



FRP 판을 거푸집 및 보강재로 활용한 콘크리트 보의 실험적 연구

유승운^{1)*} · 배한욱²⁾ · Michael Oliva²⁾ · Lawrence Bank²⁾

¹⁾관동대학교 토목공학과 ²⁾위스콘신대학교 토목환경공학과

Experimental Study of Concrete Beam with FRP Plank as Formwork and Reinforcement

Seung-Woon Yoo^{1)*}, Han-Ug Bae²⁾, Michael Oliva²⁾, and Lawrence Bank²⁾

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Kwandong University, Kangnung 201-701, Korea

²⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin, Madison 53706, USA

ABSTRACT We perform an experimental study of concrete beam with pultruded fiber reinforced polymer (FRP) plank using as a permanent formwork and the tensile reinforcement. A satisfactory bond at the interface between the smooth surface of the pultruded plank and the concrete must be developed for the FRP plank and the concrete to act as a composite structural member. Two kinds of aggregate were bonded to the FRP plank using a commercially available epoxy. No additional flexural or shear reinforcement was provided in the beams. For comparison we test two types of control specimen. One control did not have any aggregate bonded to the FRP plank and the other control had internal steel reinforcing bars instead of the FRP plank. The beams were loaded by central patch load to their ultimate capacity. The experimental results were compared to current ACI 318 (2005) and ACI 440 (2006) code predictions. This study demonstrates that the FRP plank has the potential to serve as formwork and reinforcing for concrete structures.

Keywords FRP plank, FRP formwork, FRP reinforcement, FRP composite structure, FRP composite action

1. 서 론

최근 들어 FRP(fiber reinforced polymer)는 건설 및 다른 여러 분야에서 다양하게 활용되고 있다¹⁾. 특히 콘크리트 구조물의 내부 및 외부보강재로 활용을 위한 여러 연구와 응용이 진행되고 있다^{2,3)}. FRP 보강재는 기존 철근콘크리트 구조물에서 크게 문제되는 철근의 부식 문제를 완전히 해결할 수 있는 대안으로 이용할 수 있으며, 기존의 철근콘크리트 구조물의 보수보강재로서도 각광 받고 있다. 이러한 FRP를 콘크리트 구조물의 인장 보강재로만 활용이 아니라 콘크리트 구조물 건설에 필수적인 거푸집으로의 병행이용에 관해 일부 연구가 최근까지 지속적으로 진행되고 있다^{4,10)}. 거푸집과 인장 보강재로의 병행이용은 기존 콘크리트 구조물 건설에 필수적으로 요구되는 거푸집 제작, 설치 및 탈형에 소요되는 많은 인력, 시간 및 공사비를 획기적으로 절감 할 수 있다^{11,12)}.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 현재 상용으로 생산중인 T 형태의 리브(rib)를 가진 FRP 판(plank)을 뒤집어 콘크리트 구조물의 거푸집 및 인장 보강재로 활용하고자 한다. 그러나 현재 생산되어 상품화 되어있는 FRP 판의 경

우 표면이 매끈하여 타설 콘크리트와의 일체 거동에 다소 문제점을 내포하고 있다. 타설 콘크리트와 FRP 판의 일체 거동을 증진시키기 위해 FRP 판에 잔골재를 일반적으로 건설 현장에서 많이 사용하는 에폭시를 이용하여 부착시킨다. 골재의 부착은 콘크리트를 타설 하기 이전에 에폭시를 부착하여 양생시킨 후 콘크리트를 타설 하기 때문에 타설 공정에는 영향이 없다. 타설 콘크리트와 FRP 판의 일체 거동을 증진시키는 방법으로 추가적으로 다음과 같은 방법들이 있다. 첫째로 FRP 판에 에폭시를 도포 후 에폭시가 경화되기 전에 콘크리트를 타설 하는 방법이 있으나, 이 경우 에폭시 도포와 콘크리트 타설의 연속공정이 시간적으로 촉박하기 때문에 현장에서 실시하기에는 많은 어려움이 있다. 둘째로는 FRP 판의 리브(rib)를 관통하여 FRP 막대(bar)를 삽입하는 방법이다. 그러나 실제 FRP 막대를 삽입하기에는 많은 시간과 어려움이 따르게 된다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트를 타설하기 전 미리 FRP 판에 에폭시를 이용하여 골재를 부착시킨 후 양생하여 콘크리트를 타설하였다.

본 시스템의 유용성은 실험시편의 3점 재하 실험을 통해 실험적으로 규명하고, 실험 결과는 ACI 코드^{2,3)} 및 비교 시편의 실험 결과와 비교 분석하였다.

