

유리섬유강화폴리머 판을 영구거푸집 및 인장 보강재로 활용한 현장타설 고강도콘크리트 합성보의 휨 파괴거동에 관한 실험적 연구

엄찬희* · 유승운**

Um, Chan Hee*, Yoo, Seung Woon**

An Experimental Study for Flexural Failure Behavior of Composite Beam with Cast-in-place High Strength Concrete and GFRP Plank Using As a Permanent Formwork and Tensile Reinforcement

ABSTRACT

An experiment of composite beam was performed which utilized glass fiber reinforced polymer (GFRP) plank as the permanent formwork with cast-in-place high strength concrete. This research analyzed the flexural failure behavior of composite beam by setting the sand coated at GFRP bottom surface, the perforation and interval of the GFRP plank web, and the width of the top flange as the experimental variables. As a result of the experiments for effectiveness of sand attachment in case of not perforated web, approximately 43% higher ultimate load value was obtained when the sand was coated than not coated case. For effectiveness of perforation and interval of gap, approximately 23% higher maximum load value was seen when interval of the perforation gap was 3 times and the fine aggregate was not coated, and approximately 11% higher value was observed when the perforation gap was 5 times on the coated specimen. For effectiveness of top flange breadth, the ultimate load value was approximately 12% higher in case of 20mm than 40mm width.

Key words : GFRP plank, Composite beam, Permanent formwork, Tensile reinforcement, Perforated web

초 록

본 연구에서는 유리섬유강화폴리머 판을 영구거푸집 및 인장 보강재로 활용한 현장타설 고강도콘크리트 합성보를 대상으로 판 하부의 잔골재 부착여부, 웨브의 천공유무 및 간격, 상부플랜지 폭을 변수로 하여 휨 파괴실험을 수행하였다. GFRP 판 웨브를 천공하지 않은 경우 잔골재 부착효과 여부를 위한 실험 결과, 잔골재를 부착한 경우 미부착의 경우 보다 약 43% 높은 극한하중 값을 보여주었으며, 웨브의 천공유무 및 간격효과는 잔골재를 부착하지 않은 경우 천공간격이 3배인 경우가 약 23% 정도 높은 극한하중 값을 보여주었으며, 잔골재를 부착한 경우 천공 간격이 5배인 경우가 약 11% 정도 높은 극한하중 값을 보여주었다. 상부플랜지 영향을 살펴보면, 폭 20mm 경우가 40mm에 비해 약 12% 정도 큰 극한하중 값을 보여주었다.

검색어 : 유리섬유강화폴리머 판, 합성보, 영구거푸집, 인장 보강재, 웨브 천공

* 가톨릭관동대학교 토목공학과 석사과정 (Catholic Kwandong University · boram24u@naver.com)

** 정회원 · 교신저자 · 가톨릭관동대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Catholic Kwandong University · swyoo@cku.ac.kr)

Received January 28, 2015/ revised July 2, 2015/ accepted August 11, 2015

1. 서론

철근콘크리트 구조물은 강도, 강성, 내진성, 내화성, 내구성, 수밀성, 기밀성에 우수한 경제적인 구조로서 교량, 댐, 공항, 방파제 등 토목구조물에 널리 사용되고 있다. 철근은 콘크리트의 보강 재료로 많이 사용하지만 철근으로 보강된 철근콘크리트 구조물은 시간의 경과에 따라 여러 가지 원인에 의해 노후화가 진행되어 구조물의 성능 저하 및 사용 수명이 단축된다는 문제점이 있다. 최근 철근콘크리트 바닥판의 단점을 원천적으로 개선할 목적으로 재료적 측면과 구조적 측면에서 새로운 바닥판 시스템을 개발하려는 노력이 계속 되었다(Bank, 2006). 이 중 내구성과 내식성에 강한 재료특성을 갖는 섬유강화폴리머(fiber reinforced polymer: FRP)를 건설재료로 인식하여 관심을 갖게 된 것은 비교적 최근의 일이다. FRP는 강재와 달리 부식이 되지 않는 재료로서 부식 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 장점을 가지고 있으며 강도, 내부식, 피로저항, 사공성 측면에서 많은 장점을 가지고 있다. 이러한 FRP를 콘크리트 구조물 건설에 필수적인 거푸집으로 병행이용을 위한 연구가 현재 활발히 이루어지고 있다. 거푸집과 인장 보강재로서의 병행이용은 기존 철근콘크리트 구조물 건설에 필수적으로 요구되는 거푸집 제작, 설치 및 탈형에 소요되는 많은 인력, 공사기간 및 공사비를 획기적으로 절감할 수 있는 새로운 개념의 바닥판이다 (Bank et al., 2006).

선진국의 경우에는 바닥판 연구의 중요성을 인식하고 이미 1980년대부터 재료적인 측면과 구조형식적인 측면에서 새로운 바닥판 시스템을 개발하고 새로운 작업을 지속적으로 추진하고 있다. 일본의 경우 콘크리트 합성 바닥판 개발, FRP-콘크리트 합성 바닥판 개발 등에 대한 노력을 경주해 오고 있다(Fukuyama et al., 2000). 미국의 경우에도 FHWA가 중심이 된 국가연구개발 사업을 통해 FRP 판/FRP 보강근/FRP 텐던 등을 콘크리트 바닥판과 결합하는 고내구성 바닥판 개발 등에 대한 연구 및 시험 사공을 지속적으로 추진하고 있다(Tang et al., 1998; Zureick et al., 1995; Cheng et al., 2005). 캐나다의 경우에도 콘크리트 내부에는 철근을 배근하지 않는 고내구성 콘크리트 바닥판을 개발하고 이의 실용화 단계에 접어들고 있다(Erki, 1999).

