

# L형 GFRP 외부부착 보강된 보의 휨 실험을 통한 보강 거동분석

정영석, 권민호\*, 김진섭, 남광식  
경상대학교 토목공학과

## Evaluation of Beam Behavior with External Bonded L-type GFRP Plate through bending Test

Yeong-Seok Jeong, Min-Ho Kwon\*, Jin-Sup Kim, Gwang-sik Nam  
Department of Civil Engineering, ERI, Gyeongsang National University

**요약** 국내 사회기반 시설물의 경우 70년대 이후로 건설되어 향후 신규건설에 대한 수요보다 유지보수에 대한 수요가 크게 증가할 것으로 전망된다. 더욱이 경주지진과 포항지진 이후로 과거 시공된 시설물의 내진성능에 대한 평가 및 보수 보강 사업이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 보강공법 중 L형 GFRP 외부부착공법을 대상으로 하여 시험체를 설계하고, 에폭시와 화약식 타정 충으로 압력 핀을 시공하는 방법으로 외부부착된 L형 GFRP Plate의 보강효과를 확인하기 위하여 4점 휨 시험을 수행하였다. 실험결과를 바탕으로 L형 GFRP Plate의 보강효과를 확인하고, 국내의 “복합신소재시스템에 의한 철근콘크리트구조물의 보강설계 및 시공 지침서”에 따라 L형 GFRP 외부부착공법이 적용된 보의 거동에 대하여 평가하고 에폭시와 압력 핀을 조합하여 시공하는 부착방법의 효용성을 평가하였다. 실험 결과를 분석한 결과 지침에 따른 설계는 부재의 강도를 잘 예측하는 것으로 나타났으나, GFRP Plate 보강재의 손상을 동반하는 고정법의 사용으로 인하여 설계가정의 조건을 만족하는 파괴가 일어나지 않는 것으로 분석하였다.

**Abstract** The demand for maintenance in Korea infrastructure facilities constructed since the 1970s has increased significantly compared to the demand for new construction. Moreover, after the Gyeongju and Pohang earthquakes, seismic performance evaluation, repair, and retrofitting projects have been carried out. Therefore, in this study, a specimen was designed following the L-type GFRP Plate Externally Bonded Retrofit method, one among other retrofit methods. The L-type GFRP Plate was bonded to the specimen by epoxy and a washered steel nail. A four-point bending test was performed to confirm the strengthening effect of the Externally Bonded Retrofit method using an L-type GFRP Plate. The strengthening effect of the L-type GFRP plate was proven experimentally, and the behavior of the beam designed following the L-type GFRP Plate Externally Bonded Retrofit method was evaluated according to Korea's "Design Manual & Specification for Strengthening of RC Structures by Advanced Composites System". Furthermore, the effectiveness of the bonding method, a combination of epoxy and washered steel nail, was also checked. The results showed that the design, according to the guidelines mentioned above, predicted the strength of the member well, but the failure mode did not satisfy the design assumption because of unexpected damage to the GFRP plate due to the fixing method, washered steel nail.

**Keywords** : GFRP, Externally Bonded FRP, Strengthening, Beam, Four Point Bending Test

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비지원(20IFIP-B128598-04)에 의해 수행되었습니다.

\*Corresponding Author : Min-Ho Kwon(Geongsang Univ.)

email: kwonm@gnu.ac.kr

Received September 29, 2020

Revised October 16, 2020

Accepted November 6, 2020

Published November 30, 2020

## 1. 서론

우리나라의 경우 1970년대 급격한 산업화가 진행되어 사회기반시설에 대한 많은 투자가 이루어졌고, 그에 따라 건설시장이 크게 성장하였고 많은 구조물들이 건설되게 되었다. 하지만 고도성장의 시기를 지나 저성장의 시대에 들어서면서 건설분야 SOC에 대한 투자비용이 매년 감소하는 추세이다. 그럼에도 국민들의 시설물 사용성에 대한 요구는 높아지고 있으므로 투자의 효율적 배분이 필요한 시점이라고 할 수 있다. 이와 같은 사회적 환경변화에 따라 우리나라의 건설투자 수요에도 변화가 발생하여 신규 건설보다는 완성된 시설물의 적정 유지관리를 통한 수명 연장과 이용도 제고를 위한 투자비중이 점차 증가할 것으로 판단된다[1]. 전 세계적으로 구조물 준공 후 50~60년 이상 경과 하면서 노후화된 주요구조물의 수가 급증하고 있어 이들 안전성에 관련된 많은 대책들이 요구되고 있으며 기후변화 등으로 인한 자연재해 증가로 그 안전성이 위협받고 있다.

