



매립형 유공 GFRP 판으로 보강된 RC보의 전단거동에 관한 실험적 연구

최종훈¹⁾ · 김민숙¹⁾ · 김희철¹⁾ · 이영학^{1)*}

¹⁾경희대학교 건축공학과

An Experimental Study on Shear Behaviors for Reinforced Concrete Beams Embedded with GFRP Plate with Openings

Jong-Hoon Choi,¹⁾ Min-Sook Kim,¹⁾ Hee-Cheul Kim,¹⁾ and Young-Hak Lee^{1)*}

¹⁾Architectural Engineering, Kyung Hee University, Yongin 446-701, Korea

ABSTRACT The purpose of this study is to experimentally investigate the shear behavior of reinforced concrete beams embedded with GFRP (glass fiber reinforced polymer) plate with openings. In this study, the parameters include the shape of reinforcement, reinforcement area, and thickness and width of reinforcements. The test was performed on 9 specimens with shear span-to-depth ratio of 2.8. When the reinforcement area was varied, the GFRP plate showed 3.6 times greater shear strength than steel stirrup. The test result showed that shear strength increased as reinforcement area increased. Also, when the shape of a parallelogram GFRP plate was used, it showed higher shear strength than that with rectangular shape. Effect of thickness and width of reinforcement showed that shear capacity increased as width increased. For a comparison study, a calculation of the shear strength of reinforced beams with GFRP plate based on the ACI 318M-08 was compared with the test results. The test results were compared with the maximum shear reinforcement areas required by ACI 318M-08, CSA-04, and EC2-02 provision.

Keywords : GFRP, stirrup, reinforced concrete beam, maximum shear reinforcement

1. 서 론

철근콘크리트 보의 전단거동은 콘크리트와 보강재의 상호관계에 의해 다양하고 불규칙한 거동을 보여주며 부재의 형상, 콘크리트 압축강도, 전단경간비, 전단보강비 등의 다양한 변수들로 인하여 전단거동 특성을 파악하기가 매우 어렵다. 전단력을 받는 철근콘크리트 부재에서 철근 스티럽은 전단보강재로서, 전단균열로 인한 콘크리트의 취성거동을 방지하고 균열에 저항하면서 더 높은 하중에 견딜 수 있는 역할을 한다. 부재에 높은 전단력이 작용할 경우, 철근 스티럽 배근이 조밀해지는데, 이는 전단에 대한 저항력은 증가하나 자중이 증가하거나 골재가 고르게 배치되지 않아 구조물의 성능저하를 유발하며 철근의 부식, 현장 작업내용의 증가로 인한 문제점을 유발할 수 있다. 철근과 달리 FRP(fiber reinforced polymer, FRP)는 높은 내부식성 및 경량 등의 장점을 가지고 있어 철근 대체재로 적합하기 때문에 철근을 사용한 보강근 대

신 rebar 형태의 FRP를 보 및 슬래브 등 콘크리트 부재에 적용하는 연구가 지속적으로 수행되어왔다.^{1,2)} FRP rebar를 주근으로 사용한 보의 휨 거동이나 스티럽이 없는 보의 전단성능에 관한 연구³⁻⁶⁾는 폭넓게 진행되었으나 철근 스티럽의 대체재로서의 FRP 적용에 관한 연구는 매우 드물다. Ahmed 등⁷⁾은 rebar 형태의 CFRP를 스티럽으로의 적용을 위하여 직경과 문힘길이에 따른 부착강도 및 콘크리트 보에 CFRP 스티럽의 전단 보강 성능에 대한 연구를 수행하였다. Ahmed 등⁸⁾은 철근스티럽 대신 CFRP rebar 형태의 스티럽을 보강하여 전단실험을 수행하여 전단강도에 관한 실험식과 예측식을 비교하였다. Dinh 등⁹⁾은 철근 스티럽 대신 고강도 철근섬유보강재로 보강하여 전단거동을 연구하였다.

이 연구에서는 Fig. 1(a)와 같이 FRP 중 GFRP(glass fiber reinforced polymer)를 판(plate) 형태로 제작하여, 철근 스티럽을 전단보강재로 사용하는 대신 GFRP 판을 콘크리트 보에 매립하여 전단보강재로 활용하는 방법을 제안하였다. 이 때, 콘크리트와 GFRP 판의 효과적인 부착을 위하여 유공의 판 형태를 고안하였다. 유공형 GFRP 판은 콘크리트와의 넓은 부착면적 형성 및 FRP 섬유에 의한 인장강도로 인한 부재의 전단강도 향상과 더불어,

*Corresponding author E-mail : leeyh@khu.ac.kr

Received February 6, 2012, Revised April 4, 2012,

Accepted May 2, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

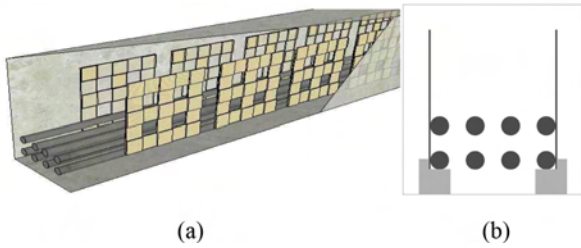


Fig. 1 Reinforced concrete beam with GFRP plates

기존 철근 스티럽과 같이 현장 배근 및 조립작업이 없이 판 형태의 보강재를 스페이서를 사용하여 주근에 끼움으로써 정착하여 시공성 향상이 가능하도록 설계하였다. 스페이서를 이용한 GFRP 판의 설치모습 상세는 Fig. 1(b)에 나타내었다. 유공형 GFRP 판을 전단보강재로 적용하기 위해, 보강재 형상, 보강 면적, 보강재의 두께 및 폭의 영향, 보강재 종류를 변수로 하여 새로운 전단보강재 형상에 대한 역학적 거동 파악 및 이를 적용한 콘크리트 보의 전단거동을 평가하는데 이 연구의 목적을 두었다.