국내에서는 아직 기초적인 연구에 머무르고 있으며 실용화를 위한 많은 연구가 필요한 실정이다. 국내의 경우 FRP 바닥판 사공 시 합리적이며 경제적인 강재 거더와의 연결방법을 검토하기 위해 연결지점 조건에 대한 하중재하 실험 및 해석을 수행하였으며 (Yong et al., 2006), 사각형 모듈을 기본으로 FSDT 평판이론을 도입하여 FRP 바닥판 해석을 위한 유한요소 모델을 개발하였다 (Kim and Lee, 2005). FRP 바닥판의 성능을 비교 검토하기 위하여 인발성형(pultrusion)으로 FRP 바닥판을 제작하여 비닐에스터 및

폴리에스터 수지로 제작된 FRP 바닥판에 대하여 플랜지와 웨브의 기본물성을 평가하고, 차량하중을 직접 지지하는 웨브의 성능을 평가하기 위해 좌굴실험을 실시하였으며(Jeong et al., 2007), FRP 데크 합성구조(Cho et al., 2007), FRP 판을 구조물의 거푸집 대응 및 인장 보강재로 활용하기 위한 실험을 수행하였으며(Yoo et al., 2007), FRP 퍼포본드 전단연결체에 대한 풀-아웃(pull-out) 실험 및 해석 스프링모델에 대한 연구도 수행되었다(Cho et al., 2012).

본 연구에서는 유리섬유강화폴리머 판 하부 플랜지상부의 골재 부착여부, 폴리머 판 웨브의 천공유무, 상부 플랜지 폭을 실험 변수로 하여 현장타설 고강도콘크리트와 GFRP를 영구거푸집 및 주요 인장재로 활용한 합성보의 휨 파괴거동을 살펴보고자 한다.

2. 실험개요

2.1 실험 시편 설계 및 제작

본 연구에 사용한 FRP 판은 Fig. 1에 나타내었다. 본 실험에서는 인장 보강재 및 영구거푸집으로 FRP 판을 사용하였고 그 외 추가적



Fig. 1. Pultruded FRP Plank

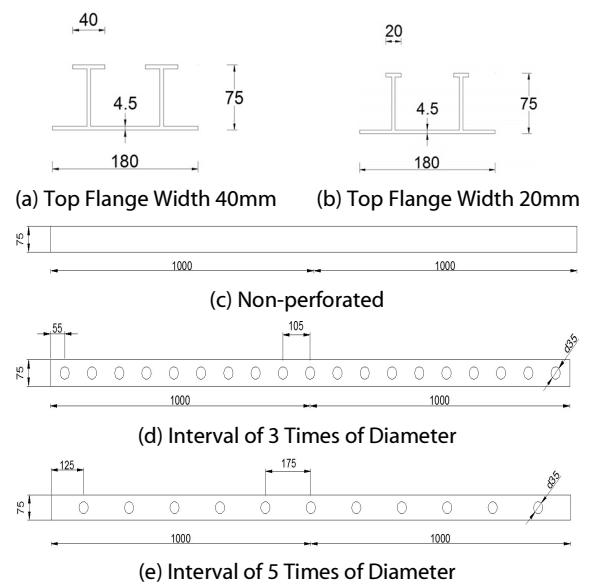


Fig. 2. Dimensions of FRP Plank(mm)

Table 1. List of Experiments

Name of experiment	No.	Tensile reinforcement	Perforation of the web	Perforated interval (times)	Top flange width (mm)
ST00No	1	Steel bar	No perfobond	-	-
FN40No	1	No coated FRP	No perfobond	-	40
FN43No	2	No coated FRP	Perfobond	3	40
FN45No	2	No coated FRP	Perfobond	5	40
FC40No	2	Sand coated FRP	No perfobond	-	40
FC43No	2	Sand coated FRP	Perfobond	3	40
FC45No	2	Sand coated FRP	Perfobond	5	40
FC20No	2	Sand coated FRP	No perfobond	-	20

Table 2. Material Properties of FRP

Type	Production method	Thickness (mm)	Tensile strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
Glass	Pultrusion process	4.5	386	328	25.3

Table 3. Mechanical Properties of Epoxy

Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Compressive yield strength (MPa)	Gel time (min)	Shear strength (MPa)
77.9	4.8	84.0	65.0	18.3

인 인장 및 전단 보강재는 사용하지 않았으며, Fig. 2와 같이 리브 (rib)가 2개가 포함되게 180mm로 절단하여 합성보의 단위 폭으로 사용하였다. Table 1에는 실험체 및 비교 실험체의 제원을 자세히 나타내었으며 실험체 명명법은 다음과 같다.

a-b-c-d-No, 여기서 a는 인장 보강재의 종류(S:철근, F:FRP), b는 잔골재 부착여부(N:미부착, C:부착), c는 FRP 판의 상부 플랜지 폭(2:20, 4:40mm), d는 FRP 웨브의 천공간격 배수(0:무천공, 3:3배수, 5:5배수), No는 실험체 수(1:1번, 2:2번)를 나타낸다.

실험 시편의 제작은 먼저 FRP 판을 폭 180mm, 길이 2000mm로 절단 후 FRP 판 하부 플랜지 부분에만 S사 에폭시를 사용하여 잔골재를 부착하였다. FRP 판에 골재 부착 시 에폭시가 골재를 완전히 덮는 경우가 없도록 하였고, 단위 평방미터당 4kg의 골재를 부착하였다. 사용한 골재의 크기는 4~7mm인 잔골재이며, Fig. 3은 잔골재가 부착된 FRP 판의 완성된 모습이다. 실험체 제작에 사용한 콘크리트는 최대 골재 치수 19mm, 28일 압축강도 43.27MPa이다. Table 2, 3에는 FRP 판과 에폭시의 물성을 나타내었다.

본 실험과 비교 분석을 위해 ST001로 명명 된 폭 180mm, 높이 200mm의 비교 실험 시편을 2개 제작하였다. ST001 비교 실험 시편은 일반적인 철근을 보강한 경우로, 전단 및 FRP 판 보강은 하지 않았다. 이 비교 실험 시편은 공칭강도 400MPa인 D10 철근 3개를 배근하였고, 피복두께는 40mm를 유지하였다.



Fig. 3. Aggregate Coated FRP Planks

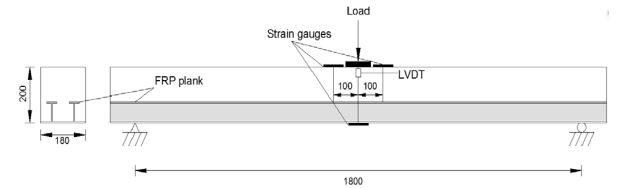


Fig. 4. Dimension and Typical Instrumentation of Specimens(mm)



Fig. 5. Photo of Experiment Setup

2.2 실험방법

지점 사이 순 간격은 1800mm이고, 지간 중앙에 유압식 압축장치를 이용하여 하중을 가했으며, 지점조건은 단순지지이고 로드셀(load cell)과 실험 시편 중앙에 설치한 LVDT를 이용하여 변위를 측정하였다. 전기 저항식 변형률게이지를 이용하여 FRP 판 및 콘크리트 상하부의 변형률을 측정하였다. 상부에 설치한 변형률게이지들은 하중 재하점을 피해 중앙에서 100mm 떨어진 2곳에 설치하였고, 하부에 설치한 변형률게이지는 중앙에 설치하였으며 자세한 형상은 Fig. 4와 같다.

