 하중은 철근의 항복모멘트의 45%이다. 이후 MF-FRP 공법에 따라 RC보에 FRP 스트립을 부착시켰다. Fig. 1과 같이 못총을 사용하였으며 못총을 사용하기 전 Lamanna et al. (2001)의 방법에 따라 드릴로 못이 들어갈 위치에 미리 구멍 (predrilled hole)을 만들어 못이 관입되는 순간의 콘크리트의 충격을 최소화 하였다. 미리 구멍을 만들지 않을 경우 못으로부터의 충격과 관입되는 못이 부

Fig. 2 Cross section of RC beam (a) and Reinforcement of RC beam (b)

Fig. 3 Anchor and nail locations on reinforced concrete beam

Table 1 Classification and number of beams in each environment

	Sustained load (S)	without load (NS)	Preliminary Tests
Room Temperature (R)	2	3	5
High Temperature (H)	2	3	0
Outdoor Condition (O)	2	3	0

분적으로 높은 인장력을 콘크리트에 전달하게 된다. 이는 추가 균열을 발생시킴으로서 콘크리트의 건전성을 크게 저해할 수 있으며 보의 피복이 탈락될 수 있으므로 미리 구멍을 뚫어 놓는 과정이 반드시 필요하다. 총 28개의 못과 2개의 앵커를 사용하여 다음 Fig. 3과 같이 RC보 밑면에 FRP 스트립을 부착하였다. 못의 길이 및 지름은 32 mm 및 3.66 mm이며 양쪽 끝에 사용된 앵커는 길이 51 mm, 지름 6.35 mm이다.

Fig. 3과 같이 MF-FRP로 보강된 보는 모두 20개로 지속하중 조건과 서중온도, 외기조건 및 실내조건 등의 환경조건에 따라서 다음 Table 1과 같이 분류하였다.

시험체에는 외부조건-지속하중의 순서로 영문 초성을 이용

하여 명칭을 부여하였다. 예를 들어 서중온도에서 지속하중이 없는 시험체는 H-NS이다. 환경 조건을 부여하기 전 사전 실험용으로 사용된 시험체는 5개이며 사전연구의 결과로 Fig. 3과 같은 못과 앵커의 배치가 결정되었다.

2.1.1 지속하중 조건

지속하중을 인위적으로 발생시키기 위하여 스프링을 이용한 지지대 프레임을 제작하였다. 지속하중은 못과 FRP의 접촉면의 최대 지압응력 (Maximum Bearing stress)의 20%가 발생될 수 있도록 스프링을 사용하여 Fig. 4와 같이 가력하였다. 사용 FRP의 지압응력-변형률곡선을 검토해 보면 약 최대 지압응력의 40%까지 선형적인 관계를 보이는 것으로 확인되었다. 본 연구에서는 이에 50%수준인 20% 지압응력을 지속하중 조건으로 선정하였다. 이는 스프링 하중으로는 23 kN에 해당한다. 또한 최종 파괴되는 보의 휨강도의 27% 수준으로서 지속하중으로는 충분한 하중조건이다.

스프링으로부터 발생하는 하중에 저항하는 프레임을 제작하기 위하여 L형강 (50×50×5)과 13 mm의 나사선이 들어간 강봉을 Fig. 4와 같이 활용하였으며 외부에 노출되어 부식이 일어나는 경우에 대비하여 방청제를 도포하였다. MF-FRP로 보강된 보는 서로 반대방향으로 윗면끼리 마주보도록 배치하여 4개의 일렬 배치된 스프링이 2개의 MF-FRP 보에 지속하중을 줄 수 있도록 하였다. 실험 종료 이후 지속하중을 제거하고 스프링을 재 실험하여 응력이완의 영향이 없는 것을 확인하였다.

