

# 탄소섬유시트와 콘크리트 구조물의 부착-슬립 모델

## Bond-Slip Model of Interface between Concrete Structures and CFRP Sheets

강 석 화\* 김 호 진\*\* 남 진 원\*\*\* 이 우 철\*\*\*\* 유 용 하\*\*\*\*\* 변 근 주\*\*\*\*\*  
Kang, Suk-Hwa Kim, Ho-Jin Nam, Jin-Won Lee, Woo-Cheol Yoo, Yong-Ha Byun, Keun Joo

### ABSTRACT

In this study, new bond-slip model is proposed. The proposed bond-slip model which has bilinear ascending regions and exponential descending region by modifying the conventional bilinear bond-slip model has been verified. Then, result by finite element analyses using interface element implemented with bond-slip model compared well with those of existing experiment researches on bond-slip models. It is shown that bond strength and effective bond length predicted by the bond-slip model and finite element analysis is good agreement with those of pull tests.

### 1. 서론

탄소섬유시트 보강공법은 콘크리트 구조물의 보강에 많이 사용되는 보강공법이다. 이러한 탄소섬유 보강공법에서는 콘크리트와 CFRP시트 사이의 경계면 거동이 전체 보강구조물의 거동을 지배하게 된다.

본 연구에서는 경계면 부착거동해석에 효과적으로 사용될 수 있는 새로운 부착-슬립 모델을 제시하고, 경계면의 부착거동을 해석할 수 있는 해석기법을 제안하였다. 새롭게 제시된 부착-슬립 모델은 기존의 이중선형 부착-슬립 모델을 개선한 것으로서, 전단응력이 증가하는 구간을 2개의 직선구간으로 구성하고, 전단응력이 감소하는 구간을 지수함수로 구성한 것이다. 제안된 부착-슬립 모델과 유한요소 해석기법은 모형실험에 의하여 타당성이 검증되었으며, 기존의 부착전단 연구결과 및 경계면 거동모델 해석결과와의 비교를 통하여 검증하였다. 제안된 부착-슬립 모델과 유한요소해석기법이 전체적인 경계면 부착거동, 부착강도, 유효부착길이를 타당성 있게 예측하는 것을 입증하였다.

\* 정회원, 연세대학교 건설공학연구소 연구원

\*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\*\* 정회원, (주)콘크리닉 기술연구소 소장

\*\*\*\*\* 정회원, (주)콘크리닉 대표이사

\*\*\*\*\* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

## 2. 부착-슬립 모델과 유한요소해석

### 2.1 부착-슬립 모델의 제안

본 연구에서는 그림 1과 같은 Yuan et al.(2004)의 이중선형 부착-슬립 모델을 바탕으로 개선한 부착-슬립 모델을 다음 그림 2와 같이 상승부에는 2개의 직선, 하강부에는 지수함수를 도입하여 제안하였다. 상승부가 나누어지는 지점은  $\delta = 0.5\delta_1$  일 때,  $\tau = 0.7\tau_f$  인 지점으로 설정하였으며, 기존의 부착-슬립 모델들을 분석하여 이 지점이 타당성이 있음을 확인하였다.

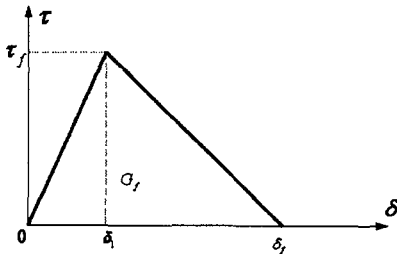


그림 1. 기존의 이중선형 부착-슬립 모델(Yuan et al., 2004)

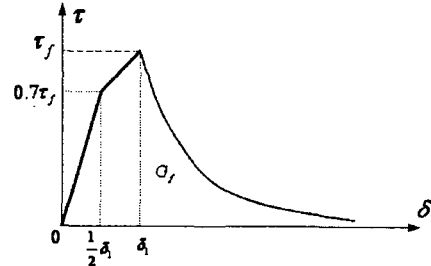


그림 2. 제안된 부착-슬립 모델

제안된 부착-슬립 모델의 전단응력( $\tau$ )은 다음 식1과 같이 슬립( $\delta$ )의 함수로 표현된다.

$$f(\delta) = \begin{cases} 1.4 \frac{\tau_f}{\delta_1} \delta & 0 \leq \delta \leq \frac{1}{2} \delta_1 \\ \frac{\tau_f}{10} \left( \frac{6\delta}{\delta_1} + 4 \right) & \frac{1}{2} \delta_1 < \delta \leq \delta_1 \\ \tau_f \exp\left\{ \frac{-\tau_f}{G_f - G_f^a} (\delta - \delta_1) \right\} & \delta > \delta_1 \end{cases} \quad (\text{식 1})$$