하중은 100mm 폭의 강판을 설치하고 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 변위제어방식으로 3점 재하하였으며, Fig. 5는 실험 전경이다.

3. 균열분포 및 파괴하중

3.1 잔골재 부착 영향

FRP 판에 잔골재 부착 여부에 대한 영향을 분석하기 위하여 FRP 하부에 잔골재를 부착한 경우, 비교 실험 시편인 D10 철근을 3개 배근한 경우, FRP 하부에 잔골재를 부착하지 않은 경우를 변수로 하여 실험하였다.

Table 4 및 Fig. 6은 FRP 판에 잔골재를 부착한 실험 결과이다. 실험 결과를 살펴보면 FRP 판에 잔골재를 부착한 경우 최대 하중이 가장 높게 나타났다. FRP 판에 잔골재를 부착한 실험 시편의 경우 25~27개의 균열 폭이 작은 휨 균열이 고르게 발생한 반면 FRP 판에 잔골재를 부착하지 않은 실험 시편의 경우 15개의 균열 폭이

상대적으로 크게 형성되었다. 하중이 증가함에 따라 FRP 판과 콘크리트에 발생하는 변형률은 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 FRP의 변형률이 0.0045를 넘어서면서 FRP와 콘크리트가 분리되며 최종 파괴에 이르렀다.

Fig. 6을 살펴보면 ST001, FN401의 경우 최대 하중 및 변위가 비슷하게 발생하였다. ST001은 하중 22.28kN, 변위 1.99mm일 때 중앙 하단에 초기 균열이 관측되었고 최대 하중은 56.84kN, 변위는 10.41mm로 나타났고, 총 22개의 휨 균열이 45~205mm 간격으로 발생하였다.

FN401은 하중 13.72kN, 변위 1.69mm일 때 중앙 하단에 초기 균열이 관측되었으며 이후 휨 균열이 중앙에서 멀어지며 발생하였다. 하중 57.44kN, 변위 12.74mm일 때 전단 균열이 발생하였으며 최대 하중은 58.01kN이었고 이 때 변위 13.01mm였다. 이후 전단 균열이 벌어지며 하중이 서서히 감소하였고 하중 31.88kN, 변위 16.54mm일 때 FRP 하부와 타설 콘크리트가 분리되었으며, FRP 판과 타설 콘크리트가 미끄러지며 최종 파괴가 발생하였다. FN401은 휨 파괴 후 FRP 판 하부와 타설 콘크리트의 미끄러짐 파괴가 발생하였고 15개의 휨 균열이 70~185mm 간격으로 발생하였다.

FC401은 하중 21.72kN, 변위 2.25mm일 때 중앙 하단에 초기 균열을 관측하였으며 하중 23.74kN, 변위 2.59mm일 때 중앙 하단에 180mm 떨어진 부근에 균열이 관찰되었다. 하중 76.40kN, 변위 12.34mm일 때 전단 균열이 관찰되었으며, 최대 하중은 84.83kN, 변위 14.41mm였다. 이후 전단 균열이 FRP 상부 플랜지를 따라 진행되고 그 균열이 벌어지며 하중이 서서히 감소하였으며

Table 4. Results for Attachment of Fine Aggregate or Not

Name of experiment	Load (kN)	Load average (kN)	Displacement (mm)	Displacement average (mm)	No. of flexural cracks	Failure mode
ST001	56.84	56.84	10.41	10.41	22	Flexure
FN401	58.01	58.01	13.01	13.01	15	Hybrid
FC401	84.83	83.10	14.41	16.14	27	Hybrid
FC402	81.37		17.87		25	Hybrid

