

# FRP-콘크리트 계면의 부착모델 I : 이론적 연구

## Bond-Slip Model for FRP-Concrete Interface I : Theoretical Approach

조근희\*    조정래\*\*    김병석\*\*\*    이영호\*    진원종\*\*    김성태\*\*  
Cho, Keun Hee    Cho, Jeong Rae    Kim, Byung Suk    Lee, Young Ho    Chin, Won Jong    Kim, Sung Tae

---

### ABSTRACT

A new method is proposed to obtain bond-slip model for an adhesive joint between FRP and concrete. Interface element, which can describe the bond behavior, is developed in order to overcome the restriction that complex constitutive relations cannot be modeled in analytic solution. Calibrating numerical bond-slip model to experimental results, multi-objective optimization problem is constructed by physical programming method, and is solved using genetic algorithm. The validity of proposed method is demonstrated by comparing known analytic solution and numerically optimized solution.

---

### 1. 서론

노후한 콘크리트 교량의 안전성을 향상시키고 사용 수명을 연장시키기 위하여 FRP sheet(Fiber Reinforced Polymer Sheet)를 접착하는 보수보강 공법이 적극 검토되고 있다. 그리고 신설되는 교량 바닥판으로서 강재를 FRP로 대체한 FRP-콘크리트 합성 바닥판에 대한 연구도 이루어지고 있다. FRP를 보수보강용 또는 신설 교량용으로 사용하는 경우, FRP와 콘크리트 부재와의 합성 거동을 유도 하기 위하여 FRP와 콘크리트를 접착시켜야 한다. 따라서 FRP와 콘크리트 사이의 적절한 접착 방법의 개발 및 이에 대한 거동 특성을 규명할 필요성이 있다. 이 연구는 FRP와 콘크리트를 규사 코팅 또는 에폭시로 부착하는 경우에 대해 부착모델을 구하는 이론적인 방법을 제시하고자 하였다.

부착 거동 특성에 대한 기존 연구들(Yuan 등, 1999; Chen 등, 2001; Wu 등, 2002)은 파괴역학에 기초한 부착모델을 대입하여 얻은 해석해를 실험 결과와 비교하여 부착강도를 산출하였다. 따라서 부착 모델은 해석적 방법으로 접근할 수 있는 비교적 간단한 모델로 제한된다. 하지만 실제의 부착 거동은 이와는 다소간 차이가 있으므로(조근희 등, 2002), 이를 극복할 수 있는 방법이 필요하다. 이에 임의의 함수로 정의된 부착모델을 기술할 수 있는 계면요소(Interface Element) 정식화를 수행한다. 또한 실제 부착 거동을 기술할 수 있는 부착모델을 찾기 위한 방법으로서 유한요소법을 통해 구한 수치해석해와 실험결과와의 차이를 최소화하도록 Physical Programming 기법(Messac, 1996)으로 최적화 문제를 구

---

\* 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원

\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 연구원

\*\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

성하고 이를 Genetic Algorithm(Goldberg, 1989)에 의해 최적화를 수행하였다. 그리고 기지의 부착모델에 대해 최적화를 수행하여 제시한 방법의 타당성을 검증하였다.

## 2. 계면요소 정식화

계면요소는 계면의 거동을 수직 및 전단응력과 이에 대응하는 변위로 나타내는 요소로, 점과 점을 연결하는 스프링요소를 선과 선 또는 면과 면을 연결할 수 있도록 확장한 것이다. 요소의 형상 및 필드변수에 따라 1차원, 2차원, 3차원 요소로 나눌 수 있으며, 여기서는 1차원 요소(그림 1 참조)를 기준으로 한 정식화 과정을 소개한다.