2. 실험

2.1 사용재료

시험체 제작에 사용된 콘크리트의 설계기준 강도는 45 MPa이며 Table 1의 배합비를 사용하였다. KS F 2405의 기준에 따라 재령 28일 후 압축강도를 측정하여 평균 42.7 MPa의 압축강도를 확인하였다. 인장철근은 지름

Table 1 Concrete mix proportions

Component	Value
Compressive strength (MPa)	45
Water binder ratio (%)	32.4
Sand to aggregate ratio (%)	44.0
Coarse aggregate size (mm)	25
Slump (mm)	150
Water content (kg/m ²)	162
Cement content (kg/m ²)	500
Fly ash content (kg/m ²)	43
Fine aggregate content (kg/m ²)	727
Coarse aggregate content (kg/m ²)	936
AE water reducer content (kg/m ²)	6.42

Table 2 Properties of steels & GFRP

	Diameter (mm)	Area (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)
Tensile reinforcement	28.7	642.4	500	200
Stirrup	9.5	71.3	500	200
GFRP	-	-	480	50

29 mm의 이형철근을 사용하였으며, 스티럽은 지름 10 mm의 이형철근을 사용하였다. Table 2에 실험에 사용된 철근과 GFRP의 물성치를 나타내었다. 유공 GFRP 판은 기본격자형과 평행사변형의 두 가지로 제작하였으며 각 형상은 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 시험체 계획 및 변수

GFRP 판으로 전단보강된 시험체 8개와 철근 스티럽으로 보강된 시험체 1개를 제작하여 총 9개의 시험체에 대하여 전단실험을 수행하였다. 철근 스티럽 및 GFRP 판의 일반적인 배치형태를 Fig. 3에 나타내었다. 시험체의 총 길이는 2,700 mm, 순경간은 2,100 mm이며 지점에서 양단으로 300 mm의 정착길이를 두었다. 피복두께는 40 mm로 하였다. 시험체의 유효깊이는 218.9 mm이며, 전단경간비는 2.8로 하였다. 모든 시험체는 휨파괴를 방지하고 전단파괴가 발생하도록 설계하였다. GFRP 판 형상 및 보강면적, 동일한 보강면적에서 보강재의 두께 및 폭의 영향을 실험변수로 선정하였다. 시험체 일람은 Table 3에 나타내었다.

2.3 실험 방법

시험체는 단순지지하여 최대용량 5,000 kN의 유압식



(a) Rectangle

(b) Parallelogram

Fig. 2 Shape of GFRP plates

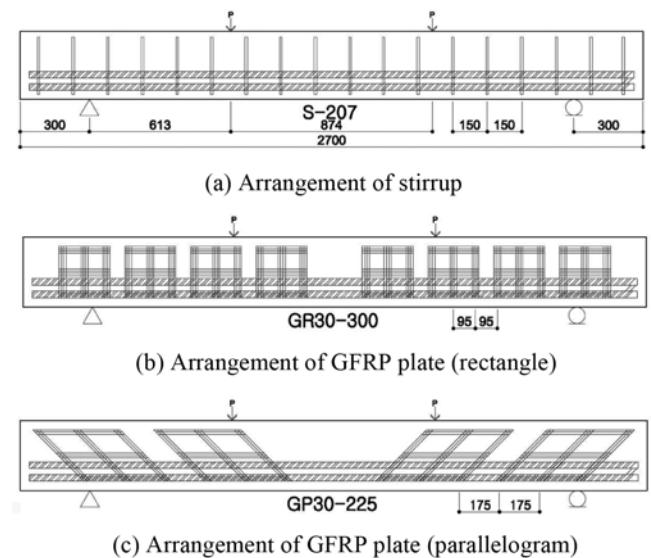


Fig. 3 Type of shear reinforcements

Table 3 Characteristics of specimens

Specimens	Cross section	a/d	f'_c (MPa)	f_y or f_{yt} (MPa)	Type of shear reinforcement	Shape of reinforcement	Width of reinforcement (mm)	Thickness of reinforcement (mm)	Reinforcement area (mm ²)
S-207	280×300	2.8	45	500	Steel	-	-	-	207
GR15-45	280×300	2.8	45	480	GFRP	Rectangle	15	1.5	45
GR30-300	280×300	2.8	45	480	GFRP	Rectangle	30	2.5	300
GR25-300	280×300	2.8	45	480	GFRP	Rectangle	25	3	300
GR50-300	280×300	2.8	45	480 <td GFRP	Rectangle	50	1.5	300	
GR30-525	280×300	2.8	45	480	GFRP	Rectangle	30	2.5	525
GP15-45	280×300	2.8	45	480	GFRP	Parallelogram	15	1.5	45
GP30-225	280×300	2.8	45	480	GFRP	Parallelogram	30	2.5	225
GP30-300	280×300	2.8	45	480	GFRP	Parallelogram	30	2.5	300

