

# 보강근과 콘크리트 사이의 해석적 부착모델 비교

## Comparison of Analytical Bond Models between Reinforcement and Concrete

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

### 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 made by the CSA code and the rebars used in the test were steel and two kinds of GFRP rebar commercially utilized. The comparison of goodness-of-fit test for existing bond models and new proposed bond model was carried out by the least squares method. The result indicates that the new proposed bond model has better goodness-of-fit test than the existing ones.

### 1. 서론

섬유복합재료(Fiber Reinforced Polymer, 이하 FRP)는 내부식성 재료이기 때문에 이를 이용하여 철근 대체재인 FRP 보강근을 개발하고 콘크리트 구조물에 적용하여 철근 콘크리트 구조물의 부식문제를 근원적으로 해결하기 위한 연구가 일본과 유럽을 중심으로 진행되고 있으며, 국내에서도 이에 대한 연구를 한국건설기술연구원이 수행하고 있다(한국건설기술연구원, 2004).

철근 콘크리트 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 있어서 FRP 보강근과 콘크리트 사이의 부착은 철근과 콘크리트 사이의 부착과 다른 거동을 보이므로 이에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 철근과 상용화된 GFRP 보강근 2종(ASLAN, ISOROD)에 대한 부착실험 결과(한국건설기술연구원, 2004)를 바탕으로 기존 연구자들이 제안한 해석적 부착모델과 본 연구진들이 제안한 모델(유영준 등, 2004)에 대해 적합성을 검토하였다. 검토결과 새롭게 제안된 해석적 부착모델이 기존 부착모델에 비해 높은 적합성을 나타내었다.

### 2. FRP 보강근의 해석적 부착모델

Eligehausen 등(1983)은 이형 철근의 부착거동을 묘사하기 위한 BEP 모델을 제안하였다. 이 모델을

\*정회원, 한국건설기술연구원 연구원

\*\*정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

\*\*\*정회원, 한국건설기술연구원 연구위원

활용하여 FRP 보강근의 부착거동을 묘사하려는 연구를 많은 연구자들이 수행하였다(Alunno 등, 1995 ; Cosenza 등, 1995).

Cosenza 등(1997)은 부착응력이 최대가 될 때까지의 부착응력-슬립 관계만을 고려한 CMR 모델을 제안하였다. 이 모델에서 매개변수  $\alpha$ 와  $s_r$ 은 실험 데이터를 최소자승법을 통하여 보정함으로써 얻을 수 있다. 또한 상기 모델에서 무차원 매개변수인  $\beta$ 를 사용하여  $s_r=s_m/\beta$ 로 치환하면 개선된 모델(MCMR)을 얻을 수 있다(Malvar 등, 2003).

국내에서 FRP 보강근 개발과 관련하여 유영준 등(2005)은 FRP 보강근과 콘크리트 사이의 부착에 대해 새로운 모델(You, Park & Park; YPP)을 제안하였다. 이 모델은  $\alpha$ 와  $\beta$ ,  $\gamma$ 로 표현되는 세 개의 매개변수를 가지고 있으며 이 변수들은 실험 데이터를 최소자승법을 통하여 보정함으로써 구할 수 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. 회귀분석은 통계처리 소프트웨어(본 연구에서는 Microsoft사의 Excel)를 이용하여 간편하게 구할 수 있으므로 충분한 수의 인발 시험이 수행된다면 매개변수의 개수는 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 표 1에는 각 연구자에 의해 개발된 부착모델식을 나타내었다.

