

## 영구거푸집으로 활용한 FRP 판의 종류에 따른 콘크리트와의 부착응력에 관한 실험적 연구

### An Experimental Study of Bond Stress between Concrete and Various Kinds of FRP Plank used as a Permanent Formwork

박 찬 영<sup>1)</sup>      유 승 운<sup>2)\*</sup>  
Chan-Young Park    Seung-Woon Yoo

#### Abstract

Development of new concrete bridge deck system with FRP plank using as a permanent formwork and the main tensile reinforcement recently has been actively conducted. Concurrent use as a reinforcing material and a permanent formwork, it is possible to reduce the construction time and construction costs than the usual concrete slab. In this study, an experiment was carried out for the bond stress between cast-in-place concrete and the type of FRP plank using as a permanent formwork. The interfacial fracture energy that can be one of the most important parameters were evaluated for adhesion performance and bond stress to know the characteristics of the failure mechanism of the adhesion surface. Interfacial fracture energy of normal concrete is 0.24kN/m of GF11 case, in the case of GF21, 0.43kN/m appears, in the case of CF11 and GF31, 0.44kN/m and 0.46kN/m respectively it appeared. In case of RFCON, 0.52kN/m appears from GF12, the CF12 and GF22, 0.51kN/m and 0.36kN/m appeared each case.

Keywords : FRP plank, GFRP, CFRP, Permanent formwork, Bond stress, Interfacial fracture energy

#### 1. 서 론

현재 우리나라 전국에 가설 되어 있는 도로교는 많은 경우 바닥판이 있는 거더교 형식의 교량이며, 교량 바닥판의 경우 대부분 철근콘크리트 구조로 건설하고 있다. 콘크리트를 현장에서 직접 타설하는 철근콘크리트 바닥판은 시공기간이 매우 길고 콘크리트의 건조수축, 온도 응력 등에 의해 비교적 초기 균열이 많이 발생하는 단점을 갖고 있다 (Dieter et al., 2002; Shao et al., 2005). 여러 선진 국가들이 바닥판의 문제점을 해결하기 위해 체계적이고 지속적인 연구개발 노력을 하고 있는 것에 비해 우리나라의 경우에는 바닥판에 대한 연구가 아직 부족하며, 새로운 바닥판 구조시스템 개발에 대한 연구 또한 초기단계인 실정이다 (Berg et al., 2006).

국내에서 보수/보강 이외의 토목분야에 FRP 재료를 이용하는 연구는 철근 대용으로 사용한 FRP (fiber reinforced

polymer) 보강근 또는 FRP 텐던에 관한 연구가 주를 이루고 있으며, 아직 기초적인 연구에 머무르고 있어 실용화하기에는 더 많은 연구가 필요한 실정이다 (Cho et al., 2004). 바닥판에 FRP를 적용하는 연구로는 2001년 국내 최초로 필라멘트 와인딩 공법으로 순수 복합재 바닥판을 제작하여 공사현장 교량에 적용한 바 있으며, 인발공법 (pultrusion process)으로 제작된 FRP 바닥판의 실용화 연구가 일부 진행되었다. 2002년에는 수직층 된 복합신소재 패널과 파형 복합신소재 부재로 구성된 순수 복합신소재 바닥판을 적용한 지간 10m, 폭 8m의 교량이 국내에 가설된 바 있다 (Ji et al., 2001). 이들 복합신소재 바닥판은 순수 신소재를 적용한 바닥판이며 최근 들어 FRP 판을 영구 거푸집 및 주요 인장 보강재로 활용하기 위한 새로운 콘크리트 교량 바닥판 시스템 개발에 대한 연구가 진행되고 있다 (Bank et al., 2010).

Reising et al. (2004a)은 4개의 다른 FRP 합성 바닥판을

1) 정회원, 가톨릭관동대학교 토목공학과 석사과정  
2) 정회원, 가톨릭관동대학교 토목공학과 교수, 교신저자

\* Corresponding author : swyoo@kd.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2015년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2015년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

5경간, 3차선 기존교량에 대체 시험 시공하여 시공성, 적용성, 성능 등 예측되는 많은 장단점에 대하여 확인하였다. 또한, Reising et al. (2004b)은 4개의 다른 FRP 합성 바닥판에 대해 2년 동안 현장 관찰과 장기적인 계측을 실시하여 일정한 교통량과 환경적인 영향 하에서 4개의 다른 FRP 합성 바닥판의 성능을 상세히 비교 분석하였다.

Kitane et al. (2004)은 18.3m의 단순교로 설계된 FRP-콘크리트로 합성된 상부구조의 5배 축소모델에 대한 정적 및 피로시험을 실시하였다. 3개의 사다리꼴 GFRP 박스 단면은 거더와 박스 판을 하나의 상부구조물로 만들기 위해 함께 부착하였으며, 콘크리트 층은 사다리꼴 내부의 박스 상단에 위치하고 있다.

최근 들어 기존의 콘크리트가 가지고 있는 인장 강도 및 연성의 취약점을 보완하고자 고성능시멘트계복합체 (HPFRCC, high performance fiber reinforced cementitious composites)를 활용한 구조부재에 대한 연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있으며 고성능 보수/보강재, 충격 완화재, 강재피복재 등 다양한 용도로의 활용이 기대되고 있다. Yun et al. (2004)의 연구에서는 서로 다른 형상비를 가진 두 종류의 PVA 섬유를 이용한 HPFRCC에 대한 휨 성능과 충격저항 성능을 평가하였으며, 강섬유의 혼입률과 분사식 FRP의 보강에 대한 영향 실험도 실시하였다

본 연구에서는 영구거푸집 및 인장구조재로 사용한 FRP 판의 종류에 따른 콘크리트와의 국부부착응력에 대해 실험을 수행하고, 그 크기를 평가하였다.

## 2. 시험체 제작 및 부착응력 실험

### 2.1 콘크리트 및 FRP 선정

고성능시멘트계복합체 (HPFRCC)에 사용된 섬유보강재는 PVA 계열인 RF4000, RSC15, RECS100L, RFS400, KLON1000이며 PP계열의 PP-macro를 사용하였다. 각각의 섬유보강재에 대한 물성은 Table 1과 같고 시험체의 배합설계표는 Table 2와 같다.

휨 성능을 평가하기 위해 휨 강도시험을 위한 시험체 (100×100×400mm)를 KS F 2403에 따라 제작하였으며 압축강도

Table 1 Fiber Material Property

Riber	Type	Color	Specific gravity	Length (mm)	Diameter ( $\mu\text{m}$ )	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
RF4000	PVA	yellow	1.3	30	600	900	28
RSC15	PVA	white	1.3	8	40	1,300	37
RECS100L	PVA	white	1.3	12	100	1,100	25
RFS400	PVA	white	1.3	18	200	1,000	29
KLON1000	PVA	white	1.26	8	15	890	14.7
PP-macro	PP	white	0.91	48	0.5~1.0	450	5.6

Table 2 Concrete Mix Design I

Concrete	Fiber type	Mix proportion (kg/m <sup>3</sup> )					
		W	C	S	G	SP	fiber
DF1	NC	178.5	478.2	695.2	960.0	4.8	-
DF2	RF4000	178.5	478.2	695.2	960.0	7.2	26
DF3	RSC15	178.5	478.2	695.2	960.0	7.2	26
DF4	RSC15	178.5	478.2	695.2	960.0	9.6	26
DF5	PP	178.5	478.2	695.2	960.0	7.2	18.2
DF6	RSC15+RF4000	178.5	478.2	695.2	960.0	9.6	13+13
DF7	RSC15+PP	178.5	478.2	695.2	960.0	9.6	13+9.1
DF8	RECS100L	178.5	478.2	695.2	960.0	9.6	26
DF9	RFS400	178.5	478.2	695.2	960.0	9.6	26
DF10	KLON1000	178.5	478.2	695.2	960.0	12.0	25.2

시험을 위한 공시체 ( $\varnothing 100 \times 200\text{mm}$ )도 제작하였다. 휨 시험은 1,000kN 용량의 UTM을 이용하여 KS F 2408에 따라 4점 채하로 실시하였고, 처짐 및 하중은 시편 양쪽에 설치한 LVDT와 로드셀을 통해 계측하였다.