2.1.2 서중 온도 조건 (High temperature condition)

FRP는 Fiber Reinforced Polymer의 약자로 폴리머 매트릭스에 섬유가 보강된 재료로 인장에 매우 강하다. 그러나 FRP를 구성하는 Polymer는 온도에 영향을 많이 받는 것으로 확인되었다 (Sullivan et al., 1995). 따라서 FRP 스트립을 구성하는 Vinylester matrix (Polymer)는 못 주변의 서중 온

Fig. 4 Sustained load set-up for strengthened beam

도에 영향을 받아 지압에 대한 강성이 감소될 수 있다. MF-FRP의 경우도 높은 온도에 대한 FRP의 강성이 감소하여 못과 FRP사이의 지압강도를 감소시켜 최종적으로 보강 효과가 저하될 수 있으므로 서중온도를 실험 조건으로 추가하였다. 본 연구에서는 하절기 가장 높은 온도라고 볼 수 있는 40℃를 서중 조건으로 정하였으며 제작된 챔버 내에서 40℃의 온도를 6개월동안 지속적으로 발생시켜 MF-FRP 보의 휨에 대한 구조성능 감소 여부를 확인하였다. 제조사에 따르면 사용된 FRP 스트립의 유리전이온도 (glass transition temperature)는 123℃에서 128℃이다. 따라서 40℃에서 사용된 FRP 스트립 자체의 응력이완이나 크리프와 같은 효과는 없었던 것으로 판단된다. Fig. 5는 40℃를 지속적으로 유지할 수 있도록 고안된 챔버의 모습이다. 내부의 온도센서가 40℃가 유지되도록 내부 발열기를 작동시키고 끊임으로 온도가 지속적으로 유지될 수 있도록 하였다.

2.1.3 외기환경 조건 (Outdoor condition)

외기 환경에 대한 MF-FRP 보강보의 내구성 및 구조성능의 감소를 확인하기 위하여 5개의 보를 외부 조건에 노출시켰다. Fig. 6에서와 같이 외부 보관 장소에 보강보를 6개월

Fig. 5 Developed High temperature chamber

Fig. 6 Outdoor condition

Fig. 7 Hourly temperature data

간 보관하였으며 주로 외기 온도 변화에 따른 동결융해의 작용이 MF-FRP 보에 어떠한 영향을 미치는지 확인하였다.

다음 Fig. 7은 실험 기간 동안 온도의 변화를 보여주는 자료이다. 온도측정은 1시간 간격으로 이루어졌으며 동결융해가 발생할 수 있는 동절기 기간을 택하여 온도변화의 추이를 관찰하였으며 이를 통해 동결융해가 보에 미치는 영향을 조사하였다.

자료의 분석결과 동결이 지속되는 시간은 평균 23시간 정도였으며 100시간 이상 지속되는 경우도 실험기간 동안 총 3회 확인되었다. 동절기 기간 최대 온도는 21°C이며 0°C에서 4°C 사이의 온도가 가장 많이 관측되었다. 영상 온도의 평균값은 1.14°C이며 영하 온도의 평균값은 -4.88°C로 관측되었다. 최대 관측 영하 온도는 -24°C이다. 관찰된 기간 동안 사용된 MF-FRP 보는 총 60회의 동결융해 작용을 받은 것으로 확인되었다.

Fig. 8 Location of strain gages and loading points

3. 실험 결과 및 고찰

전술한 상기 조건에 따라서 외부 환경의 영향을 받은 보는 다음 Fig. 8과 같이 4점 휨실험을 통해 구조적 건전성을 평가하였다. 보의 하중과 변위 및 FRP 스트립에 Fig. 8과 같이 변형률 게이지를 부착하여 거동을 평가하였다. Fig. 8의 상단 그림은 보강보의 측면도이며 하단 그림은 FRP 스트립의 보강 이후 보의 밑면에 배치된 못과 앵커의 배열을 나타낸다.

