

# 철근콘크리트 부재의 부착응력-미끌림 관계와 균열폭 예측

## Prediction of Crack Width and Bond Stress-Slip Relationships in Reinforced Concrete Members

김장현\*      이기열\*\*      김대중\*\*\*      김우\*\*\*\*  
Kim, Jang Hyun   Lee, Ki Yeo   Kim, Dae Joong   Kim, Woo

### ABSTRACT

This study deals with the estimation of the crack width by stabilized cracking considering bond-slip relationships in reinforced concrete members. The proposed method utilizes the sameness of tension stiffening and a change of bond-slip relationships because of concrete's splitting. The validity, accuracy and efficiency of the proposed method are established by comparing the analytical results with the experimental date and the major code specifications. The analytical results of analysis presented in this study indicate that the proposed method can be effectively estimated the crack width of the reinforced concrete members.

### 1. 서론

콘크리트 구조 부재가 사용기간 중 그 기능과 역할을 충분히 수행하기 위해서는 사용하중하에서 균열폭, 처짐 등과 같은 사용한계상태 조건을 만족해야 한다. 그 중에서 균열폭 제어의 중요성 때문에 현재까지 많은 연구자들이 균열폭에 관한 연구를 수행하고 있지만 피복두께, 철근의 응력상태, 철근비와 직경, 콘크리트 강도, 부착응력, 유효인장단면적 및 인장강화효과 등과 같은 다양하고 복잡한 변수와 균열단계에 따른 변형적합조건의 차이 때문에 정확하게 예측하는데 있어서 어려움이 따른다. 이와 같은 문제점들을 보완하기 위하여 균열폭에 대한 현행 설계기준 규정이나 여러 연구자들의 제안식은 철근과 콘크리트 경계면에서 발생하는 부착특성을 무시하거나 평균부착응력 개념으로 도입하고 또한 횡방향 균열만을 고려한 균열형성단계의 이론을 균열안정화단계까지 그대로 적용하고 있다. 그러나 균열안정화단계에서는 변형적합조건의 차이와 하중 증가에 따라 균열면에서 국부적으로 발생하는 쪼갬균열의 영향 및 실제 부착응력-미끌림 특성 등을 충분히 고려하지 못하고 있다. 따라서 이 논문에서는 균열안정화단계에서 실제 부착응력-미끌림 관계와 쪼갬균열의 특성을 모두 고려할 수 있는 균열폭 모델을 제안하는 것이다.

\*정회원, 전남대학교 토목공학과 석사과정

\*\*정회원, 전남대학교 토목공학과 박사후연구원

\*\*\*정회원, 전남도립 남도대학 토목환경과 부교수

\*\*\*\*정회원, 전남대학교 건설지구환경공학부 교수

## 2. 균열폭 모델

### 2.1 균열안정화 조건

균열은 작용하중  $N_o$ 가 작용할 때 철근과 콘크리트 경계면에서의 부착응력  $\tau_x$ 가 부착전달길이  $l_{to}$ 에 의해 전달되어 발생하는 인장응력이 콘크리트의 인장강도를 초과하면 발생하게 된다. 이후 균열이 계속 발생하여 균열간격이  $l_{to}$ 와  $2l_{to}$ 사이에서 존재함으로써 더 이상 균열이 발생하지 못하게 되는 상태를 균열안정화단계라 한다. 균열안정화단계는 그림 1에서 나타난 것처럼 미끌림이 0이 되는 부재 중앙단면에서의 철근과 콘크리트의 변형률이 같지 않게 된다. 또한, 부착에 의해 전달되는 중앙단면에서의 콘크리트 인장력  $N_{c,c}$ 는 균열안정화 조건에 의하여 균열하중  $N_{cr}$ 을 초과할 수 없게 되는데, 부재 중앙단면에서의 응력을 측정하여 그림 2의 Scott의 연구결과를 살펴보면,  $N_{cr}$ 을 초과하지 않는 범위 내에서 일정한 값  $\beta N_{cr}$  ( $0 < \beta < 1.0$ )로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이 논문에서는 여러 연구자들의 실험자료를 통계분석하여  $\beta$ 를 0.6으로 사용하였다. 이상과 같은 조건으로부터 균열안정화 단계의 부재 중앙단면에서 발생하는 미끌림 함수의 기울기를 나타낸 1차 도함수  $ds/dx (=s')$ 는 평형조건에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s'_o = \epsilon_s - \epsilon_c = \frac{ds}{dx} = \frac{N_o}{A_s E_s} - (1 + n\rho) \frac{N_{c,c}}{A_s E_s} > 0 \quad (1)$$

### 2.2 부착전달길이

Shah의 실험결과를 관찰하면 균열안정화단계에서의 미끌림은 비교적 선형의 분포에 가깝게 나타나고 있다. 따라서 이 논문에서는 Shah의 실험결과를 적용하여 다음과 같이 미끌림을 선형으로 가정하였다.

$$s_x = \frac{s_o}{l_{to}} x \quad (2)$$

식 (2)와 같은 선형 미끌림으로부터 부착응력-미끌림 관계를 완성할 수 있게 되는데 이 논문에서는 그림 3에서 나타나는 것과 같이 MC 90과 EC 2에서 규정하고 있는 다음과 같은 관계를 이용하였다.