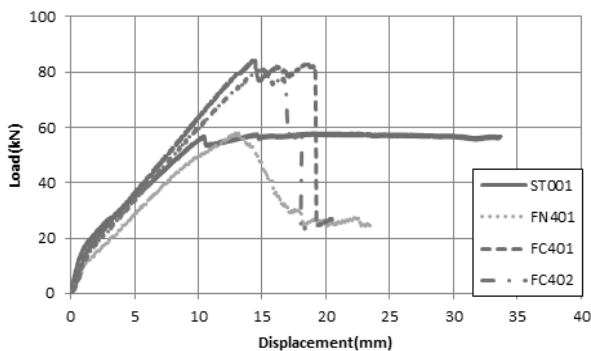


Fig. 6. Load-displacement Curve of ST001, FN401, FC401 and FC402

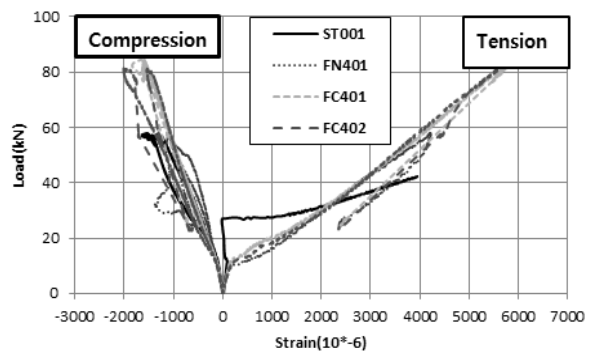


Fig. 7. Load-strain Curve of ST001, FN401, FC401 and FC402

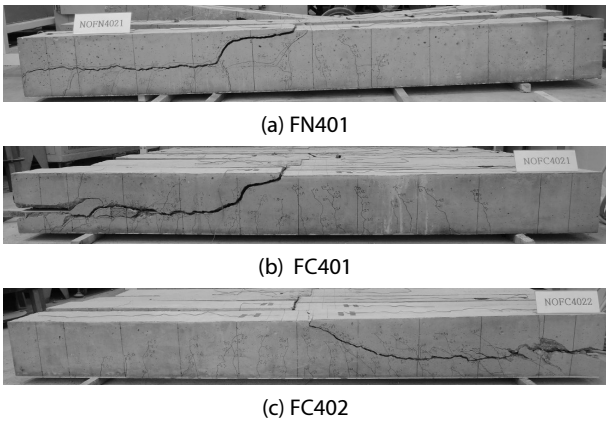


Fig. 8. Photo of Failure Mode of FN401, FC401 and FC402

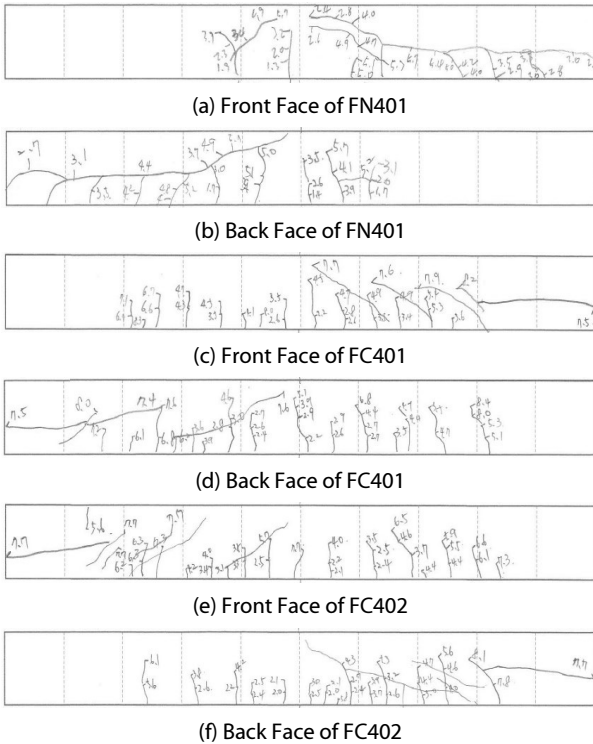


Fig. 9. Crack Pattern and Failure Mode of FN401, FC401 and FC402

하중 80.81kN, 변위 19.14mm일 때 FRP 상부 플랜지와 콘크리트가 분리되며 파괴가 발생하였다. FC402는 하중 20.08kN, 변위 2.34mm일 때 중앙 하단에 균열이 관측되었으며 하중 76.92kN, 변위 13.59mm일 때 전단 균열이 발생하였다. 최대 하중은 81.37kN, 변위는 14.87mm이었으며 이후 전단 균열이 FRP 상부 플랜지를 따라 진행되고 그 균열이 벌어지며 하중이 서서히 감소하다가 하중 75.00kN, 변위 16.84mm일 때 FRP 상부 플랜지와 콘크리트가 분리되며 파괴가 발생하였다.

FRP 판에 잔골재를 부착한 실험 시편의 결과 모두 휨 파괴 후 전단파괴가 발생하였으며, FRP 상부 플랜지를 따라 균열이 보의 끝까지 진행되면서 파괴되었다. 25~27개의 휨 균열이 35~135mm 간격으로 발생하였고 FRP 판에 잔골재를 부착하지 않은 실험 시편보다 휨 균열 분포가 고르게 형성되었다.

Fig. 9는 FRP 판 하부에 잔골재를 부착하지 않은 실험 시편과 부착한 실험 시편의 균열 형태를 나타낸 것이다. Fig. 9를 살펴보면 잔골재를 부착한 경우 부착하지 않은 경우보다 휨 균열 분포가 고르게 형성되었다. FRP 판에 잔골재를 부착하지 않은 경우 초기 하중 단계에서 휨 균열이 전단 균열로 진행되었으며, FRP 판과 타설 콘크리트가 분리되며 미끄러짐 파괴 형태로 최종 파괴가 발생하였다. FRP 판에 잔골재를 부착한 실험 시편의 경우 초기 하중 단계에서 휨 균열이 고르게 형성되었으며 이후 전단 균열로 진행되었고, 휨/전단 혼성 파괴 형태로 최종 파괴가 발생하였다.

3.2 잔골재를 미부착한 FRP 판 웹의 천공 영향

잔골재 미부착 FRP 웹의 천공 효과에 대한 영향을 분석하기 위하여 웹에 천공을 하지 않은 경우, 직경 35mm로 직경의 3배, 5배 간격으로 천공한 경우를 변수로 하여 실험하였다.

Table 5 및 Fig. 10을 살펴보면 천공을 하지 않은 실험 시편의 최대 하중과 천공간격이 직경의 5배인 경우가 비슷하게 나타났으며, 천공간격이 직경의 3배, 즉 천공간격이 촘촘한 경우 최대 하중이 높게 나타났다.

Fig. 10을 살펴보면 FN401, FN452X의 최대 하중 및 변위가 비슷하게 나타났다. 하중이 증가함에 따라 FRP 판과 콘크리트에 발생하는 변형률은 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서 보는 바와

Table 5. Result for Influence of Perforation-No Aggregate

Name of experiment	Load (kN)	Load average (kN)	Displacement (mm)	Displacement average (mm)	No. of flexural cracks	Failure mode
FN401	58.01	58.01	13.01	58.01	15	Hybrid
FN431	69.66	71.61	14.87	14.89	17	Hybrid
FN432	73.55		14.91		14	Hybrid
FN451	53.32	60.89	10.99	12.15	14	Hybrid
FN452	68.45		13.31		17	Hybrid

