

# 영구거푸집으로 활용한 탄소섬유 FRP 판과 DFRCC 사이의 부착응력에 관한 실험적 연구

박찬영\* · 유승운\*\*

Park, Chan-Young\*, Yoo, Seung-Woon\*\*

## An Experimental Study for Bond Stress between DFRCC and Carbon FRP Plank Used as a Permanent Formwork

### ABSTRACT

Recently FRP of carbon fibers is utilized as a repairing and reinforcing material for concrete structures. In this study, the bond performance between CFRP planks and ductile fiber reinforced cementitious composites was evaluated in order to develop a new system of concrete bridge deck to take advantage of the FRP planks of carbon fiber using as a permanent formwork. In order to strengthen the bonding between the FRP and cast-in-place concrete, an epoxy resin circulated in the market generally was fitted with a silica sand. The bond stress of ordinary concrete appeared in 2.11~5.43MPa and the bond stress of ductile fiber reinforced cementitious composites DC1 (RF4000) and DC2 (PP) respectively were 3.91~5.60MPa, 2.92~5.21MPa and the average bond stress of DC3 (RF4000+RSC15) and DC4 (PP+RSC15) were 4.80~5.58MPa, 5.57~5.89MPa.

**Key words** : CFRP, Ductile fiber reinforced cementitious composites, Permanent formwork, Bond stress, Slip

### 초록

최근 들어 탄소섬유 FRP가 보수/보강재로 많이 활용되고 있다. 본 연구에서는 탄소섬유 FRP 판을 영구 거푸집으로 활용하여 새로운 콘크리트 교량 바닥판 시스템을 개발하기 위하여 CFRP판과 고인성 섬유보강 콘크리트 사이의 부착성능에 대한 평가를 실시하였다. 현장타설 콘크리트와 CFRP 간에 부착을 높이기 위하여 시중에 유통되는 에폭시를 사용하여 규사를 부착하였다. 일반콘크리트의 부착응력은 2.11~5.43MPa으로 나타났고, 고인성 섬유보강 콘크리트인 DC1 (RF4000)과 DC2 (PP)의 부착응력은 각각 3.91~5.60MPa, 2.92~5.21MPa이며, DC3 (RF4000+RSC15)의 부착응력은 4.80~5.58MPa, DC4 (PP+RSC15)의 평균 부착응력은 5.57~5.89MPa으로 나타났다.

**검색어** : CFRP, DFRCC, 영구거푸집, 부착응력, 슬립

## 1. 서론

국내에서 FRP (fiber reinforced polymer)재료가 건설재료로 인식되고 관심을 갖기 시작한 것은 비교적 최근의 일이다. 캐나다, 미국, 일본 등 선진국에서는 이 분야에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있으나, 국내 건설 분야에서 FRP는 주로 구조물의 보수/보강 등의 제한적인 용도로만 사용되고 있다(Deskovic et al., 1995; Dieter et al., 2002; Shao et al., 2005). FRP 재료가 장점이 많음에도

\* 가톨릭관동대학교 토목공학과 대학원 (Catholic Kwandong University · neverdud@naver.com)

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

Received June 27, 2014/ revised August 3, 2014/ accepted October 15, 2014

불구하고 비용이 높고 취성적 거동을 보이며 탄성계수가 낮은 점 등으로 인하여 건설 분야에서 사용되기에는 많은 연구와 검토가 필요하다(Bank et al., 2010).

선진국의 경우에는 바닥판 연구의 중요성을 인식하고 이미 1980년대부터 재료적인 측면과 구조적인 측면에서 새로운 형식의 바닥판 시스템을 개발하고자 하는 연구를 지속적으로 노력하고 있다(Berg et al., 2006; Lorenzis et al., 2001). 미국의 경우에는 FHWA가 중심이 된 국가 연구개발 사업을 통해 FRP판/FRP보강근/FRP텐던 등을 콘크리트 바닥판과 결합하는 고내구성 바닥판 개발 등에 대한 연구 및 시험 시공을 지속적으로 추진하고 있다. 캐나다의 경우에도 콘크리트 내부에는 철근을 배근하지 않는 고내구성 콘크리트 바닥판을 개발하고 이의 실용화 단계에 접어들고 있다(Cheng et al., 2005).

Kitane et al. (2004)은 18.3m의 단순교로 설계된 FRP-콘크리트 복합된 상부구조의 5배 축소모델에 대한 정적 및 피로시험을 실시하였다. 3개의 사다리꼴 GFRP (glass fiber reinforced polymer) 박스 단면은 거더와 박스 판을 하나의 상부구조물로 만들기 위해 함께 부착하였으며, 콘크리트 층은 사다리꼴 내부의 박스 상단에 위치한다. 이 신개념은 초기비용을 줄이고 GFRP의 합성단면의 강도를 증가시키기 위해서 제안되었다. 정적파괴시험을 통하여 하중재하 시 국부적인 처짐은 L/480인 규정을 만족하였고 피로시험 시 하중재하범위는 0~17.1 kN, 진동수는 3Hz로 2백만 회 제한한 결과 5.9%의 강도 감소를 보여주었다.