또한 콘크리트의 압축변형률도 함께 관찰하기 위하여 하중점 사이 상단영역에 콘크리트 변형률 게이지를 부착하였다. 4점 휨실험 결과 모든 MF-FRP보는 철근의 항복 이후 콘크리트 상단의 압축 파괴가 일어나고 최종적으로 FRP 박리의 순서로 파괴가 발생하였다. 그러나 FRP의 박리는 철근의 항복 이전 (약 9 kN-m)부터 점진적으로 진전되는 것으로 확인되었다. 이는 콘크리트 인장에 따른 균열이 못의 회전을 허용하고 최종적으로 RC보와 FRP 스트립 사이의 상대적인 미끄러짐 (Slip)을 발생시키기 때문인 것으로 확인되었다. 본 실험에서 사용된 RC보와 비교한 보강된 MF-FRP 보의 대표적인 하중 변위 그래프는 다음과 같다.

Fig. 9에서 확인 할 수 있듯이 MF-FRP 공법으로 보를 보강한 본 연구는 휨강도를 약 35% 이상 향상시켰다. 또한 외부부착 FRP 보강보와는 다르게 그 파괴 모드도 저보강 RC보와 매우 유사한 연성파괴인 것으로 확인되었다. MF-FRP 보의 상세한 거동 평가 관련 추가정보를 확인하기 위해서는 Lee et al. (2009) 및 Brown et al. (2011) 등을 참고할 수 있다.

FRP 스트립의 거동을 평가하기 위하여 변형률 게이지 데이터를 분석한 결과 1번 위치의 변형률 (SG1)이 2 (SG2), 3 (SG3) 및 4번 (SG4)과 비교하여 상대적으로 낮은 것으로 확인되었다. 3번과 4번 변형률 게이지는 비슷한 값을 보여주었

Fig. 9 Load-displacement graphs for tested MF-FRP beam and RC beam

Fig. 10 Typical strain differences between strain gages

다. 이는 하중점이 3번과 4번 변형률 게이지 사이에 위치하고 있기 때문이다. 각 변형률 게이지 값의 상대적인 차이를 이용하면 못과 FRP 사이에 전달되는 평균지압응력을 계산할 수 있다. Fig. 10은 서로 인접해 있는 변형률 게이지의 상대적인 값의 차이를 나타낸 것이다. 3번과 4번 위치에서 변형률 값은 매우 유사하여 두 값의 평균값 (AVG)을 이용하였다. Fig. 10의 [AVG-SG2]와 [SG2-SG1]의 하중 초기값은 매우 비슷함을 확인할 수 있다. 그러나 약 9 kN-m에서는 두 값의 차이가 발생하여 하중이 증가할수록 두 값의 차이는 더욱 증가한다. 이는 보의 휨 하중에 의해 곡률이 상대적으로 높은 하중점 부근에서 못에 전달되는 응력이 지점부근의 못에 전달되는 응력보다 작다는 것을 의미한다. 이는 높은 곡률로 인해 발생한 균열에 의해 하중점 부근의 부착면이 지점부근의 부착면 보다 못의 더 많은 회전을 도와 최종적으로

Fig. 11 Crack locations of a MF-FRP beam

더 많은 변위를 허용하여 나타난 현상이다. 따라서 균열로 인한 못의 회전으로 인해 보의 하면과 FRP의 상대적인 미끄러짐 (Slip)이 발생한 다는 것을 MF-FRP 보의 휨실험을 통해 확인할 수 있다.

Fig. 10과 같이 변형률 게이지를 통해 확인한 점진적 미끄러짐 (Slip)은 하중점에서부터 시작하여 지점부근으로 전달되었다. 이러한 FRP 스트립과 RC보의 상대적인 미끄러짐량 (Slip)을 고려하기 위하여 Lee et al. (2009)에서는 미끄러짐이 없다는 가정에 따라 계산되는 FRP 스트립 변형률의 24%만 취하여 보의 보강된 휨강도를 재계산할 경우 미끄러짐을 고려한 MF-FRP 보의 휨강도를 예측할 수 있는 것으로 확인되었다. 또한 MF-FRP 보강보의 균열은 Fig. 11과 같이 대부분 못이 위치한 지점에서부터 발생한다. 따라서 MF-FRP의 휨거동은 FRP의 물성치나 콘크리트와 FRP 스트립의 부착관계에 대한 영향 보다는 콘크리트 휨균열의 영향을 받는다고 할 수 있다.

