

## 리브를 갖는 FRP 판과 고인성섬유보강콘크리트로 이루어진 합성보의 파괴거동에 대한 실험적 연구

강가람<sup>1</sup>, 유승운<sup>\*</sup>

<sup>1</sup>가톨릭관동대학교 토목공학과

### An Experimental Study for Failure Behavior of Composite Beams with DFRCC and FRP Plank with Rib

Ga-Ram Kang<sup>1</sup>, Seung-Woon Yoo<sup>\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Catholic Kwandong University

**요약** 고인성섬유보강콘크리트는 기존의 콘크리트에 비해 인성을 크게 개선한 재료로써, 콘크리트 구조물의 여러 분야에 적용 가능한 건설 신재료로 평가되고 있다. 본 연구에서는 고인성섬유보강콘크리트와 리브를 갖는 FRP 판을 인장 보강재 및 영구거푸집으로 활용한 합성보의 파괴거동에 관한 실험을 실시하였다. 비교를 위해 일반콘크리트와 PVA계열인 RF4000과 PP계열인 PP-macro의 섬유를 사용하였으며, 각각 RF4000+RSC15, PP-macro+RSC15를 혼입하여 합성보를 제작하여 실험하였다. FRP 판에 잔골재를 미부착한 경우는 보의 중앙에 발생한 휨 균열이 크게 벌어지면서 FRP 판과 콘크리트가 미끄러짐에 의한 파괴형태를 보여주고 있음으로 잔골재 부착은 필수적 사항이라 판단되며, 파괴모드에 대한 섬유보강재의 영향은 크지 않은 것으로 판단된다. FRP 판에 잔골재를 부착한 실험 결과는 1200, 2000mm 모두 콘크리트와 FRP 사이에 충분한 부착이 형성되었다. 일반콘크리트보다 섬유보강재를 혼입한 경우 최대 하중이 높게 나타났고, 그 중 PP계열의 섬유보강재를 혼입한 경우 최대 하중이 가장 높게 나타났다. 균열이 섬유보강재에 의해 지연되면서 FRP 리브와의 합성작용에 의해 발생한 것으로 판단된다.

**Abstract** DFRCC (ductile fiber reinforced cementitious composites), which are a significantly improved ductile material compared to conventional concrete, were evaluated as a new construction material with a high potential applications to concrete structures for a range of purposes. In this study, experiments on the failure behavior of composite beams with a DFRCC and FRP (fiber reinforced polymer) plank with a rib used as permanent formwork and tensile reinforcement were carried out. A normal concrete and a fiber reinforced concrete with PVA series of RF4000 and the PP series of PP-macro were used for comparison, and each RF4000+RSC15 and PP-macro+RSC15 was tested by producing composite beams. The experimental results of the FRP plank without a sand coating showed that sliding failure mode between the FRP plank and concrete started from a flexural crack at the beam center; therefore it is necessary for the FRP plank to be coated with sand and the effect of the fiber to failure mode did not appear to be huge. The experiment of the FRP plank with a sand coating showed that both 1200mm and 2000mm allowed sufficient bonding between the concrete and FRP plank. The maximum load of the fiber reinforced concrete was higher than that of normal concrete and the case which a series of PP fiber was mixed showed the highest value. The crack latency caused by the fibers led to composite action with a FRP rib.

**Keywords** : DFRCC, Fiber, FRP plank, Permanent formwork, Rib, Tensile reinforcement

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

\*Corresponding Author : Seung-Woon Yoo(Catholic Kwandong Univ.)