*Corresponding author E-mail : swyoo@kd.ac.kr

Received August 28, 2006, Accepted December 30, 2006

©2007 by Korea Concrete Institute

2. 실험 개요

2.1 시험체 제작

본 연구에 사용한 FRP 판은 현재 생산되어 상용화되어 있는 S사의 제품을 이용하였다(Fig. 1). Figs. 2 및 3에 실험에 사용한 FRP 판 및 콘크리트 부재의 형상 및 치수를 나타내었으며, Table 1에는 실험 시편 및 비교 실험 시편의 제원을 자세히 나타내었다. 본 연구에서는 인장 보강재 및 거푸집으로 FRP 판을 사용하였고 그 외 추가적인 인장 및 전단 보강재는 사용하지 않았다. 사용된 FRP 판의 제조 공법 및 기계적 성질은 Table 2와 같

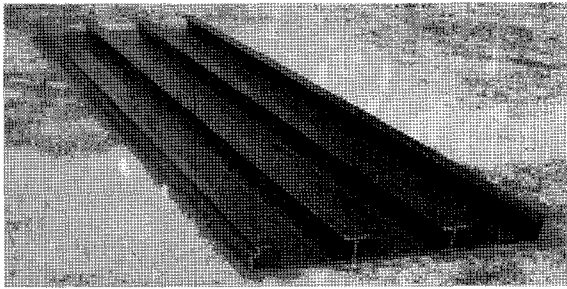


Fig. 1 305 mm wide pultruded FRP plank

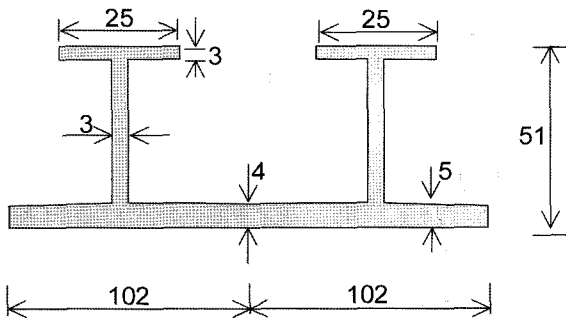


Fig. 2 Approximate cross-sectional dimensions of FRP plank (mm)

다. 현재 S사에서 상용으로 생산되는 FRP 판의 폭은 305 mm와 610 mm 2가지 종류가 있는데 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 리브(rib)가 2개가 포함되게 203 mm로 절단하여 콘크리트 부재의 단위 폭으로 활용하였다.

실험 시편의 제작은 먼저 FRP 판을 폭 203 mm 길이 1,090 mm와 1,830 mm로 먼저 절단 후 FRP 판 내부 하단 부분에만 에폭시를 도포한 후 잔골재를 그 위에 살포하였다. FRP 판의 리브의 웨브(web) 및 플랜지(flange) 부분은 일체 거동에 영향이 미미하다고 판단하여 경제성을 위해 골재를 미 부착하였다. FRP 판의 표면은 별다른 처리 없이 먼지만 제거 후 공장에서 생산된 상태 그대로를 이용하여 에폭시를 도포 후, 에폭시가 경화되기 전에 구멍이 뚫린 버킷(bucket)을 이용하여 전체 표면의 약 30%정도를 골재 부착하였다. FRP 판에 골재 부착 시 에폭시 두께가 너무 두꺼워 골재를 완전히 덮는 경우가 없도록하고 골재 간격이 130 mm 이상 떨어지는 경우가 없도록 주의해야 한다. 실험에 사용한 에폭시는 B사의 제품으로 물성치는 Table 3과 같다.

사용한 골재는 2가지 종류로, 크기가 3.18~6.35 mm인 잔골재와 크기 1.59~2.54 mm인 잔골재이다. Fig. 4은 골재가 부착된 FRP 판의 완성된 모습을 보여주고 있다. 완성된 FRP 판을 거푸집으로 하여 일반 상용 레미콘을 이용하여 실험 시편을 제작 하였으며 제작 과정은 Fig. 5와 같다. 사용된 레미콘은 최대골재 치수 19 mm, 28일 압축강도 27.6 MPa를 사용하였다.

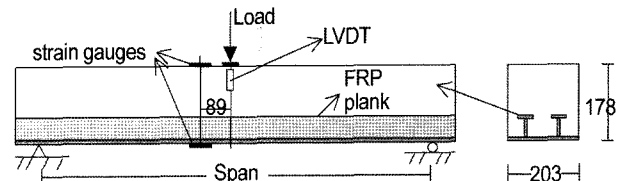


Fig. 3 Dimension and typical instrumentation of specimens (mm)

Table 1 Details of the test beams

Specimen ID	Span length (mm)	Tensile reinforcement	Compressive strength (MPa)
S1	1,090	Gravel coated FRP plank	25.8
S2	1,090	Sand coated FRP plank	25.8
S3	1,090	Sand coated FRP plank	24.5
C1*	1,090	FRP plank	25.8
S4	1,830	Sand coated FRP plank	32.1
S5	1,830	Sand coated FRP plank	33.5
C2*	1,830	Steel reinforcement	32.9

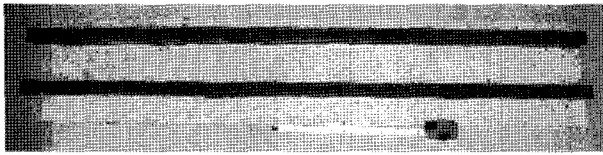
*Control specimen

Table 2 Mechanical property of FRP

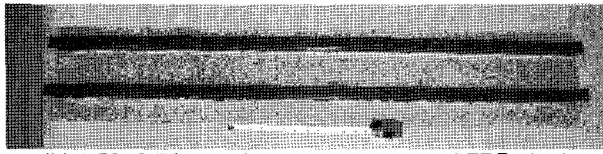
Type	Production method	Design strength (MPa)	Modulus of elasticity(MPa)
GFRP	Pultrusion process	481.3	26,889.7