위의 관계식을 이용하여, 각 구간별로 부착단부로부터 임의의 거리만큼 떨어진 지점에 대한 경계면에서의 전단응력( $\tau$ )과 슬립( $\delta$ ), CFRP시트에 발생하는 수직응력( $\sigma$ ) 등을 구할 수 있는 식을 각각 유도하였다. 또한 이렇게 유도된 식으로부터 부착강도와 유효부착길이를 예측할 수 있는 모델식을 각각 식2와 식3과 같이 유도하였다.

$$P_u = \beta_L \left\{ \frac{\tau_f b_p}{\lambda_3} + \frac{7\tau_f b_p}{10\lambda_2} \right\} \quad (\text{식 2}) \quad L_e = \frac{1}{\lambda_3} \tanh^{-1} \left( 0.99 - \frac{\lambda_3}{1000\lambda_2} \right) \quad (\text{식 3})$$

### 2.2 유한요소해석

본 연구에서는 제안된 부착-슬립 모델을 적용하여 경계면을 모델링한 경계면 요소를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 콘크리트는 평면응력요소, CFRP시트는 보요소, 경계면 요소의 재료모델은 점착제인 에폭시의 재료특성을 적용하였다.

### 2.3 제안된 부착-슬립 모델과 유한요소해석의 검증

제안된 모델과 유한요소해석결과를 검증하기 위하여 Tan(2002)의 시험체 중, PG1-22 시험체의 실험결과를 참고하였으며, 제안된 모델과 기존의 부착-슬립 모델을 이용하여 PG1-22 시험체의 보강재에서 발생하는 변형률을 구현하면 다음 그림 3.1~3.2와 같다. 제안된 모델은 박리파괴 발생 전후의 양단계에서 기존의 부착-슬립 모델들과 비교하여 모두 안전측을 고려하여 실험값과 가장 유사한 변형률 분포를 보이고 있는 것을 그림3을 통하여 알 수 있다.

한편, 제안된 부착-슬립 모델을 적용한 경계면 요소를 도입하여 수행한 유한요소해석결과는 그림 4.1~4.3과 같다. 경계면 요소를 적용한 유한요소해석이 보다 정확하게 이루어짐을 그림 4.1에서 확인할 수 있다. 또한 그림 4.2와 4.3으로 부터 경계면 요소를 적용한 유한요소해석결과가 제안된 부착-슬립 모델을 잘 반영하고 있으며, 부착-슬립 모델 보다 안전측에서 실험결과를 예측하고 있음을 알 수 있다.

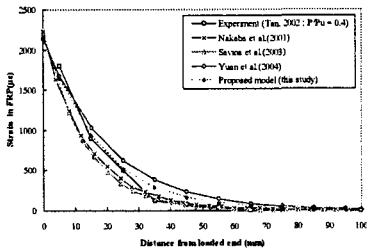


그림 3.1 박리파괴 발생전의 보강재의 변형률 비교

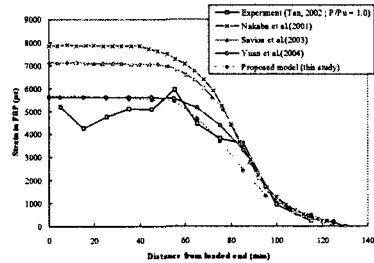


그림 3.2 박리파괴 발생후의 보강재의 변형률 비교

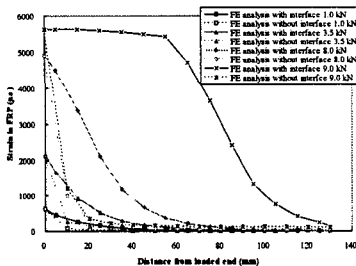


그림 4.1 경계면 요소 유·무에 따른 해석결과 비교

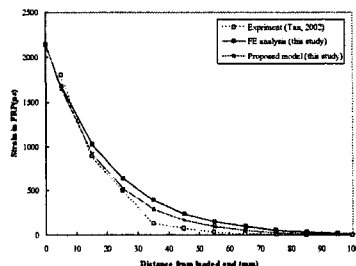


그림 4.2 박리파괴 발생전의 보강재의 변형률 비교

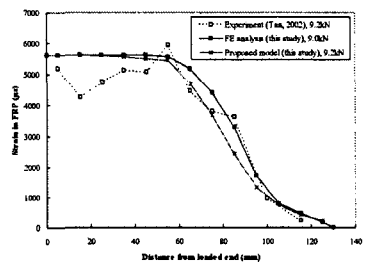


그림 4.3 박리파괴 발생후의 보강재의 변형률 비교

### 3. 직접부착전단 실험결과와 유한요소해석결과 비교

본 연구에서는 CFRP시트로 보강된 콘크리트 구조물의 경계면 부착거동을 직접 확인하기 위하여 다음 표1과 같은 제원을 갖는 시험체를 부착길이별로 3개씩 제작하여 직접부착전단 실험을 수행하였다.

