

# 하이브리드 FRP로 보강된 콘크리트 보의 거동 예측을 위한 해석연구 Analytical Studies for Predicting Behaviors of RC Beams Retrofitted with Hybrid FRPs

우투이 나디아 Utui, Nadia\* · 김희선 Kim, Hee-Sun\*\*

(Received April 13, 2011 ; Revised April 20, 2011 ; Accepted May 17, 2011)

## ABSTRACT

This study aims at predicting structural behaviors of RC (Reinforced Concrete) beams retrofitted with hybrid FRPs (Fiber Reinforced Polymers). Toward this goal, structural analysis for the RC beams retrofitted with hybrid FRPs are performed and validated using existing experimental data. For the analysis, failure models due to debonding of FRPs and concrete separation are implemented within FE (Finite Element) model, based on Smith and Teng, model, and Teng and Yao model, respectively. Nonlinear material and geometrical effects are also included in the analysis. The suggested modeling approaches are able to predict structural behaviors of RC beams retrofitted with hybrid FRPs similar to the experimental data, however, a numerical model needs to be developed in order to predict failure strength of RC beams retrofitted with hybrid FRPs accurately.

## 요 지

본 연구는 하이브리드 FRP로 보강된 철근 콘크리트 보의 구조거동 예측을 목표로 구조해석을 수행하여 기존에 발표된 실험 연구 데이터와 비교하였다. 보다 정확한 구조해석을 위하여 현존하는 다양한 부착강도 모델을 검토한 후, 이 중 콘크리트 피복분리를 예측하는 Teng and Yao model과 FRP 탈락 현상을 예측할 수 있는 Smith and Teng model을 유한요소 해석 모델에 포함시켰다. 비선형 재료 및 형상 역시 구조해석 모델에 포함되었으며 이렇게 해석된 결과는 실험결과와 비교하여 유사한 경향을 나타냈다. 그러나 다양한 하이브리드 FRP로 보강한 철근 콘크리트 보의 파괴모드를 보다 정확하게 예측하기 위하여 현존하는 수치식의 수정 및 도입이 필요하다.

**Key Words:** hybrid FRP, failure strength model, concrete separation, debonding

## 1. 서 론

현존하는 RC (reinforced concrete) 구조 부재 보강에는 다양한 방법이 있으나, FRP를 부착하여 보강하는 방법은 적용이 쉽고, 그 보강효과가 뛰어나다는 측면에서 널리 쓰이고 있으며 보강 재료의 개발 또한 활발히 이루어지고 있다. 특히 유리섬유와 탄소섬유를 적절히 혼합하여 제작하는 하이브리드 FRP 섬유는 각 섬유의 단점을 보완하고 장점을 극대화 시키는 보강재료로써 향후 적용 분야가 더욱 늘어날 예정이다. 그러나 FRP 보강 기법은 보강부재의 탈락으로 인한 보강효과의 상실 및 구조 부재의 파괴가 가장 큰 취약점으로 꼽히고 있으며 특히 보강부재의 탈락은 서서히 발생하는 것이 아니라 갑자기 일어나는 현상이기 때문에 예측이 어렵고, 콘크리트의 피복과 함께 탈락하게 되는 경우에는 구조부재 자체에도 피해를 끼칠 수 있어 그 위험성이

크다.

현재까지 FRP로 보강된 부재의 구조 거동을 예측하기 위한 해석 연구가 여러 방면으로 수행, 발표되어 왔으며, (최진우 등, 2010, 한택희 등, 2010), 보다 정확한 구조거동 분석을 위하여 보강부재 탈락으로 인한 구조부재의 파괴를 고려하는 해석기법 개발 연구 역시 활발히 진행되고 있다. FRP로 보강된 구조부재에서 보강재 탈락을 결정짓는 부착강도를 예측하는 수치 모델은 해석 원리에 따라 shear capacity based model, concrete tooth model, interfacial stress based model로 크게 나눌 수 있으며, 그 중 shear capacity based model은 콘크리트 힘부재의 전단강도가 FRP의 부착강도를 결정하는 데 그 기본 원리를 두고 있으며, concrete tooth model, interfacial stress based model과 비교하여 보다 나은 예측값을 도출하는 것으로 통계분석 결과 나타났다 (Teng et al. 2002).