모든 시험체의 하중-변위곡선을 Fig. 12와 같다. 각 외기조건에 대한 분석은 다음장에 상세하게 설명하였다.

3.1 환경 조건에 따른 휨강도의 편차

서중온도와 외기 조건 및 지속하중에 노출시킨 MF-FRP 보를 4점 휨실험을 통해 휨강도를 측정하였다.

Fig. 13은 실내 조건 (Room)을 포함한 3가지 외기 조건을 지속하중 여부에 따라 비교할 수 있도록 막대그래프로 실험을 통해 얻은 휨강도의 평균값을 비교한 것이다. 보의 철근 항복 휨강도 및 최대 휨강도에 대한 각 외기조건 별 편차는 작았다. 반면 철근 항복시 관찰된 항복 모멘트는 외기 조건 (Outdoor)일 경우 다른 환경조건 보다 낮은 값을 나타내었다. 그러나 외기 조건의 경우 지속하중의 영향은 항복 강도에 영향을 주지 않는 것으로 확인되었다. 외기 조건에서 균

Fig. 12 Comparison of load-deflection graphs for tested beams

Fig. 13 Comparison of steel yielding moment and concrete crushing moment

열을 통해 수분이 전달되어 철근에 부식을 발생시켰을 것으로 추정되며 부식으로 인해 감소된 강성이 빠른 항복을 일으켜 결과에 영향을 준 것으로 판단된다. 그러나 그래프에서 보이는 시험체 종류별 편차는 매우 낮은 수준으로 이는 시험을 제작하는 중 발생하는 작업 편차나 콘크리트의 강도 편차의 영향 등으로도 충분히 발생할 수 있는 것이다. 따라서 6개월간의 외기조건 (60회의 동결융해) 및 서중온도 (40℃) 그리고 휨강도의 27% 수준의 지속하중은 MF-FRP보의 휨강도를 저해하지 않은 것으로 판단된다. MF-FRP 보강법은 특성상 빠르게 구조물을 복구하려는 목적으로 사용되며 장기적인 내구성을 목적으로 하기 보다는 임시적인 보강을 목적으로 사용된다. 따라서 6개월의 짧은 기간에는 휨강도 측면에서 보의 내구성이 저해되지 않아 MF-FRP 보강 구조물의 내구성은 우수한 것이라 할 수 있다. 다만 6개월간 외기 조건에서 실내조건 대비 약 5% 이상의 강도 감소가 60회의

동결 융해 및 부식을 유발한 1회의 동결기에 발생하였으므로 장기적인 관점에서 지속적으로 관찰을 유지할 필요가 있는 것으로 판단된다. 보의 최대 휨강도를 비교한 경우 여전히 외기조건 (Outdoor)의 시험체가 실내조건 (Room)이나 서중온도 조건 (High temperature)의 시험체에 비하여 휨강도가 낮은 것으로 확인되었으나 이 값의 차이는 Fig. 13(b)와 같이 매우 적다.

3.2 환경 조건에 따른 변위의 편차

서중온도와 외기 조건 및 지속하중에 노출시킨 MF-FRP 보를 4점 휨실험을 통해 시험체의 항복 변위와 최대모멘트에서의 변위를 비교평가 하였다. 변위는 구조물의 연성을 평가할 수 있는 자료가 될 수 있어 구조물의 건전성을 평가하는데 중요한 자료가 된다. 본 연구에서는 2개의 LVDTs를

