

GFRP 보강근과 콘크리트 사이의 부착모델에 관한 고찰

Bond Models for GFRP Rebar Embedded in Concrete

유 영 준* 박 지 선* 박 영 환** 김 형 열**
You, Young-Jun Park, Ji-Sun Park, Young-Hwan Kim, Hyeong-Yeol

Abstract

This paper presents the comparison of the goodness-of-fit test of analytical bond models between concrete and steel or GFRP reinforcements. Bond test specimens were prepared in accordance with the CSA codes and the rebars used in the test were steel and two types of commercial GFRP rebar products. Using the test data, a bond model was proposed, and comparison of goodness-of-fit test for existing bond models and proposed bond model was carried out by the least squares method. The result indicates that the proposed bond model has better goodness-of-fit test than the existing ones.

요 지

본 논문은 철근 또는 GFRP 보강근과 콘크리트 사이의 해석적 부착모델에 관한 적합성에 대해 기술하였다. 부착시편은 CSA 규준에 따라 제작하여 실험하였으며, 실험에 사용된 보강근의 종류는 철근과 상용화된 GFRP 보강근 2종(ASLAN, ISOROD)이다. 실험결과를 이용하여 새로운 부착모델을 제안하였으며, 기존 연구자들이 제안한 해석적 부착모델과 새롭게 제안된 부착모델의 적합성을 최소자승법을 통해 검토하였다. 검토결과 새롭게 제안된 해석적 부착모델은 기존 부착모델에 비해 높은 적합성을 나타내었다.

Keywords : GFRP, Bond Model, Reinforcement, Regression Analysis, Least Squares Method

핵심 용어 : 유리섬유복합체, 부착모델, 보강근, 회귀분석, 최소자승법

* 정회원, 한국건설기술연구원 연구원
** 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

E-mail : yjyou@kict.re.kr 031-910-0052

• 본 논문에 대한 토의를 2006년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2006년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

철근콘크리트(이하 RC) 구조물은 일반적으로 시공성, 경제성 등이 우수한 구조물이나 공용기간이 증가될수록 누수, 콘크리트의 균열, 중성화 등으로 인해 철근에 부식이 발생하여 구조물의 열화와 성능저하가 발생하게 된다. 철근 부식으로 인한 구조물의 보수·보강공사는 매년 막대한 유지관리비용을 발생시키고 있다. 이로 인해 부식문제가 발생하지 않는 대체 재료의 연구가 일본과 유럽을 중심으로 진행되었으며, 섬유복합재료(Fiber Reinforced Polymer, 이하 FRP)가 주목받기 시작하였다.

FRP는 동일한 중량을 갖는 철근에 비하여 고강도이며 내부식성이 뛰어나 이를 보강근 또는 구조재료로 활용하기 위한 연구가 현재 국외에서 활발하게 진행되고 있으며, 국내에서도 철근 대체재로서 콘크리트 구조물에 적용할 수 있는 FRP 보강근의 개발 연구가 진행 중에 있다(한국건설기술연구원, 2004). 그러나 현재까지는 FRP 보강근에 대한 설계기준 등이 미비하여 FRP 보강근은 구조물의 보강공사에 부분적으로 적용되고 있는 실정이다.

RC 구조물에 사용되는 보강근의 주요 설계인자는 인장강도, 탄성계수, 그리고 부착성능이며, RC 구조물의 거동은 철근과 콘크리트 사이의 부착성능에 크게 영향을 받는다. 따라서 FRP 보강근이 철근 대체재로 사용되기 위해서는 콘크리트와의 부착성능이 확보되어야 한다. FRP는 강재와 다른 재료특성을 지니고 있어 FRP 보강근과 철근의 부착거동에는 상호 유사성도 있지만 차별성 또한 존재하므로 이에 대한 연구가 필요하다.

FRP 보강근과 콘크리트 사이의 부착에 대해 많은 연구자들이 섬유 종류나 표면 형태 등을 변화시켜가며 연구를 수행하였고(Burgoyne, 1993; JSCE, 1993; Makitani 등, 1993; Malvar, 1994), 실험결과를 바탕으로 부착거동을 해석적으로 설명할 수 있는 모델들을 제시하였다(Burong과 Brahim, 2002; Cosenza 등, 1997; Eligehausen 등, 1983; Malvar 등, 2003). 부착응력-슬립에 대한 구성방정식이 결정되면 추가적인 실험없이 RC 구조물의 보강근에 대한 정착

요구사항 등을 설정할 수 있고, 구조물의 정밀거동 파악 및 균열특성 분석이 가능해진다.