따라서 본 연구에서는 현존하는 부착강도 모델 중

\* 학생회원 · 이화여자대학교 건축공학과 석사과정

\*\* 정회원 · 이화여자대학교 건축공학과 교수, 교신저자(hskim3@ewha.ac.kr)

shear capacity model을 검토하고, 이를 포함하는 유한요소 해석기법을 이용하여 hybrid FRP로 보강한 RC 휨부재의 구조거동을 예측하도록 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 부착강도 모델 검토

본 연구에서는 shear capacity model 중에서도 잘 알려진 Oehlers model (Smith and Teng, 2002), Smith and Teng model (Smith and Teng, 2002), Teng and Yao model (Teng and Yao, 2005)을 검토하였으며 각 모델을 통해 계산되는 부착강도식은 다음과 같다.

$$\text{Oehlers' model (1992): } V_{db,s} = V_c \quad (1)$$

Smith and Teng's model (2002):

$$V_{db,end} = \eta V_c \quad (2)$$

Teng and Yao's model (2005):

$$V_{db,s} = V_c + V_p + \varepsilon_{v,e} V_s \quad (3)$$

여기서,  $V_{db,s}$  와  $V_{db,end}$ 는 FRP 끝단에서 발생하는 전단력을 의미하며,  $V_c$ 는 콘크리트 보의 전단 강도를 의미한다.  $\eta$ 는 부착강도 계수이며,  $V_p$ 는 plate의 전단 강도를,  $V_s$ 는 스티럽의 전단강도를 의미하며 계수  $\varepsilon_{v,e}$ 는 콘크리트 보의 크기와 FRP의 두께 및 탄성계수, 콘크리트의 휨강성 등을 고려하는 계수이다.

Oehler's model을 적용하기 위하여 필요한  $V_c$ 는 각 나라의 디자인 코드에 맞추어 적용할 수 있으며 따라서 KBC 2009에 의거하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$V_c = \frac{1}{6} \times \sqrt{f_{ck}} \times b_w \times d \quad (4)$$

Oehlers model을 수정, 보완한 모델이 Smith and Teng model과 Teng and Yao model 이다. Smith and Teng model에서  $\eta$ 계수는 보강재 탈락의 경우에 1.4, 콘크리트 피복탈락으로 인한 파괴의 경우에 1.5를 쓴다. Teng and Yao model에서 사용하는  $\varepsilon_{v,e}$ 는 다음과 같이 계산하고 있다.

$$\varepsilon_{v,e} = \frac{10}{\sqrt{\alpha_{flexural} \cdot \alpha_w \cdot \alpha_E \cdot \alpha_t}} \quad (5)$$

$$\alpha_{flexural} = \frac{EI_{FRP+concrete} - EI_{concrete}}{EI_{concrete}} \quad (6)$$

$$\alpha_w = \text{ratio between width of FRP and concrete} \quad (7)$$

$$\alpha_E = \frac{E_{FRP}}{E_{concrete}} \quad (8)$$

$$\alpha_t = \left( \frac{\text{thickness of plate}}{\text{beam width}} \right)^{1.3} \quad (9)$$

여기서,  $E_{concrete}$ 와  $E_{FRP}$ 는 각각 콘크리트와 FRP의 탄성계수를 의미하며, hybrid FRP의 탄성계수는 rule of mixture를 이용하여 산출하였다. Rule of mixture는 복합재료의 물성치를 산출하기 위한 일반적인 방법으로써, 다음의 식(10)으로부터 구성단일재료의 탄성계수와 부피비를 이용하여 복합재료의 탄성계수를 산출하였다.

$$E_{FRP} = V_{glass\ fiber} \cdot E_{glass\ fiber} + V_{carbon\ fiber} \cdot E_{carbon\ fiber} \quad (10)$$

여기서  $V_{glass\ fiber}$ 와  $V_{carbon\ fiber}$ 는 각각 전체 보강섬유 중 유리섬유 및 탄소섬유가 차지하는 부피비를 의미한다.  $I_{concrete}$ 와  $I_{FRP}$ 는 각각 콘크리트와 FRP의 2차단면 모멘트로, FRP의 2차 단면모멘트는 KBC 2009 (대한건축학회, 2009)에 따라 콘크리트 보의 2차단면 모멘트에 0.35를 곱한 값을 쓴다.