이용하여 보의 양쪽 좌우 변위를 동시에 측정한 후 평균값을 이용함으로써 보의 비틀림에 따른 변위의 편차에 대해서도 고려하였다. 또한 String pot을 이용하여 최종 데이터를 검증하였다. Fig. 14(a)는 모든 환경 조건에 대한 항복 모멘트에서 LVDTs로 측정된 변위값을 비교한 그래프이다. 외기조건 (Outdoor)에서 항복모멘트가 감소한 것과 유사하게 항복 모멘트에서의 변위도 다른 조건에 비해서 감소한 것을 확인할 수 있다. 항복 변위는 외기조건 (Outdoor)에서 지속하중을 고려하지 않은 시험체에서 약 25% 감소하였으며 지속하중을 고려한 경우에도 약 25% 감소하는 것으로 확인되었다. 또한 모든 환경 조건에 대해서 지속하중을 고려한 시험체가 지속하중을 받지 않은 시험체보다 변위가 약 11% 감소하였다. Fig. 14(b)는 최대모멘트에서의 변위값을 비교한 그래프이다. 최대모멘트에서의 변위는 전반적으로 지속하중의 영향에 따라 감소하는 경향을 보였다. 그러나 외기 조건과 지속하중을 받은 시험체 (O-S)의 경우에는 오히려 변위가 증가하였다. 시험체 O-S의 경우 항복 변위의 값 (Fig. 14(a))은 다른 시험체에 비하여 낮은 값을 나타내었다. 이는 외기조건과 지속하중에 의해 콘크리트의 강도가 증가하면서 보의 강성을 증가시켜 철근의 항복시기를 앞당기고 동시에 콘크리트의 파쇄시점을 늦췄기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 보의 휨실험에 앞서 콘크리트 실린더의 압축강도 평가를 실시한 결과 콘크리트 압축강도는 실내조건 (Room), 외기조건 (Outdoor) 및 서중온도 (High temperature)에서 각각 35.8 MPa, 35.2 MPa 및 32.2 MPa이었다. 본 연구에서 콘크리트 압축강도 평가시 지속하중은 제외되었다.

외기조건 콘크리트 실린더의 경우 콘크리트의 강도가 실내조건에 비해 약간 낮았다. 그러나 외기조건 콘크리트 보에

서의 강도는 외기에서 공급되는 수분을 동반한 지속하중에 의한 크리프의 효과로 콘크리트 조직이 치밀해 지면서 다른 조건 콘크리트 보의 강도 보다 높은 것으로 판단된다. 실제로 콘크리트의 변형률도 다른 환경 조건에 비해서 외기조건 (Outdoor)에서는 증가한 것으로 확인되었다. 최근 발표된 Claisse and Dean (2012)에 따르면 습윤 양생한 콘크리트의 28일 강도가 콘크리트 압축강도의 70%~90% 수준의 지속하중에 의하여 0.9%~7.9% 증가하며 Liu et al. (2002)의 실험 결과에 따르면 크리프 하중이 2축방향으로 작용할 경우 압축강도가 최대 96% 증가하는 것으로 확인되어 일정부분 본 연구결과를 뒷받침 한다고 판단된다. 그러나 6개월과 같은 장기적인 지속하중에 따른 콘크리트 압축강도의 변화에 대해서는 추가적인 연구가 반드시 수행되어야 할 것이다. O-S 시험체의 변위를 제외한 다른 시험체의 변위는 지속하중의 영향에 따라 최대모멘트에서의 변위가 모두 감소하였다.

3.3 환경 조건에 따른 연성도

외부 조건에 따른 변위값에 따른 각 시험체의 연성도를 Fig. 15에 비교하였다. 여기서 연성도는 최대모멘트에서의 변위를 철근의 항복 변위로 나눈 값으로 정의한다.