표 2 보강근의 부착모델식

모델명	모델식
BEP	$\frac{\tau}{\tau_m} = \left(\frac{s}{s_m}\right)^\alpha$
CMR	$\frac{\tau}{\tau_m} = [1 - \exp(-s/s_r)]^\alpha$
MCMR	$\frac{\tau}{\tau_m} = [1 - \exp(-\beta s/s_m)]^\alpha$
YPP	$\frac{\tau}{\tau_m} = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot (s/s_m)^{(1-\gamma)}}{1 + \beta \cdot (s/s_m)^{(1-\gamma)}}$

$\tau, s$  : 부착응력과 슬립

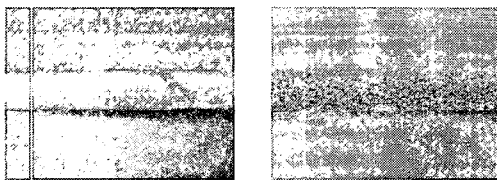
$\tau_m, s_m$  : 최대부착응력과 슬립

$\alpha, \beta, \gamma, s_r$  : 매개변수

### 3. 해석모델과 실험결과와의 비교

#### 3.1 부착실험

부착시험은 CSA(2002) 규준에 따라 너비, 폭, 높이가 각각 150 mm인 정육면체 콘크리트 속에 보강근이 직경(12.7 mm)의 4배만큼 길이가 부착되도록 제작되었다. 실험에 사용된 보강근은 철근과 상용화된 GFRP 보강근 2종(그림 1)이다. 부착실험은 각 보강근에 3개씩 실시하였다(한국건설기술연구원, 2004).



(a) ASLAN

(b) ISOROD

그림 1 GFRP 보강근

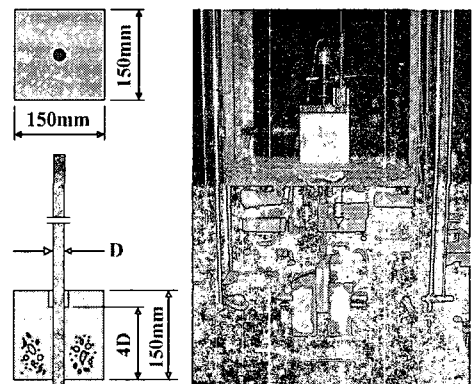


그림 2 부착시험편 제원과 실험 전경

#### 3.2 적합성 검토

부착실험 결과와 각 모델들의 비교는 실험으로부터 구한 부착응력과 슬립을 최대부착응력과 이 값

에 대한 슬립양으로 나누어 정규화 시킨 후( $\tau/\tau_m, s/s_m$ )에 실시하였다. 적합도 검정에는 추정의 표준 오차( $S_e$ )와 결정계수( $R^2$ )가 사용되었다. 종속변수의 값을 예측하는데 있어서 오류를 발생시키는 것은 오차항이기 때문에 추정의 표준오차를 통하여 오차항들을 검토함으로써 회귀선에 의한 예측의 정확성을 측정할 수 있다. 추정의 표준오차가 클수록 관측치들은 회귀선 주위로 널리 흩어지고, 만일 모든 관측치들이 회귀선상에 놓이게 되면  $S_e=0$ 이 된다. 결정계수  $R^2$ 은 종속변수의 총제곱합 중에서 회귀식으로 설명되는 제곱합이 차지하는 비율로 계산한 값으로 0부터 1까지의 값을 갖는다. 회귀선이 모든 자료에 완전히 적합하면 결정계수  $R^2$ 은 1이 된다.

정규화된 데이터에 대해 각 모델을 적용하여 최소자승법을 통해 각 모델의 매개변수를 결정하였으며 서술한 결정계수와 추정의 표준오차를 비교함으로써 각 모델의 적합성을 비교하였다.

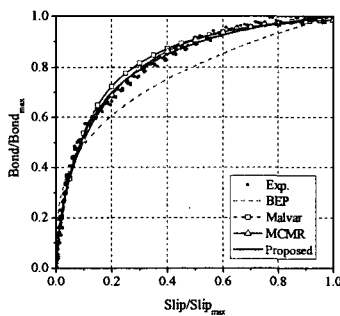
### 3.3 적합성 검토 결과

실험결과에 대한 적합성 검토 결과를 표 3에 나타내었다. 표에서 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.