압축강도 실험의 경우 섬유보강재를 혼입 하였을 때 일반 콘크리트보다 압축강도는 증가하지 않았다. 압축강도의 경우 RF4000의 DF2 시편이 35.00MPa로 가장 높은 값을 나타냈으며, PP의 DF5 시편은 22.64MPa로 가장 낮은 압축강도를 나타냈다. PP섬유는 PVA 섬유에 비해 친수성 측면 및 섬유 뭉침 현상 등으로 압축강도가 낮게 나타난 것으로 판단된다. 휨 인장강도 실험은 DF6 시편이 2.93MPa로 가장 높게 나타났으나 DF2와 DF5의 실험체에서는 최대 휨 인장강도 이후의 인성이 가장 우수하게 나타났다.

본 실험에서는 PVA계열의 DF2콘크리트 (RFCON)와 일반 콘크리트 (NOCON)를 사용하였고, 유리섬유 FRP 판을

Table 3 Compressive and Tensile Strength of HPFRCC

HPFRCC	DF1	DF2	DF3	DF4	DF5	DF6	DF7	DF8	DF9	DF10
Compressive strength (MPa)	41.17	35.00	27.69	31.65	22.64	30.58	25.45	28.76	25.65	30.46
Tensile strength (MPa)	1.83	2.65	2.23	2.44	2.17	2.93	2.67	2.23	1.86	1.97

Table 4 Material Property of FRP

FRP	Type	Thickness (mm)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
GFRP1	Glass	8.0	395	19.9
GFRP2	Glass	5.0	514	33.6
GFRP3	Glass	5.0	800	57.4
CFRP1	Carbon	2.4	3000	165.0

Table 5 Concrete Mix Design II

Concrete	Fiber type	Mix proportion(kg/m <sup>3</sup> )					
		W	C	S	G	SP	Fiber
NOCON	-	178.5	478.2	695.0	960.0	2.4	-
RFCON	RF4000	178.5	478.2	695.0	960.0	2.4	26

Table 6 Compressive and Tensile Strength (MPa)

	NOCON	RFCON
Compressive strength	44.4	34.7
Tensile strength	2.03	3.26

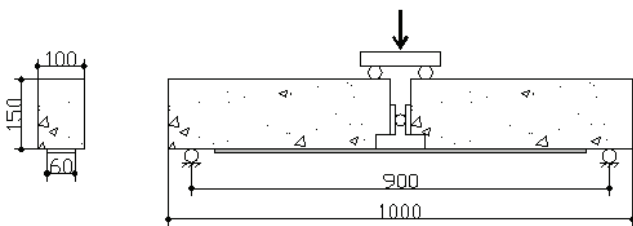


Fig. 1 Shape and Dimensions of Test Specimen (mm)

두께, 탄성계수 및 인장강도가 상이한 세 가지 형태의 GFRP 판과 탄소섬유 FRP 판을 변수로 하여 실험하였다. 실험에 사용한 각각의 FRP 판의 물성은 Table 4에 자세히 나타내었다.

## 2.2 실험개요

본 실험에서는 PVA계열인 RF4000섬유를 사용하였고 (RFCON으로 칭함), 시험체의 배합설계표는 Table 5와 같다. 실험결과 압축강도는 34.7MPa이며, 휨 인장강도 3.26MPa로 나타났다. 일반콘크리트 및 기타 상세한 내용은 Table 6에 표시하였다.

## 2.3 부착실험 시편 제작

본 부착실험에 사용한 시험시편의 제원은 길이 1000mm, 100×150mm 단면을 사용하였고, 자세한 형상과 치수는 Fig.



Fig. 2 Test Specimen

Table 7 Classification of Test Specimen

Series	Specimen	FRP	concrete
G1	GF11	GFRP1	NOCON
	GF12	GFRP1	RFCON
G2	GF21	GFRP2	NOCON
	GF22	GFRP2	RFCON
G3	GF31	GFRP3	NOCON
C1	CF11	CFRP1	NOCON
	CF12	CFRP1	RFCON

1과 같다. 각 실험변수에 대해 각각 2개씩 실험시편을 제작하였다. FRP 판과 콘크리트의 부착은 한쪽면만 하였고, 반대편 쪽은 앵커를 이용하여 고정시켰다.

실험시편의 제작 순서는 먼저 FRP 판을 폭 60mm, 길이 800mm로 절단 후 FRP 판 표면은 별다른 처리 없이 먼지만 제거 후 공장에서 생산된 상태에 시중에서 상용되는 S사의 에폭시를 사용하여 잔골재를 부착하였으며, 크기는 4~7mm이며 부착량은 4kg/m<sup>2</sup>이다. 완성된 FRP 판을 영구거푸집으로 하여 일반콘크리트 (NOCON) 및 고성능시멘트계복합체 (RFCON)를 사용하여 실험시편을 제작하였다.

## 2.4 실험계측 및 파괴형상

본 연구는 교량 바닥판 시스템의 부착거동을 가장 유사하게 표현한다고 생각되는 보-휨실험법 (beam bending test)으로 실시하였다 (Yoo and Bae, 2007).

Fig. 3과 같이 시험체 양측면에 LVDT를 설치하고 상부에 100kN 용량의 로드셀을 설치하여 하중 및 변형을 계측하였다. 또한 FRP에 변형률을 측정하기위해 Fig. 4와 같이 전기저항식 스트레인 게이지를 부착하여 데이터로거 (data logger)

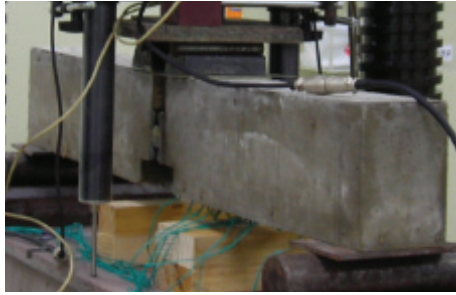


Fig. 3 Experiment Setup

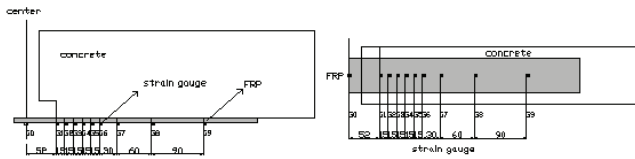


Fig. 4 Location of Strain Gauge on Test Specimen

를 통해 계측하였다. 첫 번째 스트레인 게이지, G0은 FRP 판의 중앙부분, 즉 FRP 판과 콘크리트가 부착되지 않은 중앙 지점에 설치하였고, FRP 판과 콘크리트 부착 시작점엔 G1을 설치, 그 후 G2~G6은 15mm 간격으로 설치하였으며 G7은 30mm, G8은 60mm, G9는 90mm 간격으로 설치하였다. LVDT를 이용하여 G0 위치에서 시편의 처짐에 대한 변위를 계측하였다. 지지조건은 롤러를 이용하여 단순지지 조건을 만들었다. 지점사이의 순 간격은 900mm이고, 유압식 압축장치를 이용하여 4점 재하형식으로 하중을 재하하였다.