### 2.2 부착강도 모델의 적용

위에서 검토되었던 세 가지 모델을 적용하기 위하여 기존에 발표되었던 실험연구의 결과(H.S. Kim and Y.S. Shin, 2010)를 이용하였다. 실험연구에서는 glass fiber(GFRP)와 carbon fiber(CFRP) layer의 개수 및 부착순서를 다르게 하여 일반강도 콘크리트 보를 휨보강한 후, 4점재하 실험을 통하여 구조거동의 변화를 분석하였다. 실험의 결과로 하중-처짐 곡선을 비교하면, FRP의 부착개수가 두 개 일 때보다 세 개 일 때 최대 하중 및 최대 처짐이 증가하였으며, 콘크리트 보에 GFRP가 가깝게 부착될수록 보강효과가 뛰어난 것으로 밝혀졌다. 파괴모드로는 FRP부재의 탈락과 함께 콘크리트 피복이 떨어져 나가는 현상을 보였다.

부착강도 산정을 위해 사용된 물성치는 다음 Table 1에 나타낸 바와 같다. 콘크리트의 28일 압축강도는 24.5MPa 이며, 탄성계수는 23.7GPa 이다. 콘크리트 보의 크기는 길이 2400mm, 폭 150mm, 높이 250mm로 설계되었으며, 시험체의 이름과 그에 따른 보강 상태는 Table 2에 나타내었다.

Table 1 사용된 FRP의 물성치

	CFRP	GFRP
Elastic modulus (MPa)	$2.3 \times 10^5$	$7.06 \times 10^4$
Strength/unit length (N/mm)	502.13	558.29
Fiber thickness (mm)	0.11	0.34

Table 2 시험체 리스트

보강방법		시험체명
Control beam		CONTR
2 layered FRPs	CFRP-CFRP layer	CC
	CFRP-GFRP layer	CG
	GFRP-CFRP layer	GC
	GFRP-GFRP layer	GG
3 layered FRPs	CFRP-CFRP-GFRP layer	CCG
	GFRP-CFRP-GFRP layer	GCG
	GFRP-CFRP-CFRP layer	GCC

Oehlers model, Smith and Teng model, 그리고 Teng and Yao model을 이용하여 실험연구에서 수행한 실험체의 부착강도를 예측하면 Table 3과 같다.

Table 3 사용된 모델별 부착강도

모델	시험체명	부착강도 (kN)
Oehlers' model	-	23.94
Smith and Teng model	-	35.92
Teng and Yao model	CC	22.24
	CG	44.07
	GC	44.07
	GG	72.92
	CCG	21.35
	GCG	30.93
	GCC	21.35

그래프 Fig. 1(a)~Fig. 1(c)은 위의 예측모델을 이용하여 얻은 부착강도를 실험 연구를 통해 얻은 값과 비교하여 나타낸 것이다. Oehlers model과 Smith and Teng model의 식을 통해 예측한 부착강도는 전반적으로 실험값 보다 작게 나타났으며, Oehlers model과 비교하여 Smith and Teng model에서 예측한 값들이 실험값에 가깝게 나타났다. 그러나 두 모델 모두 하이브리드 FRP가 부착강도에 미치는 영향을 고려하지 않고 있으므로, FRP 종류에 관계없이 한 값만을 예측하고 있음을 알 수 있다. 위의 두 모델과는 달리, Teng and Yao model에서 예측하는 부착강도는 FRP 종류와 강도를 고려하여 산출되므로 Fig. 1(c)에서 보는 바와 같이 실험 변수에 따라 다른 부착강도 값을 나타낼 수 있다. 그러나 hybrid FRP의 영향을 고려하였다고 해도 GCC, CG, GC를 제외한 다른 시험체에 대해서는 부착강도가 실험값과 비교하여 현저한 차이를 나타내고 있어 변수에 따라 정확도에 차이가 있음을 알 수 있다. 특히 Table 3에서 보는 바와 같이 FRP가 세 장으로 보강된 시험체의 경우 오히려 부착강도가 CG, GC, GG 시험체와 비교하여 낮게 나타나고 있으며 GG 시험체의 경우에는 실험값의 거의 두 배에 가까운 값을 예측하고 있는 것으로 미루어 보아 Teng and Yao model을 이용하는 데에는 제약이 따를 것으로 사료된다.