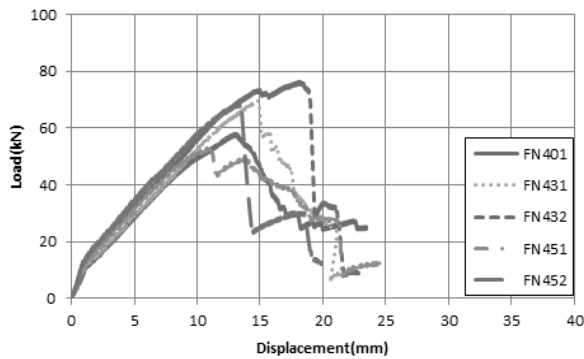


Fig. 10. Load-displacement Curve of FN401, FN431, FN432, FN451 and FN452

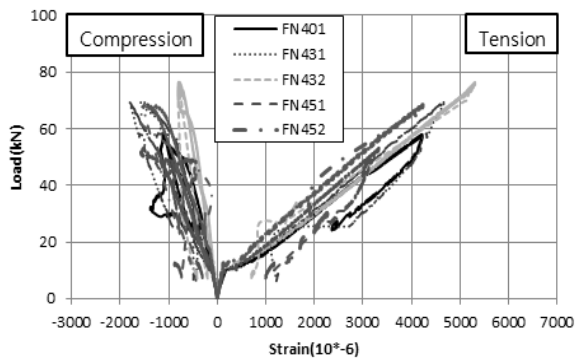


Fig. 11. Load-strain Curve of FN401, FN431, FN432, FN451 and FN452

같이 천공을 하지 않은 실험과 천공간격이 5배인 실험에서 극한 파괴 하중에서 콘크리트 압축 부분의 변형률은 0.002 이하이고, FRP 판이 받는 변형률도 0.0045 이하이므로 콘크리트의 압축파괴 형태나 FRP 판의 인장파괴 형태는 아닌 것으로 판단된다. FN451은 하중 11.70kN, 변위 0.97mm일 때 중앙 하단에 초기 균열이 관찰되었으며, FN452는 하중 14.42kN, 변위 1.11mm일 때 중앙 하단에 초기 균열을 관측하였고 하중 67.37kN, 변위 12.67mm일 때 전단 균열이 발생하였다. FRP 웹에 천공간격이 5배인 실험 결과 휨 파괴 후 FRP와 콘크리트의 미끄러짐 파괴가 발생하였으며, 총 14~17개의 휨 균열이 15~280mm 간격으로 발생하였다.

천공간격이 직경의 3배인 FN431은 하중 12.59kN, 변위 1.32mm일 때 중앙 하단에 35mm 떨어진 곳에 초기 균열을 관측하였으며 이후 휨 균열이 진행되었다. FN432는 하중 13.25kN, 변위 1.04mm일 때 중앙 하단에 균열을 관측하였다. 하중 57.30kN, 변위 10.18mm일 때 전단 균열이 관찰되었으며, 최대 하중은 73.55kN, 변위 14.91mm였다. FRP 웹에 천공간격이 3배인 실험 결과 휨 파괴 후 FRP와 콘크리트의 미끄러짐 파괴가 발생하였으며, 총 14~17개의 휨 균열이 40~265mm 간격으로 발생하였다.

Fig. 12를 살펴보면 FRP 웹에 천공을 하지 않은 실험 시편과

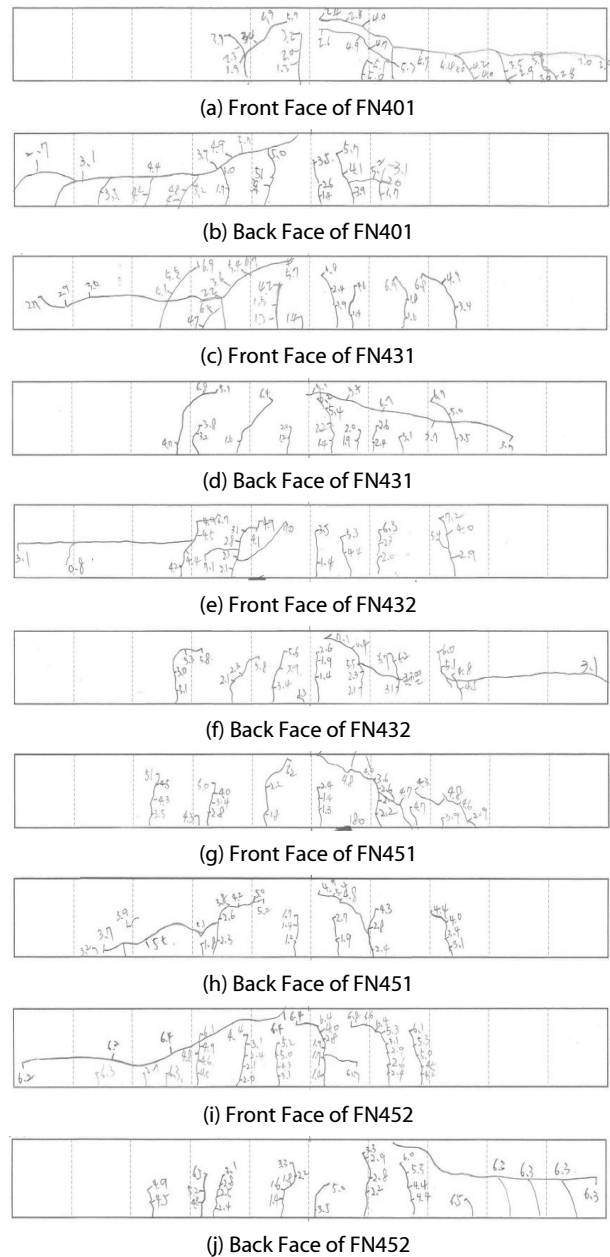


Fig. 12. Crack Pattern and Failure Mode of FN401, FN431, FN432, FN451 and FN452

천공을 한 실험 시편 모두 초기 하중 단계에서 분산된 휨 균열 양상을 보이다 하중이 극한 하중에 도달함에 따라 휨 균열이 전단 균열로 진행되었으며, FRP 상부 플랜지와 타설 콘크리트 경계면에서 균열이 발생하였고 마침내 FRP 판과 타설 콘크리트가 분리되며 미끄러짐 파괴 형태로 최종 파괴가 발생하였다. FRP 웹에 천공을 하지 않은 실험 시편의 경우 FRP 상부 플랜지와 타설 콘크리트 경계면에 발생한 균열이 보의 끝까지 발생하면서 최대 하중이 낮게 나타난 것으로 판단되며, 천공간격이 직경의 3배, 5배인 경우

전단 균열이 보의 끝까지 진행되지 않아 높은 하중이 나타난 것으로 판단된다. 이 현상은 FRP 웹에 천공을 한 경우 FRP 판과 타설 콘크리트가 장부효과에 의한 영향이 발생하여 높은 하중을 나타낸 것으로 판단되며, 천공간격이 촘촘할수록 그 영향이 커지는 것으로 판단된다.

3.3 잔골재를 부착한 FRP 판 웹 천공 영향

잔골재 부착 FRP 웹의 천공 효과에 대한 영향을 분석하기 위하여 웹를 천공 하지 않은 경우, 직경의 3배, 5배 간격으로 천공한 경우를 변수로 하여 실험하였다.