NOCON의 파괴 형상으로 유리섬유 FRP 판인 GFRP1, GFRP2와 GFRP3는 FRP 판과 에폭시 사이의 파괴와 콘크리트와 에폭시 사이의 파괴가 혼합된 파괴 형상을 보여주고 있다. 탄소섬유 FRP 판인 CFRP1은 유리섬유 FRP 타입에 비해 FRP 판과 에폭시의 부착이 잘 된 것으로 나타났으며 FRP 판과 에폭시 사이의 파괴도 나타났지만 대부분의 파괴형상은 콘크리트와 에폭시 층 사이의 파괴가 나타났다. RCON의 파괴 형상은 NOCON의 파괴형상과 비슷한 결과를 보여

주며 파괴형상에서는 NOCON과 RCON의 차이점은 육안으로는 관찰되지 않았다. 표면적인 파괴형상은 콘크리트종류에 따른 큰 차이가 없어 NOCON의 첫 번째 실험시편에 대해 Fig. 5에 수록하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 일반콘크리트의 경우

##### 3.1.1 국부 변형률 분포

각각의 FRP 판의 중앙으로부터 Fig. 4와 같이 설치된 변형률 게이지에 의해 각각 위치에서 변형률을 측정하였다. 각 실험시편의 변형률 분포는 다소 편차가 있으나 그래프의 경향은 비슷하게 나타났으므로 첫 번째 경우에 대해 Fig. 6에 수록하였다.

##### 3.1.2 국부 부착응력-슬립 관계

본 연구의 주 관심중 하나인 FRP와 타설 콘크리트 사이의 국부 부착응력 (local bond stress)은 전체 FRP 인발력을 전체 부착면의 면적으로 단순히 나누는 것으로 구할 수 없다. 국부 부착응력은 부착면의 위치에 따라 상이하므로 반드시 부착면을 부분적으로 나누어 각각의 영역에서 국부 부착응력을 산정해야 한다 (Dai et al., 2005).

그러므로 국부 부착응력은 다음과 같이 각각의 위치에서 측정된 변형률을 가지고 구해야 한다. FRP 판을 선형탄성으로 가정할 때 국부 부착 전단응력은 평형조건으로부터 다음 같은 관계를 유도 할 수 있다.

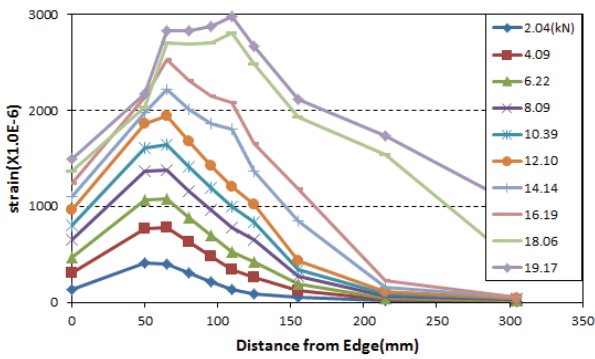
$$\tau(x) = tE \frac{d\epsilon(x)}{dx} \quad (1)$$

여기서  $\tau(x)$ 는 x위치에서의 전단 부착응력, t는 FRP 판의 두께, E는 탄성계수,  $\epsilon(x)$ 는 x위치에서의 FRP 변형률이다.

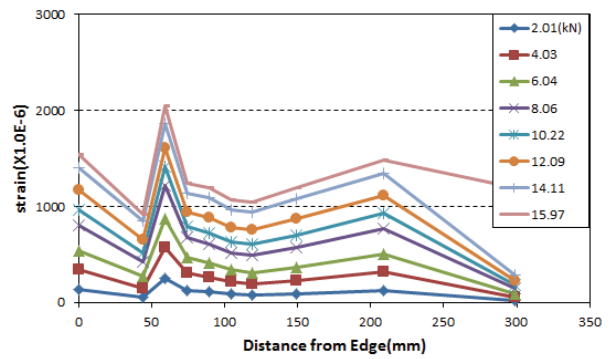


Fig. 5 Failure Shape of GF11, GF21, GF31 and CF11- NOCON

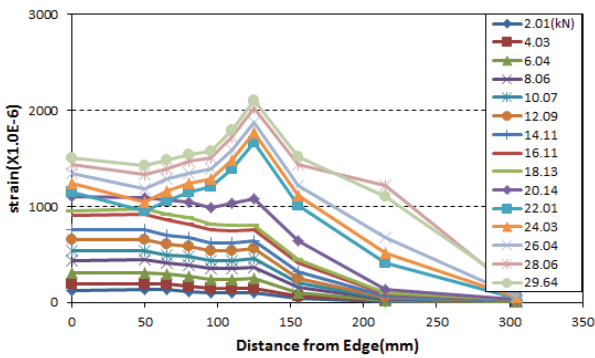




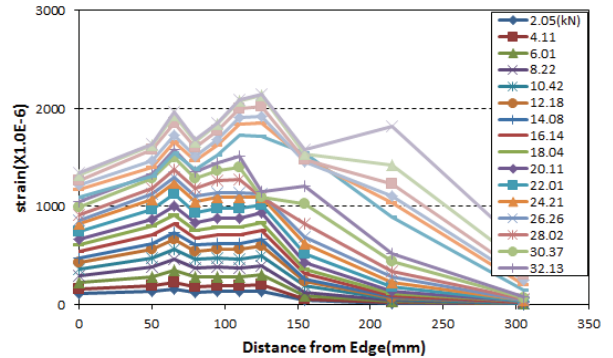
(GF11)



(GF21)



(GF31)



(CF11)

Fig. 6 Local Strain Distribution of GF11, GF21, GF31 and CF11- NOCON

본 연구에서 변형률을 일정한 간격을 두고 측정 하였으므로, 국부적으로 인접한 두 변형률계이지 사이의 국부 부착응력을 다음과 같이 구할 수 있고 이를 통해 국부 부착 전단응력의 변화를 살펴 볼 수 있다.

$$\tau_{i,i+1} = tE \frac{\epsilon_i - \epsilon_{i+1}}{x_{i+1} - x_i} \quad (2)$$

여기서  $\tau_{i,i+1}$ 는  $G_i$ 와  $G_{i+1}$  사이의 평균 부착응력,  $t$ 와  $E$ 는 FRP 판의 두께와 탄성계수,  $\epsilon_i$ 는  $G_i$  위치에서의 변형률,  $x_i$ 는  $G_i$  위치의 좌표 값이다.

$G_i$  위치에서의 슬립은 콘크리트의 변형을 무시하면  $G_i$  위치와 인접한  $G_{i+1}$  위치 사이의 FRP 판의 신장량과 같다. 그러므로 슬립은 다음과 같은 식으로 표현이 가능하다.

$$s(x) = s(0) + \int \epsilon(x) dx \quad (3)$$

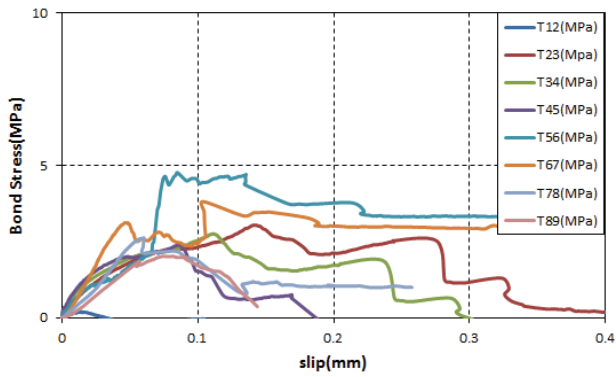
여기서,  $s(x)$ ,  $\epsilon(x)$ 는  $x$  위치에서의 슬립 및 FRP 변형률이다.