계면요소에서 1면, 2면의 변위를 각각  $u^1(x)$ ,  $u^2(x)$ 라 하면, 상대변위  $u(x)$ 는 두 변위의 차로 정의된다.

$$u(x) = u^2(x) - u^1(x) \quad (1)$$

그리고, 계면요소의 전단응력  $\tau(x)$ 는 상대변위에 대한 전단응력을 정의하는 부착모델의 구성관계함수  $g(u)$ 에 의해 얻어진다.

$$\tau(x) = g(u(x)) \quad (2)$$

Isoparametric formulation을 도입하여, 각 면의 변위벡터를 보간하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u^1(x) &= \mathbf{N}(\xi)\hat{\mathbf{u}}^1 \\ u^2(x) &= \mathbf{N}(\xi)\hat{\mathbf{u}}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $\hat{\mathbf{u}}^1$ ,  $\hat{\mathbf{u}}^2$ 는 각각 1, 2면의 절점변위이고,  $\mathbf{N}(\xi)$ 는 형상함수이다. 식 (1)에 의해 상대변위는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u(x) = \mathbf{M}\hat{\mathbf{u}} = [-\mathbf{N} \quad \mathbf{N}] \begin{Bmatrix} \hat{\mathbf{u}}^1 \\ \hat{\mathbf{u}}^2 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

비선형 해석 단계에서 절점하중-절점변위 관계를 구하기 위하여 가상변위법을 적용한다.

$$\int_L \delta u^T (\tau^j + \Delta\tau^j) dx = \delta \hat{\mathbf{u}}^T \mathbf{F}^{j+1} \quad (5)$$

여기서,  $t$ 는 계면요소의 폭이고,  $\mathbf{F}^{j+1}$ 은  $j+1$  단계의 절점력으로서 다음 식과 같다.

$$\mathbf{F}^{j+1} = \int_{-1}^1 \mathbf{M}^T \tau t \frac{dx}{d\xi} d\xi + \int_{-1}^1 \mathbf{M}^T \frac{d\tau}{du} \mathbf{M} t \frac{dx}{d\xi} d\xi \Delta \hat{\mathbf{u}} \quad (6)$$

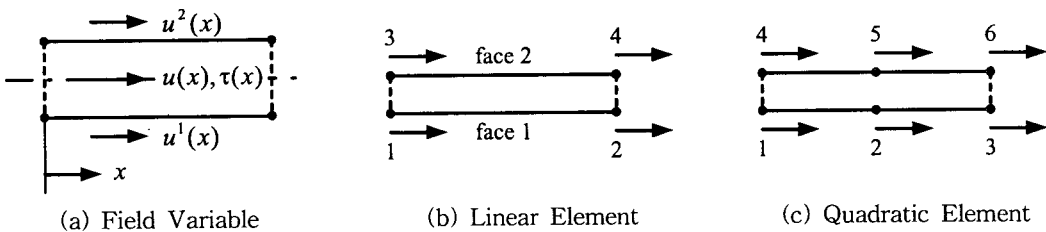


그림 1 계면요소 : 1차원

### 3. 부착모델의 결정 방법

실험 결과로부터 적절한 부착모델을 결정하기 위해서는 실험 오차를 적게 포함하면서 부착 특성을 잘 표현하는 측정변수를 선정하여야 한다. 그리고 이 측정변수에 대해 실험 결과와 수치해석해의 차이가 최소화되도록 부착모델의 매개변수를 결정하여야 하며, 이 연구에서는 최적화 기법을 적용한다. 실험으로부터 얻을 수 있는 측정변수들 중에 하중-치짐 곡선 또는 변형률을 기준으로 최적화 문제를 구성할 수 있으며, 여기서는 변형률을 기준으로 정식화를 수행한다. 그리고 각 측정 위치에 대해서 동일한 오차 한계를 적용하는 단일 최적화 기법을 사용하기 보다는 다중 최적화 기법을 사용하여 오차 한계를 상대적으로 적용할 수 있도록 하였다.

다중 최적화 문제를 구성하는 방법으로는 Messac이 처음 제안한 Physical Programming 기법을 사용하였다. Physical Programming 기법은 각 설계인자에 대해 그림 2와 같이 선호도 함수(Preference Function)를 정의하고 이의 합으로써 목적함수를 구성한다. 이 때 선호도 함수는 설계인자에 대한 만족도를 기준으로 구간을 나누고, 각 구간별로 문제 유형에 따라 함수값을 대응하여 정의한다. 따라서 직접적인 물리량을 기준으로 최적화 문제를 구성하기 보다는 선호도를 기준으로 최적화 문제를 구성하기 때문에 각 설계인자의 물리량 및 변화량에 상관없이 각 목적함수 간에 통일된 척도를 갖게 할 수 있으며, 각 설계인자의 최적화 기준을 직접적으로 적용할 수 있기 때문에 합리적인 다중 최적화 문제 구성 방법이라 할 수 있다.