Reising et al. (2004)은 4개의 다른 FRP 합성 바닥판을 207m의 5경간, 3차선 기존교량에 대해 시험 시공하여, 시공성, 적용성, 성능 등 예측되는 많은 장단점에 대하여 확인하였다. FRP-1은 중공 육각형 및 이중 사다리꼴로 구성된 단면을 사용하였고, FRP-2는 충전재로 직사각형 FRP 박스단면 내부를 채운 패널 구조를 사용하였고, FRP-3은 코아 내부를 충전한 합성형 허니컴 코아로 사용하였다. FRP-1, FRP-2, FRP-3의 패널은 높이 20cm, 길이 2.44m로 사용하였다. FRP-4는 FRP-콘크리트 합성 바닥판으로서 중공 정사각형 튜브와 콘크리트를 합성하여 패널의 높이 20cm, 길이 2.40m로 사용하였다.

FRP 판의 두께를 변화시키고, 섬유보강재로 강섬유를 사용한 섬유보강콘크리트와 FRP판과의 부착응력에 관한 연구가 실시되었다(Yun et al., 2007).

DFRCC (ductile fiber reinforced cementitious composites)에 대한 연구는 현재 미국을 선두로 하여 가장 활발한 연구가 진행 중이며 일본, 유럽이 그 뒤를 이어 현재까지 활발히 진행되고 있으나 국내는 아직 미비한 수준이다. 해외에서는 신소재에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 특히 보통 포틀랜드시멘트를 기본 결합재료로 하는 섬유복합재료의 경우, 미시간대학의 Li 교수 연구실

을 중심으로 진행되고 있는 ECC재료와 Naaman 교수에 의하여 개발된 강섬유, Torex 등이 대표적이다. 또한 이와 같이 개발된 재료를 다양한 공법과 구조물에 적용하고자 하는 연구가 진행되고 있는 실정이다. 이러한 재료의 특성은 1축 인장에 변형을 경화거동을 하는 것으로서 특히 내진부재, 기존 구조물의 보수/보강 등에 적용하였을 때에 구조물의 성능을 극대화할 수 있는 장점을 갖고 있는 것으로 보고하고 있다(Yun et al., 2004).

본 연구는 CFRP (carbon fiber reinforced polymer) 판을 연구거꾸집으로 활용한 새로운 콘크리트 교량 바닥판 시스템을 개발하기 위하여 CFRP 판과 고인성 섬유보강 콘크리트 사이의 부착응력에 대한 평가를 실시하였다.

## 2. 시험체 제작 및 부착응력 실험

### 2.1 고인성 섬유보강 시멘트 복합체 선정

사용된 섬유보강재는 PVA계열인 RF4000, RSC15, RECS100L, RFS400, KLON1000이며 PP계열의 PP-Macro를 사용하였고, 형태는 Fig. 1과 같다.

각각의 섬유보강재에 대한 물성은 Table 1과 같고 각각의 압축과 휨 인장강도를 측정하기 위한 시험체의 배합설계표는 Table 2와 같다.

고인성 섬유보강 콘크리트의 압축강도 및 휨 인장강도시험을 시행하였고, 그 결과 평균 최대 압축 강도는 22.64~41.17MPa이며, 휨 인장강도는 1.86~2.93MPa로 나타났다.

압축강도 실험의 경우 섬유보강재를 혼입 하였을 때 일반 콘크리트보다 압축강도는 증가하지 않은 결과를 보여주며, RF4000의 DF2 시편이 35.00MPa로 가장 높은 압축강도를 나타냈다. 반면 PP의 DF5 시편은 22.64MPa로 가장 낮은 압축강도를 나타냈다. 다른 섬유보강재에 비해 PP섬유는 물과 잘 섞이지 않아 압축강도가 낮게 나타난 것으로 판단된다. 휨 인장강도 실험은 DF6 시편이