본 연구에서는 철근과 FRP 보강근에 대한 부착실험 결과(한국건설기술연구원, 2004)를 바탕으로 기존에 제시되어 있는 부착모델들이 실험결과를 잘 묘사하고 있는지 검토하였고, 선행연구(유영준 등, 2004)에서 제안한 모델에 대한 적합성을 평가하였다.

2. FRP 보강근의 해석적 부착모델

보강근과 콘크리트 사이의 부착거동은 부착응력-슬립 곡선에서 부착응력이 최대값에 도달할 때까지의 단계와 그 후의 단계로 구분할 수 있다. 거의 모든 구조물의 문제가 균열 폭이나 처짐 등을 제한하는 사용성 한계 수준(Serviceability limit state)에서 다루어지기 때문에 본 논문에서는 부착응력-슬립 관계를 부착응력이 최대가 되는 상태까지만 고려하였다.

2.1 Malvar Model

1994년에 Malvar는 다양한 외피 형상을 가진 유리섬유 복합체(Glass Fiber Reinforced Polymer, 이하 GFRP) 보강근에 대해 콘크리트 압축강도를 고정시킨 상태에서 횡구속압력을 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 실험결과에 근거하여 Malvar는 아래와 같은 부착모델식을 제안하였다.

$$\frac{\tau}{\tau_m} = \frac{F(s/s_m) + (G-1)(s/s_m)^2}{1 + (F-2)(s/s_m) + G(s/s_m)^2} \quad (1a)$$

$$\frac{\tau_m}{f_t} = A + B(1 - \exp\{-C\sigma/f_t\}) \quad (1b)$$

$$s_m = D + E\sigma \quad (1c)$$

여기서, τ_m 은 최대부착응력이고, s_m 은 최대부착응력에 대한 슬립, σ 는 횡구속압력, f_t 는 콘크리트 인장강도, A, B, C, D, E, F, G 는 각 FRP 보강근의 형태에 따라 결정되는 실험적 상수이다.

2.2 BEP Model

Eligehausen 등(1983)은 이형 철근의 부착거동을 묘사하기 위한 모델을 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{\tau}{\tau_m} = \left(\frac{s}{s_m} \right)^\alpha \quad (2)$$

이 모델의 매개변수 α 는 실험으로부터 구한 부착응력-슬립 곡선을 보정하여 얻는 값으로 물리적인 의미를 갖기 위해 1.0보다 작은 값이다.

이 모델을 활용하여 FRP 보강근의 부착거동을 묘사하려는 연구를 많은 연구자들이 수행하였다(Alunno 등, 1995; Cosenza 등, 1995; Faoro, 1992). Cosenza 등(1995)은 FRP 보강근의 부착력이 주로 마찰에 의해 발생될 경우에 $\alpha=0.069\sim 0.175$, 지압에 의해 발생될 경우에는 $\alpha=0.177\sim 0.283$ 을 제안하였다(Burong과 Brahim, 2002).

2.3 CMR & MCMR Model

Cosenza 등(1995)은 부착응력이 최대가 될 때까지의 부착응력-슬립 관계만을 고려한 모델을 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{\tau}{\tau_m} = [1 - \exp(-s/s_r)]^\alpha \quad (3a)$$

이 모델에서 매개변수 α 와 s_r 은 실험 데이터를 최소자승법을 통하여 보정함으로써 얻을 수 있다.

또한 상기 모델에서 무차원 매개변수인 β 를 사용하여 $s_r = s_m/\beta$ 로 치환하면 다음과 같이 개선된 모델(MCMR)을 얻을 수 있다(Malvar 등, 2003).

$$\frac{\tau}{\tau_m} = [1 - \exp(-\beta s/s_m)]^\alpha \quad (3b)$$

2.4 Burong Model

위와 같은 모델들은 최대 부착응력과 최대 슬립, 곡

선식 보정계수 등의 매개변수를 필요로 하는데, 이러한 값은 FRP 보강근의 인발시험을 통해 구해야 하는 값들이다. 최근에 Burong과 Brahim(2002)은 모델을 단순화시키기 위해 콘크리트와 FRP 보강근 사이에 작용하는 점착력, FRP 보강근 표면의 미세구조에 의한 마찰, FRP 보강근 형상에 따른 맞물림을 고려함에 있어 FRP 보강근과 콘크리트 사이에 슬립이 발생하는 순간 점착력은 감소한다고 가정하여 이러한 매개변수를 상수로 하는 모델을 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{\tau}{\tau_m} = 1 - \left(\frac{s}{s_m} - 1 \right)^2 \quad (4)$$