부착모델을 실험에 대해 최적화하는 다중 최적화 문제는 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\text{Minimize } J = \frac{1}{n_o} \sum_{i=1}^{n_o} J_i \text{ subject to } \begin{cases} \mu_i(d_j) \leq \mu_{\infty} & i=1, \dots, n_o \\ d_{j,\min} \leq d_j \leq d_{j,\max} & j=1, \dots, n_m \end{cases} \quad (7)$$

여기서,  $n_o$ ,  $n_m$ 은 각각 측정위치의 개수와 부착모델의 매개변수 개수이고,  $d_j$ 는 최적화변수 즉 부착모델의 매개변수를 나타낸다.  $\mu_i$ 는 최적화인자로서 각 측정위치에 대한 변형률의 차이로 정의한다.

$$\mu_i = \frac{\|\epsilon_{exp,i} - \epsilon_{ani,i}\|}{n_{di}} \quad (8)$$

그리고  $J_i$ 는 최적화인자  $\mu_i$ 에 대한 선호도 함수  $f_{\mu_i}$ 로 정의된다.

$$J_i = f_{\mu_i}(\mu_i(d)) \quad (9)$$

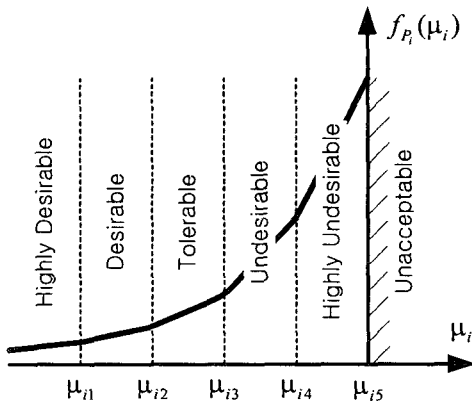


그림 2 선호도 함수의 한 형태

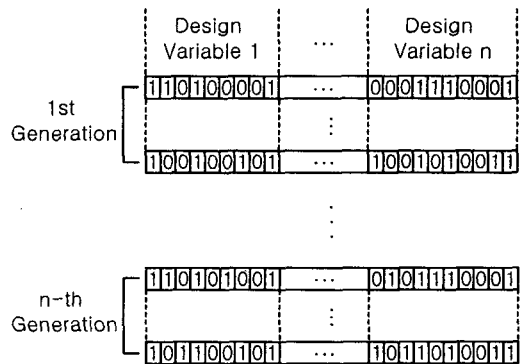


그림 3 설계변수의 2진법 표기

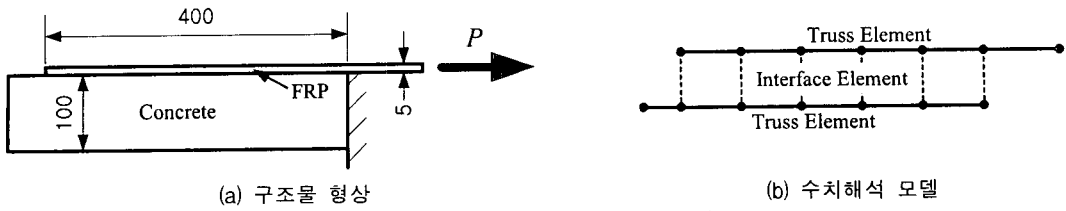


그림 4 구조물 형상 및 수치해석 모델

이상과 같이 구성된 최적화 문제는 Genetic Algorithm(Goldberg, 1989)에 의해 최적화를 수행한다. Genetic Algorithm은 주어진 영역 내에서 목적함수에 대한 적합성(Fitness)을 기준으로 설계변수들의 최적해를 찾아가는 진화론적 최적화 방법이다. 각각의 설계변수들을 염색체(Chromosome)로 간주되는 기호열로 표시하고, 이 기호열에 교배(Crossover), 변이(Mutation), 재생산(Reproduction) 등의 유전자 조작을 반복함으로써 다음 세대(Generation)의 염색체들이 더 우수한 적합도를 갖도록 진화시키는 방법이다(그림 3 참조). 따라서, 최적화를 수행하기 위해 검색영역 내의 미분 정보가 필요치 않고, 국부적인 최소/최대값을 찾을 확률도 적으며 초기값 설정에 따른 민감성이 없어 초기값을 임의로 생성할 수 있는 이점을 가진다.