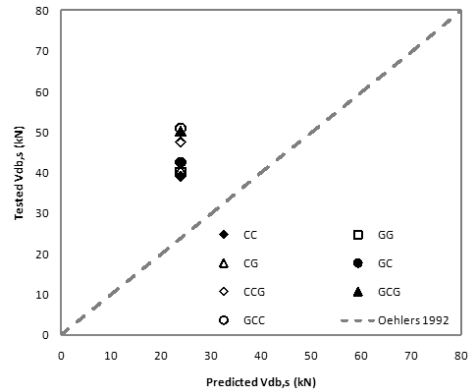


Fig. 1(a) Oehlers model (1992)

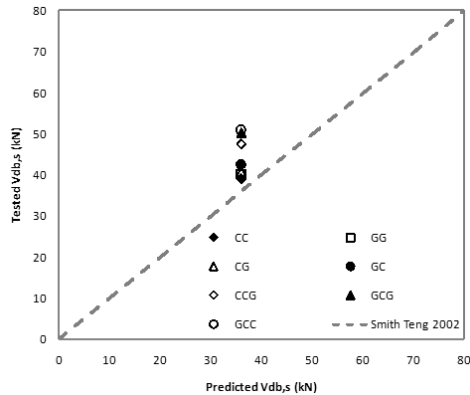


Fig. 1(b) Smith and Teng model (2002)

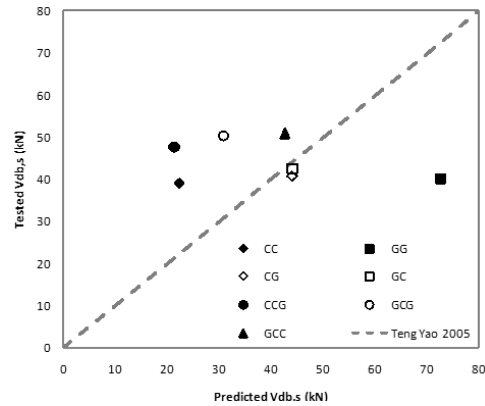


Fig. 1(c) Teng and Yao model (2005)

### 2.3 부착강도모델을 적용한 유한요소해석기법

본 해석연구를 수행하기 위하여 하이브리드 FRP로 보강된 철근 콘크리트 휨 부재를 Fig. 2와 같이 유한요소를 이용하여 모델링하였다. 유한요소 해석은 범용해석 프로그램인 ABAQUS Standard 6.10을 이용하여 수행하였으며 콘크리트의 비선형 재료 및 기하 해석 기법을 이용하였다. 콘크리트는 3D continuum brick 요소를 이용하여 모델링하였으며 주철근 및 스테럽은 3D

트러스 요소를 이용하였다. FRP layer는 Shell 요소를 이용하여 모델링하였으며 하이브리드 FRP를 모델링하기 위하여 shell 요소를 composite section 으로 구성하여, 여러 장의 각기 다른 FRP 물성치와 두께를 고려할 수 있도록 모델링하였다. FRP와 콘크리트 요소 사이에는 3D cohesive 요소를 이용하고, 에폭시의 물성치를 입력하였다. Cohesive 요소는 복합재료의 부착거동 등을 고려하기 위한 요소로써 일정응력에 도달했을 경우 cohesive 요소에 파괴가 일어나 부착되어 있는 부재가 탈락하는 현상을 모델링할 수 있다.(Dassault Systemes, 2010) 본 연구에서는 앞서 검토된 재료모델 중 비교적 보강재의 탈락 시점을 잘 예측하고 있는 Teng and Yao model에서 도출된 부착강도를 Cohesive요소의 재료모델에 포함시켜 부착강도에 의한 FRP재료의 탈락이 예측될 있도록 하였다. 또한 Smith and Teng model에서 도출된 부착강도를 콘크리트 피복부분 요소 모델에 포함하여 콘크리트 요소에서 일정 응력에 도달하였을 때, 피복부분에 파괴가 시작되면서 콘크리트의 피복 탈락을 예측할 수 있도록 모델링하였다.