Table 3 Mechanical property of epoxy

Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Compressive yield strength (MPa)	Compressive modulus (MPa)	Shear strength (MPa)
34.5	1	79	2,200	16.5



(a) 3.18~6.35 mm size aggregate coated FRP plank



(b) 1.59~2.54 mm size aggregate coated FRP plank

Fig. 4 Aggregate coated FRP planks

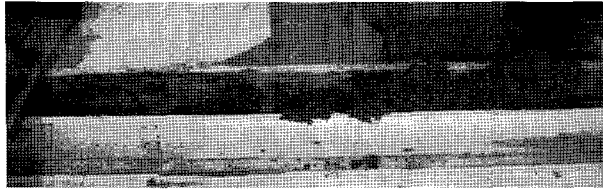


Fig. 5 Manufacture of test specimen

본 연구 결과의 비교 분석을 위해 C1, C2 로 명명 된 폭 203 mm, 높이 178 mm의 비교 실험 시편을 2개 제작 하였다. C1 비교 실험 시편은 길이가 1,090 mm이며 FRP 판에 골재를 부착 시키지 않고 거푸집 및 인장 보강재로 이용하여 제작 하였다. 이 비교 실험 시편은 실험 시편 S1~S3과 비교를 위한 것으로, 즉 전단이 지배적으로 영향을 미치는 경우에 대해 FRP 판에 골재를 부착 한 경우와 아닌 경우를 비교하기 위함이다. 또한 비교 실험 시편 C2는 길이가 1,830 mm이며 일반적인 교량 슬래브에 많이 사용하는 정도의 철근을 보강한 경우로써, 전단 및 FRP 판 보강은 하지 않았다. 이 비교 실험 시편은 직경 10 mm, 공칭강도 414 MPa인 철근 3개를 배근하였고, 콘크리트 덮개는 38 mm를 유지하였다. 이 비교 실험 시편은 휨 작용이 지배적인 길이가 다소 긴 보에서 일반적으로 사용하는 철근을 인장 보강재로 사용한 철근콘크리트 보와 FRP 판을 보강재로 이용한 본 연구와의 비교를 위해서이다. 본 연구의 목적 중의 하나가 골재가 부착 된 FRP 판을 보강재로 활용한 콘크리트 보가 기존의 철근 콘크리트 보를 강도 및 사용성에서 충분히 필적 할 수 있는가를 살펴보는 것이다. 비교 실험 시편을 포함한 실험 시편의 자세한 치수 및 형상은 Table 1에 제시 되어 있다.

2.2 실험 및 계측

본 시험 시편은 50 mm 폭의 지지철판 아래에 물러를 이용하여 단순지지 조건을 만들었다. 지지사이의 순 간격은 실험 시편 S1~S3, C1은 1,090 mm이고 실험 시편 S4, S5, C2는 1,830 mm이다. 지간 중앙에 유압장치를 이용하여 재하 하였으며, 로드셀(load cell)과 중앙에 설치한 LVDT를 이용하여 변위를 측정하였다. 전기 저항식 변형률게이지를 이용하여 FRP 판 및 콘크리트의 상하부의 변

형률을 측정하였다. 설치한 변형률게이지들은 하중 재하 점을 피해 중앙에서 89 mm 떨어진 곳에 설치하였다. Fig. 3는 실험 시편의 하중재하 및 변형률, 변위 측정 위치를 나타낸다.

하중재하는 76 mm 폭의 고무판을 댄 강판을 설치하고 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 변위제어방식으로 3점 재하하였다. Figs. 6~8은 경간길이 1,090 mm 인 경우와 1,830 mm 인 경우의 실험 시편 설치 및 실험 전경을 보여 주고 있다.

3. 실험 결과

3.1 비교 기준

하중을 증가시키면서 FRP 판(plank)과 타설 콘크리트 사이의 합성 작용의 분석은 3개의 기준을 사용하여 비교검토 하였다. 첫째 비교 기준은 실험 시편의 초기 균

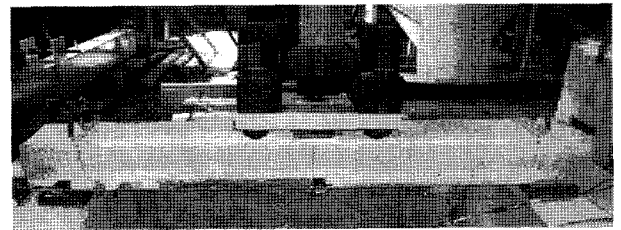


Fig. 6 Experiment setup for specimen S1 prior to loading

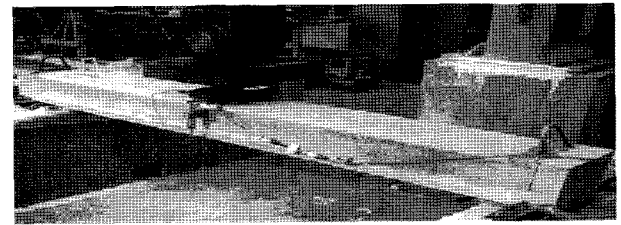


Fig. 7 Experimental setup for specimen S4 prior to loading



(a) Crack pattern and failure mode of specimen S1(shear failure)