Specimens notation -GR15-45

G: Type of shear reinforcements (G-glass fiber reinforced polymer, S-steel)

R: Shape of reinforcement (R-rectangle, P-parallelogram)

15: Width of reinforcement (15 mm, 25 mm, 30 mm, 50 mm)

45: Reinforcement area (45 mm², 207 mm², 225 mm², 300 mm², 525 mm²)

UTM을 사용하여 평균 5 kN/min의 속도로 하중을 재하하였다. 양 지점으로부터 각각 613 mm 떨어진 가력점에 서 2점 가력하였고 시험체 중앙 하부에 LVDT를 설치하여 시험체의 수직 변위를 측정하였다. 콘크리트가 최대 변형률에 도달하는지의 유무를 파악하고 어떠한 파괴형태를 보이는지 분석하기 위하여 시험체 중앙부의 상부와 하부에 각각 변형률 게이지를 부착하여 콘크리트의 변형률을 측정하였다. 또한 인장철근의 항복 여부를 판단하기 위하여 인장철근 중앙 하부에 변형률 게이지를 부착하여 철근의 변형률을 측정하였다. GFRP 판의 가로축과 세로축에 변형률 게이지를 부착하여 GFRP 판의 가로축 및 세로축의 변형률을 측정하였다. UCAM-500A를 사용하여 하중, 변위 및 변형률의 데이터를 수집하였다. 시험체 세팅 및 변형률 게이지의 부착 위치를 Fig. 4에 도식화하여 나타내었다.

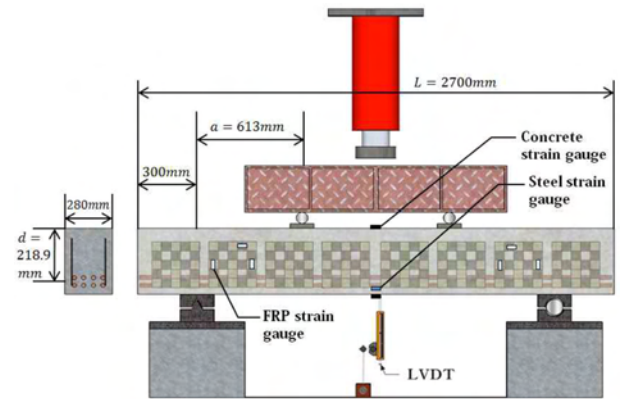


Fig. 4 Specimens setting and strain gauge

3. 실험 결과

3.1 시험체 균열 및 파괴양상

전단경간비가 2.5 이상인 일반보는 사인장 균열로 인하여 전단파괴가 발생한다. 실험 결과 모든 시험체에서 사인장 균열로 인한 파괴가 발생하였다. 초기 균열은 휨 인장응력에 의한 휨 균열로 나타났다. 휨 균열 이후 반력지점으로부터 유효길이만큼 떨어진 곳에서 휨 전단 균열이 발생하였다. 이 균열은 휨 지배적이던 단면이 전단에 지배적인 영향으로 바뀌는 과정을 통해 발생하였다.

전단보강면적에 따라 GFRP 판이 파단된 경우와 파단되지 않은 경우, 두 가지의 파괴양상이 나타났다. Table 4는 GFRP 판으로 보강된 철근콘크리트 보의 실험 결과



Fig. 5 Fracture of GFRP plates



Fig. 6 Shear compression failure

Table 4 Test results

Specimens	P_{max} (kN)	V_{exp} (kN)	V_{cal} (kN)	Failure mode
S-207	595.80	297.90	200.65	Shear
GR15-45	472.78	236.39	118.64	Shear
GR30-300	528.76	264.38	241.04	Shear
GR25-300	455.20	227.60	241.04	Shear
GR50-300	496.62	248.31	241.04	Shear
GR30-525	600.44	300.22	349.04	Shear
GP15-45	496.96	248.48	127.59	Shear
GP30-225	511.52	255.76	249.78	Shear
GP30-300	535.18	267.59	300.69	Shear

를 보여주고 있다. GFRP 판의 파단이 발생한 경우는 기본격자형 GR15-45와 평행사변형 GP15-45로, 실험의 전단강도가 설계 전단강도에 비하여 약 95% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 GFRP 판이 파단하기 전까지 충분한 강도를 발휘하여 전단성능 향상에 기여한 것으로 판단된다. 반면, GFRP 판이 파단되지 않은 경우는 실험 전단강도가 설계 전단강도와 유사하거나 그 이하의 값을 나타내었다. 이는 높은 보강면적으로 인해 GFRP 판이 최대내력에 도달하기 전에 콘크리트 압괴로 인한 취성과 파괴가 먼저 발생했기 때문으로 판단된다.