따라서 국내의 구조물의 경우 구조물의 유지관리의 중요성이 더욱 부각되고 있으며, 경주·포항지진 이후로 구조물의 내진성능 확보 요구가 증가 되면서 시장수요가 증가하게 되었다. 보강 방법의 선택에 있어 가벼운 재료와 부식에 대한 내성이 요구되며, 이러한 요구조건에 적합한 재료 중 하나로 기계적 및 내구성 성능이 우수한 콘크리트 표면에 접합된 유리 섬유 강화 폴리머(GFRP) 쉬트가 있다[2, 3]. 80년대 많이 사용된 강판보강법, 부재 증설 보강공법, 단면증대 보강공법 등의 방법이 있으나 최근에 기존의 소재가 아닌 FRP를 활용한 보강기술이 시설물의 구조적 안전도를 향상시키기 위해서 제시되고 있다[4]. 하지만 이러한 보강기술 대부분이 보유한 기술의 검증 실험의 결과만으로 성능을 검증받아 관련 기술을 현장에 적용해 왔다[5]. 이에 2017년 한국복합신소재 구조학회에서는 시설물 보강에 대한 안전도 확보와 민간업체 기술의 실용화를 목적으로 “복합신소재시스템에 의한 철근콘크리트구조물의 보강설계 및 시공지침서”[4](이하 FRP 보강설계 지침서)를 발간하였다. 본 연구에서는 단면의 보를 설계하고 시험체를 제작하여 FRP 보강설계 지침서에 따라 설계된 보강량에 따라 실제 현장에 적용되는 시공방법을 고려하여 에폭시 도포 후 경화시간 확보를 위해 타정 총으로 고정하는 방식으로 보강시험체를 제작하였다. 이렇게 완성된 보 시험체에 대하여 4점 휨 시험을 통해 휨 성능을 평가하고, 도출된 결과를 FRP 보강설계 지침서의 설계에 따른 결과와 비교하여 실무의 시

공조건에서 설계법에 따라 계산된 결과의 신뢰성을 평가하여 보았다.

FRP 보강 시스템의 보강방법은 에폭시 등으로 부착하는 방법으로 시공방법에 따라 외부부착공법(Externally Bonded Retrofit)과 표면매립공법(Near Surface Mounted Retrofit) 등이 있다[6]. 그리고 FRP 외부부착공법은 섬유복합재의 부착방법에 따라 크게 FRP 쉬트 보강공법과 FRP Plate 보강공법으로 나뉜다. FRP 쉬트를 활용하여 현장 시공하는 경우 양생기간이 길고 시공 품질 관리가 어려운 단점이 있다[4]. FRP Plate 외부부착공법은 에폭시를 인장부 표면에 선 도포후 FRP를 부착하는 것으로 시공성이 용이하나 FRP의 구속 부족으로 부착파괴에 의해 FRP 보강재가 내력을 충분히 발휘하지 못하고 그 외에도 보강재가 노출되어 외부 환경에 대해 민감한 문제가 발생한다[6]. 따라서 본 연구에서는 이를 개선하기 위하여 부착성 확보와 시공이 용이한 L형 FRP Plate 보강재를 계획하고 압력 핀을 사용하여 FRP 쉬트 보강에 대한 연구[7]를 참고하여, 화약식 타정 총(Powder Actuated Fastener Nailer)으로 압력 핀(washed Steel Nail) 시공하여 부착의 용이성을 확보할 수 있도록 하였다.