본 연구에서 변형률을 일정한 간격을 두고 측정 하였으므로 각각 인접한 두 지점 사이의 슬립량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

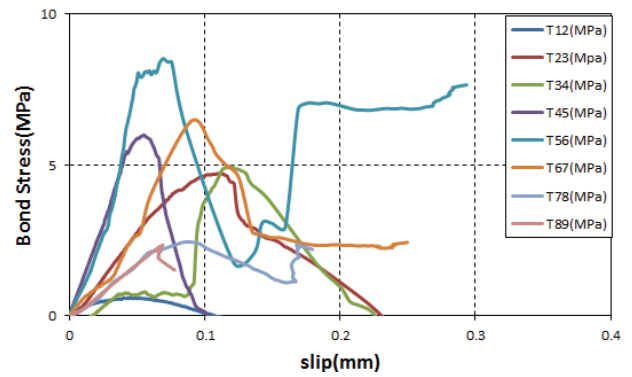
$$s_{i,i+1} = s_{i+1,i+2} + (\epsilon_i + \epsilon_{i+1}) \frac{(x_{i+1} - x_i)}{2} \quad (4)$$

여기서  $s_{i,i+1}$ 는  $i$ 와  $i+1$  사이의 슬립,  $\epsilon_i$ 는  $i$  위치에서의 변형률,  $x_i$ 는  $i$  위치의  $x$  좌표값을 나타낸다.

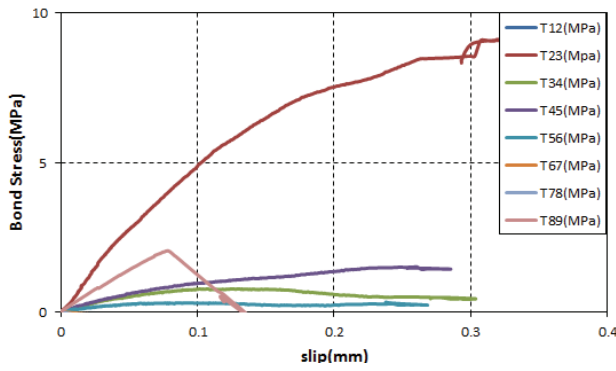
변형률계이지의 각각의 구간에서 위 식에 의해 국부 부착응력과 슬립과의 관계를 유도 할 수 있다. 위 식의 관계를 이용하여 각각의 구간에서 국부 부착응력 및 슬립 곡선을 그리면 Fig. 7과 같으며, 그림에서 보는 바와 같이 각 구간별로 다소 큰 편차를 보여주고 있으나, 기존 보강공법에 대한 실험결과에서도 유사한 편차를 보여주고 있다. 또한 특히 GF21 실험시편의 경우 첫 번째 경우와 두 번째 경우가 상당한 차이를 보여 주고 있는데, 다른 경우와 비교하면 첫 번째 실험에 다소 문제가 있는 것으로 판단되며, GF21 실험시편의 경우 두 번째 실험결과를 위주로 분석하였다.



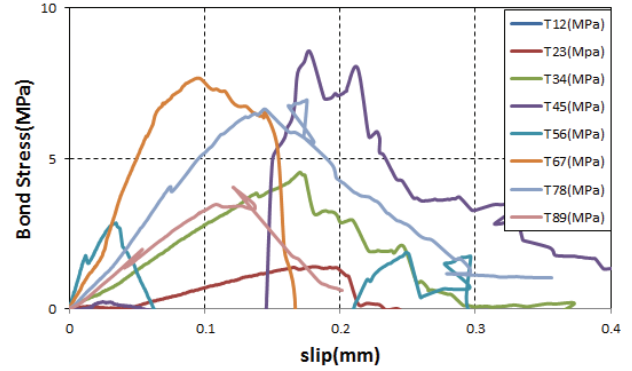
(GF11-1)



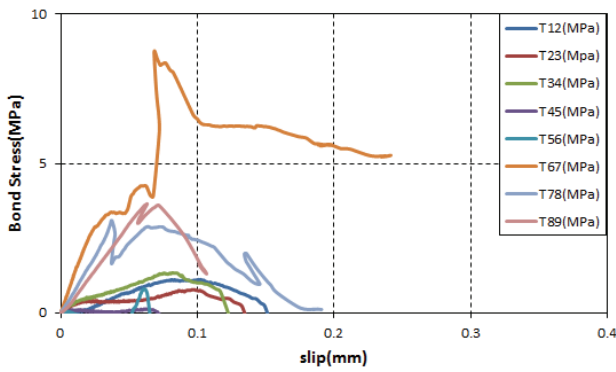
(GF11-2)



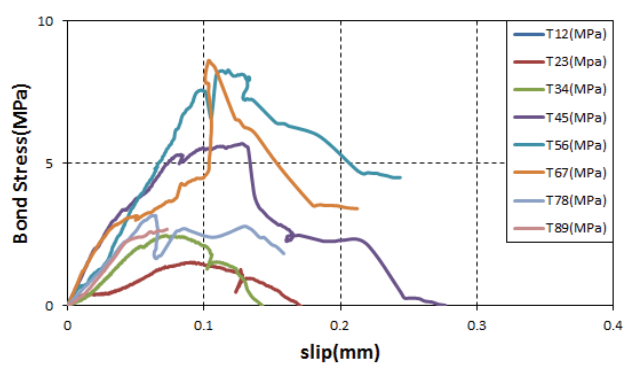
(GF21-1)



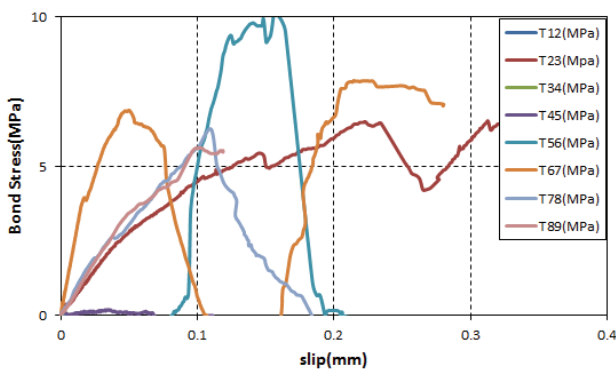
(GF21-2)



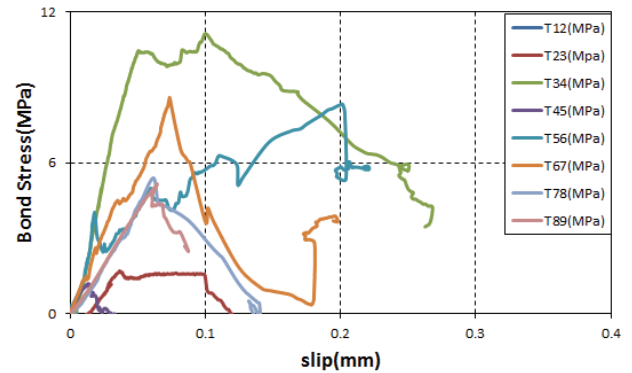
(GF31-1)



(GF31-2)



(CF11-1)



(CF11-2)

Fig. 7 Bond Stress-Slip Relationship of GF11, GF21, GF31 and CF11- NOCON

### 3.1.3 인발력-슬립 관계

FRP 판에 작용하는 인발력 (pullout force)은 평형식과 FRP 판에 부착한 변형률게이지의 값을 가지고 계산할 수 있다. 그러나 FRP의 경우 하중이 재하됨에 따라 하향방향으로 휘어지므로 FRP 판 하부에 부착한 변형률 게이지의 값은 실제보다 과도하게 변형하게 되며, 상부의 경우는 실제보다 작은 값을 나타내게 된다. 본 실험의 경우 변형률게이지를 하단에 부착하였으므로 실제보다 큰 변형률을 나타내게 되므로, 본 연구에서는 평형식을 이용해 인발력을 계산하였다. 대 변형이 발생할 경우 처음조건과 달라질 수 있으나 본 실험의 경우 변형이 미소하므로 이의 영향은 무시할 수 있다고 판단하였다. FRP 판에 인발력이 작용함에 따라 FRP 판과 콘크리트 사이에 국부 부착응력이 발생하게 된다. 하중이 증가함에 따라 FRP 판과 콘크리트 사이의 부착 시작점에서 국부부착응력이 점차 증가하다 최고 국부 부착응력에 도달한 후 FRP 판과 타설 콘크리트 사이의 부착면에 미세 균열이 발생하고 이로 인해 국부 부착응력이 감소되면서 인접 지역으로 최고 국부 부착응력 값이 전이되어 최종적으로 전체 부착면이 파괴에 도달했다. 슬립량의 계산은 식 (4)에 의해 산정 할 수 있으며 이를 Fig. 8에 수록하였다.