Table 6 및 Fig. 13은 FRP 판에 잔골재를 부착하고 FRP 웹에 천공을 하지 않은 실험 시편과 직경의 3배, 5배 간격으로 천공한 실험 시편의 실험 결과이다. 실험 결과를 살펴보면 천공을 하지 않은 실험 시편의 최대 하중과 천공간격이 3배인 실험 결과 최대 하중이 비슷하게 나타났으며, 천공간격이 직경의 5배인 경우 최대 하중이 가장 높게 나타났다. Fig. 14는 하중이 증가함에 따라 FRP 판과 콘크리트에 발생하는 변형률을 나타낸 것이다. Fig. 14에서 보는 바와 같이 인장력을 받는 실험 시편 하단부의 FRP 변형률은 0.0045를 넘어서고 있다.

Fig. 14를 살펴보면 FC402X, FC432X의 최대 하중 및 변위가 비슷하게 나타났다. FC432X의 초기균열하중은 19.05~19.10kN

이며, 79.03~81.65kN에서 전단 균열이 관측되었으며 최대 하중은 79.68~84.13kN이다. FC432x 실험은 휨 파괴 후 전단파괴가 일어났으며, 전단 균열이 FRP 상부 플랜지를 따라 균열이 발생하였지만 보의 끝까지 진행되기 이전에 FRP 판 하부로 균열이 진행되어 파괴되었으며, 이 현상은 FRP 웹에 천공으로 인한 강성 저하가 원인인 것으로 판단된다. 총 30~32개의 휨 균열이 33~112mm 간격으로 발생하였다.

FC452X 시편의 초기균열하중은 18.26~22.05kN이며, 79.92~84.13kN에서 전단 균열이 발생하였고, 최대 하중은 91.43~93.07kN이다. FC452X 실험은 휨 파괴 후 전단파괴가 발생하였으며 FC432X 실험과 마찬가지로 전단 균열이 FRP 상부 플랜지를 따라 균열이 발생하였지만 보의 끝까지 진행되기 이전에 콘크리트 바닥으로 균열이 진행되어 파괴되었다. 총 32~33개의 휨 균열이 29~127mm 간격으로 발생하였다.

FRP 판에 잔골재를 부착하고 FRP 웹에 천공 변수에 대한 실험 결과 천공을 하지 않은 실험 시편보다 천공간격을 넓게 한 실험 시편이 최대 하중이 높게 나타났다. FC432X의 경우 FRP와 콘크리트의 장부효과에 대한 영향은 있지만 FRP의 강성이 크게 저하되어 최대 하중이 낮게 나타난 것으로 판단되며, FC452X인 경우 FRP 강성 저하에 대한 영향이 적고 천공을 하지 않은 경우보다 장부효과에 대한 영향이 커지면서 최대효과를 나타낸 것으로 판단된다.

Table 6. Result for Influence of Perforation-Aggregate

Name of experiment	Load (kN)	Load average (kN)	Displacement (mm)	Displacement average (mm)	No. of flexural cracks	Failure mode
FC401	84.83	83.10	14.41	16.14	27	Hybrid
FC402	81.37		17.87		25	Hybrid
FC431	79.68	81.91	15.11	15.68	30	Hybrid
FC432	84.13		16.25		32	Hybrid
FC451	93.07	92.25	16.06	15.71	33	Hybrid
FC452	91.43		15.35		32	Hybrid