## 2. 실험 계획 및 방법

### 2.1 실험 변수 및 시험체 제작

시험체는 폭 300 mm, 높이 450 mm, 길이 4,400 mm로 계획하고 주철근은 인장부에 D13 철근 4본을 사용하고, 압축부에 D10 철근 2본을 배근하였으며, 전단스트립은 D10 철근을 200 mm 간격으로 배근하였다. 시험체 제작에 사용된 주철근과 전단스트립은 모두 항복강도가 400 MPa인 SD400 규격의 이형철근을 사용하였고, 피복두께는 30 mm로 배근하였다. 시험체 단면형상은 및 치수와 철근 배근 상세는 Fig. 1과 같다.

본 연구에서는 FRP Plate를 사용한 보의 보강에서 일반적으로 사용되는 장판형이 아닌 보의 코너부를 감싸는 형태의 L형 GFRP Plate로 휨 보강된 보의 성능향상을 평가하고, FRP 보강설계 지침서의 휨 부재 보강설계식에 따라 산출된 계산 결과와 비교하기 위하여 Fig. 2, 3에 나타낸 바와 같이 보강상세에 따라 철근콘크리트 보를 L형 GFRP Plate로 보강하고, 단조하중 가력방식으로 4점 휨 재하 실험을 수행하였다. 시험체는 총 3개로 시험체는 비교군인 비보강 시험체(RBN), 철근콘크리트 보 하부 전

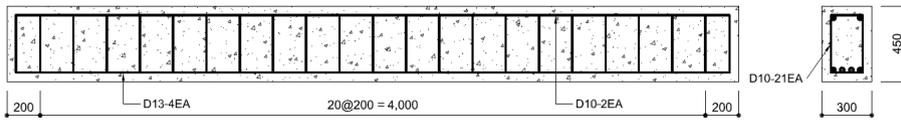


Fig. 1. Specimen Detail (RBN)

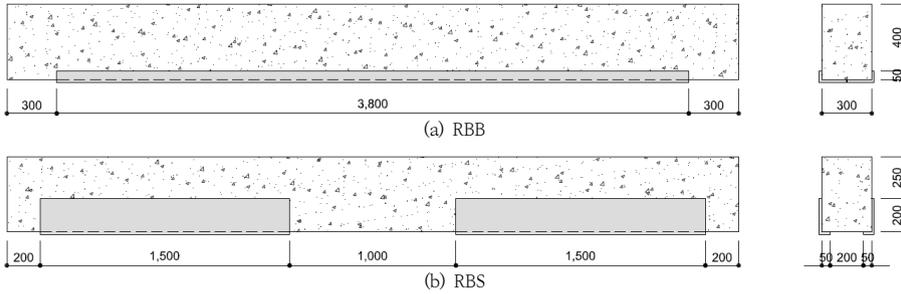


Fig. 2. Specimen GFRP Retrofit Detail

Table 1. Material Property

Material	Property	Value
Concrete	Specified Compressive strength $f_{ck}$ (MPa)	21
	Young's Modulus $E_c$ (MPa)	24,854
Rebar D13	Yield strength $f_y$ (MPa)	400
	Young's Modulus $E_s$ (MPa)	200,000
	Nominal section area $A_s$ (mm <sup>2</sup> )	126.7
GFRP Plate	Thickness (mm)	1.4
	Young's Modulus $E_{frp}$ (MPa)	25,060
	Tensile strength $f_{frp}$ (MPa)	421
	ultimate strain $\epsilon_{frpu}$	0.0168

Table 2. GFRP Plate Tensile test Result

Name	Tensile strength $f_{frp}$ (MPa)	ultimate strain $\epsilon_{frpu}$
# 1	422.15	0.0197
# 2	416.61	0.0190
# 3	424.68	0.0133
# 4	420.44	0.0188
# 5	421.45	0.0134
Average	421.07	0.0168

체가 L형 GFRP Plate로 보강된 휨보강 시험체(RBB), 그리고 양단지점으로부터 길이 1,500 mm, 높이 200 mm로 양측면이 보강된 전단보강 시험체(RBS)를 계획하였다.