Tel: +82-33-649-7513 email: swyoo@cku.ac.kr

Received January 6, 2016

Revised (1st February 11, 2016, 2nd March 2, 2016)

Accepted March 3, 2016

Published March 31, 2016

## 1. 서론

콘크리트에 대한 사회적 요구는 변화되고 있으며, 최근 공학적 요구의 급속한 다양화에 맞추어 그 성능이 나날이 발전하고 있다. 건설재료로 지금까지 널리 사용되고 있는 콘크리트는 내구성, 시공성, 성형성 및 경제성이 우수한 성질을 가지고 있지만, 압축강도에 비해 인장강도가 낮으므로 균열에 대한 저항능력이 작아 취성파괴가 발생하는 등의 단점이 있다[1]. 이러한 단점을 개선한 고인성섬유보강시멘트복합체(ductile fiber reinforced cementitious composites: DFRCC)는 일반적인 콘크리트의 연성부족 현상을 극복하고 있기 때문에 콘크리트계의 구조물에 사용되어질 경우 그 연성능이나 내구성 향상이 기대되며 콘크리트계 구조물에 대한 기능을 향상시킬 것으로 평가되고 있다[2]. 고인성섬유보강콘크리트는 기존의 콘크리트에 비해 취성을 크게 개선한 재료로써, 균열 후 응력 감소가 둔화되는 변형경화 특성과 다수의 미세균열이 발생하는 다수균열 특성을 가진다. 따라서 철근부식 및 균열이 중시되고 있는 특수한 용도의 철근콘크리트 구조물에 적용 가능한 건설 신재료로 평가되고 있어 미국 등 선진국을 중심으로 다양한 연구가 진행되고 있으며 교량, 진동을 받는 부재 및 보수재료 등의 용도로 사용하고 있다[3].

최근 철근콘크리트 구조의 문제점을 극복하기 위하여 재료적인 측면[4]과 구조적인 측면[5]에서 새로운 합성 시스템을 개발하려는 노력이 진행되고 있다[6,7]. 이 중 내구성과 강재에 비해 내식성이 강한 특성을 갖는 섬유강화폴리머(fiber reinforced polymer: FRP)를 건설재료로 인식하여 최근에 관심을 갖게 되었으며[8], FRP를 콘크리트 구조물 건설에 필수적인 거푸집 및 인장재로의 활용에 대한 연구가 현재 활발히 이루어지고 있으며[9], FRP 합성구조의 수치해석적 연구도 일부 수행되었다[10]. 본 연구에서는 고인성섬유보강콘크리트와 리브(rib)를 갖는 FRP 판을 영구거푸집 및 인장재로 활용한 합성보의 파괴거동을 살펴보고자 한다.

## 2. 실험개요

### 2.1 실험체 설계 및 제작

사용된 섬유보강재는 N사의 제품으로, PVA(polyvinyl alcohol)계열인 RF4000, RSC15이며 PP(polyolefin/polypropylene)

계열의 PP-macro를 사용하였다. 일반적으로 PVA섬유는 친수성 물질로서 화학적, 물리적으로 우수한 접착성을 가진 친수성 물질이고, PP섬유는 다양한 형태를 가진 플라스틱 섬유보강재로 본 보강재는 표면에 기하학적 굴곡형상이 시멘트와 정착성을 향상 시킨다. 섬유보강재에 대한 형태 및 물성은 Fig.1, Table 1과 같고 실험체의 배합표는 Table 2와 같다. 또한 비교를 위하여 NOCON으로 명명한 일반 콘크리트(normal concrete)에 대해서 실험하였다.



Fig. 1. Shape of PVA and PP-macro  
(a) RF4000 (b) RSC15 (c) PP-macro

Table 1. Mechanical properties of fiber

Fiber	Type	Specific gravity	Length (mm)	Diameter ( $\mu\text{m}$ )	Tensile strength (MPa)
RF4000	PVA	1.3	30	600	900
RSC15	PVA	1.3	8	40	1300
PP-macro	PP	0.91	48	0.5~1.0	450

Table 2. Concrete mix design( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Concrete	Fiber type	Mix design					
		W	C	S	G	SP	Fiber
NOCON	-	179	478	695	960	3.4	-
RFCON	RF4000+RSC15	179	478	695	960	11.9	18.2+7.8
PPCON	PP-macro+RSC15	179	478	695	960	9.6	12.7+7.8

고인성섬유보강콘크리트의 28일 압축강도 및 휨 인장강도 시험결과는 Table 3에 자세히 나타내었다.