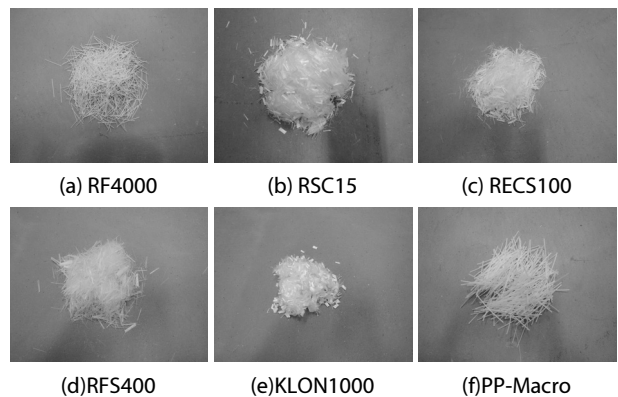


Fig. 1. Shape of Fiber

Table 1. Fiber Material Property

Fiber	Type	Color	Weight	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	2.6
DF3	RSC15	178.5	478.2	695.2	960.0	7.2	2.6
DF4	RSC15	178.5	478.2	695.2	960.0	9.6	2.6
DF5	PP	178.5	478.2	695.2	960.0	7.2	1.84
DF6	RSC15+RF4000	178.5	478.2	695.2	960.0	9.6	1.3+1.3
DF7	RSC15+PP	178.5	478.2	695.2	960.0	9.6	1.3+0.9
DF8	RECS100L	178.5	478.2	695.2	960.0	9.6	2.6
DF9	RFS400	178.5	478.2	695.2	960.0	9.6	2.6
DF10	KLON1000	178.5	478.2	695.2	960.0	12.0	2.6

Table 3. Compressive and Tensile Strength(MPa)

	NC	DC1	DC2	DC3	DC4
Compressive strength	44.44	34.69	29.45	35.33	32.73
Tensile strength	2.03	3.26	2.42	3.05	3.02

2.93MPa로 가장 높은 인장 강도가 나타났으나 DF2와 DF5의 실험체에서는 최대 휨 인장강도 이후의 인성이 가장 우수하게 나타났다. DF2 실험체와 DF5 실험체의 섬유보강재의 길이가 가장 길기 때문에 인성이 가장 우수하게 나타난 것으로 판단되며 길이가 짧을수록 인성이 낮은 결과를 나타냈다.

본 실험에서는 인성이 가장 우수하게 나타난 DF2, DF5, DF6, DF7을 선별하여 각각 DC1, DC2, DC3, DC4로 명명하여 실험을 진행하였다.

## 2.2 실험개요

본 시험은 교량 바닥판 시스템의 부착거동을 가장 유사하게 표현한다고 생각되는 보휨실험(*beam bending test*) 방법으로 실험하였다(Yoo and Bae, 2007).

압축 및 휨 인장강도 실험결과 압축강도는 29.45~44.44MPa,

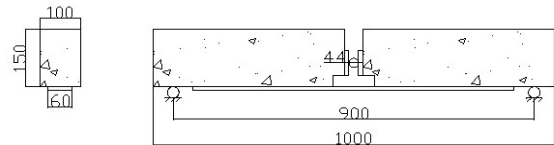


Fig. 2. Shape and Dimensions of Test Specimen(mm)

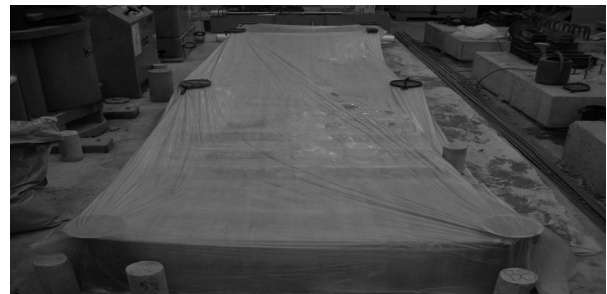


Fig. 3. Preparation of Test Specimen

휨 인장강도는 2.03~3.26MPa이며 상세한 결과는 Table 3에 수록하였다.

## 2.3 부착실험 시편 제작

본 실험에 사용한 시편은 길이 1000mm, 100x150mm단면을 사용하였고, 자세한 형상과 치수는 Fig. 2와 같으며, 실험변수는 6가지 종류로 각각 2개씩 총 12개의 실험시편을 제작하였다. CFRP 판과 타설 섬유보강 콘크리트의 부착은 한쪽면만 하였고, 반대편 쪽은 앵커를 이용하여 고정시켰다.

이와 같이 한쪽을 고정하여 시험하는 방법은 기존 구조물의 보수/보강공법의 부착실험에도 유사하게 이용하고 있는 방법이다. 사용한 CFRP 판의 기계적 성질은 Table 4와 같다.

실험시편의 제작 순서는 먼저 CFRP 판을 폭 60mm, 길이 800mm로 절단 후 CFRP 판에 에폭시를 도포한 후 C12시편에는 2~4mm골재를 부착하였고, 그 외의 시편에는 4~7mm골재를 그 위에 살포 하였다. CFRP 판 표면은 별다른 처리 없이 먼저만 제거 후 공장에서 생산된 상태 그대로를 이용하여 S사의 에폭시를

사용하여 골재를 부착하였고, 완성된 CFRP 판을 거푸집으로 하여 일반 콘크리트 및 고인성 섬유보강 콘크리트를 이용하여 실험시편을 제작 하였다.