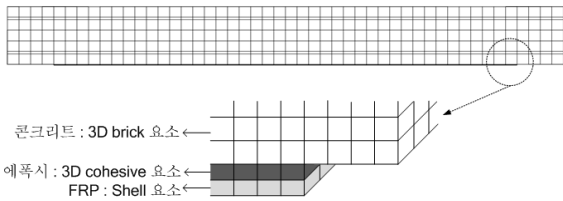


Fig. 2 유한요소 모델

2.4 부착강도모델을 적용한 유한요소해석 결과

유한요소해석을 수행한 결과는 Fig. 3, 4, 5와 같이 하중-처짐 곡선으로 나타내었다. 먼저, FRP로 보강하지 않은 철근 콘크리트 보의 유한요소 해석결과를 실험값과 비교함으로써 유한요소 해석기법 및 콘크리트 재료 모델의 타당성을 검증하도록 하였다. 콘크리트 요소 모델에는 비선형 탄성 및 소성 재료 특성과 압축 및 인장 파괴 모델을 포함하여 유한요소 해석결과에 반영하도록 하였다. Fig. 3에서 나타내는 바와 같이 FRP로 보강하지 않은 철근 콘크리트 보의 구조 거동해석은 실험값과 비교하여 유사한 것으로 나타났다.

두 장의 FRP를 이용하여 보강한 철근 콘크리트 보의 해석결과는 Fig. 4(a)~(d)의 하중-처짐곡선으로 나타내었다. GFRP 두 장으로 보강한 GG 시험체의 해석결과는 실험결과와 매우 유사하게 나타나며, GC와 CG 시험체의 해석결과는 실험결과에 비해 약간 높은 강성을 나타낸다. 실험에서는 GC 시험체가 CG 시험체에 비하여 소성 구간의 강성이 약간 높고 부착강도도 더 높게 나타나는 것에 비하여, 유한요소 해석에서는 GC와 CG 시험체가 하이브리드 FRP 요소모델에서 같은 유효 탄성계수를 가지며, Smith and Teng와 Teng and Yao 모델에서 도출된 부착강도 역시 GC와 CG 시험체에서 큰 차이를 나타내지 않으므로 두 시험체의 해석결과

값은 거의 동일하게 나타난다. CFRP 두 장으로 보강된 CC 시험체의 해석결과를 보면, 실험값과 비교하여 탄성 구간이후의 강성이 높게 나타나, 같은 하중 레벨에서의 처짐 오차가 두 배 가까이 발생하는 것을 알 수 있다.