Table 3. Compressive and tensile strength of DFRCC

Concrete	Compressive strength(MPa)	Tensile strength(MPa)
NOCON	43.27	4.90
RFCON	29.65	5.38
PPCON	30.19	5.45

본 실험에서 거푸집 및 인장 보강재로 FRP 판을 사용하였으며, 전단 보강은 하지 않았다. Fig. 2와 같이 리브가 2개가 포함되게 180mm로 절단하여 합성보의 단위 폭으로 사용하였다. Table 4에는 실험체 및 비교 실험체의 제원을 자세히 나타내었으며 실험체 명명법은 다음과 같다.

XX-a-b-cc-d-No, 여기서 XX는 콘크리트 종류(NO:NOCON, RF:RFCON, PP:PPCON), a는 인장보강재의 종류(F:FRP, S:철근), b는 잔골재 부착여부(C:부착, N:미부착), cc는 FRP 판의 상부 플랜지 폭(00:Steel, 40:40mm), d는 부재의 길이(1:1,200mm, 2:2,000mm), No는 실험체 수(1 또는 2)를 나타낸다.

Table 4. List of experiments

Name of experiment	No.	Tensile reinforcement	Top flange width(mm)	Length (mm)
NOST002No	1	Steel bar	-	2000
RFST002No	1	Steel bar	-	2000
PPST002No	1	Steel bar	-	2000
NOFC402No	2	Sand coated FRP	40	2000
RFFC402No	2	Sand coated FRP	40	2000
PPFC402No	2	Sand coated FRP	40	2000
NOFN401No	1	No coated FRP	40	1200
RFFN401No	1	No coated FRP	40	1200
PPFN401No	1	No coated FRP	40	1200
NOFC401No	2	Sand coated FRP	40	1200
RFFC401No	2	Sand coated FRP	40	1200
PPFC401No	2	Sand coated FRP	40	1200

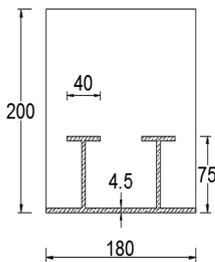


Fig. 2. Section of composite beam (Length of 1200 and 2000mm)

실험체 제작은 FRP 판을 폭 180mm, 길이 1,200mm, 2,000mm로 절단 후 FRP 판 하부에 S사 에폭시를 사용하여 잔골재를 부착하였으며, Fig. 3은 제작 완료된 FRP 판의 모습이다. Table 5, 6에는 FRP와 에폭시의 물성을

나타내었다.

Table 5. Material properties of FRP

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

Table 6. 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



Fig. 3. Sand coated FRP planks

## 2.2 실험방법

지점간격은 1,000mm와 1,800mm이고, 지간 중앙에 가력장치를 사용하여 하중을 가했으며, 지점조건은 단순 지지이다. 하중계와 중앙에 설치한 변위계를 이용하여 하중 및 변위를 측정하였다. 전기 저항식 스트레인게이지를 이용하여 FRP 판의 하부 및 콘크리트 상부 2곳의 변형률을 측정하였다. 실험시편 상부에는 하중 가력점을 피해 중앙에서 100mm 떨어진 2곳에 스트레인게이지를 설치하였고, 하부에는 중앙에 설치하였다. 하중은 100mm 폭의 강판을 설치하고 Fig. 4과 같이 3점 재하방식으로 가력하였다.

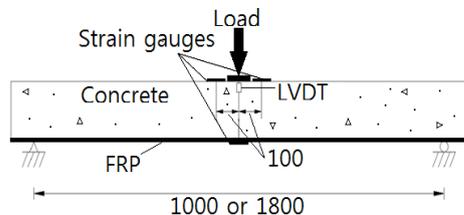


Fig. 4. Experiment setup

### 3. 균열분포 및 파괴하중

#### 3.1 1200mm 보의 잔골재를 미부착한 경우

FRP 판 하부에 잔골재를 미부착한 경우로, NOCON, RFCON, PPCON의 콘크리트를 실험하였다.