황현복 등¹⁰⁾은 철근콘크리트 보의 최대전단철근비에 대한 평가에서 전단균형파괴를 콘크리트의 압괴와 동시에 전단보강철근이 항복하는 시점으로 정의하고 전단파괴모드를 최소 전단보강근파괴, 인장파괴, 균형파괴, 압축파괴의 4가지로 구분하였다. 이를 참고하여 GR15-45와 GP15-45는 GFRP 판이 충분한 인장강도를 발휘한 후 파단되었으므로 전단보강비가 최소전단보강비와 균형보강비 사이에 있는 인장파괴로 판단된다. 이를 제외한 나머지 시험체는 GFRP 판이 충분한 내력을 발휘하기 전에 콘크리트 압괴에 의해 파괴되었기 때문에 전단보강비가 균형보강비보다 큰 경우인, 압축파괴로 판단된다. 따라서 최소전단보강비 이상, 균형보강비 이하로 GFRP 판을 전단보강하는 경우에 더 효과적인 전단보강이 될 것이라 판단된다.

3.2 변형률

Fig. 7에서는 전단 균열이 발생하는 구간 내 GFRP 판의 변형률을 나타내었다. GFRP 판의 변형률은 초기전단균열이 발생하기 전까지 탄성상태에 머물다 작용하중이 증가하면서 전단 균열이 발생하고, 전단 균열 발생시점에서 변형률이 크게 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 7에서 GFRP 판의 가로축의 변형률은 탄성상태에 있는 것으로 보아 전단력에 대한 지지능력에 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 GFRP 판을 전단보강재로 사용할 경우, GFRP 판의 세로축이 전단성능에 기여하는 것으로 판단된다.

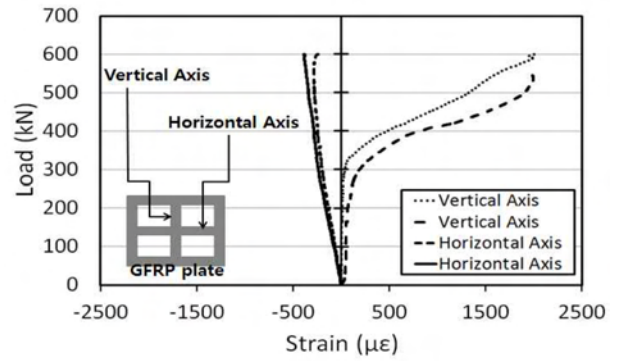


Fig. 7 Load-strain curve (GR30-525)

3.3 하중-변위

3.3.1 철근 스티럽과 GFRP 판의 하중-변위

GFRP 판으로 보강한 시험체와 철근 스티럽으로 보강한 시험체의 하중-변위 곡선을 Fig. 8에 나타내었다. 이 실험은 철근 스티럽과 GFRP 판의 전단보강재로서의 성능을 비교 및 분석하기 위하여 전단보강재의 항복에 의하여 전단파괴가 발생하는 것으로 가정하였다. 이는 두 가지의 전단보강재가 최대내력을 발휘했을 때 전단성능 비교가 가능하기 때문이다. 철근 스티럽으로 보강한 S-207은 철근 스티럽의 항복에 의하여 전단파괴가 발생하였다. FRP는 항복하지 않는 재료적 특성을 가지고 있으므로 GFRP 판의 파단이 발생한 시점을 최대내력이 발현된 구간으로 보고 이를 동반하여 전단파괴가 발생한 GR15-45를 비교 대상으로 선정하였다. 다음으로 철근 스티럽을 전단보강재로 사용한 현행 설계기준과 달리 GFRP 판의 전단강도는 위험단면구간에 존재하는 보강재의 보강면적과 보강재의 인장강도를 통해 산정할 수 있다. 따라서 형상이 다른 두 보강재의 전단성능을 비교하기 위하여 단위 보강면적을 맞추고 최대전단강도를 비교하였다. 철근 스티럽으로 보강한 S-207의 보강면적은 207 mm² 이고 GFRP 판으로 보강한 GR15-45의 보강면적은 45 mm² 이다. 단위 보강면적당 최대전단강도를 비교한 결과 GFRP 판으로 보강한 보가 철근 스티럽으로 보강한 보에 비해 3.6배 우수한 것으로 나타났다. 따라서 GFRP 판이 충분한 전단성능을 발휘한다면 철근 스티럽보다 전단성능 향

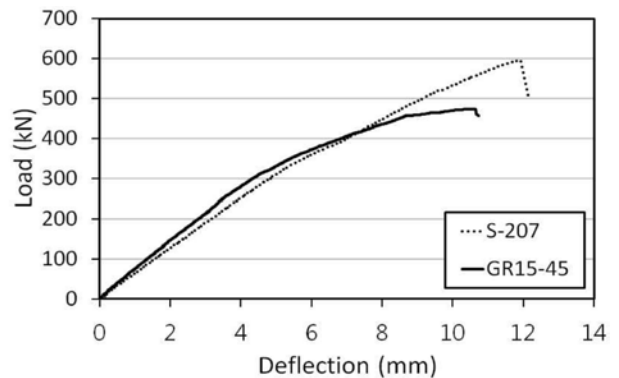


Fig. 8 Load-deflection curve (type of shear reinforcements)

상에 더 효과적이라고 판단된다.