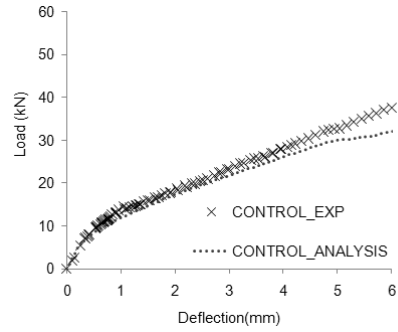


Fig. 3 CONTR 시험체의 해석 및 실험결과

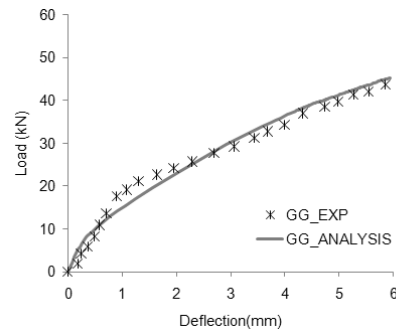


Fig. 4(a) GG 시험체의 해석 및 실험결과

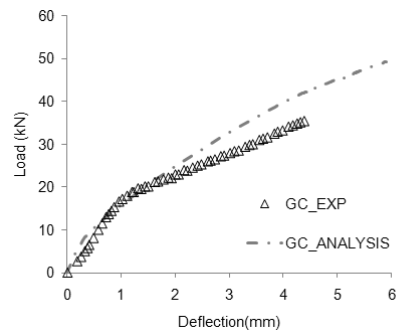


Fig. 4(b) GC 시험체의 해석 및 실험결과

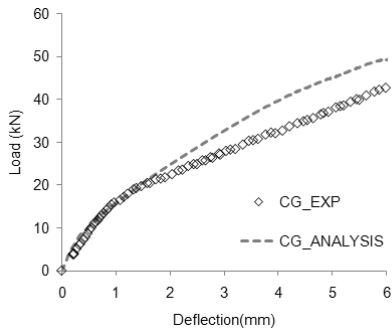


Fig. 4(c) CG 시험체의 해석 및 실험결과

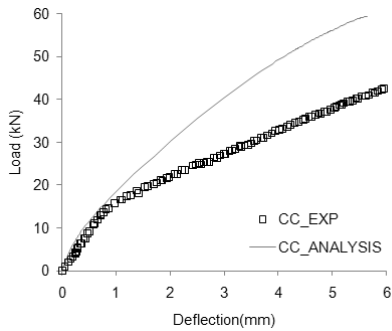


Fig. 4(d) CC 시험체의 해석 및 실험결과

줄일 수 있을 것으로 판단 된다.

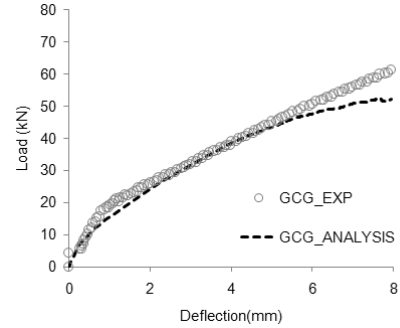


Fig. 5(a) GCG 시험체의 해석 및 실험결과

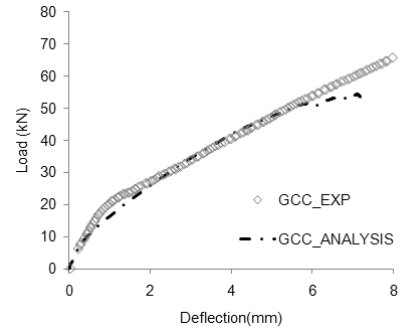


Fig. 5(b) GCC 시험체의 해석 및 실험결과

세 장의 FRP를 이용하여 보강한 철근 콘크리트 보의 해석결과는 Fig. 5(a)~(c)의 하중-처짐곡선에서 보는 바와 같이 실험값과 매우 유사한 경향을 보인다. 단, FRP로 보강된 콘크리트 보의 해석결과에서 소성구간의 하중-처짐 곡선의 기울기가 감소하면서 발생하는 실험값과의 오차는, Fig. 3에서 무보강 철근 콘크리트 보의 하중-처짐 곡선이 소성 구간으로 갈수록 해석값과 실험값이 차이가 벌어지고 있는 현상과 유사하게 나타나고 있다. 이러한 오차는 콘크리트와 철근의 재료모델이 실제 거동에 비하여 소성구간에서 낮은 강성을 나타내도록 입력되었기 때문인 것으로 유추할 수 있다. 본 해석에서 사용한 콘크리트 및 철근의 재료모델은 기존에 발표된 논문(H.S. Kim and Y.S. Shin, 2010)으로부터 콘크리트의 압축 및 인장 강도와 탄성 계수의 제한적인 정보를 이용하여 입력되었으며, 비선형구간에 해당하는 콘크리트 압축비탄성 구간과 인장 연화구간은 기발표된 콘크리트의 응력-변형률 곡선 (Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M., 2006, Gopalaratnam, V.S., Shah, S.P., 1985)으로 부터 추정하여 재료모델을 완성하였다. 따라서 사용된 실험체의 보다 자세한 재료실험결과를 바탕으로 한 재료모델을 입력한다면 해석결과의 정확도를 높일 수 있을 것으로 사료된다. 또한 콘크리트 보의 인장측에서 콘크리트 재료가 인장한계에 도달한 경우, 그 거동은 인장측에 배근된 주철근이 담당하게 되므로, 철근의 비선형 거동을 포함하는 재료모델을 입력시킬 수 있다면 본 해석결과의 오차를