Table 7. Results for non sand coated(1200mm)

Name of experiment	Load (kN)	Displacement (mm)	No. of flexural cracks	Failure mode
NOFN4011	93.54	4.63	6	Flexure
RFFN4011	101.64	4.85	9	Flexure
PPFN4011	140.84	5.38	9	Flexure

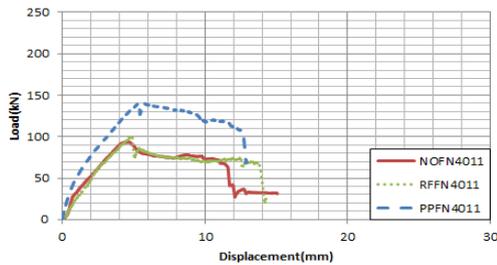


Fig. 5. Load-displacement curve of NOFN4011, RFFN4011 and PPFN4011

Table 7과 Fig. 5을 살펴보면 그래프의 형상은 모두 비슷하게 나타났지만 최대 하중이 차이가 발생하였다. 가력 하중이 증가에 따른 하부 FRP 판의 중앙과 상부 콘크리트 표면에서 발생하는 변형률은 Fig. 6에 나타내었다. FRP 판에 잔골재를 미부착한 경우 극한하중에서 상부 콘크리트 표면의 압축부분 변형률이 0.002 이하이므로 콘크리트는 압축파괴에 도달하지는 않았으며, FRP 판의 하부에서 측정된 변형률도 0.0045 이하이므로 FRP의 인장파괴 형태는 아닌 것으로 판단된다.

NOCON의 경우 가력 하중 29.12kN일 때 실험시편 하단 콘크리트부분에 초기 균열이 관찰되었으며 극한하중은 93.54kN, 변위 4.63mm였다. 총 6개의 균열 폭이 큰 휨 균열이 52~163mm 간격으로 발생하였다. RFCON은 하중 59.08kN, 변위 2.37mm일 때 중앙 하단에 초기 균열이 관측되었고 최대 하중은 101.64kN, 변위 4.85mm이었으며, 이후 중앙 균열이 벌어지며 하중이 서서히 감소하였다. 총 9개의 균열 폭이 큰 휨 균열이 62~207mm 간격으로 발생하였다. PPCON은 하중 54.04kN, 변위 1.10mm일 때 중앙 하단에 초기 균열을

관측하였으며 최대 하중은 140.84kN, 변위 5.38mm이었다. 총 9개의 휨 균열이 90~193mm 간격으로 발생하였다.

FRP 판에 잔골재를 미부착하여 인장 보강재로 활용한 실험 결과 모두 휨 파괴 후 FRP 판과 콘크리트가 미끄러지며 파괴가 발생하였다. 섬유보강재를 투입한 실험의 최대 하중이 높게 나타났으며 PP계열의 섬유보강재를 사용한 경우 가장 높게 나타났으며, 하중이 증가함에 따라 휨균열 폭이 커질 때 섬유보강재가 지연시키면서 나타나는 현상인 것으로 판단된다. PPCON은 NOCON보다 최대 하중이 약 33.58%, RFCON보다 27.83% 크게 나타났다. 균열분포를 살펴보면 보의 중앙에 발생한 휨 균열이 하중이 증가함에 따라 크게 벌어지면서 FRP 판과 콘크리트가 분리되며 미끄러짐이 발생하였고, 파괴 모드에 대한 섬유보강재의 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.

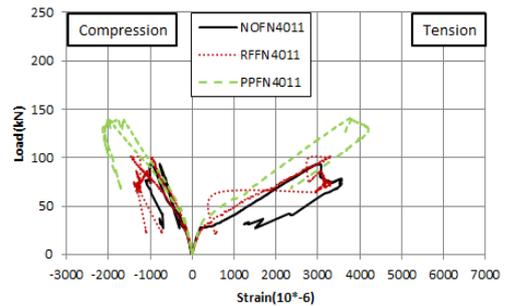


Fig. 6. Load-strain curve of NOFN4011, RFFN4011 and PPFN4011

#### 3.2 1200mm 보의 잔골재를 부착한 경우

FRP 판 하부에 잔골재를 부착한 NOCON, RFCON, PPCON의 콘크리트 종류를 변수로 1200mm 보에 대하여 실험하였다.