시험체는 설계기준압축강도 21 MPa의 콘크리트를 사용하여 타설하고, 타설 5일 후 거푸집을 탈형하여 28일 이상 보양하였다. 보강시험체의 경우 보양 후 GFRP Plate를 보강하고 보강면 박락에 의한 보강성능저하를 예방하고자 보강면 글라인딩 하였다. 글라인딩을 통해서 레이턴스를 제거하고, 먼 처리가 완료된 콘크리트 부착부에 프라이머를 얇게 도포 후 함침시켜 에폭시를 사용한 GFRP Plate 부착 시 부착력이 일정하게 발현될 수 있도록 하였다. 프라이머 경화 후 L형 GFRP Plate를 Fig. 2,

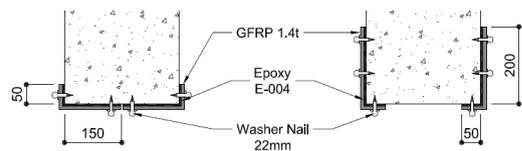


Fig. 3. L-type GFRP Plate Install Detail (RBB and RBS)

Table 3. Mix Proportion of Concrete

Name	Quantity (kg/m <sup>3</sup> )
Cement	330
Water	167
fine aggregate	926
Coarse aggregate	947
Admixture	2.97

3의 보강상세에 따라 에폭시 수지를 사용하여 부착 후 화약식 타정 총으로 22 mm의 압력 판을 20 cm에서 40 cm 간격으로 타정하여 고정될 수 있도록 하였다. 보강에 사용된 L형 GFRP Plate는 보강 형태에 따라 단면 치수의 차이는 있으나 두께는 동일하게 1.4 mm로 제작되었다. 휨 보강된 RBB 시험체는 L-150\*50\*1.4t의 GFRP Plate로 길이 3,800 mm 구간을 보강하였으며, 전단보강 시험체 RBS는 L-200\*50\*1.4t의 길이 1,500 mm인 GFRP Plate로 보강하였다.

시험체의 제작 및 보강에 사용된 콘크리트, 이형철근, GFRP Plate의 물리적 성질은 Table 1과 같다. 여기서, GFRP Plate의 탄성계수, 인장강도, 극한인장변형율은