2.5 새로운 부착모델(YPP Model)

국내에서 FRP 보강근에 대한 부착모델로서 유영준 등(2005)은 FRP 보강근과 콘크리트 사이의 부착에 대해 다음과 같은 모델(일명 YPP Model)을 제안하였다.

$$\frac{\tau}{\tau_m} = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot (s/s_m)^{(1-\gamma)}}{1 + \beta \cdot (s/s_m)^{(1-\gamma)}} \quad (5)$$

상기 모델은 α 와 β , γ 로 표현되는 세 개의 매개변수를 가지고 있으며 이는 실험 데이터를 최소자승법을 통하여 보정함으로써 구할 수 있다.

기존의 모델들은 두 개 이하의 매개변수를 가지고 있으나 상기 모델은 실험데이터와 가장 근접한 추정을 할 수 있도록 세 개의 매개변수를 가지고 있다. FRP 보강근의 부착거동을 표현하기 위한 해석모델은 주로 인발시험의 결과를 이용하여 개발되기 때문에 각 모델의 매개변수는 측정된 실험값에 대해 적절한 보정이나 회귀분석을 통해 구하게 된다. 일반적으로 회귀분석은 상용화 통계처리 소프트웨어 수행할 수 있으며, 본 연구에서는 MS Excel을 사용하였다.

3. 모델의 적합성 검토

3.1 각 부착모델의 특징

부착응력-슬립 곡선을 나타내는 각 모델 식을 슬립에 대해 미분을 취하면 다음과 같이 곡선의 기울기를 얻을 수 있다.

- Malvar Model :

$$\frac{d\tau}{ds} = \frac{\tau_m}{s_m} \left\{ F + 2(G-1) \left(\frac{s}{s_m} \right) + (2-2G-F) \left(\frac{s}{s_m} \right)^2 \right\} \quad (6)$$

- BEP Model :

$$\frac{d\tau}{ds} = \frac{\tau_m}{s_m} \alpha \left(\frac{s_m}{s} \right)^{(1-\alpha)} \quad (7)$$

- CMR Model :

$$\frac{d\tau}{ds} = \frac{\tau_m}{s_r} \alpha \frac{\exp(-s/s_r)}{\{1 - \exp(-s/s_r)\}^{(1-\alpha)}} \quad (8)$$

- YPP Model :

$$\frac{d\tau}{ds} = \frac{\tau_m}{s_m} \frac{\alpha\beta(1-\gamma)}{(s/s_m)^\gamma} \frac{1 + 2\beta(s/s_m)^{(1-\gamma)}}{\{1 + \beta(s/s_m)^{(1-\gamma)}\}^2} \quad (9)$$

슬립이 발생하지 않은 상태($s=0$)에 대해 BEP 모델과 CMR 모델은 모두 초기 기울기가 무한대가 되는 것을 알 수 있다. 따라서 두 모델들은 슬립이 발생하지 않은 상태에서 작지만 점착력에 의해 부착응력 값이 관찰되는 현상을 묘사하는 것이 가능하다.

Malvar 모델에서 초기 기울기는 $F\tau_m/s_m$ 로서 최대 부착응력에서 F 에 Secant Tangent를 곱한 값과 같다. Malvar가 제안한 5.5~13.0 사이의 F 값은 부착응력-슬립 곡선이 초기에 매우 큰 값의 기울기를 가지고 거동하도록 한다(Cosenza 등, 1995).

이 모델의 식 (1a)는 다음과 같은 조건을 만족할 때 분모가 0가 되는 경우가 발생할 수 있다.

$$\frac{s}{s_m} = \frac{-(F-2) \pm \sqrt{(F-2)^2 - 4G}}{2G} \quad (10)$$

따라서 슬립양 s 와 매개변수 F, G 사이의 관계가 식 (10)을 만족하게 되면 식 (1a)에서 부착응력 값이 무한대가 되어 부착응력-슬립 곡선이 부드럽게 연결되지 않는 점이 발생하게 된다.

반면에 제안된 YPP 모델에서는 슬립이 발생하지 않은 경우에 매개변수 $\gamma \neq 0$ 이라면 초기 기울기가 무한대 값을 가지므로 BEP, MCMR 모델들과 동일하게 점착력에 의해 슬립이 발생하지 않은 상태에서 부착응력 값이 관찰되는 현상을 묘사하는 것이 가능하다.