Table 8. Results for sand coated(1200mm)

Name of experiment	Load (kN)	Load average (kN)	Displacement (mm)	Displacement average (mm)	No. of flexural cracks	Failure mode
NOFC4011	128.65	137.08	8.92	8.08	11	Shear
NOFC4012	145.51		7.23			
RFFC4011	182.84	189.28	10.04	9.53	22	Shear
RFFC4012	195.75		9.01			
PPFC4011	190.96	203.00	10.06	10.65	20	Shear
PPFC4012	215.04		11.23			

Table 8과 Fig. 7를 살펴보면 섬유보강재를 투입한 경우 최대 하중이 높게 나타났으며 그중 PP계열을 사용한 실험의 최대 하중이 가장 높게 나타났다. 하중을 가력함으로써 하부 FRP판과 상부 콘크리트 표면에서 측정된 변형률을 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 FRP의 변형률이 0.0045를 넘어서면서 FRP와 콘크리트가 분리되며 최종 파괴에 이르렀다.

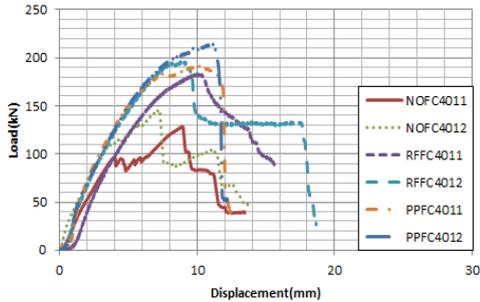


Fig. 7. Load-displacement curve of NOFC4011, NOFC4012, RFFC4011, RFFC4012, PPFC4011 and PPFC4012

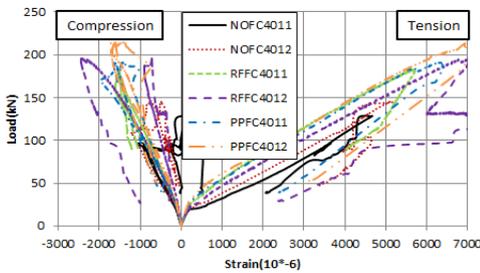


Fig. 8. Load-strain curve of NOFC4011, NOFC4012, RFFC4011, RFFC4012, PPFC4011 and PPFC4012

NOFC401X의 경우 42.09~46.44kN에서 초기균열이 발생하였고, 전단균열은 하중 110.16~126.59kN일 때 발생하였으며, 최대 파괴하중은 128.65~145.51kN이다. NOFC401X 실험의 경우 모두 전단파괴가 발생하였으며, 휨 균열이 32~137mm 간격으로 총 11~15개 발생하였고 FRP 판 하부와 콘크리트가 분리되며 최종적인 파괴가 발생하였다. RFFC401X의 초기균열하중은 35.28~75.04kN이고, 117.60~119.28kN에서 전단 균열이 발생하였으며, 최대 하중은 182.84~195.75kN으로 나타났다. RFFC401X는 모두 전단파괴가 발생하였으며, 총 22~23개의 휨 균열이 29~173mm 간격으로 발생하였다. PPFC401X는 하중 58.52~58.80kN에서 초기균열이

관측되었고, 161.00 ~178.36kN일 때 전단균열이 발생하였으며, 최대 하중은 190.96~215.04kN으로 나타났다. PPFC401X는 모두 전단파괴가 발생하였고, 총 20~22개의 휨 균열이 37~194mm 간격으로 발생하였다.