2.4 부착파괴 실험 및 계측

실험시편은 28일 일반양생 후 실험을 수행하였다. 데이터는 Fig. 4과 같이 CFRP 판에 부착한 전기저항식 변형률게이지와 LVDT 그리고 로드셀을 통하여 계측하였다. 첫 번째 게이지, G0은 CFRP 판의 중앙부분, 즉 CFRP 판과 콘크리트가 부착되지 않은 중앙 지점에 설치하였고, CFRP 판과 콘크리트 부착 시작점엔 G1을 설치하였고 그 후 G2~G6은 15mm간격으로 설치하였으며 G7은 30mm, G8은 60mm, G9는 90mm간격으로 설치하였다. LVDT를 이용하여 G0 위치에서 시편의 처짐에 대한 변위를 계측

Table 4. Material Property of CFRP

FRP	Type	Thickness (mm)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
CFRP	Carbon	2.4	3000	165.0

Table 5. Classification of Test Specimen

Specimen	Concrete	FRP	No.	Sand
C11	NC	CFRP	2	4~7mm
C12	NC	CFRP	2	2~4mm
C13	DC1	CFRP	2	4~7mm
C14	DC2	CFRP	2	4~7mm
C15	DC3	CFRP	2	4~7mm
C16	DC4	CFRP	2	4~7mm

Table 6. Mechanical Property 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	18.3



Fig. 4. Test Setup

하였다. 자세한 변형률게이지 부착은 Fig. 5와 같다.

실험 시편은 몰러를 이용하여 단순지지 조건을 만들었다. 지점사이의 순 간격은 900mm이고, 유압식 압축장치를 이용하여 4점 재하 형식으로 하중을 가했으며, 로드셀과 중앙 양쪽에 LVDT를 이용하여 하중과 수직 변위를 측정 하였다. 그리고 CFRP 판에 스트레인게이지를 이용하여 각각의 위치에서 CFRP의 변형률을 측정 하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 파괴 형상과 국부 변형을 분포

CFRP의 각 부재별 파괴형상은 대부분 골재와 콘크리트 사이의 파괴가 일어났으며 CFRP 판과 에폭시사이의 파괴가 혼합된 형상

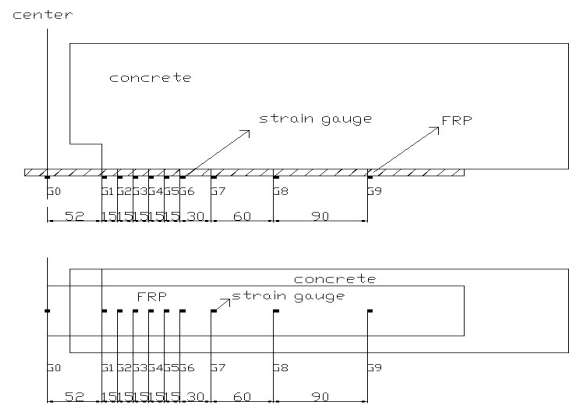


Fig. 5. Location of Strain Gauge on Test Specimen

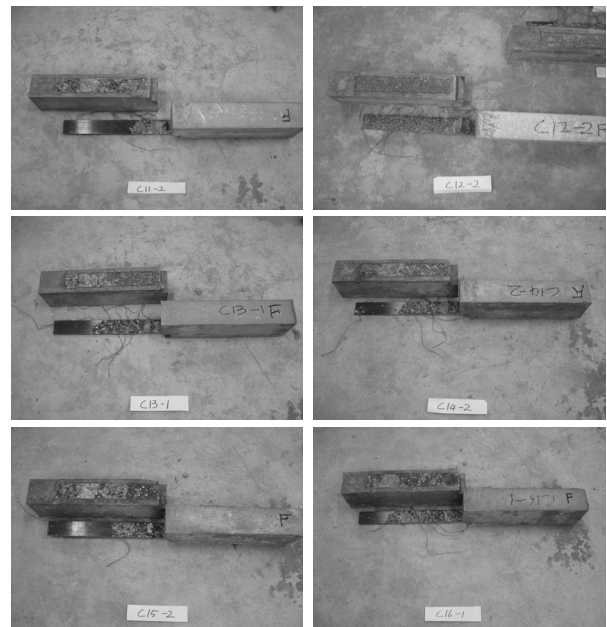


Fig. 6. Failure Shape of C11, C12, C13, C14, C15 and C16

을 보이지만 C12의 경우에는 골재와 콘크리트 사이의 파괴만 일어났다. C12의 경우만 부착골재가 2-4mm로 다른 시편보다 부착골재가 작은 시편이다. 고인성 섬유보강 콘크리트 종류에 따른 특이한 부착분리 형상은 보이지 않았지만 부착파괴가 발생하지 않은 부분의 미세균열은 일반콘크리트에 비해 고인성 섬유보강 콘크리트의 경우가 전반적으로 분포되는 형태를 보이고 있다.