연성도는 다른 값들과 비교하여 차이가 큰 것으로 확인되었다. 특히 외기 조건 (Outdoor)의 경우 오히려 연성도가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 또한 지속하중을 받은 외기조건 시험체 (O-S)와 서중온도 시험체 (H-S)가 지속하중을 받지 않은 시험체보다 연성도가 증가하였다. Fig. 13과 함께 비교한다면 높은 항복 모멘트와 높은 최대 모멘트는 낮은 연성도와 연관이 있다는 결론을 내릴 수 있다. 또한 실내조건

(a) Yield displacement

(b) Displacement at maximum moment

Fig. 14 Comparison of steel yielding and concrete crushing displacement

Fig. 15 Typical strain differences between strain gages

에 비하여 외기조건과 서중온도조건에서 연성도가 감소되지 않았다. 결론적으로는 6개월의 기간 동안 동결융해를 동반한 동절기 환경조건과 서중온도 및 보의 휨강도의 27%에 해당하는 지속하중에도 MF-FRP 보강보의 연성도는 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 RC구조물 보강공법으로 주목 받고 있는 MF-FRP 보강공법을 적용시킨 보를 3가지 환경조건과 지속하중에 노출시킴으로서 환경영향에 대한 구조건전성을 평가하였다. 주요 실험결과를 다음과 같이 정리하였다.

- (1) 본 연구에서 제작된 MF-FRP보는 기존 철근콘크리트 보와 비교하여 약 35% 이상의 보강효과가 있는 것으로 나타났으며 기존 RC보와도 연성도 측면에서 큰 차이가 없어 기존 외부부착 FRP 보강보에 비하여 연성도가 높은 것으로 확인되었다.
- (2) MF-FRP보는 철근의 항복 이후 콘크리트 상단의 압축 파괴, 최종적으로 FRP 박리의 순서로 파괴가 발생 되었으며 FRP 박리는 철근의 항복 이전부터 점진적으로 진전되어 최종파괴까지 지속되었다.
- (3) MF-FRP 보는 본 연구에서 적용한 환경조건에 대해서 휨강도 측면에서 구조건전성을 유지하였다. 다만 6개월간 외기 조건 (Outdoor condition)에서 실내조건 대비 약 5% 이상의 항복강도 감소가 발생한 것으로 확인되어 장기적인 강도감소를 예측하기 위해서는 지속적으로 관찰을 유지할 필요가 있다.
- (4) 지속하중을 고려한 외기조건 시험체 (O-S)의 항복강

도, 항복변위 및 최대 휨강도는 다른 시험체와 달리 감소하였다. 그러나 최대모멘트에서의 변위는 다른 시험체에 비하여 높았다. 이는 외기 조건과 지속하중에 따른 콘크리트의 압축강도 변화에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 콘크리트와 FRP 스트립의 부착성능 감소는 발생하지 않은 것으로 판단된다. 다만 장기적인 지속하중에 대한 콘크리트 강도 변화에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

- (5) 서중온도에서는 콘크리트 실린더의 압축강도가 감소되었으나 MF-FRP보의 구조건전성에는 영향이 없는 것으로 확인되었다. 따라서 서중온도의 영향으로 인한 FRP 스트립과 콘크리트 보의 부착 성능 감소는 없는 것으로 판단된다. 그러나 화재 발생시 FRP 스트립이 유리전이온도를 초과할 수 있으므로 추가적인 연구가 수행되어야 한다.
- (6) 6개월 동안 보의 휨강도의 27%에 해당하는 지속하중을 부여한 보의 구조 건전성에는 별다른 영향이 없는 것으로 확인되었다. 그러나 지속하중을 부여한 경우 항복변위는 전반적으로 모든 환경조건에서 감소하는 것으로 나타났다. 이는 지속하중이 콘크리트의 크리프를 발생시켜 보의 강성이 높아졌기 때문이다.
- (7) 동절기 환경하중, 서중온도 및 지속하중에 따른 연구 결과 MF-FRP보의 구조건전성은 유지되는 것으로 판단된다.
- (8) MF-FRP 보에 초기 크리프의 효과에 의해 콘크리트의 강도가 증가한 것이라면 1년 이상의 높은 지속하중을 동반한 장기적인 크리프에 따른 콘크리트 강도변화에 대해서도 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다. 또한 기존 균열폭 (Precrack width)에 따른 환경의 영향, 모의 부식에 따른 영향, 에폭시 보수 유무의 영향 및 피로와 환경의 복합작용 등은 본 연구에서 추가적으로 진행되어야 할 연구 주제이다.