FRP 판에 잔골재를 부착하여 인장 보강재로 활용한 실험 결과 모두 휨균열 후 전단파괴가 발생하였으며, FRP 판 하부와 콘크리트가 분리되며 최종파괴가 발생하였다. PPFCON은 NOCON보다 최대 하중이 약 32.47%, RFFCON보다 6.76% 크게 나타났다. 균열분포를 살펴보면 모두 초기 하중단계에서 휨 균열이 분산되며 발생하였고, 하중이 증가함에 따라 전단 균열이 발생하여 최종 파괴가 발생하였다. 섬유보강재를 투입한 경우 휨 균열 분포가 고르게 형성되었으며 균열간격 또한 촘촘하게 형성되었다. NOCON, RFFCON의 경우 전단 균열이 상부 플랜지를 따라 보의 끝까지 진행되었지만, PPFCON의 경우 전단 균열이 보의 끝까지 진행되지 않으면서 최대 하중이 가장 높게 나타난 것으로 판단되며, PP계열의 섬유보강재가 보다 좋은 효과를 나타냈다.

### 3.3 2000mm 보의 철근을 인장 보강재로 활용한 경우

D10 철근을 3개 배근한 NOCON, RFFCON, PPFCON의 콘크리트 종류를 변수로 2000mm 보에 대하여 실험하였다.

Table 9. Results of reinforced concrete beams

Name of experiment	Load (kN)	Load average (kN)	Displacement (mm)	Displacement average (mm)	No. of flexural cracks	Failure mode
NOST0021	56.84	56.84	10.41	10.41	22	Flexure
RFST0021	52.81	52.81	10.17	10.17	26	Flexure
PPST0021	52.01	52.01	9.82	9.82	26	Flexure

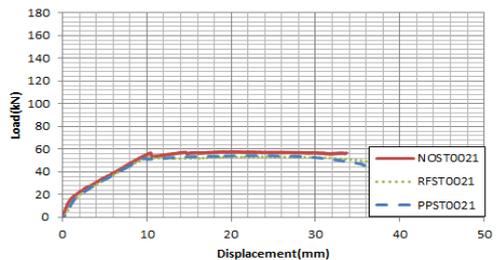


Fig. 9. Load-displacement curve of NOST0021, RFST0021 and PPST0021

Table 9과 Fig. 9는 NOCON, RFCON, PPCON의 2000mm인 보에 D10 철근을 3개 배근한 실험 결과이다. 최대 하중 및 변위가 비슷하게 나타났으며 그래프의 기울기 또한 비슷하게 나타났다. 가력함에 따라 FRP 판과 상부 콘크리트 표면에서 측정된 변형률을 Fig. 10에 나타내었다. 과소 철근보의 파괴 형태인 철근이 항복한 후 콘크리트가 파괴되는 형태이다. 균열분포를 살펴보면 콘크리트의 종류에 상관없이 휨 균열분포가 고르게 형성되었지만 섬유보강재를 투입한 경우 균열간격이 촘촘하게 형성되었다.

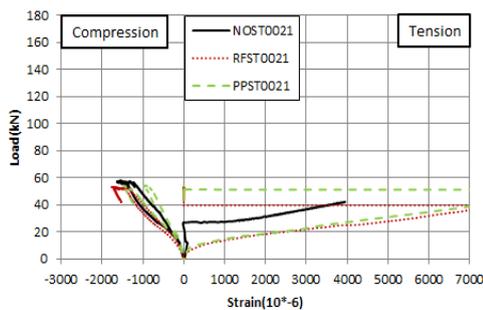


Fig. 10. Load-strain curve of NOST0021, RFST0021 and PPST0021

### 3.4 2000mm 보의 FRP를 인장보강재로 활용한 경우

FRP 판 하부에 잔골재를 부착한 NOCON, RFCON, PPCON의 콘크리트 종류를 변수로 2000mm 보에 대하여 실험하였다.