(b) Crack pattern and failure mode of specimen S2(shear failure)



(c) Crack pattern and failure mode of specimen S3(shear failure)



(d) Crack pattern and failure mode of specimen C1(flexural failure)

Fig. 8 Specimens S1-S3 and C1 after test

열 하중의 검토이다. 초기 균열 하중은 변형률계이지의 변형을 변화와 변위의 변화를 가지고 판단하였다. 두 번째 비교 기준은 휨 균열의 크기 및 분포이다. 하중이 증가됨에 따라 발생하는 휨 및 전단균열은 개수 및 크기를 세밀히 관찰 측정하였다. 골재가 부착된 FRP 판과 타설 콘크리트 사이에는 미끄러짐이 방지되어 균열 폭이 작고 잘 분산된 휨 균열이 발생될 것으로 기대되며, 비교 실험 시편 C1의 경우 FRP 판과 콘크리트 사이에 큰 미끄러짐이 발생하여 균열 폭이 매우 큰 단일 균열이 발생할 것으로 기대된다. 세 번째 비교 기준으로 실험 시편의 극한하중 및 파괴 형태이다.

3.2 초기 균열 하중

초기 균열 하중은 하중-변형률 곡선의 기울기 변화에서 추정하였다. 변형률계이지에 의해 측정된 초기 균열 하중의 크기는 육안 관찰에 의한 초기 균열 발생보다는 일반적으로 작은 값을 가진다. 초기 휨 균열이 발생 할 때의 하중 및 변형률을 Table 4에 나타내었다. 모든 실험 시편의 초기 균열은 보의 중앙 부근에서 처음 관찰되었다. 각각의 실험에서 초기 균열 하중을 균열모멘트로 환산하였고, 각각 실험 시편의 압축강도의 상이함을 고려하기 위해 압축강도 27.6 MPa로 정규화 하였다. 정규화는 계산된 균열모멘트에 환산 값을 곱하여 구하였다.

골재를 부착한 실험 시편 S1~S5는 골재를 부착하지 않은 매끈한 표면의 비교 실험 시편 C1과 FRP 판을 사용하지 않고 기존의 철근을 인장 보강재로 사용한 비교 실험 시편 C2에 비해 높은 초기 균열 하중 값을 보여 주고 있다. 이것은 골재가 부착된 FRP 판이 초기 균열 모멘트 저항 능력을 증가시켜 주는 것으로, 특히 교량 상판의 보강 콘크리트 구조 단면의 사용성(serviceability)을 개선시킬 수 있다. FRP 판에 크기가 작은 종류의 잔골재를 부착한 실험 시편 S2, S3가 크기가 큰 종류의 잔골재를 부착된 실험 시편 S1에 비해 초기 균열 하중이 38% 높음을 볼 수 있다.

3.3 휨 균열의 분포

현행 대부분의 시방서에서는 사용하중 상태에서 균열

은 허용하나 그 폭은 엄격히 제한하고 있다. FRP 판에 골재가 부착된 경우 좁은 균열 폭을 가진 잘 분산된 균열을 얻을 수 있었다. 이것은 FRP 판과 타설된 콘크리트 사이에 미끄러짐이 없거나 아주 미소한 미끄러짐 만이 발생함을 의미하므로 본 연구에서는 균열의 개수로서 이를 평가하고자 한다.

휨 균열의 수는 각각의 실험 시편이 완전히 파괴 될 때까지 발생한 균열의 개수로 계산하였다. 시간이 짧은 실험 시편의 경우 FRP 판에 골재를 부착시킨 실험 시편 S1~S3의 경우 9~11개의 균열 폭이 작은 휨 균열이 발생한 반면, FRP 판에 골재를 미부착한 비교 실험 시편 C1의 경우는 균열 폭이 큰 3개의 휨 균열이 발생하였다. 이것은 FRP 판에 골재를 부착한 경우가 균열을 잘 분산 시킴을 의미하며, 이는 FRP 판과 타설 콘크리트 경계에 부착응력이 잘 전달 된다는 것을 의미한다. 균열 폭을 비교해 볼 때, 크기가 큰 잔골재가 부착된 실험 시편 S1이 크기가 작은 잔골재가 부착된 실험 시편 S2, S3 보다 다소 나은 거동을 보여주고 있다. 시간이 긴 실험 시편의 경우, 즉 S4, S5의 경우 22~29개의 휨 균열이 측정되었다. Table 4에서 보는 바와 같이 비교 실험 시편 C2의 경우 이와 유사한 경향을 보여 주고 있다. 이는 FRP 판에 골재를 부착한 경우 재래의 철근콘크리트 보와 같이 효과적으로 인장 보강재 역할을 하며 휨 균열을 분산시키는 역할도 함을 알 수 있다.