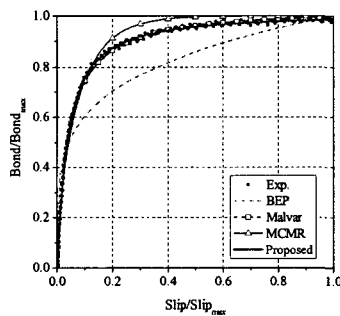
그림 3은 정규화된 실험 데이터를 각 모델에 대해 최소자승법을 적용하여 나타낸 예이다. 표 2와 그림 3에서 보듯이 새롭게 제안된 모델(YPP)이 실험 데이터와 가장 유사한 거동을 보이고 있과 적합성이 가장 우수한 것을 확인할 수 있다.

표 3 결정계수와 추정의 표준오차

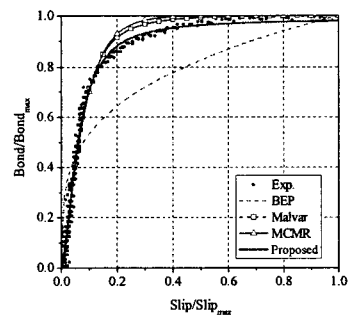
시편 종류	번호	BEP	MCMR	YPP
STEEL	1	0.928 (0.084)	0.989 (0.033)	<b>0.993</b> (0.026)
	2	0.937 (0.079)	0.986 (0.037)	<b>0.990</b> (0.032)
	3	0.955 (0.061)	0.988 (0.031)	<b>0.991</b> (0.027)
ALSAN	1	0.834 (0.129)	0.986 (0.037)	<b>0.997</b> (0.018)
	2	0.849 (0.121)	0.992 (0.029)	<b>0.996</b> (0.019)
	3	0.854 (0.119)	0.977 (0.047)	<b>0.995</b> (0.021)
ISOROD	1	0.813 (0.126)	0.975 (0.046)	<b>0.987</b> (0.034)
	2	0.831 (0.116)	0.985 (0.035)	<b>0.986</b> (0.033)
	3	0.725 (0.167)	0.971 (0.054)	<b>0.979</b> (0.046)



(a) Steel



(b) ASLAN



(c) ISOROD

그림 3 모델의 적합성 비교 예

## 4. 결론

본 연구는 보강근의 부착거동을 해석적으로 묘사하는 부착모델들의 적합성을 검토한 것으로 철근과

상용화된 GFRP 보강근 2종에 대해 총 9개의 부착실험 결과를 해석적 부착모델에 적용하여 각 모델의 적합성을 비교하였다. 이를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 부착실험 결과에 대한 해석모델들의 적합성을 비교한 결과, 새로 제안된 YPP 모델은 각 시편에 대해 적합성이 가장 우수한 회수가 다른 모델들에 비해 많기 때문에 기존 해석모델에 비해 보강근의 부착거동을 좀 더 유사하게 표현하고 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 있다.
- 3) 상기 실험에 대해 제안된 부착모델의 매개변수는 큰 편차를 나타내고 있으므로 신뢰성 있는 매개변수 값을 얻기 위해서는 다수의 부착시편에 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. 유영준, 박지선, 박영환, 유영찬, 김공환, 김형열, "GFRP 보강근의 표면 형상과 거칠기에 따른 부착 모델에 관한 연구," 봄학술발표회 논문집, 한국구조물진단학회, 2005, pp.61-66.
2. 한국건설기술연구원, FRP 복합재료 보강재 개발 및 이를 활용한 콘크리트 구조물 건설기술 개발, 1차년도 최종보고서, 2004.
3. Alunno, Rosetti, V., Caleota, 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.
4. 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.
5. 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.
6. CSA Standard, Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers, Canadian Standards Association, S806-02, 2002.
7. 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.
8. 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.