Table 10. Results for attachment of fine aggregate (2000mm)

Name of experiment	Load (kN)	Load average (kN)	Displacement (mm)	Displacement average (mm)	No. of flexural cracks	Failure mode
NOFC4021	84.83	83.10	14.41	14.64	27	Hybrid
NOFC4022	81.37		14.87		25	Hybrid
RFFC4021	138.34	134.36	32.89	31.90	46	Hybrid
RFFC4022	130.38		30.91		52	Hybrid
PPFC4021	144.76	143.26	28.34	27.79	52	Hybrid
PPFC4022	141.76		27.23		54	Hybrid

Table 10과 Fig. 11, 12을 살펴보면 RFCON, PPCON의 경우 최종적으로 가력지점의 콘크리트 변형률이 0.003을 넘어가면서 압축 및 전단 파괴 양상을 보이고 있다. 균열분포를 살펴보면 섬유보강재를 투입한 경우 일반콘크리트보다 휨 균열 분포가 고르게 형성되었으며 균열간격 또한 촘촘하게 형성되었다. NOCON의 경우 보의 중앙에서 발생한 전단 균열이 보의 양단까지 진행되며 최종파괴가 발생했고, RFCON, PPCON의 경우 전단 균열이 보의 양단까지 진행되지 않고 최종파괴가 발생하였다.

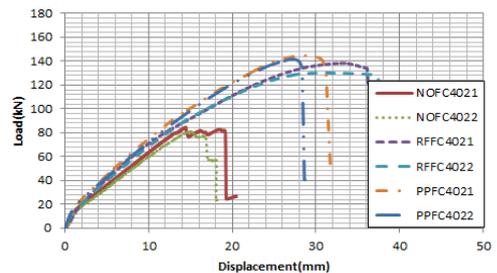


Fig. 11. Load-displacement curve of NOFC4021, NOFC4022, RFFC4021, RFFC4022, PPFC4021 and PPFC4022

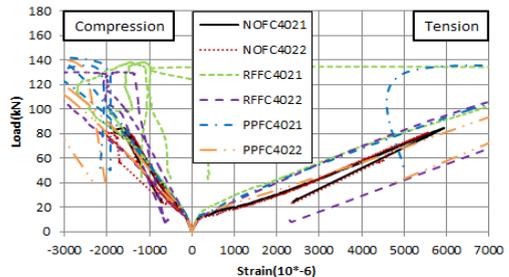


Fig. 12. Load-strain curve of NOFC4021, NOFC4022, RFFC4021, RFFC4022, PPFC4021 and PPFC4022

NOFC402X는 초기균열하중이 20.08~21.72kN이며, 76.40~76.92kN일 때 전단 균열이 발생하였고, 최대 하중은 81.37~84.83kN으로 나타났다. NOFC402X는 모두 휨 파괴 후 전단파괴가 발생하였고 FRP 상부 플랜지와 콘크리트가 분리되며 최종 파괴가 발생하였으며, 총 25~27개의 휨 균열이 35~135mm 간격으로 발생하였다. RFFC402X는 23.08~39.23kN에서 초기균열이 관측되었고, 98.97~115.03kN일 때 전단 균열이 발생하였으며, 최

대 하중은 130.38~138.34kN이다. RFFC402X는 가력 초기단계에서 분산된 휨 균열 형태를 보이다 점차 전단 균열로 진행되면서 최종적으로 휨 파괴 후 전단파괴가 발생하였고, 총 46~52개의 휨 균열이 18~51mm 간격으로 발생하였다. PPFC402X는 초기균열하중이 24.95~28.09kN이고, 111.00~111.99kN일 때 전단 균열이 발생하였으며, 최대 하중은 141.76~144.76kN으로 나타났다. PPFC402X는 휨 파괴 후 전단파괴가 발생하였고, 총 52~54개의 휨 균열이 22~91mm 간격으로 발생하였다.