3.4 극한하중 및 파괴 형태

실험 시편은 다양한 파괴 형태를 보여주고 있다. 시간이 짧은 실험 시편의 경우, FRP 판에 골재가 부착된 실험 시편 즉 S1~S3은 전단파괴 형태를 보여 주는 반면, FRP 판에 골재를 미부착한 비교 실험 시편 C1의 경우 FRP 판과 타설 콘크리트의 경계면에서 미끄러짐이 발생하였으며, 휨파괴 형태를 보여주고 있다. 시간이 긴 실험 시편의 경우, FRP 판에 골재가 부착된 실험 시편 즉 S4, S5의 경우 휨/전단 혼성 파괴 형태를 보여주며, 이의 비교 실험 시편 즉 재래의 철근을 보강재로 사용한 C2의 경우 철근콘크리트 보에서 일반적으로 발생하는 철근 항복 후 휨 파괴 형태를 보여 주고 있다. 각각의 구체적인 실험 결과는 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 알 수 있

Table 4 Test results of initial cracking load and ultimate load

Specimen ID	Span length (cm)	Initial cracking load (kN)	Normalized initial cracking moment* (kN-cm)	Failure load (kN)	Deflection at failure load (mm)	No. of flexural cracks
S1	109	15.6	439.5	63.2	3.556	11
S2	109	20.9	590.9	66.7	4.216	9
S3	109	22.2	645.1	57.4	4.216	9
C1	109	15.1	427.1	16.9	0.432	3
S4	183	12.5	527.6	59.6	16.993	22
S5	183	12.0	498.3	65.8	17.907	29
C2	183	8.0	335.6	38.3	54.483	22

* Normalized value to concrete with 27.6 MPa of compressive strength

듯이 지간 길이에 상관없이 FRP 판에 골재를 부착시킨 경우는 비교 실험 시편에 비해 하중재하 능력이 큼을 알 수 있다.

3.5 결과 분석

3.5.1 지간 1,090 mm의 경우

Fig. 8은 지간이 짧은 경우의 실험 시편 S1~S3 및 비교 실험 시편 C1의 파괴 형태를 나타낸 것이다. 지간이 짧은 실험 시편의 경우 중 FRP 판에 골재를 부착시킨 실험 시편의 경우, 즉 S1~S3의 경우 초기 하중 단계에서 분산된 휨 균열 양상을 보이다 하중이 극한하중에 도달함에 따라 휨 균열이 전단 균열로 진행되고 마침내 Fig. 8(a, b, c)에서 보는 바와 같이 경사 전단균열에 의한 전단 파괴 형태로 최종 파괴가 발생함을 알 수 있었다. 또한 초기하중에서 하중이 증가함에 따라 보의 중앙 부분에서 FRP 판과 타설 콘크리트 사이에 국부적인 분리 현상이 목격되었으며 이는 하중이 증가함에 따라 점차 증가하는 경향을 보여 주고 있다. 그러나 실험 시편이 전단파괴 형태로 최종파괴가 발생 할 때에도 보의 끝 부분에서 FRP 판과 타설 콘크리트 사이의 분리 현상은 관찰 할 수 없었고, 중앙 부분의 경우 분리 현상이 심화되었다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 비교 실험 시편 C1은 하중이 증가함에 따라 첫 번째 최고점인 16.9 kN에

도달 후 계속해서 FRP 판과 타설 콘크리트 사이의 미끄러짐이 발생하면서 하중을 지탱하다가, 다시 하중이 증가하면서 두 번째 최고점인 40.9 kN에 도달하는 양상을 보여주고 있다. 이와 같은 추가적인 하중 저항 능력은 보의 지지점에서의 구속이나 FRP 판과 콘크리트 사이에 존재하는 잔류 마찰에 의한 FRP 판의 인장 지지력에 의해 발생 되는 것으로 추정된다. 비교 실험 시편 C1의 경우 첫 번째 하중 최고점에서 이미 FRP 판과 타설 콘크리트 사이에 미끄러짐이 발생되어 서로가 분리되므로 실제적으로 합성 작용 발휘가 어려운 것으로 추정되어 첫 번째 하중 최고 값인 16.9 kN을 극한하중 값으로 산정했다. 하중이 증가함에 따라 FRP 판과 콘크리트에 발생하는 변형률은 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 극한 파괴 하중에 도달 했을 때 콘크리트 압축 부분의 변형률은 0.001 이하이고, 또한 FRP 판이 받는 인장 FRP 판이 받는 인장 변형률도 0.0045 이하이므로 보의 파괴는 콘크리트의 압축파괴 형태나 FRP 판의 인장파괴 형태는 아닌 것으로 판단된다¹⁾. 초기 균열 하중 및 파괴 하중 단계에서의 변형률 값은 Table 5에 나타내었다. 실험 시편 S1~S3의 비교 실험 시편 즉 FRP 판에 골재를 부착하지 않고 원래의 매끄러운 FRP 판을 그대로 사용한 경우의 실험 시편 C1은 Fig. 8(d)에서 보는바와 같이 FRP 판과 타설 콘크리트 사이에 상당량의 미끄러짐이 발생하면서 휨 파괴 형태를 보여 주고 있다.