3.3.2 GFRP 판의 보강면적에 따른 하중-변위

GFRP 판의 보강면적에 따른 특성을 분석하기 위해 하중-변위 곡선을 Fig. 9에 나타내었다. 보강면적이 증가함에 따라 전단강도 또한 증가하는 것으로 나타났다. 모든 변수가 동일하고 보강면적만 다르게 한 GP30-225와 GP 30-300 시험체를 전단강도에 따라 비교한 결과 보강면적이 약 33% 증가한 것에 비해 전단강도는 약 20%가 증가한 것으로 나타나 보강면적의 증가량에 비해 전단강도의 증가량은 크지 않음을 확인할 수 있었다. 이것은 보강면적이 증가하여도 GFRP 판이 최대내력에 도달하기 전에 콘크리트 압괴로 인한 취성파괴가 발생하기 때문이라고 판단된다.

3.3.3 GFRP 판의 형상에 따른 하중-변위

Fig. 10은 GFRP 판의 형상에 따른 하중-변위 곡선을 나타내었다. 일반적으로 철근 스테럽 보강 시, 보에 수직으로 스테럽을 배근하는 방법과, 전단균열 방향에 수직으로 위치하도록 보에 45°로 스테럽을 배근하는 방법이 있다. 이를 고려하기 위해 GFRP 판을 보에 수직인 방향인 기본격자형과 전단균열방향에 수직인 방향인 평행사변형으로 제작하였으며 이에 대한 비교를 위해 기본격자형 GR15-45와 평행사변형 GP15-45는 형상만 다르게 하고 나머지 변수는 동일하게 하였다. Fig. 10에서 보는

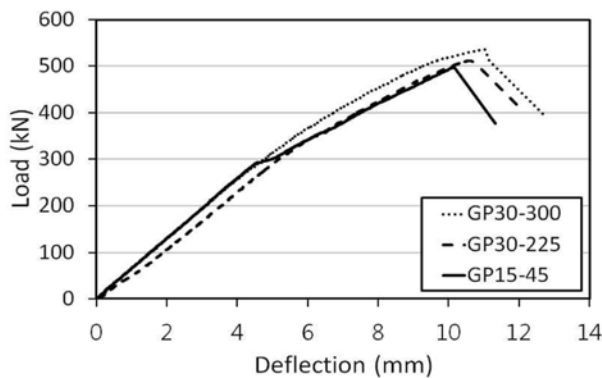


Fig. 9 Load-deflection curve (reinforcement area)

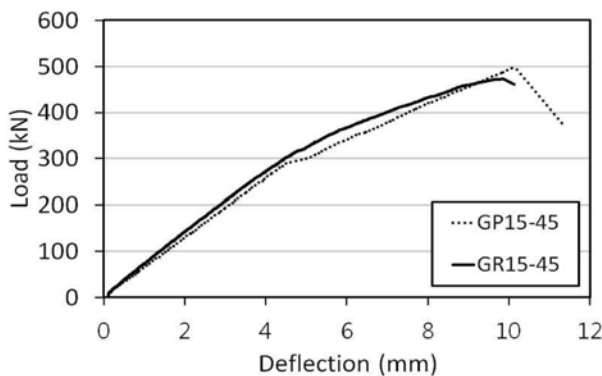


Fig. 10 Load-deflection curve (shape of GFRP plate)

바와 같이, 최대전단강도에 도달하고 난 후 GP15-45는 GR15-45에 비해 취성적으로 파괴가 발생하였다. 최대전단강도는 GP15-45가 GR15-45에 비해 약 5% 더 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 따라서 같은 면적으로 전단보강한 경우 기본격자형 GFRP 판으로 보강하기보다는 전단균열방향에 수직인 평행사변형 GFRP 판으로 보강하는 것은 최대전단강도에 미치는 영향은 미미하지만 최대전단강도 도달 후 전단균열의 제어를 통한 연성 거동 확보에 더 효과적이라고 판단된다.

3.3.4 GFRP 판의 폭 및 두께에 따른 하중-변위

동일한 보강면적을 가지는 GR30-300, GR25-300, GR 50-300을 GFRP 판의 폭 및 두께에 따라 하중-변위 곡선으로 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에서 세 가지 시험체 모두 초기 균열이 발생하기 전까지 동일한 거동을 보였다. 초기 균열 이후 서서히 강성에 차이가 발생하고 전단균열 이후 그 차이가 더욱 두드러졌다. GR30-300을 기준으로 보강재의 폭은 감소하고 두께가 증가한 GR25-300의 경우는 GFRP 판이 최대내력에 도달하기 전에 콘크리트 압괴로 인한 취성파괴 때문에 충분한 내력을 발휘하지 못하였으나, 보강재의 두께는 감소하고 폭이 증가한 GR50-300의 경우는 충분한 최대내력을 발휘하였다. 동일한 보강면적에서 GR25-300의 경우만 콘크리트 압괴로 GFRP 판이 최대내력에 도달하지 못한 것을 통해 두께의 증가는 제한적인 것을 알 수 있었다. 또한 보강재의 폭이 넓어질수록 전단균열에 저항할 수 있는 접촉면이 더 증가하기 때문에 전단균열 제어 측면에 있어 더 효과적이라고 판단된다. 따라서 높은 전단강도 확보를 위해서 두께보다 일정크기 이상의 폭을 확보하는 것이 더 효과적이다.