CFRP 판과 중앙으로부터 Fig. 4와 같이 설치된 변형률 게이지에 의해 각각 위치에서 변형률을 측정하였다. 각 실험시편의 변형률 분포는 다소 편차가 있으나 그래프의 경향은 비슷하게 나타났다. 하중 초기 단계로써 하중이 증가함에 따라 CFRP 판과 고인성 섬유보강 콘크리트 사이의 부착이 시작되는 부분에서 변형률이 최고 값을 나타내며 끝단으로 갈수록 급격히 감소하는 경향을 보여준다.

### 3.2 부착응력 - 인발력 관계

CFRP 판에 작용하는 인발력(pullout force)은 평형방정식과 CFRP 판 중앙에 부착한 변형률게이지에 의해 구할 수 있다. 그러나

CFRP의 경우 하중을 받음에 따라 휘어지므로 CFRP 중앙 하단에 발생하는 변형률은 실제보다 큰 값을 나타내며 상단의 경우 실제보다 작은 값을 보여주게 된다. 본 실험의 경우 변형률게이지를 하단에 부착하였으므로 실제보다 큰 변형률을 나타내게 되므로 평형방정식을 이용해 인발력을 산정하였다. 대 변형이 발생할 경우 처음 조건과 달라질 수 있으나 본 실험의 경우 변형이 미소하므로 이의 영향은 무시 할 수 있다고 판단하였다. CFRP 판에 인발력이 작용함에 따라 CFRP 판과 콘크리트 사이에 국부 부착응력이 발생하게 된다. 하중이 증가함에 따라 CFRP 판과 콘크리트 사이의 부착 시작점에서 국부부착응력이 점차 증가 하다 최고 국부 부착응력에 도달한 후 CFRP 판과 타설 콘크리트 사이의 부착면에 미세 균열이 발생하고 이로 인해 국부 부착응력이 감소되면서 인접 지역으로 최고 국부 부착응력 값이 전이되어 최종적으로 전체 부착면이 파괴되는 것이 이상적인 관계이다.