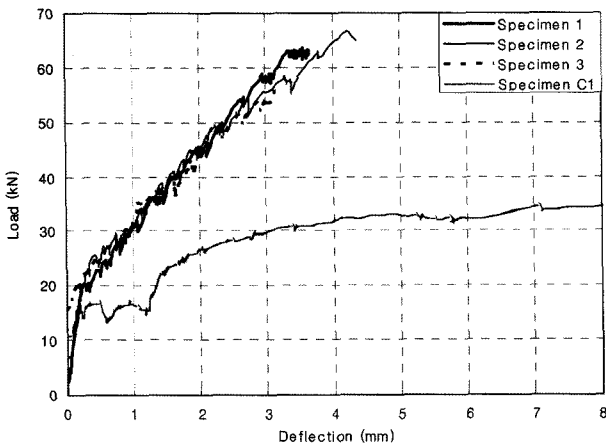


Fig. 9 Load-displacement curves for specimens S1-S3 and C1

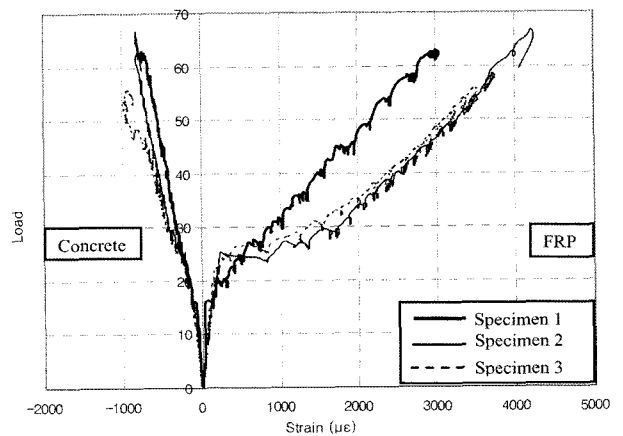


Fig. 10 Load-strain curves for specimens S1-S3

Table 5 Strains of FRP plank and concrete

Specimen ID	Strain at initial cracking load ($\times 10^{-6}$)		Strain at failure load ($\times 10^{-6}$)	
	Concrete (compression)	FRP (tension)	Concrete (compression)	FRP (tension)
S1	74	37	740	3,000
S2	164	179	812	4,203
S3	180	176	802	3,621
C1	100	139	187	619
S4	197	151	2,091	6,610
S5	188	243	3,047	6,496
C2	112	-	3,804	-

3.5.2 시간 1,830 mm의 경우

Fig. 11은 지간이 긴 경우의 실험 시편 및 비교 실험 시편 C2의 파괴 형태를 나타 낸 것 이다. 지간이 긴 실험 시편의 경우 중 FRP 판에 골재를 부착 시킨 실험 시편의 경우, 즉 S4, S5의 경우 초기 하중 단계에서 분산 된 휨 균열 양상을 보이다 하중이 극한하중에 도달함에 따라 휨 균열이 전단 균열로 진행되고 마침내 Fig. 11(a, b)에서 보는 바와 같이 휨/전단 혼성 파괴 형태로 최종 파괴가 발생함을 알 수 있었다. 그림에서 보는 바와 같이 극한 하중 상태에서 국부적으로 하중 재하 지점의 콘크리트가 압축파괴 양상을 보이면서 매우 큰 경사 균열이 발생하여 최종파괴에 이르는 압축/전단 파괴 양상을 보여주고 있다. 콘크리트 상부의 압축파괴는 콘크리트 상부에 부착한 변형률계이지 값에서도 확인할 수 있었다. Fig. 12의 하중-변위곡선에서 보는 바와 같이 기존의 철근을 보강재로 사용한 비교 실험 시편 C2의 경우 FRP 판을 보강재로 한 실험 시편 S4, S5에 비해 변형이 크게 발생함을 알 수 있다. 그러나 극한하중의 경우 FRP 판을 보강재로 한 S4, S5가 C2에 비해 월등히 큰 값을 보