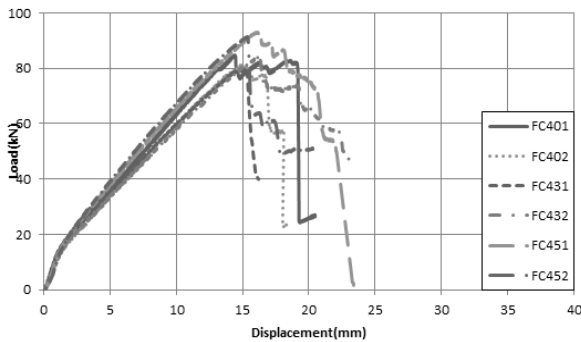


Fig. 13. Load-displacement Curve of FC401, FC402, FC431, FC432, FC451 and FC452

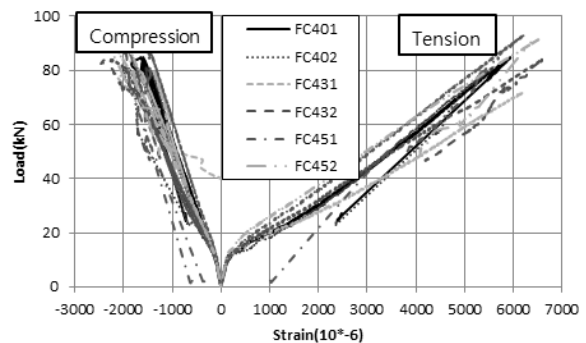


Fig. 14. Load-strain Curve of FC401, FC402, FC431, FC432, FC451 and FC452

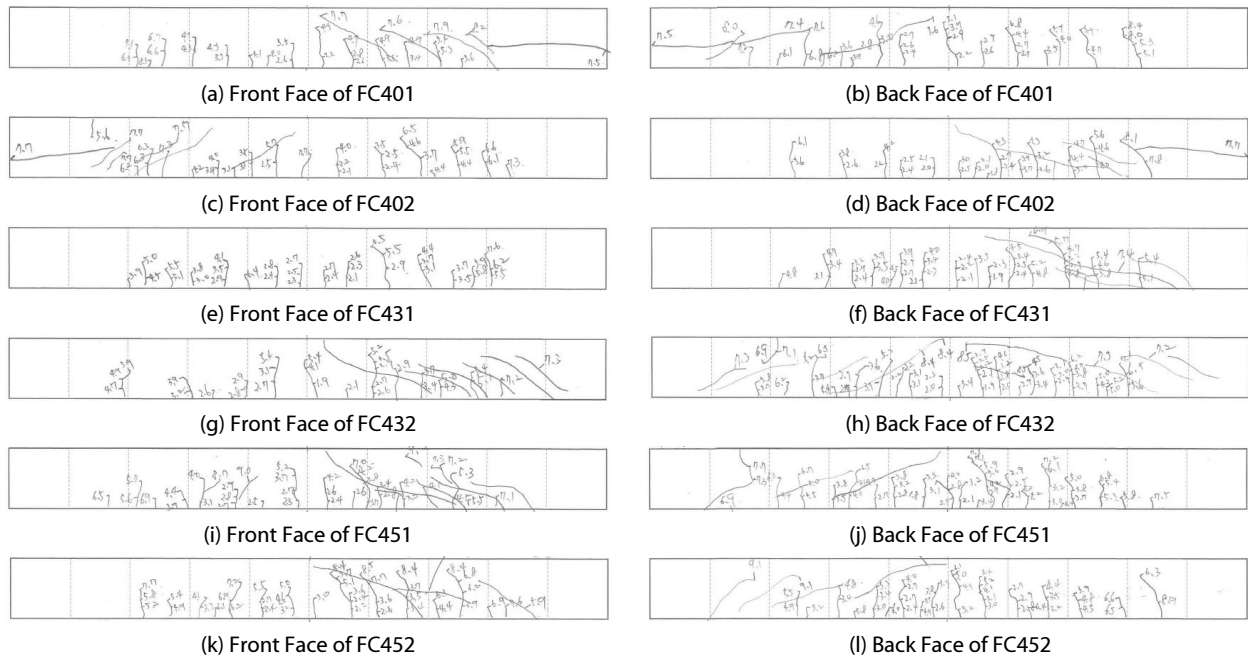


Fig. 15. Crack Pattern and Failure Mode of FC401, FC402, FC431, FC432, FC451 and FC452

Table 7. Results for Top Flange Variable

Name of experiment	Load (kN)	Load average (kN)	Displacement (mm)	Displacement average (mm)	No. of flexural cracks	Failure mode
FC401	84.83	83.10	14.41	16.14	27	Hybrid
FC402	81.37		17.87		25	Hybrid
FC201	91.15	92.78	16.75	17.74	27	Hybrid
FC202	94.41		18.73		28	Hybrid

Fig. 15의 파괴형상을 살펴보면 무천공 FRP의 경우 분산된 휨 균열이 파괴 하중에 도달함에 따라 전단 균열로 진행되었으며 전단 균열이 FRP 하부까지 진행되지 않고 최종 파괴에 이르렀다. 천공 FRP의 경우 FRP 하부까지 균열이 진행되어 최종적으로 FRP 판 하부와 타설 콘크리트가 분리되며 파괴에 이르렀다. 이 현상은 휨 파괴가 지배적으로 작용하여 FRP가 하중을 받게 되면서 FRP 웨브에 천공을 하지 않은 경우 FRP의 강성에 변화가 없어 전단 균열이 FRP 상부 플랜지를 따라 균열이 진행되었으며, FRP 웨브에 천공간격을 촘촘하게 한 경우 FRP의 강성이 크게 저하되면서 균열이 FRP 하부까지 진행된 것으로 판단된다.

3.4 FRP 상부 플랜지 영향

FRP 상부 플랜지 폭에 대한 영향을 분석하기 위하여 FRP 상부 플랜지 폭이 40, 20mm인 두 가지 변수를 이용하여 실험하였다.

Table 7 및 Fig. 16은 FRP 판 하부에 잔골재를 부착한 FRP 상부 플랜지 폭이 40, 20mm인 실험 시편의 실험 결과이다. 실험

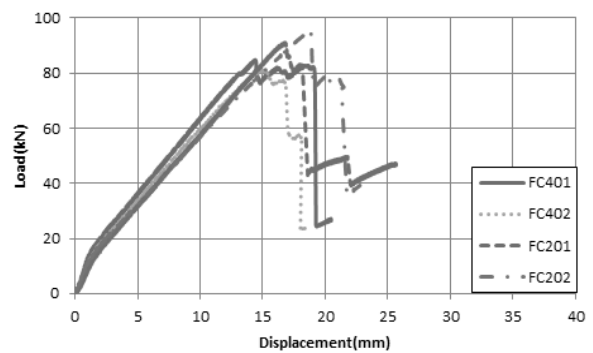


Fig. 16. Load-displacement Curve of FC401, FC402, FC201 and FC202

결과를 살펴보면 FRP 상부 플랜지 폭이 좁은 경우 최대 하중이 높게 나타났다. 이 현상은 플랜지 폭이 넓은 경우 콘크리트타설 공간이 좁아 콘크리트가 제대로 시공되지 못한 점과, 플랜지 사이의 콘크리트 면적이 좁아 타설 콘크리트와 FRP가 분리되는 현상에

기인한 것으로 판단되며, 초기하중단계에서 FRP와 상부플랜지 쪽에 의해 더 높은 강성을 보이지만 최종단계의 전단파괴 시 오히려 콘크리트 면적 감소로 인해 저항강도가 낮게 나온 것으로 판단된다. 하중이 증가함에 따라 FRP 판과 콘크리트에 발생하는 변형률은