### 3.2 고성능시멘트계복합체 (RFCON)의 경우

#### 3.2.1 국부 변형률 분포

고성능시멘트계복합체 (RFCON)의 국부 변형률 분포는 일반콘크리트 (NOCON)와 비슷한 양상을 나타내고 있으며, 실험시편 별 변형률 분포는 다소 편차가 있으나 그래프의 경향은 비슷하게 나타났다. 변형률의 분포형태는 콘크리트의 영향보다 FRP 판의 영향이 큰 것으로 나타났다. 각각의 실험시편별 경향은 비슷하게 나타났으므로 Fig. 9에 첫 번째 시편의 결과에 대해서만 수록하였다.

#### 3.2.2 국부 부착응력-슬립관계

고성능시멘트계복합체 (RFCON)에서 유리강화섬유 GFRP1의 경우 하중 초기 단계에서 부착응력이 최대 값을 나타내다가 부착응력이 점차 감소하면서 파괴되는 형상을 보여주었고, GFRP2의 경우 부착응력이 처음부터 서서히 증가하면서 최대 부착응력에서 파괴되는 형상을 나타낸다. 탄소강화섬유 CFRP1은 시작점에서 최대 부착응력을 보이고 이후 계속 하중이 증가함에 따라 선단부분의 미세 균열과 이로 인한 선단부분 부착응력의 감소와 인접부분으로 최대 부착응력 값의

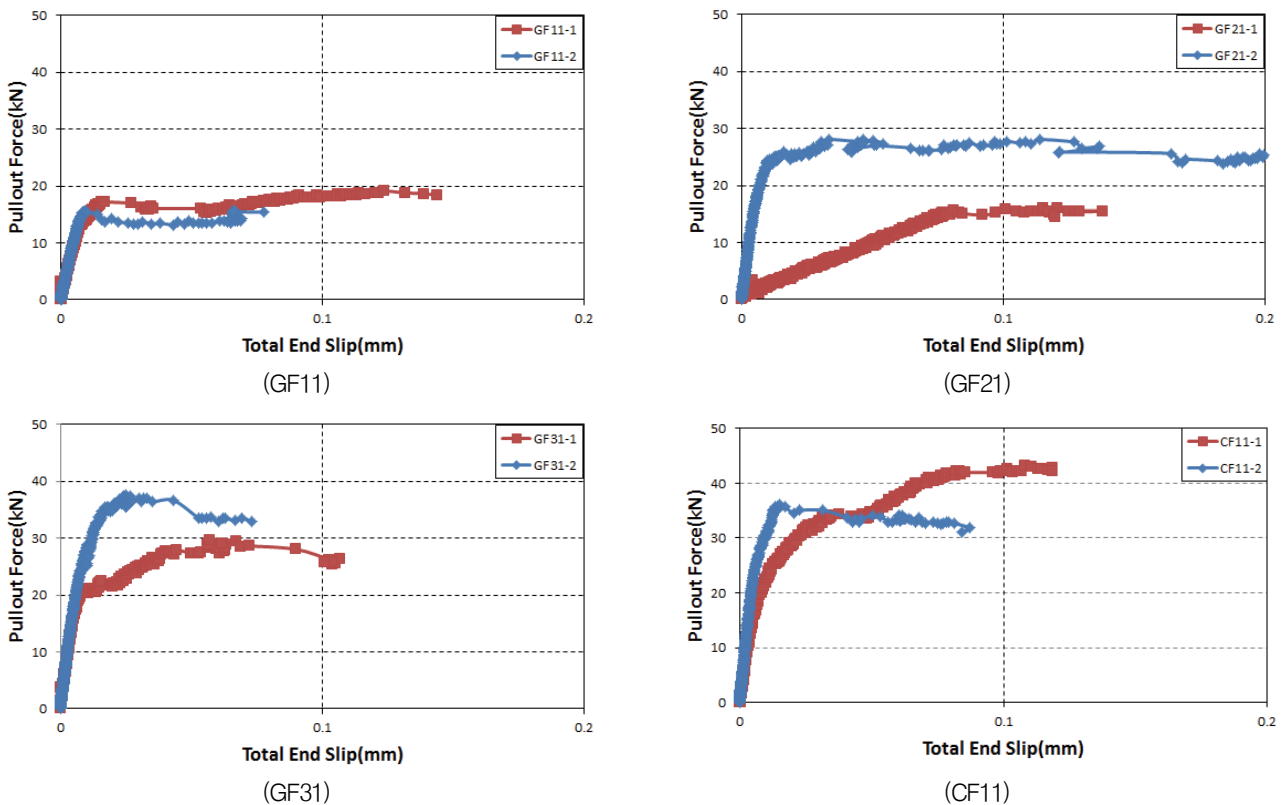


Fig. 8 Pullout Force–Total Slip Relationship of GF11, GF21, GF31 and CF11– NOCON

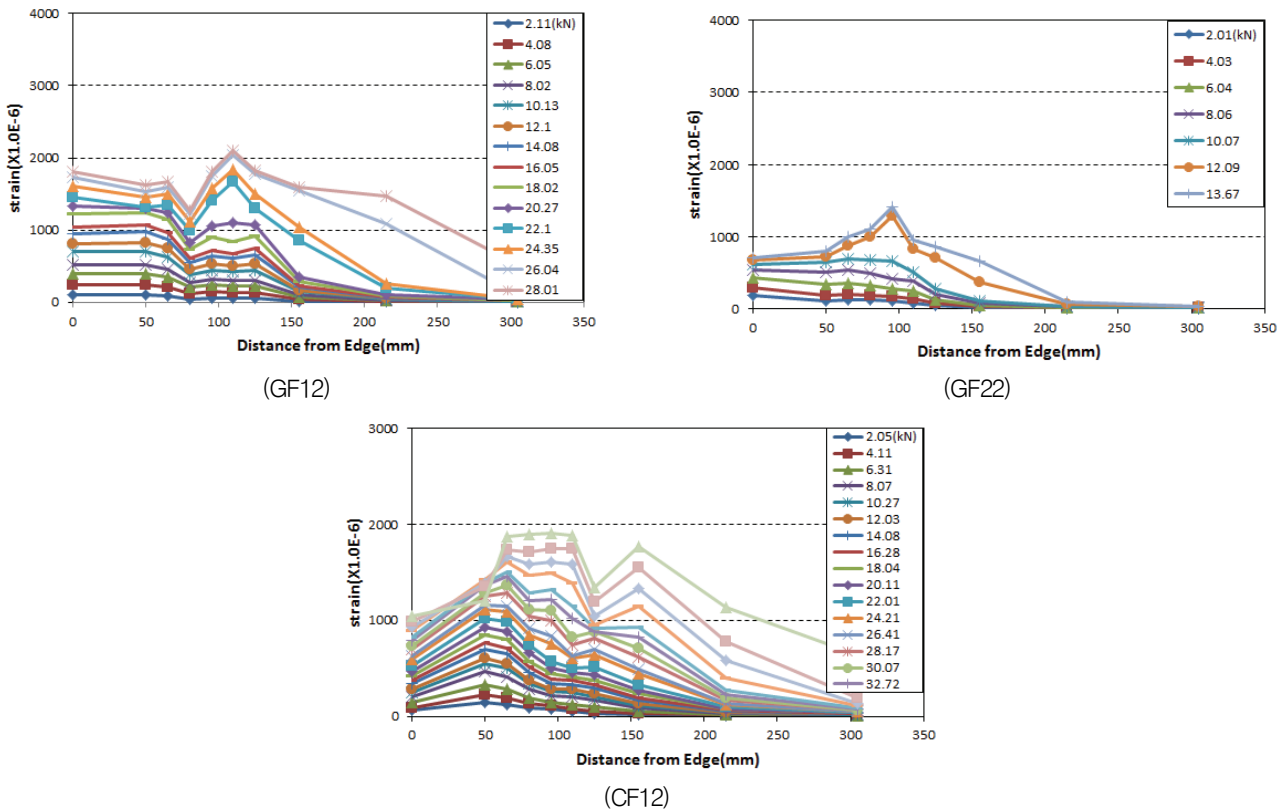


Fig. 9 Local Strain Distribution of GF12, GF22 and CF12-RFCON

전이현상을 볼 수 있었다 (Fig. 10).