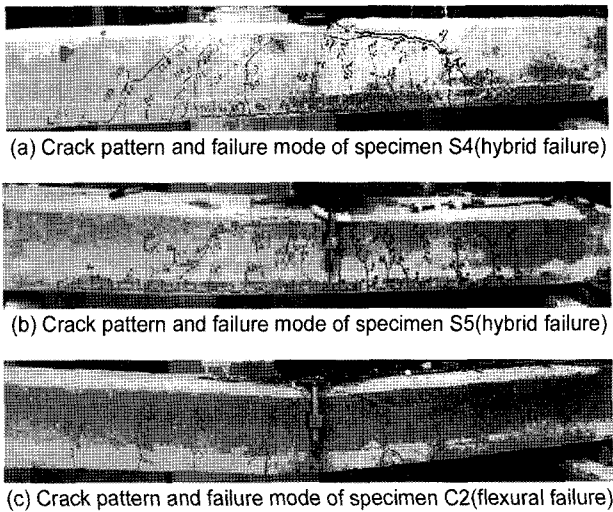


Fig. 11 Specimens S4, S5 and C2 after test

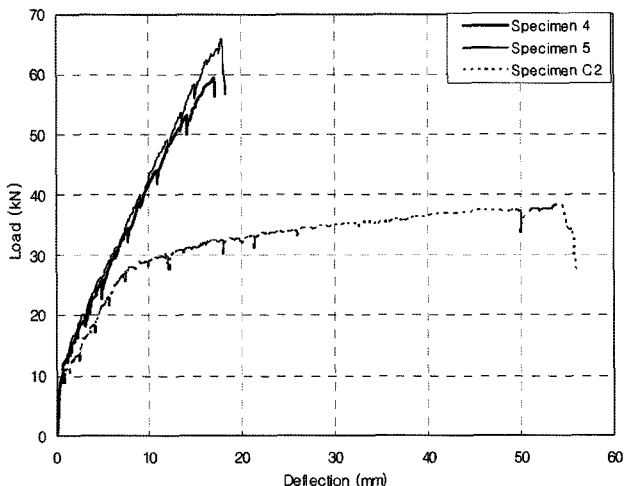


Fig. 12 Load-displacement curves for specimens S4, S5 and C2

여주고 있다. 이와 같은 현상은 ACI 440(2006)³⁾에서 언급한 내용과 같은 결과를 보여주고 있다. 하중이 증가함에 따라 FRP 판과 콘크리트에 발생하는 변형률은 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 압축력을 받는 실험 시편의 상단부의 콘크리트 변형률은 0.003을 넘어서고 있다. Table 5에 초기 균열 하중 및 파괴 하중 단계에서의 변형률 값을 나타내었다. 비교 실험 시편 즉 C2의 경우는 전형적인 과소 철근보 파괴 형태인 철근이 먼저 항복한 후 콘크리트 파괴되는 양상을 보여주고 있다. FRP 판을 인장재로 활용한 실험 시편 S4, S5는 비교 실험 시편 C2 보다 약 56~72% 정도의 저항 능력 향상이 있었다. 이는 FRP 판이 충분히 재래의 철근 대신 인장보강재로서 역할이 가능함을 보여주고 있다.

3.6 시험 결과 코드와의 비교

본 실험 결과를 ACI 318(2005)²⁾, ACI 440(2006)³⁾와 비교한 결과를 Table 6에 나타내었다. ACI 318의 경우 일반적인 철근콘크리트 구조에 관한 코드이며, ACI 440는 FRP 보강근 및 FRP를 이용한 외부보강에 관한 코드로 널리 알려져 있다. ACI 코드에 적용시 FRP 판과 콘크리트는 완전히 일체로 작용하는 것으로 가정을 했고 FRP 판을 막대(bar)형태로 환산하여 계산하였다.

ACI 318의 경우 균열 하중은 비교 실험 시편 C2를 제외하고는 실험 결과에 비해 상당히 작게 계산되었다. 전단저항 능력 계산의 경우 ACI 318이 ACI 440에 비해 실험 결과와 유사한 결과를 보여주고 있다. ACI 318, 440에서 전단 및 휨 능력 계산 시 FRP 판에 작용하는 인장력은 하단에서 12.78 mm 떨어진 FRP 판의 도심에서 작용하며, 완전부착 상태로 가정하고 계산을 했다. 제작된 FRP 판을 인장 보강재로 사용한 실험 시편 모두는 FRP 보강 콘크리트 설계 개념에서 과대 보강(over-reinforced) 보에 해당하며, 일반적으로 FRP 보강 콘크리트 설계에서는 기존 철근콘크리트 보와 다르게 과대 보강 보를 선호하는 편이다¹⁾.

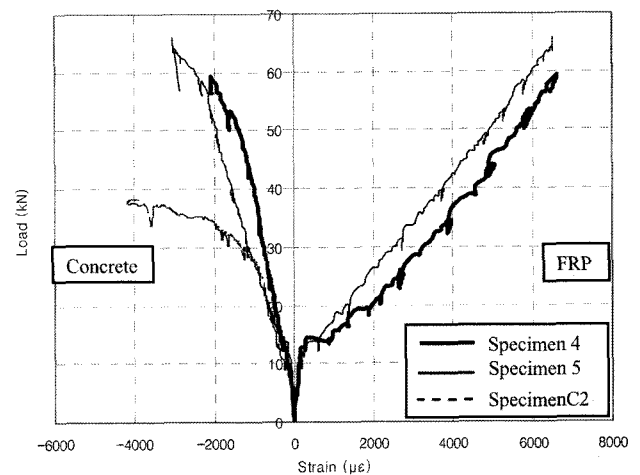


Fig. 13 Load-strain curves for specimens S4, S5 and C2

Table 6 Comparison of test results to code prediction

Specimen ID	Initial cracking load (kN)		Failure load (kN)				
	Test	ACI 318	Test	Failure mode	ACI 318 (shear failure)	ACI 440 (shear failure)	ACI 440 (flexural failure*)
S1	15.6	12.5	63.2	Shear	56.5	36.5	109.4
S2	20.9	12.5	66.7	Shear	56.5	36.5	109.4
S3	22.2	12.0	57.4	Shear	55.2	36.0	105.4
C1	15.1	12.5	16.9	Flexure	-	-	-
S4	12.5	8.5	59.6	Hybrid	63.2	38.7	75.6
S5	12.0	8.5	65.8	Hybrid	64.5	39.1	77.8
C2	8.0	8.5	38.3	Flexure	52.0	-	24.5

*Calculated with an assumption of full composite action between FRP plank and concrete. For C2 the flexural capacity was calculated using ACI 318

4. 결 론

본 연구는 FRP 판(plank)을 거푸집 대용 및 인장 보강재로 활용하기 위한 연구 중의 일부이다. 본 연구에서 사용한 FRP 판은 콘크리트와 일체 거동을 위해 골재를 일반 건설 현장에서 많이 사용하는 에폭시를 이용하여 부착하고 충분히 경화 된 후 콘크리트를 타설 하는 방법으로 거푸집 대용 및 인장 보강재로 활용하였다.