### 3.3 국부 부착응력 - 슬립 관계

본 연구의 주 관심중 하나인 CFRP 와 타설 콘크리트 사이의

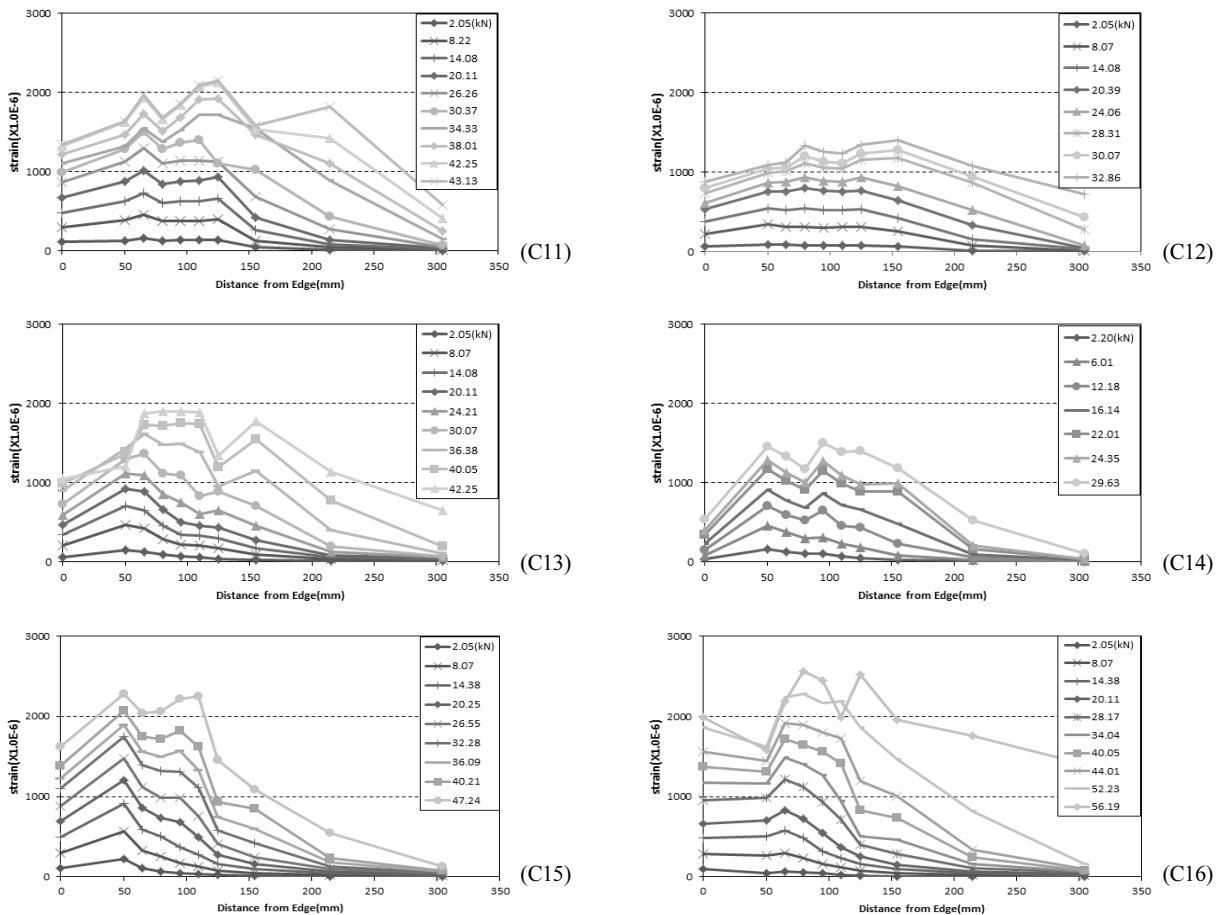


Fig. 7. Local Strain Distuibration of C11, C12, C13, C14, C15 and C16

국부 부착응력(local bond stress)은 전체 CFRP 인발력은 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.

그러므로 국부 부착응력은 다음과 같이 각각의 위치에서 측정된 변형률을 가지고 구해야 한다. CFRP 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 CFRP 판의 두께, E는 탄성계수,  $\epsilon(x)$ 는 x 위치에서의 CFRP 변형률이다.

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, t와 E는 FRP 판의 두께 와 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 슬립 량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

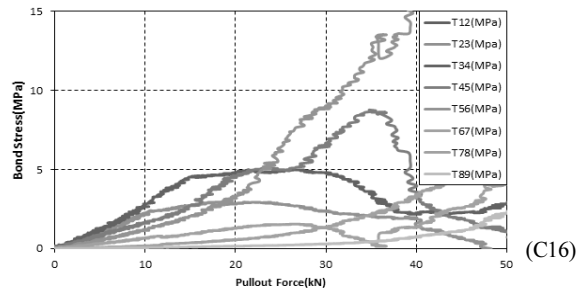
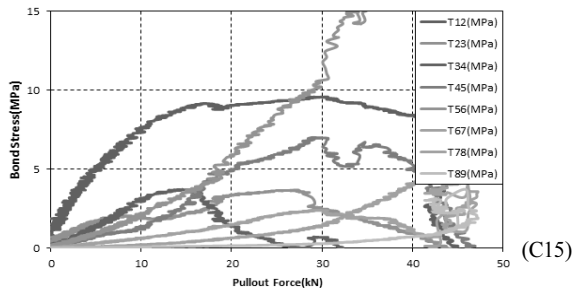
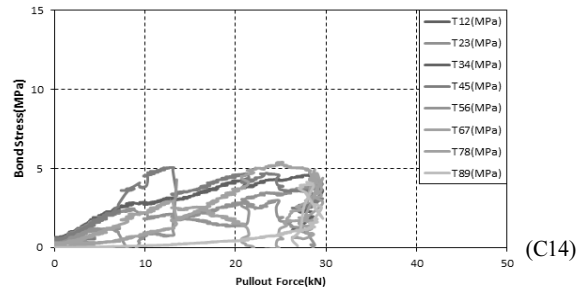
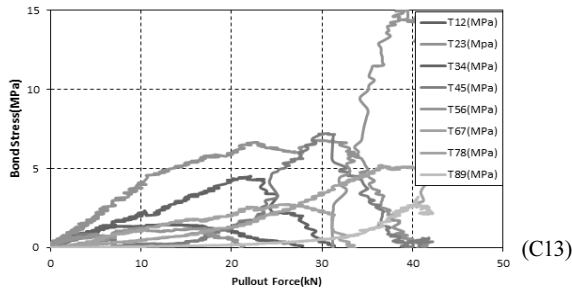
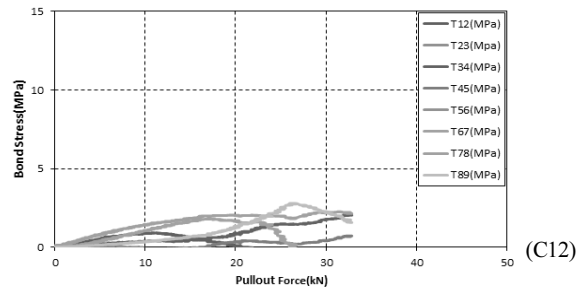
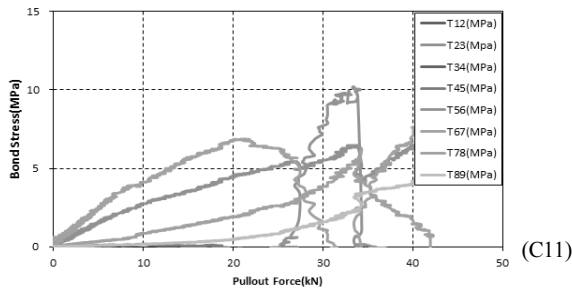


Fig. 8. Bond Stress-Pullout Force Relationship of C11, C12, C13, C14, C15 and C16

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

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.