3.2 모델의 적합성 검정

실험 데이터에 대해 회귀선을 도출하게 되면 이 회귀선이 모든 관측치(데이터)들에 대해 적합하게 도출되었는지 적합도 검정을 실시해야 한다. 적합도 검정에는 추정의 표준오차(S_e)와 결정계수(R^2)가 사용된다(강금식, 2003).

3.2.1 추정의 표준오차

구한 회귀선이 종속변수 Y 의 값을 예측하는데 어느 정도의 신뢰성을 갖는가를 평가하기 위한 지표 중의 하나가 추정의 표준오차이다. 종속변수 Y 의 값을 예측하는데 있어서 오류를 발생시키는 것은 오차항이기 때문에 오차항들을 검토함으로써 회귀선에 의한 예측의 정확성을 측정할 수 있다. 추정의 표준오차 S_e 는 다음과 같이 구한다.

$$S_e = \sqrt{\sum \frac{(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-2}} = \sqrt{\frac{SSE}{(n-2)}} \quad (11)$$

여기서, Y_i 는 관측값, \hat{Y}_i 는 예측값, n 은 관측 자료수, SSE는 오차 제곱합이다.

추정의 표준오차가 클수록 관측치들은 회귀선 주위로 널리 흩어지고, 만일 모든 관측치들이 회귀선상에 놓이게 되면 $S_e=0$ 이 된다.

3.2.2 결정계수

결정계수는 구한 회귀선이 표본자료를 얼마나 잘 설명하는가를 설명해 주는 하나의 지표이다. 회귀분석에서 종속변수의 실제 관측치 Y_i 와 Y 값들의 평균 \bar{Y} 사이의 차이를 총편차라고 하는데, 이는 $(Y_i - \bar{Y})$ 으로 나타내는 설명 안 된 편차와 $(\hat{Y}_i - \bar{Y})$ 로 나타내는 설명된 편차로 구분할 수 있다.

$$(Y_i - \bar{Y}) = (Y_i - \hat{Y}_i) + (\hat{Y}_i - \bar{Y}) \quad (13)$$

위 식에서 양변을 각각 제곱한 후 이를 합한 값으로 전환시키면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sum (Y_i - \bar{Y})^2 &= \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 + \sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \\ \Rightarrow SST &= SSE + SSR \quad (14) \end{aligned}$$

총제곱합은 독립변수를 고려하지 않았을 경우 실제 관측치 Y_i 들이 이들의 평균 \bar{Y} 로부터 흩어진 정도를 나타낸다. 총제곱합을 이와 같이 분해함으로써 SSE의 크기로 회귀식의 적합도를 측정할 수 있다. 결정계수 R^2 은 종속변수 Y 의 총제곱합 중에서 회귀식으로 설명되는 제곱합이 차지하는 비율로 계산한다.

$$R^2 = \frac{\text{설명되는 변동}}{\text{총변동}} = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (15)$$

결정계수는 0부터 1까지의 값을 갖는다. 회귀선이 모든 자료에 완전히 적합하면 $SSE=0$ 이 되고 결정계수 R^2 은 1이 된다.

4. 해석모델과 실험결과와의 비교

4.1 부착실험

부착시편은 CSA(2002) 규정에 따라 너비, 폭, 높이가 각각 150 mm인 정육면체 콘크리트 속에 보강

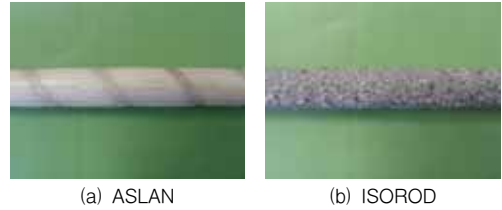


Fig. 1 GFRP 보강근

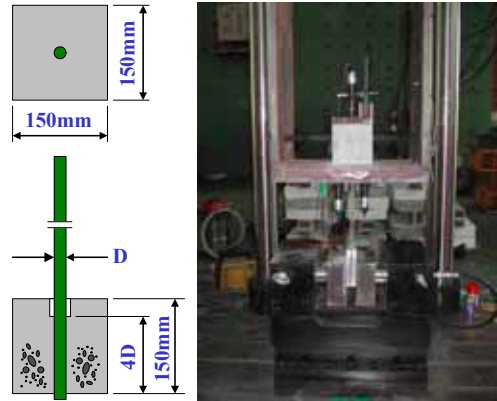


Fig. 2 부착시편 제원과 실험 전경

근이 직경(12.7 mm)의 4배만큼 길이가 부착되도록 제작되었다. 실험에 사용된 보강근은 이형철근과 외국에서 상용화된 GFRP 보강근(E-glass/vinylester) 2종(Fig. 1)이다. 부착실험은 철근에 대해 8개, GFRP 보강근에 대해서는 각각 3개씩 실시하였다.