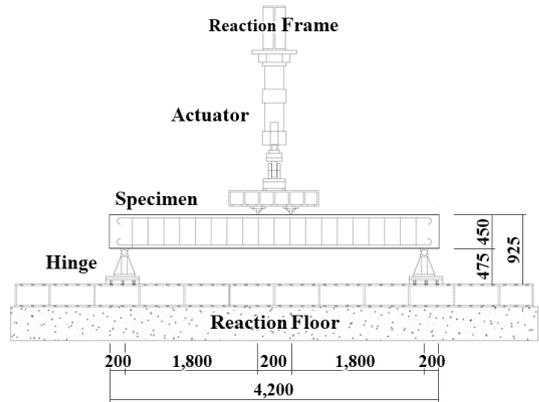


Fig. 4. Test Setup

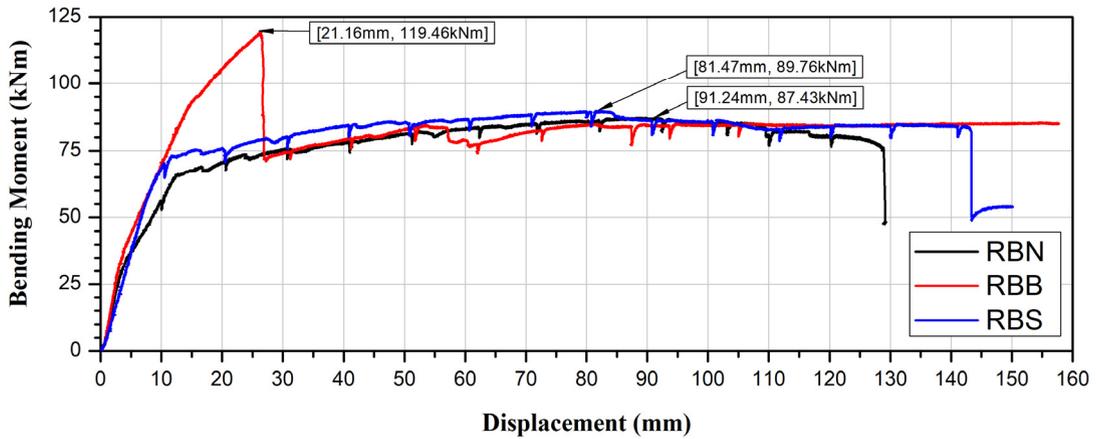


Fig. 5. Result of Displacement-load relationship curve



(a) RBN



(b) RBB



(c) RBS

Fig. 6. Failure Mode of Specimens

Table 2에 정리된 GFRP Plate의 인장시험을 수행한 후 그 결과를 바탕으로 작성된 결과이고, 설계기준압축강도 21 MPa의 콘크리트는 Table 3의 배합표에 따라 배합된 레디믹스트 콘크리트이다.

## 2.2 가력 및 데이터 측정

시험체의 휨 성능평가를 위한 가력은 Fig. 4와 같이 4점 휨 실험으로 시험장치와 시험체 설치를 계획하였다. 시험체의 거치는 양단부의 곡면 힌지를 시험체 내측으로 200 mm 이격 배치하여 힌지 사이의 거리가 4,000 mm가 되도록 하였다. Actuator에 설치된 두 가력지점의 간격은 400 mm로 설정하였으며 그 중심이 시험체와 힌지의 중심과 일치 하도록 배치하였다. 따라서 최대 발생모멘트 계산에 중요한 양단부 힌지와 Actuator의 두 가력지점 사이의 거리는 1,800 mm로 결정되었다. 가력은 2,000 kN 용량의 Actuator를 사용하였고, 5.0 mm/min의 속도로 변위 제어방식으로 가력하였다. 실험 중 콘크리트의 탈락 또는 박리, 철근의 파단 또는 압축부 파괴로 인하여 하중이 급격히 감소하거나 Actuator의 최대 발생변위를 초과하는 경우 실험을 종료하였다. 하중 및 처짐의 측정은 Actuator를 기준으로 하여 발생 변위와 하중은 모두 데이터 로거(Data logger)를 이용하여 10 Hz의 샘플링주기로 저장하였다.

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 실험결과 및 파괴모드

비보강 시험체와 보강시험체에 대한 4점 휨 실험을 수행하고 Actuator의 변위계와 하중계에서 측정한 자료를 이용하여 각 시험체의 작용한 휨 모멘트 - 처짐 곡선을 작성하여 Fig. 5에 나타내었다. 실험 종료 후 시험체의 최종적인 파괴 사진을 Fig. 6에 각각 나타내었다.

비보강 시험체 RBN은 변위 91.24 mm에서 최대 모멘트 87.43 kN·m로 나타났으며 변위 128.92 mm에서 급격히 내하력을 상실하였다. 시험체 RBN은 전형적인 휨 균열의 파괴형상을 보이며 파괴되었다. 시험체 RBN은 시험체 가력에 따라 휨 균열이 발생 성장하였으며, 초기에 발생한 휨 균열이 가력 변위가 증가 할수록 확장되는 형태로 진전되었다. 가력변위 30 mm 이후로 수직으로 발생하던 휨균열이 Actuator의 가력지점을 따라서 사선방향으로 성장하였으며, 가력변위 90 mm 이후로