변형률게이지의 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 다음 그림과 같다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 각 구간별로 다소 큰 편차를 보여주고 있다.

G1 게이지의 경우 CFRP 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 분석하고자 한다. 각 시험체의 부착응력은 국부적인 변형이 집중되는 곳을 제외한 최고값을 기준으로 산정하였으며 4개 구간 전체를 평균한 값과 부착응력-슬립 곡선에서 최대응력 및 기울기 등에서

Table 7. Average Bond Stress between Interval(MPa)

Specimen		Bond stress(MPa)				Average bond stress	Modified bond stress*
		G2-G3	G3-G4	G4-G5	G5-G6		
C11	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
C12	No.1	0.20*	2.11	0.72*	0.00*	0.76	2.11
	No.2	1.88	0.05*	4.66	0.02*	1.62	3.27
C13	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
C14	No.1	2.46	0.05*	5.08	1.23	2.21	2.92
	No.2	11.26*	3.92*	8.70	1.71	6.40	5.21
C15	No.1	3.67	3.72	7.01	14.96*	7.34	4.80
	No.2	5.58	8.75*	14.23*	11.72*	10.07	5.58
C16	No.1	2.94	5.00	8.77	13.53*	7.56	5.57
	No.2	3.57	4.40	9.55	1.76*	4.82	5.89

\*in case of exclusion

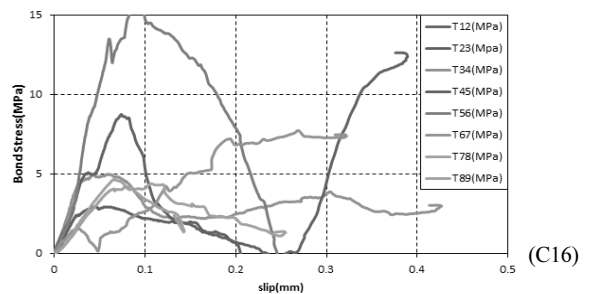
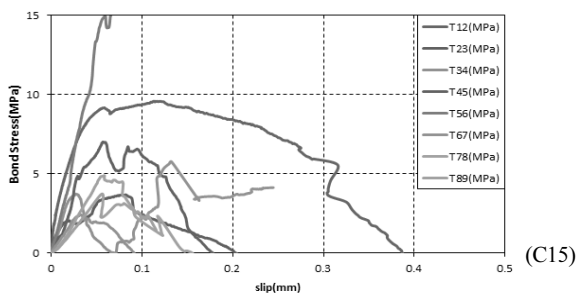
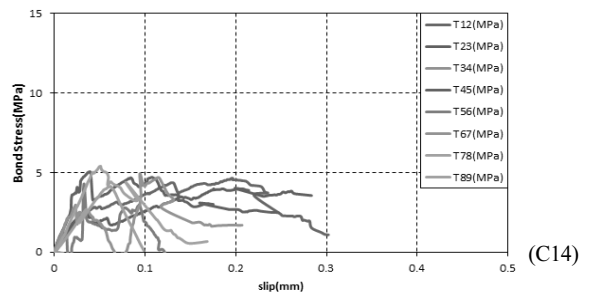
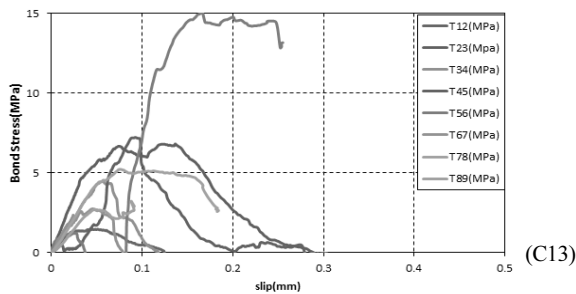
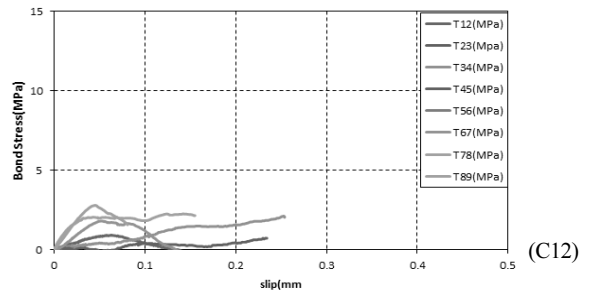
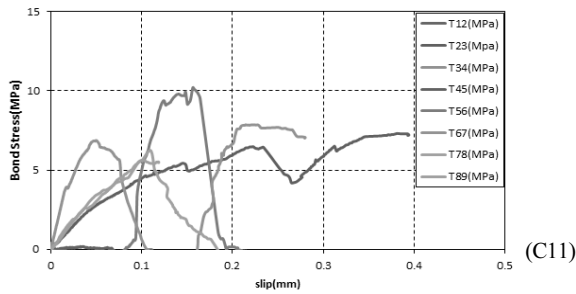


Fig. 9. Bond Stress-Slip Relationship of C11, C12, C13, C14, C15 and C16

특이한 경우를 제외한 경우를 나타낸 결과는 Table 7에 자세히 나타내었다.