#### 4. 검증

이 연구에서 제안한 부착모델 결정 방법의 타당성을 검증하기 위하여 부착모델을 알고 있는 해석해와 비교하도록 한다. 검증 예제의 구조물 형상은 그림 4(a)와 같으며, 이를 그림 4(b)와 같이 트러스요소와 계면요소로 모델링 하였다. 그리고 해석해를 구하기 위하여 적용한 부착모델은 Wu 등(2002)의

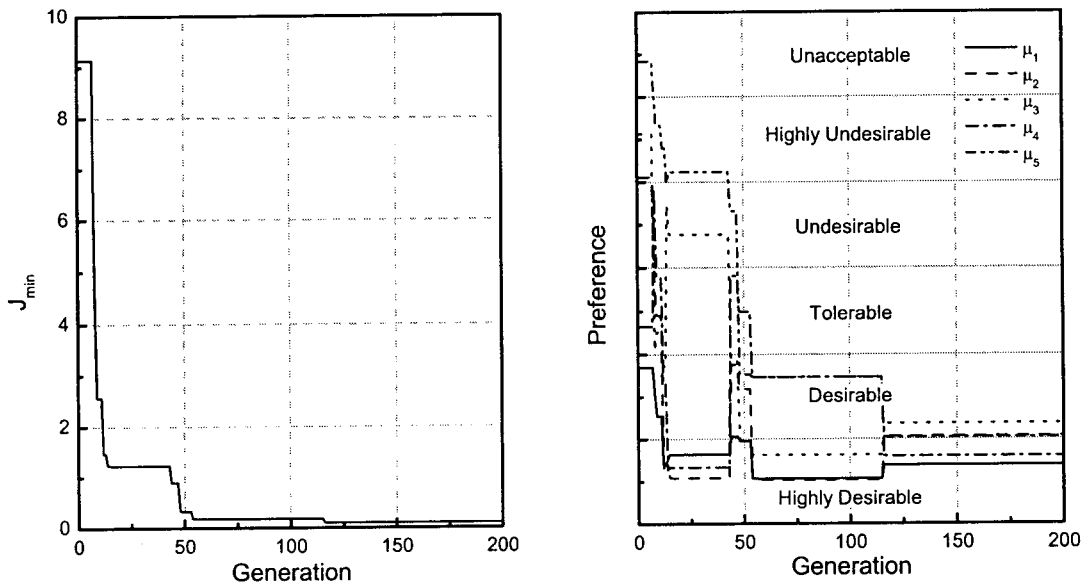
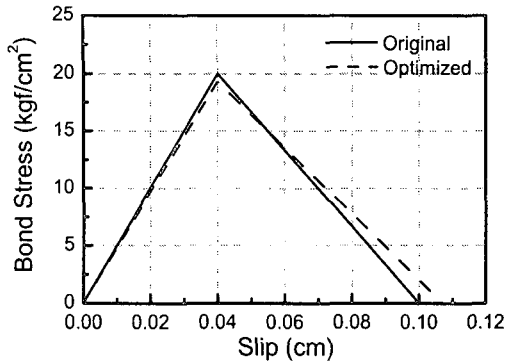
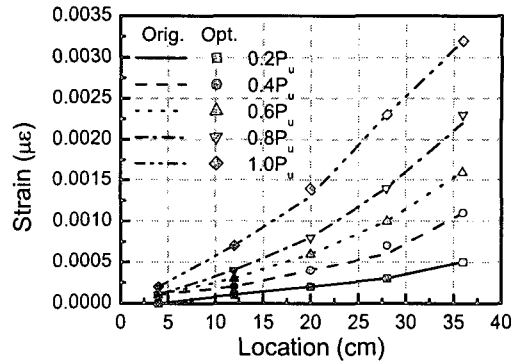


그림 5 최적화 과정 중의 목적함수 및 선호도 변화 양상



(a) 최적화된 부착모델



(b) 변형률 분포

그림 6 최적화된 부착모델 및 이의 변형률 분포

연구에서 모델 II에 해당하며,  $\delta_1$ ,  $\delta_f$ ,  $\tau_f$ 는 각각 0.04cm, 0.1cm, 20kgf/cm<sup>2</sup> 이다(그림 6(a) 참조).