압축부 파괴가 관찰되었다. 이후로 가력변위 128.92 mm에서 하중이 급격히 감소하며 실험을 중단하였다. 휨 보강된 시험체 RBB의 최종적인 파괴형상은 휨 파괴의 형태로 나타났고, 균열의 분포나 수가 시험체 RBN과 유사하게 진전되었다. 시험체 RBB는 변위 21.16 mm에서 최대하중 119.46 kN·m로 나타났으며, 최대 모멘트 이후 압력 핀의 시공 위치를 기준으로 GFRP Plate의 파단이 발생하며 하중이 크게 감소하였다. GFRP Plate의 파단 후 가력변위 50 mm 이후로 파단이 발생한 위치의 GFRP Plate 단부에서 국소적인 전단파괴가 발생하였고, 전단균열과 접한 수직방향의 휨 균열이 교차하면서 상당히 큰 크기의 박리가 발생하였다. 박리로 인하여 하중이 일부 감소하는 양상을 보이다 증가하여 이후로 일정한 하중을 유지하다 장비의 최대 발생변위(157.62 mm)에 이르러 실험을 종료 하였다. 전단 보강된 시험체 RBB의 최종적인 파괴양상 또한 휨파괴의 형태로 나타났고, 균열의 발생 및 진전은 GFRP로 보강되지 않은 1,000 mm의 영역에 균열이 집중되어 발생한 이후 지속적으로 균열이 확장 성장하는 양상을 보였다. 시험체는 변위 81.47 mm에서 최대 모멘트 89.76 kN·m로 나타났다. 가력변위 80 mm 이후로 압축부 파괴가 관찰되었고, 이후로 가력 변위 143.36 mm 이후 하중이 급격히 감소하여 실험을 중단하였다.

모든 시험체의 파괴모드는 휨 파괴로 나타났으나 휨 보강된 시험체 RBB의 경우 GFRP의 파단까지 상당히 큰 하중을 지지하는 것으로 나타났고, GFRP Plate 파단 이후의 거동은 비보강 시험체 RBN 및 전단보강 시험체 RBS의 거동과 유사하게 나타났다. 반면 최대 처짐은 RBB > RBS > RBN의 순으로 나타났으며, RBB 시험체의 경우 장비의 최대 발생변위(160 mm)를 초과하여 최대 처짐을 확인할 수 없었다.

### 3.2 FRP 보강설계 지침서에 따른 결과 분석

콘크리트 보의 경우 강도설계법을 기반으로 설계된다. 본 연구에서 사용된 RBN 시험체의 경우 철근항복에 의한 휨 파괴가 일어나도록 설계 휨강도(Mn) 81.31 kN·m로 설계되었고, RBN 시험체의 파괴 또한 휨강도(Mu) 87.43 kN·m를 보이며 휨 파괴모드로 나타났다. 외부 FRP 부착 보강된 철근콘크리트 보의 파괴모드는 크게 4가지의 형태로 분류된다. 1) 콘크리트파괴, 2) 콘크리트 파괴에 따른 철근의 항복, 3) FRP 파단에 따른 철근의 항복, 4) FRP 부착부근의 부착파손 또는 콘크리트와 FRP 계면의 부착파괴 이다[5]. 시험체 RBB는 콘크리트 파괴

의 형태의 파괴모드를 설계하는 경우 아래의 Eq. (1)에서 (7)의 과정을 통해서 설계된다.

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.0015f_{ck} \geq 0.67 \quad (1)$$

$$\beta_1 = 0.97 - 0.0025f_{ck} \geq 0.67 \quad (2)$$

$$\alpha_1 \phi_s f_{ck} \beta_1 b c^2 + (\phi_{frp} E_{frp} A_{frp} \epsilon_u - \phi_s f_y A_s) - \phi_{frp} E_{frp} A_{frp} \epsilon_{cu} h = 0 \quad (3)$$

$$a = \beta_1 c \quad (4)$$

$$\epsilon_s = \epsilon_{cu} \left( \frac{d-c}{c} \right) \geq \epsilon_y \quad (5)$$

$$\epsilon_{frp} = \epsilon_{cu} \left( \frac{h-c}{c} \right) \leq \epsilon_{frpu} \quad (6)$$

$$M_r = \phi_s f_y A_s \left( d - \frac{a}{2} \right) + \phi_{frp} E_{frp} A_{frp} \epsilon_u \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (7)$$

콘크리트 응력블록의 응력포물선 분포를 직사각형 분포로 대치하기 위한 상수  $\alpha_1$  와  $\beta_1$ 는 0.67 이상의 값으로 제한하고 있으며 콘크리트 설계기준압축강도가 21 MPa인 경우 각각 0.82와 0.92로 계산되었다. 그리고 압축 측의 철근의 영향은 무시한 중립축까지의 거리  $c$ 를 Eq. (3)와 같이  $c$ 의 항으로 표시된 2차 방정식에 의해 결정된 결과 92.81 mm가 되고, Eq. (4)에 의해서 직사각형으로 가정된 콘크리트 응력블록의 높이  $a$ 가 85.15 mm로 계산되었다. 이어서 계산된 중립축까지의 거리에 따른 부재의 발생 변형률이 파괴모드의 가정에 결정된 조건에 대한 판별식 Eq. (5)와 (6)을 모두 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 시험체 RBB는 콘크리트 파괴의 형태의 파괴모드를 설계하는 경우 Eq. (7)에 의해 계산된 설계 휨강도( $M_r$ )는 119.07 kN·m을 발휘할 수 있는 것으로 계산되었다.