### 3.2.3 인발력-슬립 관계

고성능시멘트계복합체 (RFCON)에서 유리강화섬유 GFRP의 계열에서는 콘크리트와 에폭시 사이에서 파괴가 일어났으나, 점진적 슬립의 전이 보다는 전체적으로 급격히 파괴되는 양상을 보여주고 있다. 반면, 탄소강화섬유 CFRP의 경우에는 슬립이 점차적으로 전이되면서 최종적으로 전체 부착면이 파괴에 이르는 형태를 보여주었다. 슬립량의 계산은 식 (4)에 의해 산정 할 수 있으며, Fig. 11로 나타내었다.

### 3.3 계면 파괴에너지 및 평균 부착응력

국부 부착응력-슬립 곡선의 면적으로 표현 될 수 있는 계면 파괴에너지 ( $G_f$ , interfacial fracture energy)는 부착특성을 나타내는 중요한 변수 중에 하나로서 부착 강도 및 부착면의 파괴 매커니즘 특성을 좀더 명확히 알 수 있게 하는 유용한 변수이다 (Teng et al., 2002; Oehlers and Seracino, 2004).  $G_f$ 는 콘크리트의 인장파괴 매커니즘을 잘 표현하는 값으로 이미 알려져 있으며 FRP 판과 콘크리트 사이의 계면

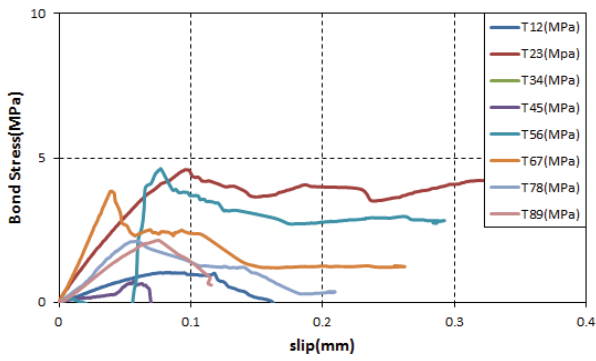
파괴에너지  $G_f$ 는 식 (5)와 같이 표현 될 수 있다 (Taljsten, 1997; Teng et al., 2002).

$$G_f = \frac{P^2}{2Etb^2} \quad (5)$$

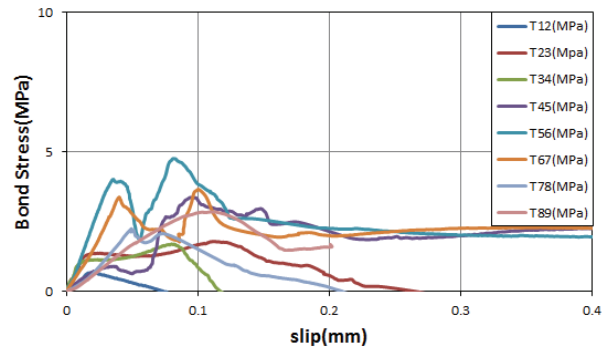
여기서 P는 FRP 판에 작용하는 인발력으로 유효부착길이 이상의 부착면을 갖는 경우 부착면의 면적에 상관없이 일정한 값으로 알려져 있다. b는 FRP 판의 폭, E와 t는 각각 FRP 판의 탄성계수와 두께를 나타낸다. 각각의 실험에서 측정된 인발력과 식 (5)에 의해 계산된 계면 파괴에너지는 Table 8과 같다.

NOCON의 경우 계면파괴에너지는 0.24~0.44kN/m의 분포를 보여주고 있는데 GFRP1의 경우 0.24kN/m로 다소 작은 값을 보여주고 있다. GFRP2, 3 및 CFRP1의 경우 0.44kN/m로 거의 유사한 값을 보여주고 있다. 또한 RFCON의 경우 0.36~0.52kN/m의 분포를 보여주고 있는데 GFRP2의 첫 번째 실험을 제외하면 거의 유사한 값을 보여주고 있다. RFCON의 경우 일반콘크리트에 비해 다소 큰 계면파괴에너지 값을 보여주고 있다.

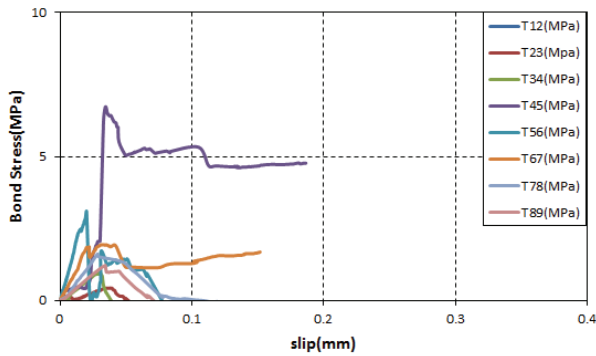




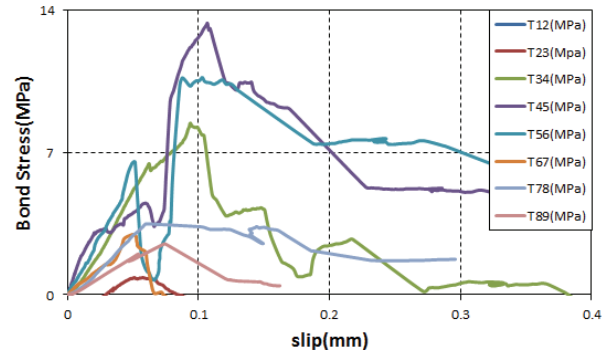
(GF12-1)



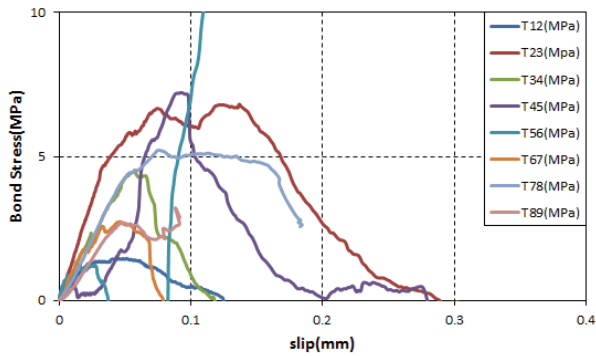
(GF12-2)



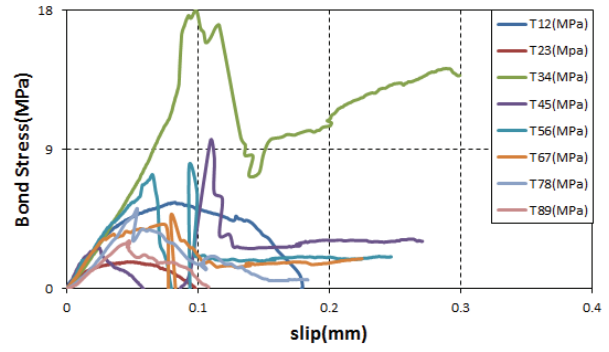
(GF22-1)



(GF22-2)



(CF12-1)



(CF12-2)

Fig. 10 Bond Stress-Slip Relationship of GF12, GF22 and CF12- RFCON

부착응력 결과분석에서 G1 게이지의 경우 FRP 판이 휘어지는 시작부분으로 응력이 집중되는 현상이 발생하며, G7게이지 이상의 경우는 등 간격이 아니며 앞부분의 급격한 분리 및 일정부분 분리 후 잔존부착력이 적은 관계로 G2~G6위치에서의 측정값을 가지고 부착거동 특성을 분석하였다. 각 시험체의 부착응력은 국부적인 변형이 집중되는 곳을 제외한 최고값을 기준으로 산정하였으며 4개 구간 전체를 평균값과 부착응력-슬립 곡선에서 최대응력 및 기울기 등에서 특이한 경우를 제외한 결과는 Table 9와 Table 10에 자세히 나타내었다.