Fig. 2에는 부착시편의 제원과 실험전경을 나타내었다. 실험시 보강의 슬립은 재하측 콘크리트 면과 재하 반대측 보강근의 끝에 LVDT를 설치하여 측정하였다.

4.2 적합성 검토

부착실험 결과와 각 모델들의 비교는 실험으로부터 구한 부착응력과 슬립을 최대부착응력과 이 값에 대한 슬립으로 나누어 정규화 시킨 후($\tau/\tau_m, s/s_m$)에 실시하였다. 정규화된 데이터에 대해 각 모델을 적용하여 최소지승법을 통해 각 모델의 매개변수를 결정하였으며 서술한 결정계수와 추정의 표준오차를 비교함으로써 각 모델의 적합성을 비교하였다.

4.2.1 이형철근

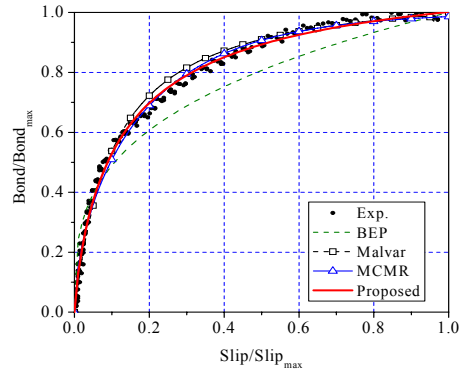
총 8개의 시편을 실험하였으며 실험결과에 대한 적합성 검토 결과를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 굵은 글씨는 결정계수의 최대값과 추정의 표준오차의 최소값을 나타낸다. 음영부분은 결정계수가 최대인 동시에 추정의 표준오차가 최소인 것을 의미하는 것으로 결과적으로 해당 시편에 대해 실험 데이터를 가장 적절하게 묘사하고 있는 모델을 나타낸다.

Fig. 3은 정규화된 실험 데이터를 각 모델에 대해 최소자승법을 적용하여 나타낸 예이다. Fig. 3에서는 시편에 따라 MCMR, Malvar, YPP 모델이 모두 실험값과 유사한 거동을 하는 것으로 관찰되나 Table 1에서 각 시편에 대해 부착응력-변형을 곡선을 가장 유사하게 표현하는 모델은 결정계수가 최대이면서 동시에 추정의 표준오차가 제일 작은 값을 가지는 모델(음영부분)로서 기존 모델들에 비해 새롭게 제안된 YPP 모델이 적합한 회수가 가장 많았다. 따라서 새롭게 제안된 모델을 기존 모델에 비해 보다 나은 적합성을 나타내고 있다고 볼 수 있다.

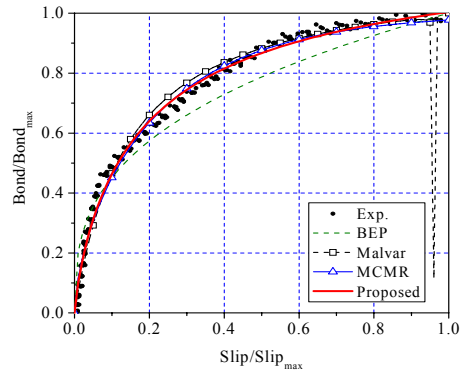
Fig. 3(b)의 Malvar 모델에서는 3.1절에서 서술한 바와 같이 부착응력-슬립 곡선이 부드럽게 연결되지 않는 점이 존재함을 확인할 수 있다. 이 때 s/s_m 은 0.96, 매개변수 F 와 G 는 각각 7.86, -7.19의 값을

가지게 되어 식 (1a)의 분모가 거의 0이 된다.