실험 결과 골재를 부착한 FRP 판의 경우 재래의 인장 보강재인 철근을 대신해서 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 초기 균열모멘트 저항능력, 휨 균열의 분포 및 극한 하중 등 모든 면에서 재래의 철근콘크리트를 필적하거나 우수한 경향을 보여주고 있다. 이러한 효과를 얻기 위해서는 타설 콘크리트와의 합성 작용을 위해 FRP 판에 골재를 부착하는 것을 필수적이라 할 수 있다. 골재를 부착하지 않은 매끈한 FRP 판의 경우 타설 콘크리트와의 사이에 과도한 미끄러짐이 발생하여 합성 효과 발휘에 문제가 있었다. FRP 판에 부착한 골재는 두 가지 종류의 잔골재 모두 우수한 결과를 보여주었다. 이러한 결과를 조합할 때 골재를 부착한 FRP 판은 거푸집 대용뿐만 아니라 철근을 대용한 훌륭한 인장재 역할도 하는 것으로 판단된다. 이와 같은 효과는 특히 철근 부식 등 내구성에 많은 문제점을 내포하고 있는 콘크리트 교량 상판 건설에 매우 효과적으로 이용이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- Bank, L. C., *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*, John Wiley & Sons, USA, 2006.
- ACI, *Building Code Requirements for Structural Concrete*, ACI 318-05, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA, 2005.
- ACI, *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*, ACI 440.1R-06, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA, 2006.
- Deskovic, N., Triantafyllou, T. C., and Meier, U., "Innovative Design of FRP Combined with Concrete: Short-Term Behavior", *Journal of Structural Engineering*, Vol.121, No.7, 1995, pp.1069~1078.
- Hall, J. E. and Mottram, J. T., "Combined FRP Reinforcement and Permanent Formwork for Concrete Members", *Journal of Composites for Construction*, Vol.2, No.2, 1998, pp.78~86.
- Hulatt, J., Holloway, L., and Thorne, A., "The Use of Advanced Polymer Composites to form an Economic Structural Unit", *Construction and Building Materials*, Vol.17, No.1, 2003, pp.55~68.
- Kitane Y., *Development of Hybrid FRP-Concrete Bridge Superstructure System*, PhD Dissertation, SUNY at Buffalo, USA, 2003.
- Dieter, D. A., Dietsche, J. S., Bank, L. C., Oliva, M. G., and Russell, J. S., "Concrete Bridge Decks Constructed with FRP Stay-in-Place Forms and FRP Grid Reinforcing", Transportation Research Record No.1814, *Journal of the Transportation Research Board*, 2002, pp.219~226.
- Cheng, L., Zhao, L., Karbhari, V. M., Hegemier, G. A., and Seible, F., "Assessment of a Steel-Free Fiber Reinforced Polymer-composite Modular Bridge System", *Journal of Structural Engineering*, Vol.131, No.3, 2005, pp.498~506.
- Berg, A. C., Bank, L. C., Oliva, M. G., and Russell, J. S., "Construction and Cost Analysis of an FRP Reinforced Concrete Bridge Deck", *Construction and Building Materials*, Vol.20, 2006, pp.515~526.
- Matta, F., Galati, N., Nanni, A., Ringelstetter, T. E., Bank, L. C., and Oliva, M. G., "Pultruded Grid and Stay-in-Place form Panels for the Rapid Construction of Bridge Decks", *COMPOSITES 2005 Convention and Trade Show*, American Composites Manufacturers Association, USA, September 28-30, 2005, pp.1~8.
- Bank, L. C., Oliva, M. G., Bae, H. U., Barker, J., and Yoo, S. W., "Test of Pultruded FRP Plank as Formwork and Reinforcement for Concrete Structures", *COMPOSITES 2006 Convention and Trade Show*, American Composites Manufacturers Association, USA, October 18~20, 2006, pp.1~8.

요 약 FRP 판을 콘크리트 구조물의 거푸집 및 보강재로 이용하기 위한 기본적인 실험을 수행하였다. FRP 판과 콘크리트가 합성 효과를 발휘하기 위해서는 두 재료간의 부착이 중요한 요인 중의 하나이다. 이러한 부착을 확보하기 위하여 FRP 판에 두 가지 크기의 골재를 일반적으로 건설 현장에서 많이 사용하는 에폭시를 이용하여 부착 하였다. 콘크리트 보는 FRP 판만으로 인장 보강하였고 추가적인 휨 및 전단 보강은 하지 않았다. 비교를 위해 한 비교 실험 시편은 FRP 판에 골재를 부착하지 않고, 다른 한 비교 실험 시편은 FRP 판 대신에 종래의 철근으로 보강하여 실험하였다. 모든 콘크리트 보의 실험은 보의 중앙에 집중하중을 파괴까지 재하하였다. 실험 결과는 현행 ACI 318(2005)과 ACI 440(2006)과 비교 분석하였다. 본 연구 결과 FRP 판을 콘크리트 구조물의 거푸집 대응 및 인장 보강재로 충분히 활용할 수 있는 가능성을 보여주었다.

핵심용어 : FRP 판, FRP 거푸집, FRP 인장 보강재, FRP 합성구조, FRP 콘크리트 합성작용