일반콘크리트의 경우 GF11의 국부 부착응력은 3.22~6.04MPa로 나타났고, GF21의 국부 부착응력은 2.25~3.17MPa이 나타났으며, GF31과 CF11의 국부 부착응력은 각각 0.76~4.32MPa, 3.77~4.32MPa로 나타났다. 부착응력-슬립 곡선에서 최대응력 및 기울기 등에서 특이한 경우를 제외한 경우의 평균값은 GF11의 경우 3.22~5.35MPa이고 GF21의 경우 1.63~3.69MPa이며 GFRP3의 경우 1.06~4.32MPa, CFRP1의 경우 5.20~5.43MPa의 부착응력이 나타났다. FRP의 종류에 따른 영향은 본 실험 결과로 살펴볼 때 동일한 유리섬유 FRP내의 영향은 크지 않은 것으로 판단되며, FRP가 CFRP로 변경됨에 따른 영향은

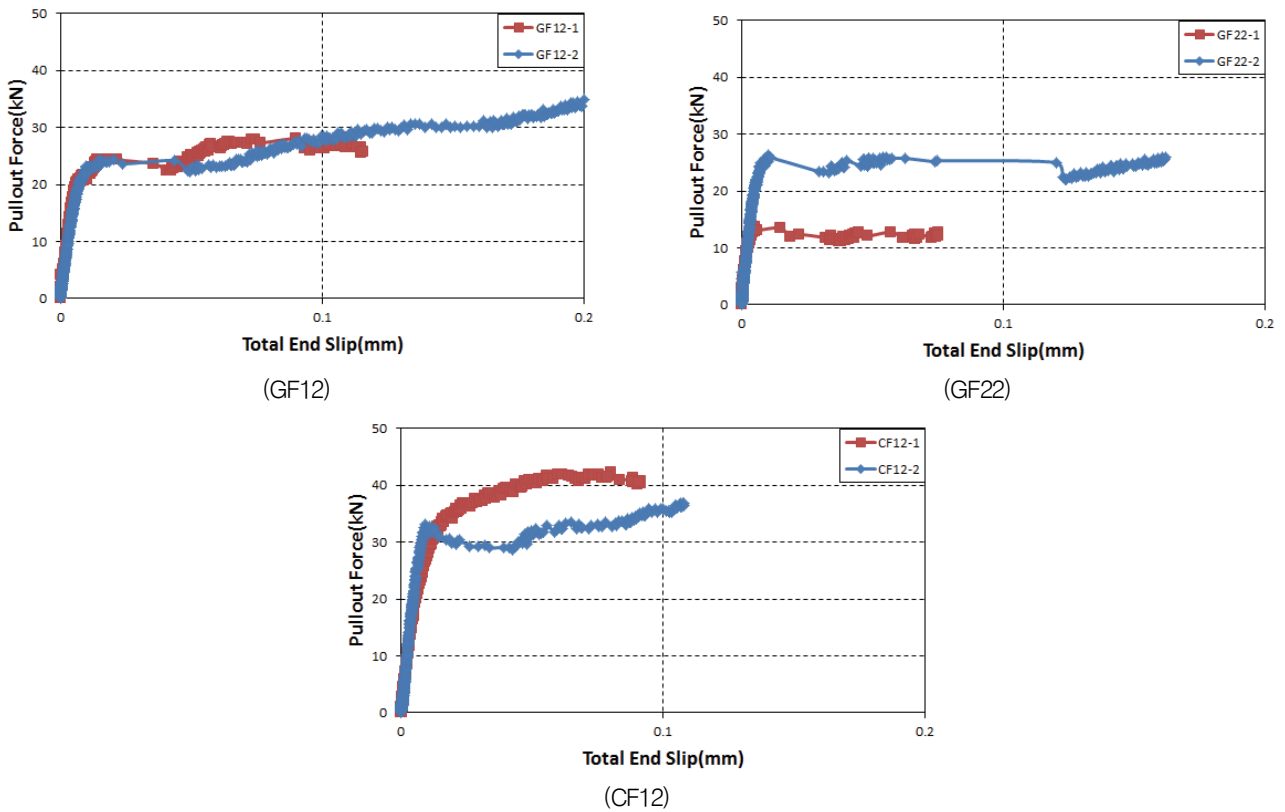


Fig. 11 Pullout Force–Total Slip Relationship of GF12, GF22 and CF12– RFCON

Table 8 Interfacial Fracture Energy

Specimen	Concrete	FRP	Pullout force (kN)	Fracture energy $G_f$ (kN/m)	Average pullout force (kN)	Average fracture energy $G_f$ (kN/m)
GF11	NOCON	GFRP1	17.21	0.26	16.45	0.24
			15.68	0.21		
GF21	NOCON	GFRP2	15.83	0.21	21.95	0.43
			28.06	0.65		
GF31	NOCON	GFRP3	21.87	0.23	29.71	0.46
			37.55	0.68		
CF11	NOCON	CFRP1	34.33	0.41	35.21	0.44
			36.09	0.46		
GF12	RFCON	GFRP1	24.49	0.52	24.42	0.52
			24.35	0.52		
GF22	RFCON	GFRP2	13.67	0.15	20.00	0.36
			26.33	0.57		
CF12	RFCON	CFRP1	42.25	0.63	37.50	0.51
			32.75	0.38		

큰 것으로 판단된다.

RFCON의 경우 GF12의 국부 부착응력은 2.00~2.50MPa로 나타났으며, GF22와 CF12의 국부 부착응력은 2.80~5.10MPa, 3.33~7.44MPa로 나타났다. 특이한 경우를 제외한 경우의 평균 값은 GF12는 2.36~4.60MPa로 나타났으며, GF22는 4.91~

6.51MPa로 나타났고 CF12에서는 3.91~5.60MPa로 나타났다. RFCON의 경우 일반콘크리트와 달리 섬유 종류에 따른 FRP 판의 영향은 크지 않은 것으로 판단되며, 이는 RFCON의 특성, 즉 인성 및 균열분포에 연관된 것으로 사료된다.