G2~G6 위치에서 4개구간 전체 최고값의 평균으로 평가하면 일반콘크리트의 경우 0.76~4.32MPa이며, DC1과 DC3은 3.33~7.44MPa과 7.374~10.07MPa이며, DC2와 DC4는 2.21~6.40MPa과 4.82~7.56MPa이다. 또한 부착응력-슬립 곡선에서 최대응력 및 기울기 등에서 특이한 경우를 제외한 경우를 살펴보면 일반콘크리트의 경우 2.11~5.43MPa이며, DC1과 DC3의 경우 3.91~5.60MPa과 4.80~5.58MPa이며, DC2와 DC4의 경우 2.92~5.21 MPa와 5.57~5.89MPa이다. 고인성 섬유보강 콘크리트의 경우 섬유길이 가 짧은 RSC15를 첨가한 경우가 다소 부착강도가 증가하는 경향을 보여준다.

#### 4. 결론

일반콘크리트인 C11과 C12시편에서 C11시편은 4~7mm의 골재를 부착하였고 C12시편은 2~4mm의 골재를 부착하였는데 C12시편에서 부착응력은 다소 낮은 결과를 나타냈다.

본 실험의 CFRP는 다른 유리섬유계열의 GFRP 판보다 변형률이 적게 나타났으며 부착응력은 평균적으로 더 높은 결과를 보여준다.

일반콘크리트의 부착응력은 2.11~5.43MPa으로 나타났고, 고인성 섬유보강 콘크리트인 DC1과 DC2의 부착응력은 각각 3.91~5.60MPa, 2.92~5.21MPa이며, DC3의 부착응력은 4.80~5.58MPa, DC4의 평균 부착응력은 5.57~5.89MPa으로 DC4의 평균 부착응력이 가장 높은 것으로 나타났다.

부착응력 및 슬립 관계는 기존 구조물의 보수/보강 공법에서 사용하는 FRP를 에폭시를 사용하는 외부 부 부착한 공법에서와 마찬가지로 다소 결과치가 분산되는 경향을 보여주고 있다.

앞으로 해석적인 접근을 위해서 단순한 부착모델을 개발하고자 하며 개발된 단순부착 모델을 이용하여 실험과 해석을 비교하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

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

#### References

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*, Vol. 24, No. 4, pp. 552-558.

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*, Vol. 20, No. 8, pp. 515-526.

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.

Deskovic, N., Triantafillou, T. C. and Meier, U. (1995). "Innovative design of FRP combined with concrete: Hort-term behavior." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No. 7, pp. 1069-1078.

Dieter, D. A., Dietsche, J. S., Bank, L. C., Oliva, M. G. and Russell, J. S. (2002). "Concrete bridge decks constructed whit FRP stay-in-place forms and FRP grid reinforcing." *Journal of the Transportation Research Record*, No. 1814. pp. 219-226.

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*, Vol. 8, No. 2, pp. 182-190.

Lorenzis, L., Miller, B. and Nanni, A. (2001). "Bond of fiber-reinforced polymer laminates to concrete." *ACI Materials Journal*, Vol. 98, pp. 256-264.

Reising, R. M. W., Shahrooz, B. M., Hunt, V. J., Neumann, A. R., Helmicki, A. J. and Hastak, M. (2004). "Close look at construction issues and performance of four fiber-reinforced polymer composite bridge decks." *Journal of Composites for Construction, ASCE*, Vol. 8, No. 1, pp. 33-42.

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.

Yoo, S. W. (2008). "A proposal of simplified bond stress-slip model between FRP plank and cast-in-place concrete." *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 12, No. 1, pp. 65-72 (in Korean).

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*, Vol. 27, No. 1, pp. 69-77 (in Korean).

Yun, H. D., Yang, I. 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*, Vol. 16, No. 5, pp. 49-58 (in Korean).

Yun, W. M., Kook M. S., Yoo, S. W. and Park, S. Y. (2007). "Experimental study of bond failure between cast-in-place fiber reinforced concrete and FRP plank." *Proceeding of Conference on Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, Vol. 2007, No. 10, pp. 3858-3861 (in Korean).