References

1. Bank, L., Nanni, A., Rizzo, A., Arora, D., and Borowicz, D. (2004), Pultruded FRP Strips, Mechanically Fastened, Give Concrete Bridges Strength, *Composites Fabrication*, ACMA, 32-39.
2. Claisse, P., and Dean, C. (2012), Compressive strength of concrete after early loading, *Proceedings of ICE-Construction Materials*, 166(3), 152-157.
3. Ekenel, M., Rizzo, A., Myers, J., and Nanni, A. (2006), Flexural Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams

-
- Strengthened with FRP Fabric and Precured Laminate Systems, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 10(5), 433-442.
4. Elsayed, W. E., Ebead, U. A., and Neale, K. W. (2009), Mechanically Fastened FRP-Strengthened Two-Way Concrete Slabs with and without Cutouts, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 13(3), 198-207.
5. Lamanna, A. J., Bank, L. C., and Scott, D. W. (2001), Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams using fasteners and fiber-reinforced polymer strips, *ACI Structural Journal*, 98(3), 368-376.
6. Lamanna, A. J., Bank, L. C., and Scott, D. W. (2004), Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams by Mechanically Attaching Fiber-Reinforced Polymer Strips, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 8(3), 203-210.
7. Lee, J., Lopez, M. M., and Bakis, C. E. (2009), Slip Effects in reinforced concrete beams with mechanically fastened FRP strips, *Cement and Concrete Composites*, 31(7), 496-504.
8. Liu, G. T., Gao, H., Chen, F. Q. (2002), Microstudy on creep of concrete at early age under biaxial compression, *Cement and Concrete Research*, 32(12), 1865-1870.
9. Napoli, A., Matta, F., Nanni, A., and Realfonzo, R. (2009), Strengthening of reinforced concrete one-way slabs with mechanically fastened FRP laminates, *Proceeding of 9th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-9)*, ACI, Sydney, Australia.
10. Sullivan, J. L., Wen, Y. F., and Gibson, R. F. (1995), Universal aspects of composite viscoelastic behavior, *Polymer Composites*, 16(1), 3-9.
- Received : 09/17/2013
Revised : 10/20/2013
Accepted : 10/27/2013

요 지

못과 앵커를 이용하여 FRP를 콘크리트에 부착시키는 MF-FRP 공법은 에폭시를 이용하여 콘크리트 구조물을 보강시키는 외부 부착 FRP 보강 공법에 비하여 더 많은 연성을 부여하는 것으로 많은 연구를 통하여 확인되었다. 이러한 MF-FRP 공법의 사용은 앞으로 증가할 것으로 예상된다. 그러나 MF-FRP 보강법의 환경영향에 대한 평가에 대해서는 현재 연구가 전무한 상태이다. 본 연구에서는 환경의 영향으로부터 MF-FRP 구조물이 구조건전성을 유지할 수 있는지 6개월의 기간 동안 환경조건을 구성하여 보강보의 거동을 비교 평가하였다. RC보에 MF-FRP 보강 공법을 적용시킨 후 지속하중을 가하는 조건과 함께 서중온도 (40℃) 및 외기환경 조건에 6개월 (10월-3월)의 동절기 기간 동안 보강보를 노출시켰다. 이후 4점 휨실험을 수행하여 각 시험체의 구조건전성을 평가한 결과 본 연구에서 제시한 환경 조건에서는 MF-FRP 보의 강성 변화나 파괴모드의 변화가 발생하지 않아 구조건전성이 유지되는 것으로 나타났다. 보의 파괴모드는 FRP의 박리와 콘크리트의 파쇄에 의해 결정적인 영향을 받으며 못과 앵커로만 연결된 FRP와 콘크리트의 부착성능은 파괴모드에 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

핵심 용어 : FRP 보강, 환경영향, 지속하중, 휨실험, MF-FRP 보강보