Table 9 Average Bond Stress between Interval (MPa)–NOCON

Specimen		Bond stress (MPa)				Average bond stress	Modified bond stress*
		G2–G3	G3–G4	G4–G5	G5–G6		
GF11	No.1	3.05	2.77	2.42	4.65	3.22	3.22
	No.2	4.71	4.94*	5.98	8.52*	6.04	5.35
GF21	No.1	9.15*	1.76	1.50	0.30*	3.17	1.63
	No.2	1.39*	4.53	0.22*	2.85	2.25	3.69
GF31	No.1	0.77	1.35	0.13*	0.79*	0.76	1.06
	No.2	1.53	2.46	5.70	7.58	4.32	4.32
CF11	No.1	5.43	0.08*	0.18*	9.38*	3.77	5.43
	No.2	1.68*	10.41	1.18	4.02	4.32	5.20

\*in case of exclusion

Table 10 Average Bond Stress Between Interval (MPa)–RFCON

Specimen		Bond stress (MPa)				Average bond stress	Modified bond stress*
		G2–G3	G3–G4	G4–G5	G5–G6		
GF12	No.1	4.60	0.02*	0.74*	4.63*	2.50	4.60
	No.2	1.37	1.70	0.90*	4.02	2.00	2.36
GF22	No.1	0.44*	0.96*	6.73	3.08	2.80	4.91
	No.2	0.85*	8.46	4.52	6.56	5.10	6.51
CF12	No.1	6.66	4.53	0.88*	1.23	3.33	5.60
	No.2	1.73	18.00*	2.64	7.37	7.44	3.91

\*in case of exclusion

#### 4. 결론

본 연구에서는 영구거푸집 및 인장구조재로 활용한 FRP 판의 종류에 따른 콘크리트와의 부착응력에 대해 실험을 수행하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

FRP에 따른 파괴형상으로 유리섬유 FRP 판의 경우 각 부재별 대부분의 파괴형상은 FRP 판과 에폭시 사이의 파괴와 FRP 판과 콘크리트 사이의 파괴가 혼합된 파괴형상을 보여 주고 있다. 탄소섬유 FRP 판의 경우에는 유리섬유 FRP 판에 비해 FRP 판과 에폭시의 부착이 잘 된 것으로 나타났으며 FRP 판과 에폭시 사이의 파괴도 나타났지만 대부분의 파괴형상은 콘크리트와 에폭시 층 사이의 파괴가 발생했다.

일반콘크리트의 경우 계면파괴에너지는 0.24~0.44kN/m의 분포를 보여주고 있고, RFCON의 경우 0.36~0.52kN/m의 분포를 보여주고 있으며, RFCON의 경우 일반콘크리트에 비해 다소 큰 계면파괴에너지 값을 나타내고 있다. 동일한 콘크리트 내에서 FRP 판의 종류에 대한 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.

일반콘크리트의 경우 국부 부착응력은 GF11의 경우 3.22~

5.35MPa이고 GF21의 경우 1.63~3.69MPa이며 GFRP3의 경우 1.06~4.32MPa, CFRP1의 경우 5.20~5.43MPa의 부착응력이 나타났다. FRP의 종류에 따른 영향은 본 실험결과로 살펴볼 때 동일한 유리섬유 FRP내의 영향은 크지 않은 것으로 판단되며, FRP 판의 종류에 따른 영향은 큰 것으로 판단된다. RFCON의 경우 국부 부착응력은 GF12는 2.36~4.60MPa, GF22는 4.91~6.51MPa, CF12에서는 3.91~5.60MPa로 나타났다. RFCON의 경우 일반콘크리트와 달리 섬유 종류에 따른 FRP 판의 영향은 크지 않은 것으로 판단되며, 이는 RFCON의 특성, 즉 인성 및 균열분포성에 연관된 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

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

#### References

1. Bank, L. C., Oliva, M. G., Bae H. U., and Bindrich, B. V. (2010), Hybrid Concrete and Pultruded-Plank Slabs for Highway and Pedestrian Bridges, *Journal of Construction and Building Materials*, 24(4), 552-558.
2. Berg, A. C., Bank, L. C., Oliva, M. G., and Russell, J. S. (2006), Construction and Cost Analysis of an FRP Reinforced Concrete Bridge Deck, *Construction and Building Materials*, 20(8), 515-526.
3. Cho, K. H., Cho, J. R., Lee, Y. H., and Kim, B. S. (2004), Fracture Mechanics Based Bond-Slip Models for the Interface between FRP and Concrete, *Proceeding of Conference on Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, 24(4), 653-661.
4. Dai, J., Ueda, T., and Sato, Y. (2005), Development of the Nonlinear Bond Stress-slip Model of Fiber Reinforced Plastics Sheet-Concrete Interfaces with a Simple Method, *Journal of Composites for Constructions*, 9(1), 52-62.
5. Dieter, D. A., Dietsche, J. S., Bank, L. C., Oliva, M. G., and Russell, J. S. (2002), Concrete Bridge Decks Constructed with FRP Stay-in-place Forms and FRP Grid Reinforcing, *Journal of the Transportation Research Record*, 1814, 219-226.
6. Ji, H. S., Son, B. J., and Chang, S. Y. (2001), An Experimental Study on the Behavior of Composite Materials Bridge Decks for Use in Deteriorated Bridge Decks Replacement, *Journal of Steel Structures, KSSC*, 13(6), 631-640.
7. Kitane, Y., Aref, A. J., and Lee, G. C. (2004), Static and Fatigue Testing of Hybrid Fiber-Reinforced Polymer-Concrete Bridge Superstructure, *Journal of Composites for Construction, ASCE*, 8(2), 182-190.
8. Oehlers, D. J., and Seracino, R. (2004), Design of FRP steel

- plated RC Structures, Elsevier, UK.
9. Reising, R. M. W., Shahrooz, B. M., Hunt, V. J., and Helmicki, A. J. (2004b), Performance Comparison of Four Fiber-Reinforced Polymer Deck Panels, *Journal of Composites for Construction, ASCE*, 8(3), 265-274.
  10. Reising, R. M. W., Shahrooz, B. M., Hunt, V. J., Neumann, A. R., Helmicki, A. J., and Hastak, M. (2004a), Close Look at Construction Issues and Performance of Four Fiber-Reinforced Polymer Composite Bridge Decks, *Journal of Composites for Construction, ASCE*, 8(1), 33-42.
  11. Shao, Y., Wu, Z. S., and Bian, J. (2005), Wet-bonding between FRP Laminates and Cast-in-place Concrete, *Int. Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures, IIFC*, Hong Kong.
  12. Taljsten, B. (1997), Defining Anchor Lengths of Steel and CFRP Plates Bonded to Concrete, *Int. Journal of Adhesion and Adhesives*, 17, 319-327.
  13. Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., and Lam, L. (2002), FRP Strengthened RC Structures, John Wiley & Sons, England.
  14. Yoo, S. W., and Bae, H. U. (2007), Bond-Slip Behavior between Cast-in-place Concrete and FRP Plank Used as Permanent Formwork and Tensile Reinforcement, *Journal of Korea Concrete Institute*, 27(1), 69-77.
  15. Yun, H. D., Yang, L. S., Han, B. C., Fukuyama, H., and Suwada, H. (2004), State-of-the-art of Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites - Part1: Manufacture Technology and Structural Performance, *Journal of Korea Concrete Institute*, 16(5), 49-58.

Received : 08/06/2014  
 Revised : 10/30/2014  
 Accepted : 01/30/2015

## 요 지

최근 들어 FRP 판을 영구 거푸집 및 주요 인장보강재로 활용하기 위한 새로운 콘크리트 교량 바닥판 시스템 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 영구거푸집과 인장 보강재로의 병행이용은 기존의 콘크리트 바닥판 보다 공사비와 공사기간을 절감 할 수 있다. 본연구에서는 영구거푸집 및 주요인장재로 활용한 FRP 판의 종류에 따른 현장타설 콘크리트와 부착응력에 대해 실험을 수행하였다. 부착성능 평가를 실시하였고, 부착특성을 나타내는 중요한 변수중에 하나로서 부착 강도 및 부착면의 파괴 메커니즘 특성을 알 수 있는 계면 파괴에너지를 나타내었다. 일반콘크리트에서 계면 파괴에너지는 GF11의 경우 0.24kN/m이고, GF21의 경우에는 0.43kN/m, GF31과 CF11의 경우에는 각각 0.46kN/m와 0.44kN/m로 나타났고, RCON에서는 GF12의 경우 0.52kN/m, GF22와 CF12에서는 각각 0.36kN/m와 0.51kN/m로 나타났다.

**핵심 용어** : FRP 판, GFRP, CFRP, 영구거푸집, 부착응력, 계면 파괴에너지