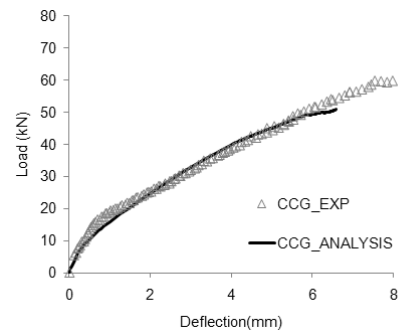


Fig. 5(c) CCG 시험체의 해석 및 실험결과

### 3. 결론

본 논문에서는 하이브리드 FRP로 보강된 철근 콘크리트 구조물의 구조거동을 예측하기 위한 해석기법에 대하여 연구하였다. FRP 보강된 콘크리트 거동에서 보의 파괴를 결정하는 주요변수인 부착강도를 정확하게 예측하기 위하여, 현존하는 부착강도 모델을 비교, 검토하였다. 현존하는 부착강도 예측 모델 중, Oehlers model과 비교하여 Smith and Teng model과 Teng and Yao model이 비교적 부착강도 예측값이 정확하며, 특히 Teng and Yao model에서는 보강된 FRP의 종류와 크기에 따른 부착강도가 고려된다는 장점이 있는 것으로 파악되었다. 따라서 Smith and Teng model과 Teng and Yao model을 이용하여 보강재 탈락 강도와 콘크리트

피복 탈락 강도를 각각 도출하고, 이를 유한요소 모델에 포함하여 해석연구를 수행하였다. 부착강도를 고려한 유한요소 해석 결과, 전반적으로 실험값과 유사한 하중-처짐 곡선을 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 CC 실험체와 같이 변수에 따라 해석결과가 실험결과에 비해 높은 강성을 나타내는 경우가 있으며 하이브리드 FRP의 부착순서 등을 해석기법에 반영할 수 없는 제약이 있어, 보다 정확한 예측 결과를 위하여 콘크리트 재료 모델에 대한 연구와 함께, 하이브리드 FRP의 다양한 조건에 따른 부착강도 해석기법이 추가적으로 연구, 보완되어야 한다고 사료된다.

### 감사의 글

이 연구는 2010도 이화여자대학교 교내연구비 지원에 의한 연구임.

### 참고 문헌

1. 국토해양부 고시 건축구조기준 및 해설, 대한건축학회, 2009, 344pp.
2. 최진우, 주형중, 남정훈, 윤순중 (2010) FRP-콘크리트 합성말뚝의 개발, *한국복합신소재구조학회 논문집*, 제 1권, 제 2호, pp. 20-28.
3. 한택희, 김효산, 장영두, 박윤희, 강영중 (2010), 지중매설 GFRP 관로 및 플랜지의 거동 분석, *한국복합신소재구조학회 논문집*, 제 1권, 제 1호, pp. 27-33.
4. ABAQUS 6.10 Analysis Manual, Dassault Systemes, 2010, Chapter. 28.5
5. Gopalaratnam, V.S., Shah, S.P. (1985), *Softening response of plain concrete in direct tension*, Journal of the American Concrete Institute, 82, 310-323.
6. Kim, H.S., Shin, Y.S.(2011) *Flexural behavior of reinforced concrete (RC) beams retrofitted with hybrid fiber reinforced polymers (FRPs) under sustaining loads*, Composite Structures, 93(2011) 802-811.
7. Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (2006), Concrete, The McGraw-Hill, New York, Chapter 3.
8. Smith, S.T., Teng, J.G.(2002) *FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength models*, Engineering Structures, Vol. 24(2002), pp. 385-395.
9. Smith, S.T., Teng, J.G.(2002) *FRP-strengthened RC beams. II: assessment of debonding strength models*, Engineering Structures, Vol. 24(2002), pp. 397-417.
10. Teng, J.G., Yao, J., *Plate end Debonding failures of FRP-or Steel Plated RC Beams: A new Strength Model*, Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures, pp. 283-290.