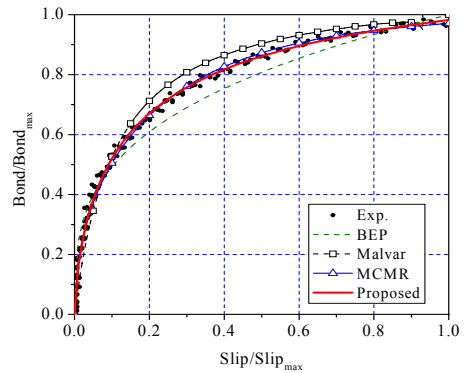
Table 2에는 회귀분석을 통하여 구한 철근에 대한 각 모델별 매개변수를 나타내었다.



(a) Steel 1



(b) Steel 2



(c) Steel 3

Fig. 3 모델의 적합성 비교 예(철근)

Table 1 결정계수와 추정의 표준오차(철근)

시편	BEP	MCMR	Malvar	YPP
1	0.928 (0.084)	0.989 (0.033)	0.988 (0.034)	0.993 (0.026)
2	0.937 (0.079)	0.986 (0.037)	0.985 (0.038)	0.990 (0.032)
3	0.955 (0.061)	0.988 (0.031)	0.966 (0.053)	0.991 (0.027)
4	0.882 (0.105)	0.991 (0.029)	0.987 (0.035)	0.994 (0.023)
5	0.934 (0.075)	0.993 (0.023)	0.992 (0.027)	0.993 (0.024)
6	0.919 (0.090)	0.997 (0.018)	0.996 (0.020)	0.998 (0.015)
7	0.885 (0.104)	0.996 (0.019)	0.992 (0.027)	0.997 (0.018)
8	0.839 (0.111)	0.966 (0.051)	0.967 (0.050)	0.964 (0.052)

(): 추정의 표준오차

Table 2 각 모델별 매개변수(철근)

시편	매개변수	BEP	MCMR	Malvar	YPP
1	α or F	0.31	0.58	10.50	1.19
	β or G		3.72	-9.88	5.30
	γ				0.18
2	α or F	0.34	0.63	7.86	1.26
	β or G		3.33	-7.19	3.86
	γ				0.18
3	α or F	0.31	0.49	10.06	1.28
	β or G		2.82	-9.71	3.34
	γ				0.31
4	α or F	0.41	1.25	3.45	1.04
	β or G		4.98	3.97	16.18
	γ				-0.59
5	α or F	0.44	1.02	3.94	1.19
	β or G		3.60	-2.26	5.13
	γ				-0.18
6	α or F	0.59	1.96	1.44	1.20
	β or G		4.15	1.47	5.53
	γ				-0.67
7	α or F	0.50	1.72	1.81	1.09
	β or G		4.77	3.66	11.46
	γ				-0.76
8	α or F	0.33	1.22	3.57	1.03
	β or G		6.05	13.67	25.42
	γ				-0.65

특히, 이형철근에 대해 BEP 모델을 적용한 경우 각 시편에 대한 매개변수 α 값들 중 95% 신뢰구간 내에 존재하는 값에 대한 평균은 0.40으로써 이형철근에 대해 CEB-FIP(1991)에서 채택하고 있는 값과 동일한 결과가 산출되었다.

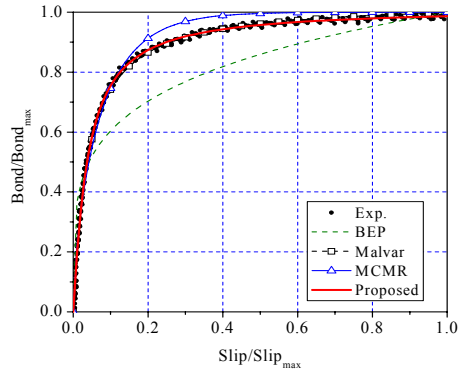
4.2.2 GFRP 보강근

GFRP 보강근에 대한 각 모델별 거동 예를 Fig. 4에 비교하여 나타내었고, 적합성 검토 결과를 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 철근의 경우와 마찬가지로 GFRP 보강근에 대해 BEP 모델에 비해 나머지 모델들이 상대적으로 높은 적합성을 나타내었으며, 새로 제안된 YPP 모델이 MCMR 모델과 Malvar 모델에 비해 보다 높은 적합성을 나타내었다.

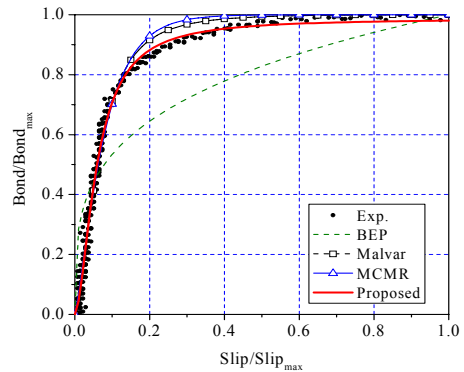
Table 4에는 GFRP 보강근에 대한 각 모델별 매개변수를 나타내었다.