하지만, Fig. 6에서 나타난 시험체의 파괴 형태는 FRP 파단에 따른 파괴의 비보강 보와 유사한 거동을 보였다. 이는 RBB 시험체 FRP Plate 파괴가 타정 층으로 시공된 고정 못에서부터 FRP의 균열이 발달 진전된 점을 볼 때 FRP Plate의 시공시 초기손상으로 인해서 FRP 보강재의 성능이 충분히 발휘되지 못하고 손상지점에서 응력 집중으로 인해 낮은 하중에서 손상이 급격히 성장하여 압축부의 파괴 이전에 FRP의 파괴가 발생한 것으로 판단된다. 따라서 외부 FRP 부착공법을 적용한 보 부재의 보강에 있어서 접착제 이외의 보강재 손상을 유발하는 보조적인 고정수단은 오히려 보강재의 심각한 성능저하를 일으킬 위험성이 있음을 본 실험을 통해서 확인할 수

있었다. 반면 RBB 시험체의 FRP 보강설계 지침서에 따른 설계 휨강도와 실험의 휨강도 사이의 차는 0.39 kN·m로 FRP 보강설계 지침서의 설계식은 상당히 보수적인 설계값을 제시하는 것으로 판단된다.

### 3.3 외부 FRP 부착에 따른 거동 변화

외부 FRP 부착공법이 적용된 두 시험체 중 RBS 시험체의 경우 양단부에만 FRP 보강된 이유로 하중의 증가는 미미한 수준의 결과를 보였다. 반면 초기강성이 증가하였으며, 최대강도 발생변위가 RBN 시험체 보다 약 10 mm 조기에 최대하중에 이르는 것으로 나타났다. 이는 부재의 보강 부분과 비보강 부분의 강성차에 의하여 변형이 비보강 구간에 집중되기 때문으로 판단된다. 이에 대한 근거로 Fig. 6(b)를 보면 균열이 비보강 구간에 집중적으로 분포하는 파괴현상을 통해서 확인할 수 있다. 그리고 특징적으로 외부 FRP 부착공법이 적용된 두 시험체 모두 RBN 시험체 대비 큰 변위를 지지하는 것을 알 수 있다. 따라서 변형 에너지적인 관점에서 보았을 때 외부 FRP 부착은 부재의 에너지 소산능력의 증대를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 이는 조정환[7]의 연구와 같이 "철근콘크리트 보와 보강재의 부착력을 충분히 확보하면 (압력 핀 사용)보의 휨 성능을 향상시키고 동시에 충분한 연성이 확보될 수 있다." 는 결과를 보완하기보다 L형 GFRP Plate의 보강으로 인해서 단면의 물리적인 강도변화 및 집중되어 발생하는 균열로 인해 발생하게 되는 거동특성으로 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 직사각 단면의 철근콘크리트 보 계획하여 L형 GFRP Plate을 에폭시와 화약식 타정 층으로 압력 핀을 시공하는 보강법의 보강 효과를 4점 휨 시험을 수행한 결과를 통해서 분석을 통해서 도출된 결과는 다음과 같다.

- (1) 보의 하부에 L형 GFRP Plate를 휨보강 한 RBB 시험체의 경우 비보강 시험체인 RBN 시험체에 비하여 매우 큰 휨강도와 강성의 증가를 보였다. 특히 휨강도의 경우 1.37배 증가하는 결과를 보였다.
- (2) RBB 시험체의 경우 FRP 보강설계 지침서를 참고하여 산출된 설계 휨강도의 차가 0.39 kN·m로 지침에 따른 설계가 실제 설계와 매우 근소한 차이를 보였다. 하지만, 보의 파괴모드가 설계가정과

다르게 FRP 파괴 후 콘크리트 파괴로 나타났다.