표1. 직접부착전단 실험에 사용된 시험체의 제원

콘크리트			CFRP시트			
크기 (mm)	압축강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	부착폭 (mm)	부착길이 (mm)	두께 (mm)	탄성계수 (MPa)
76×100×400	30	26,000	70	100, 175, 250	2	31,000

#### 3.1 유한요소해석과 실험결과의 비교

그림 5.1~5.3은 직접부착전단 실험결과와 유한요소해석 결과를 부착길이별로 비교한 것이다. 그림 5.1~5.3으로 부터 박리파괴 발생전의 단계에서는 유한요소해석결과와 실험결과치가 거의 일치함을 확인할 수 있다. 박리파괴 발생후의 단계에서는 직접부착전단 실험에서 자주 나타나는 현상인 부착단부

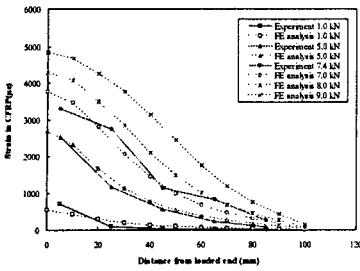


그림 5.1 부착길이 100mm인 경우의 결과 비교

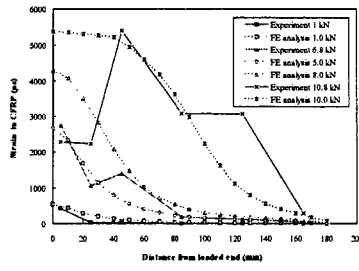


그림 5.2 부착길이 175mm인 경우의 결과 비교

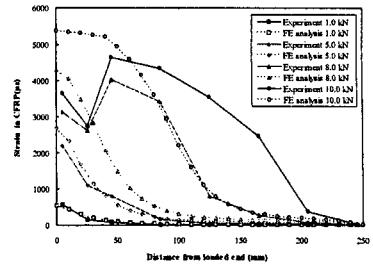


그림 5.3 부착길이 250mm인 경우의 결과 비교

의 변형을 감소현상을 구현하지는 못하고 있지만 파괴하중과 박리파괴가 발생하는 길이를 잘 예측하고 있는 것으로 판단된다.

### 3.2 부착강도와 유효부착길이

부착강도와 부착길이에 관하여 본 연구의 예측모델, 유한요소해석, 실험결과 Chen and Teng(2001)의 모델을 비교하면 표2와 같고, 이 결과로부터 제안된 부착강도와 부착길이 예측식이 가장 합리적이라고 판단된다. 이 결과를 근거로 CFRP시트의 단위폭(mm)당의 부착강도와 유효부착길이를 예측할 수 있는 상관관계를 그림 6과 같이 제안하였다. 유효부착길이를 제안하였다.

표2. 부착전단실험의 결과와 예측결과

부착 길이 (mm)	Chen and Teng (2001)		제안된 모델		유한요소 해석 부착강도 (kN)	실험 부착강도 (kN)	비고
	유효부착 길이 (mm)	부착 강도 (kN)	유효부착 길이 (mm)	부착 강도 (kN)			
100	106	7.9	124	9.7	9.0	7.4	부착폭 30mm
175	106	8.0	124	10.1	10.0	10.8	
250	106	8.0	124	10.1	10.0	10.0	

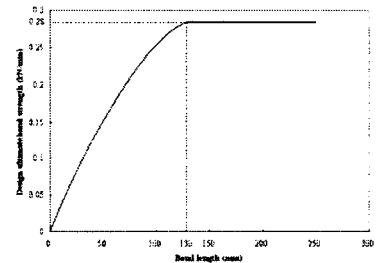


그림 6. 제안된 단위폭당 부착강도와 유효부착길이

### 4. 결론

- (1) CFRP시트로 보강된 콘크리트 구조물의 경계면 부착거동에 효율적으로 적용될 수 있는 부착-슬립 모델을 제안하고, 제안된 부착-슬립 모델을 적용한 경계면 요소를 도입하여 유한요소해석을 수행하였다. 제안된 부착-슬립 모델과 유한요소해석기법은 기존의 부착-슬립 모델 및 실험결과와 비교하여 경계면 부착거동을 잘 예측하는 것으로 검증되었다.
- (2) 직접부착전단 실험을 수행하여 부착강도와 유효부착길이에 대한 타당성을 검증하였으며, 설계극한부착강도와 유효부착길이를 제안하였다.

### 참고문헌

1. Yuan, H., Teng, J.G., Seracino, R., Wu, Z.S., and Yao, J.,(2004), "Full range behavior of FRP to concrete bonded joints", *Engineering Structures*, Vol. 26, pp. 553-565.