3.4 전단강도 평가

이 실험은 철근 스테럽 대신 매립형 유공 GFRP 판으로 전단보강된 경우로서 식 (1)에서처럼 전단강도 산정 시에 콘크리트의 전단강도와 전단보강재의 전단강도의 합으로 나타낼 수 있다. 콘크리트의 전단강도를 산정할 때 ACI 318M-08 기준식¹¹⁾에 의거하여 식 (2)는 인장철근의 전단성능과 전단경간비를 고려한 콘크리트 전단강

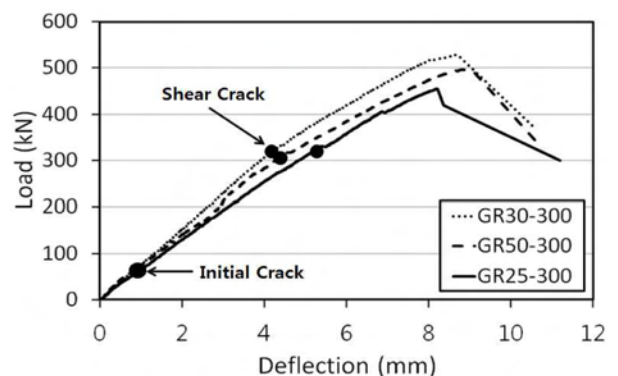


Fig. 11 Load-deflection curve (thickness and width)

도식이고, 식 (3)은 콘크리트의 압축강도만 고려한 일반화된 식이다. 전단파괴를 유도하기 위해 인장철근을 과보강으로 설계한 이 실험에서는 전단강도 산정시 식 (2)를 적용하였다. 식 (4)는 GFRP 판의 전단강도를 나타낸 식으로 다음과 같이 표현하였다.

$$V_n = V_c + V_f \quad (1)$$

$$V_c = (0.16\sqrt{f'_c} + 17\rho_\omega d/a)b_\omega d \quad (2)$$

$$V_c = \frac{1}{6}\sqrt{f'_c}b_\omega d \quad (3)$$

$$V_f = A_f f_{yf} \quad (4)$$

$$A_f = 2nt_{frp}\omega_{frp} \quad (5)$$

여기서,

V_n : GFRP 판 보강 콘크리트 전단강도(kN)

V_c : 콘크리트 전단강도(kN)

V_f : GFRP 판 전단강도(kN)

f'_c : 콘크리트의 압축강도(MPa)

ρ_ω : 주인장철근비

a/d : 전단경간비

b_ω : 보의 폭(mm)

d : 보의 춤(mm)

A_f : GFRP 판 단면적(mm²)

f_{yf} : GFRP 판 인장강도(MPa)

n : 전단경간 내의 GFRP 개수

t_{frp} : GFRP 판 두께

ω_{frp} : GFRP 판 폭

철근 스티럽을 전단보강재로 사용한 철근콘크리트 보의 전단강도를 산정하는 ACI 318M-08 기준식을 통해 GFRP 판으로 보강된 보의 전단강도를 평가하여 보았다. Table 5와 Fig. 12는 ACI 318M-08 기준식에 의해 설계된 최대 전단강도(V_{cal})와 실험에 의해 나온 최대전단강도(V_{exp})를 비교한 결과를 나타낸 것이다. 비교 결과 전단강도비(V_{exp}/V_{cal})는 평균 1.25, 표준편차는 0.42로 나타났다. 일반적으로 철근 스티럽으로 보강한 S-207 시험체와 같이 실험에 의한 최대전단강도는 기준식에 의한 최대전단강도보다 크게 나타난다. 이와 달리 Fig. 12에서 GFRP 판의 보강비가 균형보강비 이하인 GR15-45와 GP15-45는 기준식에 의해 설계된 최대전단강도보다 실험에 의한 최대전단강도가 95% 이상 크게 나타나면서 우수한 전단성능을 보였으나 나머지 시험체들은 기준식에 의한 최대전단강도와 실험에 의한 최대전단강도를 비교한 결과 “1”을 내외하는 값을 나타내었다. “1”을 내외하는 값을 나타낸 시험체들은 균형보강비 이상의 GFRP 판으로 보강되었고 높은 보강면적으로 인해 GFRP 판이 최대내력에 도달하기 전에 콘크리트 압괴로 인한 취성파괴가 먼저 발생하

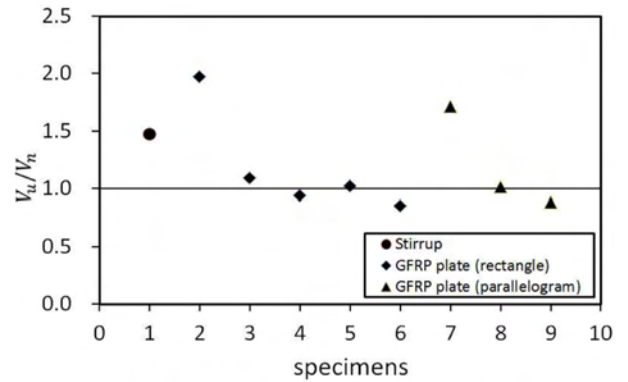


Fig. 12 Comparison of shear strength

Table 5 Comparison of shear strength

No.	Specimens	V_{exp} (kN)	V_{cal} (kN)	V_{exp}/V_{cal}
1	S-207	297.90	200.65	1.48
2	GR15-45	236.39	118.64	1.99
3	GR30-300	264.38	241.04	1.10
4	GR25-300	227.60	241.04	0.94
5	GR50-300	248.31	241.04	1.03
6	GR30-525	300.22	349.04	0.86
7	GP15-45	248.48	127.59	1.93
8	GP30-225	255.76	249.78	1.02
9	GP30-300	267.59	300.69	0.89

였기 때문에 충분한 전단성능을 발휘하지 못하였다. 따라서 ACI 318M-08 기준식은 GFRP 판의 보강비가 균형보강비보다 작은 경우에서 전단성능을 과소평가하는 점을 보완한다면 GFRP 판 형상의 전단보강재를 사용한 경우의 전단강도 예측식으로 사용이 가능한 것으로 판단된다.