- (3) 설계가정과 다르게 FRP 파괴모드가 나타난 이유는 보강재의 손상을 동반하는 보조적인 고정수단인 압력 핀으로 인해 FRP에 손상발생으로 인한 응력집중이 원인으로 판단하였다.
- (4) 전단보강 형태의 외부 FRP 부착공법이 적용된 RBS 시험체를 포함한 외부 FRP 부착공법이 적용된 경우 발생 변위가 기존 부재의 최대 발생변위 대비 증가하는 현상을 관찰하였고, 이는 외부 FRP 부착공법의 적용은 변형에너지 관점에서 부재의 에너지 소산능력을 증대시키는 기능을 할 수 있을 것으로 판단된다.

## References

- [1] W. T. Jung, Development of Bridge Strengthening Method using Prestressed FRP Composites, Annual Report(KICT 2016-05), Korea Institute Of Construction Technology, Korea.  
DOI: <https://doi.org/10.23000/TRKO201700000968>
- [2] R.Kotynia, S.Cholostiakow, "New Proposal for Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using CFRP T-Shaped Profiles", *polymers*, 7(11), 2461-2477, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/polym7111524>
- [3] J. R. Cho, Y. H. Park, S. Y. Park, C. W. Park, "Development of Design Guidelines for FRP Reinforced Concrete Structure and Application of FRP Reinforcement in Korea", *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 30(6), pp.81-86, 2018.  
<http://www.cbpi.co.kr/journal/articleDetail?model=NODE07571350>
- [4] G. H. Hong, "Construction Method Improvement of the FRP-plate Strengthening Method using the Velcro", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 12(6), pp.225-232, 2008.  
[http://uci.kci.go.kr/resolution/result.do?res\\_cd=G704-000667.2008.12.6.005](http://uci.kci.go.kr/resolution/result.do?res_cd=G704-000667.2008.12.6.005)
- [5] Korean Society for Advanced Composite Structures, Design Manual & Specification for Strengthening of RC Structures by Advanced Composites System, pp.116, donghwa Publishers, 2017, pp.1-69.
- [6] J. W. Lim, *Insulation Method for fire Resistance of RC Members Strengthened by FRP*, Master's thesis, Korea National University of Transportation, Chungju, Korea, 2016.
- [7] J. H. Jo, *Behavior of Strengthened RC Beams with anchored AFRP (Aramid Fiber Reinforced Polymer) Sheet*, Master's thesis, Chungbuk National University Graduate School of Industry, Chungju, Korea, 2013.

정 영 석(Yeong-Seok Jeong)

[준회원]



- 2015년 2월 : 경상대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 경상대학교 토목공학과 (박사과정)

<관심분야>

철근콘크리트 구조해석, 복합재료 보강재, 내진성능평가

권 민 호(Min-Ho Kwon)

[정회원]



- 2000년 8월 : Univ.of Colorado Boulder (공학박사)
- 2000년 8월 ~ 2001년 12월 : Univ. of Colorado, Denver (Research Fellow)
- 2002년 3월 ~ 현재 : 경상대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

철근콘크리트 구조해석, 전산구조, 내진성능평가

김 진 섭(Jin-Sup Kim)

[종신회원]



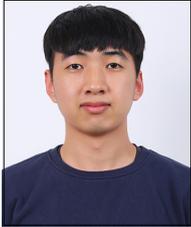
- 2008년 2월 : 경상대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2014년 2월 : 경상대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2016년 9월 ~ 현재 : 경상대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

강구조, 구조해석, 복합재료 보강재, 내진성능평가

남 광 식(Gwang-Sik Nam)

[준회원]



- 2020년 8월 : 경상대학교 토목공학과 (공학사)
- 2020년 9월 ~ 현재 : 경상대학교 토목공학과 (석사과정)

<관심분야>

철근콘크리트 구조해석, 전산구조, 내진성능평가