2, 3장에서 제시한 방법으로 부착모델의 최적화를 수행하였다. 그림 5(a)는 목적함수의 세대별 최소값( $J_{min}$ )에 대한 변화양상을 도시한 것이다. 최초 세대에는 임의로 생성된 초기값의 영향으로 상당히 큰 목적함수값을 보이나 이 후 세대부터는 급격히 감소하여 116세대부터는 별다른 변화를 보이지 않아 200회 때의 값을 최종값으로 결정하였다. 그림 4(b)는 개별적인 선호도의 변화양상으로 모두 Desirable, Highly Desirable 영역에 있으므로 만족할 만한 최적화라 할 수 있다.

이러한 최적화 과정을 수행하여 얻은 최적화된 부착모델은  $\delta_1$ ,  $\delta_f$ ,  $\tau_f$ 가 각각 0.04cm, 0.107cm, 19.7kgf/cm<sup>2</sup>으로 그림 6(a)에서 보는 바와 같이 원래의 부착모델과 거의 일치한다. 그리고, 원래의 모델을 해석해에 대입하여 얻은 변형률 분포와 최적화된 부착모델을 수치해석에 적용하여 얻은 변형률 분포를 비교하여 보면 서로 잘 일치함을 알 수 있다(그림 6(b) 참조). 따라서 제시한 계면요소 정식화 방법 및 최적화를 통한 부착모델의 결정 방법은 타당하다고 볼 수 있다.

## 5. 결론

FRP와 콘크리트 사이의 부착 거동에 대해 부착모델을 구하는 정식화 과정을 제시하였다. 파괴역학에 기초한 부착모델을 해석해에 대입하는 기존 방법은 비교적 간단한 부착모델만을 적용할 수 있는 반면, 이 연구에서는 부착 거동을 기술할 수 있는 계면요소를 개발하고 이를 수치해석에 적용함으로써 임의의 부착모델을 표현할 수 있도록 하였다. 또한 수치해석 및 실험 결과로부터 부착모델을 결정하기 위한 방법으로서 Physical Programming 기법에 의해 다중최적화 문제를 구성하고 이를 Genetic Algorithm을 통해 최적화를 수행하였다. 제시된 계면요소 및 부착모델 최적화 방법을 검증하기 위하여 부착모델을 알고 있는 해석해에 대해 최적화를 수행하였으며, 원래 모델과 최적화된 모델은 서로 잘 일치하므로 제시된 방법은 타당하다고 할 수 있다.

## 감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원의 기관고유사업인 장수명 합리화 바닥판 개발(I)의 과제 지원금에 의해

수행된 것입니다.

#### 참고 문헌

1. 조근희, 이영호, 김병석, 김영진 (2003) FRP와 콘크리트의 부착 거동 특성 : 해석적 연구, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회 (심사중).
2. Chen, J.F. and Teng, J.G. (2001) Anchorage Strength Models for FRP and Steel Plates Bonded to Concrete, Journal of Structural Engineering, Vol. 127, No. 7, pp. 784-791.
3. Goldberg, D.E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, Reading Mass.
4. Messac, A. (1996) Physical Programming: Effective Optimization for Computational Design, AIAA Journal, Vol. 34, No. 2, pp. 149-158.
5. Wu, Z., Yuan, H. and Niu, H. (2002) Stress Transfer and Fracture Propagation in Different Kinds of Adhesive Joints, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 128, No. 5, pp. 562-573.
6. Yuan, H. and Wu, Z. (1999) Interfacial Fracture Theory in Structures Strengthened with Composite of Continuous Fiber, Proceeding of Symposium of China and Japan: Science and Technology of 21st Century, Tokyo, September, pp. 142-155.