Table 3 결정계수와 추정의 표준오차(GFRP 보강근)

시편 종류	번호	BEP	MCMR	Malvar	YPP
ALSAN	1	0.834 (0.129)	0.986 (0.037)	0.996 (0.021)	0.997 (0.018)
	2	0.849 (0.121)	0.992 (0.029)	0.996 (0.020)	0.996 (0.019)
	3	0.854 (0.119)	0.977 (0.047)	0.993 (0.025)	0.995 (0.021)
ISOROD	1	0.813 (0.126)	0.975 (0.046)	0.986 (0.035)	0.987 (0.034)
	2	0.831 (0.116)	0.985 (0.035)	0.987 (0.033)	0.986 (0.033)
	3	0.725 (0.167)	0.971 (0.054)	0.975 (0.050)	0.979 (0.046)



(a) ALSAN



(b) ISOROD

Fig. 4 모델의 적합성 비교 예(GFRP 보강근)

4.3 적합성 검토 결과

실험에 사용된 GFRP 보강근 중 ISOROD는 표면에 규사가 코팅된 형태로서 인발력에 대한 부착 저항력은 주로 마찰에 의해 발생한다. ASLAN은 표면에 약간의 규사 코팅과 와인딩에 의한 요철이 존재하는 형태로서 지압과 마찰에 의해 인발력에 저항하는 보강근이다. 이들 보강근에 대해 BEP 모델을 적용할 경우 매개변수 α 는 철근에 비해 낮은 평균 0.24 정도의 값을 나타내고 있다.

BEP 모델을 제외한 각 모델들의 매개변수는 대부분 큰 편차를 보이고 있기 때문에 각 GFRP 보강근에 대해 부착시편 3개의 실험결과를 고려한 본 연구에서는 이들에 대한 값을 정의하는 것은 다소 무리가 있는 것으로 사료되며, 향후 많은 수에 부착시편 실험을 통해 충분한 모집단이 구성되면 GFRP 보강근에 대한 신뢰성 있는 매개변수를 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 5는 시편에 대해 부착모델을 적용하여 적합성을 나타낸 Table 1과 3에서 각 모델별로 가장 높은 적합성을 나타낸 회수를 나타낸다. 그림에서 보듯이

Table 4 각 모델별 매개변수(GFRP 보강근)

FRP 종류	번호	매개변수	BEP	MCMR	Malvar	YPP
ALSAN	1	α or F	0.22	0.65	25.86	1.01
		β or G		10.19	-25.60	36.69
		γ				-0.10
	2	α or F	0.27	0.73	13.41	1.06
		β or G		6.96	-2.72	18.67
		γ				-0.11
	3	α or F	0.20	0.53	33.25	1.01
		β or G		9.30	-36.18	33.29
		γ				0.01
ISOROD	1	α or F	0.23	0.64	21.75	1.02
		β or G		8.55	-18.66	29.23
		γ				-0.09
	2	α or F	0.25	0.66	16.10	1.07
		β or G		7.12	-7.17	16.40
		γ				-0.02
	3	α or F	0.27	1.36	5.44	0.99
		β or G		14.72	146.30	135.35
		γ				-0.73