3.5 최대전단보강 제한

현행 기준에서는 전단력을 받는 부재가 콘크리트의 압괴로 인한 취성파괴를 방지하기 위하여 전단보강철근양에 제한을 두고 있다. 이 연구에서는 철근 스티럽의 대체재인 GFRP 판으로 현행 기준에서 최대전단보강 요구사항을 만족하는지를 검토하기 위하여 시험체들의 전단보강면적과 각 국가의 최대전단보강 요구사항을 비교하였다. ACI 318M-08 기준식,¹¹⁾ CSA-04 기준식,¹²⁾ EC2-02 기준식¹³⁾에서 제한하고 있는 최대전단보강철근비(ρ_{max}) 기준식은 다음과 같고, 이를 이용하여 최대전단보강면적($A_{f,max}$)은 식 (9)와 같이 표현하였다.

$$\text{ACI 318M-08} \quad \rho_{max} \leq \frac{2\sqrt{f'_c}}{3f_{yt}} \quad (6)$$

$$\text{CSA-04} \quad \rho_{max} \leq 0.25\frac{f_{ck}}{f_y} - \beta\sqrt{\frac{f_{ck}}{f_y}} \tan\theta \quad (7)$$

$$EC2-02 \quad \rho_{max} \leq \frac{v f_{ck}}{f_{yt}} \sin^2 \theta \quad (8)$$

$$A_{f,max} \cong \rho_{max} b_{\omega} d \quad (9)$$

여기서,

f'_c : 콘크리트의 압축강도(MPa)

f_{ck} : 콘크리트의 압축강도(MPa)

f_{yt} : 철근의 항복강도

β : CSA-04 기준의 콘크리트 전단 저항성분 계수

$$\beta = 230 / (1000 + d_v)$$

d_v : CSA-04 기준에서 유효 보의 춤(mm)

$$d_v = 0.9d$$

θ : EC2-02 기준에서 콘크리트 압축대의 각도(38.5°)

v : EC2-02 기준의 콘크리트 압축강도 저감계수

$$v = 0.6(1 - f_{ck}/250)$$

b_{ω} : 보의 폭(mm)

d : 보의 춤(mm)

앞서 GFRP 판의 파괴양상에서 시험체의 보강면적에 따른 시험체의 파괴양상을 분석한 결과 보강면적이 225 mm², 300 mm², 525 mm²일 경우, GFRP 판이 최대내력에 도달하기 전에 콘크리트 압괴로 인한 취성파괴가 발생하였으며, 이보다 적은 보강면적을 가질 경우의 파괴양상을 보이는 시험체가 전단성능 향상에 더 효과적인 것으로 나타났다. 따라서 전단보강면적이 225 mm² 이상은 GFRP 판을 과보강한 경우로 판단된다. Table 6은 GFRP 판을 전단보강재로 사용한 철근콘크리트 보의 국가별 최대전단보강면적 요구사항을 계산한 결과와 시험체들의 GFRP 판 보강면적을 나타낸 것이다. 국가별 최대전단보강면적 요구사항은 GFRP 판의 최대전단보강면적보다 ACI 318M-08은 2.5배, CSA-04는 5.1배, EC2-02는 4.9 배 크게 평가하는 것으로 나타났다. 현행 기준을 적용하여 GFRP 판의 최대전단보강면적을 제한하는 것은 적합하지 않은 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 연구에서 철근 스티럽의 대체재인 매립형 유공 GFRP 판으로 전단 보강된 철근콘크리트 보의 전단거동을 분석하기 위하여 GFRP 판의 형상, 보강면적, 보강재

Table 6 Maximum area of shear reinforcement

GFRP plate reinforcement area (mm ²)	$A_{f,max}$ (mm ²)		
	ACI 318M-08	CSA-04	EC2-02
45	571.05	1145.04	1095.56
225			
300			
525			

두께 및 폭의 영향을 변수로 하여 실험을 수행하였다. 이를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 철근 스티럽과 GFRP 판을 단위 보강면적당 전단강도로 비교한 결과, GFRP 판으로 보강한 보가 3.6배 우수한 것으로 나타났다. 또한 GFRP 판 형상에 따른 비교 결과 기본격자형 GFRP 판으로 보강하기 보다는 전단균열방향에 수직인 평행사변형의 GFRP 판으로 보강하는 것이 전단균열의 제어를 통한 연성 거동 확보에 더 효과적이라고 판단된다.
- 2) GFRP 판의 두께 및 폭의 영향을 분석한 결과 두께의 증가보다 보강재의 폭의 증가가 전단균열에 저항할 수 있는 접촉면의 증가로 전단균열 제어 측면에 있어 더 효과적이라고 판단된다. 따라서 GFRP 판의 두께보다 일정크기 이상의 폭을 확보하는 것이 더 효과적이다.
- 3) ACI 318M-08의 전단강도 산정식은 GFRP 판의 전단보강비가 균형보강비보다 작은 경우 전단성능을 과소평가하는 점을 보완한다면 GFRP 판 형상의 전단보강재를 사용한 경우의 전단강도 예측식으로 사용이 가능한 것으로 나타났다. 따라서 추후, GFRP 판을 사용한 부재의 균형보강비 기준 정립을 통한 적합한 전단강도 식의 제안이 필요할 것으로 판단된다.
- 4) ACI 318M-08 및 CSA-04, EC2-02의 최대 전단보강비제한은 GFRP 판을 사용한 경우의 최대전단보강비 제한 시 적합하지 않은 것으로 판단된다. 추후, GFRP 판의 보강비에 관한 연구를 통해 최대전단보강비 요구사항을 충족시킬 수 있는 식의 제안이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2012-0005672).