FRP 판에 잔골재를 부착하여 인장 보강재로 활용한 실험 결과 모두 휨 균열 후 최종적으로 전단에 의해 파괴되었다. 섬유보강재를 투입한 경우 최대 하중이 높게 나타났고, 이 현상은 전단 균열의 진행이 섬유보강재에 의해 지연되면서 발생한 것으로 판단되며, PP계열의 섬유보강재를 투입한 경우 최대 하중이 가장 높게 나타났다. PPCON은 NOCON보다 최대 하중이 약 41.99%, RFCON보다 6.21% 크게 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구는 고인성섬유보강콘크리트와 리브를 갖는 FRP 판을 인장재 및 영구거푸집으로 활용한 합성보를 대상으로 수행한 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

1. FRP 판에 잔골재를 미부착하여 인장 보강재로 활용한 실험 결과는 보의 중앙에 발생한 휨 균열이 하중이 증가함에 따라 크게 벌어지면서 FRP 판과 콘크리트가 미끄러짐에 의한 파괴형태를 보여주고 있음으로 잔골재 부착은 필수적 사항이라 판단된다.
2. FRP 판에 잔골재를 부착한 실험 결과는 1200, 2000mm 모두 콘크리트와 FRP사이에 충분한 부착이 형성되었다. 섬유보강재를 혼입한 실험의 최대 하중이 높게 나타났으며, NOCON의 경우 전단 균열이 보의 양단까지 진행되며 최종파괴가 발생했고, RFCON, PPCON의 경우 전단 균열이 보의 양단까지 진행되지 않고 최종파괴가 발생하였다. 이 현상은 전단 균열의 진행이 섬유보강재에 의해 지연되면서 FRP 리브와의 합성작용에 의해 발생한 것으로 판단된다.

#### Reference

- [1] H.H. Abrishami and D. Mitchell, "Influence of Splitting Cracks on Tension Stiffening," *ACI Structural Journal*, Vol. 93, No. 6, pp.703-710, 1997.
- [2] K. Noghabai, "Behavior of Tie Element of Plain and Fibrous Concrete and Varying Cross Sections," *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 2, pp.279-284, 2000.
- [3] Y.O. Lee and H.D. Yun, "Effect of Aggregate Size on The Behavior and Fracture Characteristics in Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composites," *Journal of The Architectural Institute of Korea Structure*, Vol. 23, No. 12, pp.19-26, 2007.
- [4] G.S. Ryu, K.T. Koh, S.T. Kang, B.-W. Kim and K.H. Ahn, "Study on The Shrinkage Reduction of Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites," *Proceedings of Conference on Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 2008, No. 10, pp.2673-2676, 2008.
- [5] L.C. Bank, *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*, John Wiley & Sons, NJ, USA, 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470121429>
- [6] Y.B. Kim and J.H. Lee, "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, 2005.
- [7] L. Cheng, L.M. Zhao, V. Karbhari, G.-A. Hegemier and F. Seible, "Assessment of A Steel-Free Fiber Reinforced Polymer-Composite Modular Bridge System," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 131, No.3, pp.498-506, 2005.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2005\)131:3\(498\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:3(498))
- [8] L.C. Bank, M.G. Oliva, H.U. Bae, J. Barker and S.W. Yoo, "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, 2006.
- [9] S.W. Yoo, "An Experimental Study for Flexure/Shear Failure Behavior of Composite Beam with GFRP Plank Used as a Permanent Formwork and Cast-in-place High Strength Concrete", *Journal of The Korea Academia -Industrial Cooperation Society*, Vol. 16, No. 6, pp.42245-4252, 2015.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.6.4245>
- [10] M.S. Kook and S.W. Yoo, "Finite Element Analysis for Bending Behavior of Composite Beam with Perfobond FRP Used as a Permanent Formwork", *Journal of The Korea Academia -Industrial Cooperation Society*, Vol. 12, No. 7, pp.3280-3286, 2011.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.7.3280>

**강 가 램(Ga-Ram Kang)**

[정회원]



- 2015년 2월 : 가톨릭관동대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 가톨릭관동대학교 토목공학과 (석사과정)

<관심분야>

구조공학, 합성구조, 구조물보수보강

---

**유 승 운(Seung-Woon Yoo)**

[정회원]



- 1985년 2월 : 연세대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : KAIST 토목환경공학과 (공학박사)
- 2005년 7월 ~ 2006년 8월 : 위스콘신대학교 방문교수
- 1995년 3월 ~ 현재 : 가톨릭관동대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 합성구조, 구조물보수보강