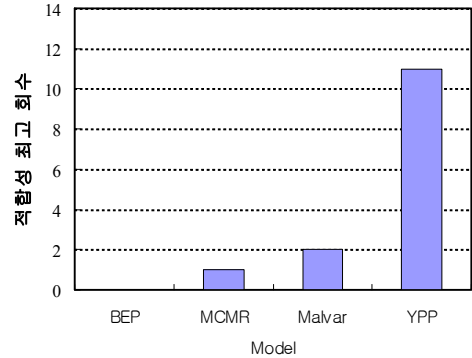


Fig. 5 모델별 적합성 최고 회수

새로 제안된 YPP 모델은 기존 해석모델에 비해 상대적으로 적합성이 우수함을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구는 보강근의 부착거동을 해석적으로 묘사하는 부착모델들의 적합성을 검토한 것으로 철근과 상용화된 GFRP 보강근 2종에 대해 총 14개의 부착실험결과를 해석적 부착모델에 적용하여 각 모델의 적합성을 비교하였다. 본 연구에서 도출된 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 부착실험 결과에 대한 해석모델들의 적합성을 비교한 결과, 제안된 YPP 모델은 각 시편에 대해 적합성이 가장 우수한 회수가 다른 모델들에 비해 많기 때문에 기존 해석모델에 비해 적합성이 우수하다고 할 수 있다.
- 2) 제안된 해석모델은 철근과 GFRP 보강근 모두에 대해 높은 적합성을 나타내므로 철근이나 실험에 사용된 GFRP 보강근에 대해 기존 모델들과 달리 보강근의 종류에 관계없이 적용할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 철근의 부착실험 결과에 BEP 모델을 적용한 경우 각 시편에 대한 매개변수 α 값들 중 95% 신뢰구간 내에 존재하는 값에 대한 평균은 0.40으로써 CEB-FIP에서 채택하고 있는 값과 동일한 결과가 산출되었다.

- 4) 상기 실험에 대해 제안된 부착모델의 매개변수는 큰 편차를 나타내고 있으므로 신뢰성 있는 매개변수 값을 얻기 위해서는 다수의 부착시험에 대한 실험이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 공공기술연구회 정책연구사업인 "FRP 복합재료 보강재 개발 및 이를 활용한 콘크리트 구조물 건설기술 개발" 연구비 지원에 의해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 강금식, EXCEL 활용 현대 통계학, 박영사, 2003.
2. 유영준, 박지선, 박영환, 유영찬, 김궁환, 김형열, "GFRP 보강근의 표면 형상과 거칠기에 따른 부착모델에 관한 연구," 봄학술발표 논문집, 한국구조물진단학회, 2005, pp. 61-66.
3. 한국건설기술연구원, FRP 복합재료 보강재 개발 및 이를 활용한 콘크리트 구조물 건설기술 개발, 1차년도 최종보고서, 2004.
4. Alunno, Rosetti, V., Calcota, D., and Giammatteo, M. M., "Local bond stress-slip relationships of glass fibre reinforced plastic bars embedded in concrete," *Mat. and Struct.*, Vol. 28, No. 180, 1995.
5. Burgoyne, C.J., "Should FRP be Bonded to Concrete?" *International Symposium Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures*, ACI SP-138, 1993.
6. Burong, Z. and Brahim, B., "Pullout Bond Properties of Fiber-Reinforced Polymer Tendons to Grout," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 5, 2002.
7. Comité Euro-International du Béton (CEB), CEB-FIP model code 1990, *Bulletin d'information*, Lausanne, Switzerland, 1991, pp.203-205.
8. Cosenza, E., Manfredi, G. and Realfonzo, R., "Analytical modeling of bond between FRP reinforcing bars and concrete," *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Proc. 2nd International RILEM Symposium (FRPRCS-2), Taerwe L., editor, 1995, pp.165-171.
9. Cosenza, E., Manfredi, G. and Realfonzo, R., "Behavior and Modeling of Bond of FRP Rebars to Concrete", *Journal of Composites for Construction*, Vol.1, No.2, 1997.
10. CSA Standard, *Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers*, Canadian Standards Association, S806-02, 2002.
11. Eligehausen, R., Popov, E.P., and Bertero, V.V., "Local Bond Stress-Slip Relations of Deformed Bars Under Generalized Excitations." Rep. No. UCB/EERC 83/23, *Earthquake Engineering Research Center*, University of California, Berkeley, 1983.
12. Faoro, M., "Bearing and deformation behaviour of structural components with reinforcements comprising resin bounded glass fibre bars and conventional ribbed steel bars," *Proc. Int. Conf. on Bond in Concrete*, 1992.
13. JSCE, *State-of-the-Art Report on Continuous Fiber Reinforcing Materials*, Concrete Engineering series 3, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, 1993.
14. Makitani, E., Irisawa, I., and Nishiura, N., "Investigation of Bond in Concrete Member with Fiber Reinforced Plastic Bars," *International Symposium Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures*, ACI SP-138, 1993.
15. Malvar, L.J., "Bond Stress-Slip Characteristics of FRP Rebars," TR-2013-SHR Naval facilities engineering service center, Port Hueneme, CA., 1994.
16. Malvar, L.J., Cox, J.V. and Bergeron, C.K., "Bond between Carbon Fiber Reinforced Polymer Bars and Concrete. I: Experimental Study," *Journal of Composites for Construction*, Vol. 7, No. 2, 2003.

(접수일자 : 2005년 10월 16일)