참고문헌

1. Tang, W. C. and Lo, T. Y., "Shear Strengthening of Polystyrene Aggregate Concrete Beams with Near Surface Mounted GFRP Bars," *Materials Research Innovations*, Vol. 14, No. 2, 2010, pp. 138~145.
2. Nigro Emidio, Cefarelli Giuseppe, Bilotta Antonio, Gaetano Manfredi, and Edoardo Cosenza, "Fire Resistance of Concrete Slabs Reinforced with FRP Bars. Part I: Experimental Investigations on the Mechanical Behavior," *Composites Part B-Engineering*, Vol. 42, No. 6, 2011, pp. 1739~1750.
3. EI-Sayed, A. K., EI-Salakawy, E. F., and Benmokrane, B., "Shear Capacity of High-Strength Concrete Beams Reinforced with FRP Bars," *ACI Structural Journal*, Vol. 103, No. 3, 2010, pp. 383~389.
4. Gravina, R. J. and Smith, S. T., "Flexural Behavior of Indeterminate Concrete Beams Reinforced with FRP Bars,"

- Engineering Structures*, Vol. 30, No. 9, 2008, pp. 2370~2380.
5. 이영학, 김민숙, 조장세, 김희철, “AFRP Rebar로 보강된 콘크리트 깊은보의 전단강도,” 한국지진공학회 논문집, 13권, 6호, 2009, 19 pp.
 6. Razaqpur, A. G. and Isgor, O. B., “Proposed Shear Design Method for FRP-Reinforced Concrete Members without Stirrups,” *ACI Structural Journal*, Vol. 103, No. 1, 2011, pp. 93~102.
 7. El-Sayed, A. K., El-Salakawy, E., and Benmokrane, B., “Mechanical and Structural Characterization of New Carbon FRP Stirrups for Concrete Members,” *Journal of Composites for Construction*, Vol. 11, No. 4, 2007, pp. 352~362.
 8. Ehab A. Ahmed, El-Salakawy, E. F., and Benmokrane, B., “Shear Performance of RC Bridge Girders Reinforced with Carbon FRP Stirrups,” *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 15, No. 1, 2010, pp. 44~54.
 9. Hai H. Dinh, Gustavo J. Parra-Montesinos, and James K. Wight, “Shear Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrup Reinforcement,” *ACI Structural Journal*, Vol. 107, No. 5, 2010, pp. 597~606.
 10. 황현복, 문초화, 이정윤, “철근콘크리트 보의 최대 전단 철근비에 대한 평가,” 콘크리트학회 논문집, 21권, 26호, 2009, pp. 719~727.
 11. ACI Committee 318M-08, “Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI318M-08),” American Concrete Institute, Farmington Hills, 2008, 159 pp.
 12. CSA Committee A23.3-04, “Design of Concrete Structures for Buildings CAV3-A23.3-04,” Canadian Standard Association, Canada, 2004, 232 pp.
 13. Comete European de Normalisation (CEN), “Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1-General Rules and Rules for Buildings,” prEN 1992, 2002, 211 pp.

요약 이 연구의 목적은 매립형 유공 GFRP(glass fiber reinforced polymer) 판으로 보강된 철근콘크리트 보의 전단 거동에 관하여 실험적으로 연구하였다. 보강재의 형상, 보강면적, 보강재 두께 및 폭의 영향을 변수로 선정하였다. 전단 경간비가 2.8인 일반보 총 9개의 시험체에 대한 전단실험을 수행하였다. GFRP 판이 철근 스티럽으로 보강한 경우보다 단위보강면적당 전단강도가 3.6배 향상되었다. 보강면적에 따른 전단성능을 평가한 결과 전단보강면적이 증가함에 따라 전단강도도 증가하였다. 보강재의 형상에 따라 전단성능의 영향을 평가한 결과 평행사변형 GFRP 판이 기본격자형 GFRP 판보다 전단강도가 우수한 것으로 나타났다. 일정한 보강면적에서 보강재의 폭 및 두께를 변수로 두었을 때 폭이 증가할수록 전단성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로, GFRP 판으로 전단 보강된 철근콘크리트 보의 ACI 318M-08 기준식에 의한 최대전단강도와 실험에 의한 최대전단강도를 비교하였다. 또한, ACI 318M-08, CSA-04, EC2-02 기준식의 최대전단보강면적과 시험체의 최대전단보강면적을 비교하였다.

핵심용어 : GFRP, 스티럽, 철근콘크리트 보, 최대 전단보강비