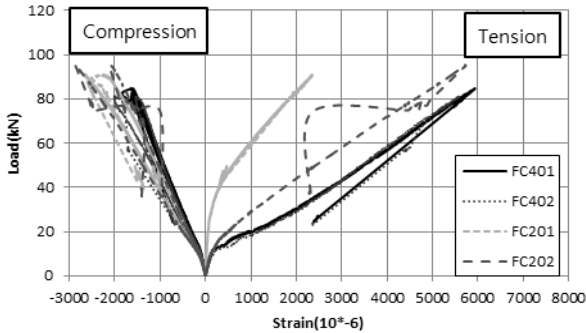


Fig. 17. Load-strain Curve of FC401, FC402, FC201 and FC202

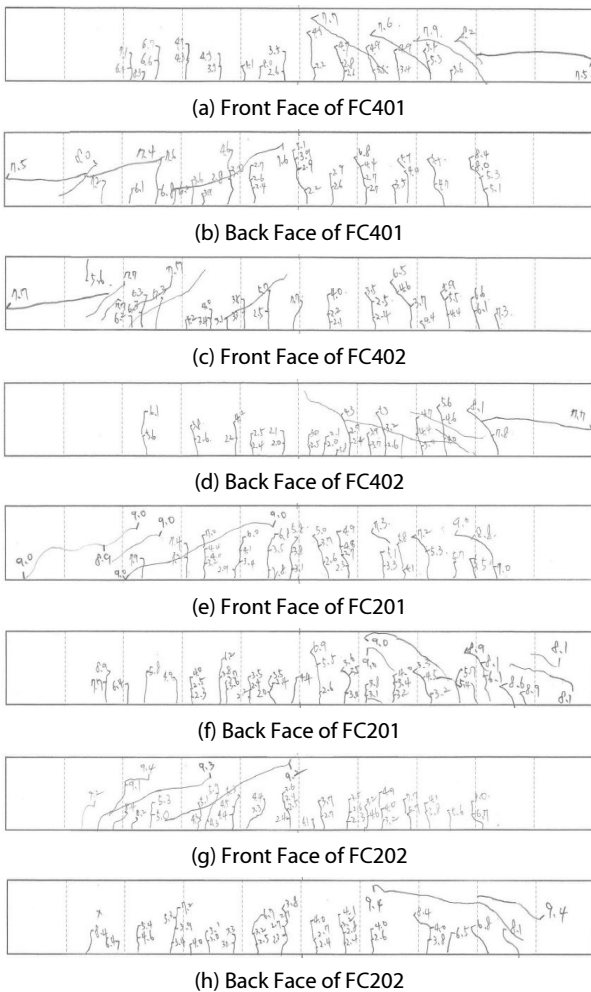


Fig. 18. Crack Pattern and Failure Mode of FC401, FC402, FC201 and FC202

Fig. 17에 나타내었으며 그림에서 보는 바와 같이 극한하중에 도달함에 따라 FRP 상부 플랜지 쪽이 좁은 경우 콘크리트 변형률이 커지는 것으로 나타났다.

FC202x 시편의 초기균열하중은 20.13~23.13kN이며, 90.12~94.10kN에서 전단 균열이 발생하였고, 최대 하중은 91.15~95.41kN 이다. FRP 상부 플랜지 폭이 20mm인 실험은 휨 파괴 후 전단파괴가 일어났으며 FRP 상부 플랜지를 따라 균열이 발생하였지만 보의 끝까지 진행되지 않고 파괴되었다. 총 27~28개의 휨 균열이 50~105mm 간격으로 발생하였다.

Fig. 18을 살펴보면 FRP 상부 플랜지 폭이 40mm인 경우 상부 플랜지와 타설 콘크리트 경계면에서 발생한 전단 균열이 보의 끝까지 진행되는 반면, 상부 플랜지 폭이 20mm인 경우 FRP 상부 플랜지와 타설 콘크리트 경계면에서 발생한 전단 균열이 보의 끝까지 진행되지 않아 하중이 높게 나타난 것으로 판단된다. 이 현상은 상부 플랜지 폭이 넓은 경우 좁은 경우보다 FRP 상부 플랜지와 타설 콘크리트 공간의 면적이 작아지면서 나타난 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 FRP 판을 영구거푸집 및 인장 보강재로 활용한 합성보를 대상으로 휨 파괴실험을 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) FRP 판 하부에 잔골재를 부착하지 않은 실험 시편의 결과 무천공 실험 시편의 최대 하중과 천공간격이 직경의 5배인 최대 하중이 비슷하게 나타났으며, 천공간격이 직경의 3배인 경우가 최대 하중이 가장 높게 나타났다.
- (2) FRP 판 하부에 잔골재를 부착한 실험 시편의 결과 천공을 하지 않은 실험 시편의 최대 하중과 천공간격이 직경의 3배인 실험 결과 최대 하중이 비슷하게 나타났으며, 천공간격이 직경의 5배인 경우 최대 하중이 가장 높게 나타났다.
- (3) FRP 판 하부에 잔골재를 부착한 FRP 상부 플랜지 폭이 40, 20mm인 실험 시편의 결과 FRP 상부 플랜지 폭이 20mm인 경우가 최대 하중이 높게 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2013R1A1A2010852) 으 로 이에 감사드립니다.

References

- Bank, L. C. (2006). Composites for construction: Structural design with FRP materials, John Wiley & Sons, NJ, USA.
- Bank, L. C., Oliva, M. G., Bae, H. U., Barker, J. and Yoo, S. W. (2006). "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, pp. 1-8.
- Cheng, L., Zhao, L. M., Karbhari, V., Hegemier, G. A. and Seible, F. (2005). "Assessment of a steel-free fiber reinforced polymer-composite modular bridge system." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 131, No. 3, pp. 498-506.
- Cho, J. R., Park, S. Y., Cho, K. H., Kim, S. T. and Kim, B. S. (2012). "Pull-out test and discrete spring model of fibre-reinforced polymer perfbond rib shear connector." *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 39, No. 12, pp. 1311-1320.
- Cho, K. H., Park, S. Y., Cho, J. R. and Kim, B. S. (2007). "Structural systems and behavioral characteristics of an innovative FRP-concrete composite deck." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 27, No. 3, pp. 347-357 (in Korean).
- Erki, M. (1999). "Fiber-reinforced polymers for structural engineering in Canada." *Structural Eng, International*, Vol. 9, No. 4, pp. 278-280.
- Fukuyama, H., Matsuzaki, Y., Sato, Y., Iso, M. and Suwada, H. (2000). "Structural performance of engineered cementitious composite elements." *Proceeding of 6th ASCCS Conference*, pp. 969-976.
- Jeong, J. W., Park, K. T., Lee, Y. H. and Hwang, Y. K. (2007). "A comparison of the structural performance for GFRP bridge decks applied to vinyl ester and polyester resins." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 27, No. 4, pp. 479-484 (in Korean).
- Kim, Y. B. and Lee, J. H. (2005). "Simplified analytical model for flexural response of fiber reinforced plastic decks." *Journal of the Korean Association for Shell and Spatial Structures*, Vol. 5, No. 3, pp. 65-74 (in Korean).
- Tang, B. and Podolny, W. and Hooks, J. (1999). "A good start for fiber-reinforced polymer composite material bridges." *American Society of Civil Engineers*, Materials Engineering Congress, pp. 324-331.
- Yong, H. S., Hwang, Y. K., Kyung, K. S. and Park, Y. C. (2006). "A study of static behavior of FRP bridge deck concerning connection condition." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 26, No. 4, pp. 597-604 (in Korean).
- Yoo, S. W., Bae H. U., Oliva, M. and Bank, L. (2007). "Experimental study of concrete beam with FRP plank as formwork and reinforcement." *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, Vol. 19, No. 1, pp. 67-74 (in Korean).
- Zureick, A. H., Shih, B. and Munley, E. (1995). "Fiber-reinforced polymeric bridge decks." *Structural Engineering*, SCI, Vol. 7, No. 3, pp. 257-266.