$$\tau_x = \tau_{max} \left( \frac{s_x}{s_1} \right)^\alpha \quad (3)$$

여기서,  $\tau_{max} = 2.0 \sqrt{f_{ck}}$ ,  $s_1 = 0.6mm$ ,  $\alpha = 0.4$ 를 사용하였다. (그림 3 참조)

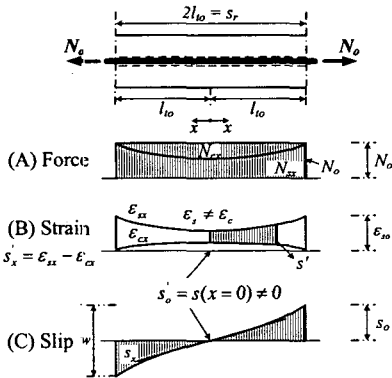


그림 1 균열안정화단계에서의 힘, 변형률, 미끌림 분포

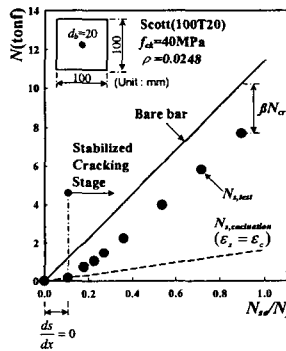


그림 2 철근의 인장력 분포

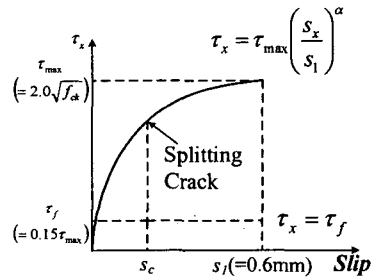


그림 3 부착응력-미끌림관계 (MC 90)

식 (2), 식 (3)을 이용하여 부착응력에 의해 부착전달길이 내에서 인장응력의 크기를 결정할 수 있게 되는데, 앞에서 설명한 바와 같이 안정화단계에서 일정한 값으로 나타나기 때문에 다음과 같이 표현할

수 있다.

$$\sum_0 \int_0^{l_o} \tau_x dx = N_{c,c} = \beta N_{\sigma} \quad (4)$$

식 (4)로부터 안정화단계에서의 부착전달길이  $l_{to}$ 를 계산할 수 있게 되는데 이를 전개하면 다음과 같다.

$$l_{to} = \left( \frac{(1+\alpha)s_1^{\alpha}\beta N_{\sigma}}{\sum_0 \tau_{\max} \left( \frac{ds}{dx} \right)^{\alpha}} \right)^{\frac{1}{\alpha+1}} = \left[ \frac{(1+\alpha)s_1^{\alpha}(A_s E_s)^{\alpha} \beta N_{\sigma}}{\sum_0 \tau_{\max} \{N_{o,st} - (1+n\rho)N_{c,c}\}^{\alpha}} \right]^{\frac{1}{\alpha+1}} \quad (5)$$

식 (5)로부터  $l_{to}$ 를 계산하기 위해서 중앙단면에서의 기울기를 식 (1)로부터 계산하여야 하기 때문에 안정화가 시작되는 하중  $N_{o,st}$ 를 결정해야 한다. 균열안정화 조건( $N_{c,c} < N_{c,r}$ ,  $ds/dx > 0$ )에 의해  $N_{o,st}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_{o,st} = (1+n\rho)N_{c,r} \quad (6)$$

이와 함께 안정화단계의 균열면에서 국부적인 쪼갬균열의 영향을 고려해야 하는데, 이를 정의하기 위해서 그림 3과 같이 쪼갬균열이 발생하는 순간의 한계 미끌림  $s_c$ 를 정하여  $s_c$ 이상의 미끌림이 발생하는 구간에서는 쪼갬균열이 발생한다고 가정하였다. 이 한계 미끌림  $s_c$ 는 그림 4와 같이 미끌림이  $s_c$ 에 도달할 때까지는 선형으로 증가하게 되는데 이를 부착전달길이  $l_{to}$ 와 그때의 중앙 단면의 기울기의 관계를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s_c = l_{to} \cdot \frac{ds}{dx} \quad (7)$$

쪼갬균열의 발생으로 인하여  $l_{to}$ 는 그림 4에 나타난 잔류부착응력  $\tau_f$ 가 존재하는 등분포 구간  $l_{sp}$ 와 비선형 부착응력  $\tau_x$ 가 존재하는  $l_{tb}$ 로 구분할 수 있다. 이와 같이 구간별로 적용시킨 조건 또한 식 (4)의 평형조건에 만족하여야 하는데 이를 전개하여 하중단계에 따라 적용시킬 경우 그 하중 단계에서의  $l_{tb}$ 와  $l_{sp}$ 를 구할 수 있다.

$$\sum_0 \int_0^{l_{sp}} \tau_f dx + \sum_0 \int_0^{l_{tb}} \tau_x dx = \beta N_{\sigma} \quad (8)$$

### 2.3 균열폭 제안식

균열폭  $w$ 는 임의의 균열 간격 내의 양쪽 균열면에서 발생하는 철근과 콘크리트의 변형률 차 또는 미끌림 량으로 정의한다. 이 논문에서는 균열안정화단계에서의 쪼갬균열 발생 후 부착응력의 형태를 분석하여 그림 4와 같이  $l_{tb}$ 구간에서는  $s_c$ 를 사용하고 쪼갬균열로 인한  $l_{sp}$ 구간에서는 철근의 변형에서 잔류부착응력으로 인한 변형의 차로써 두 구간의 미끌림 량의 합을 사용하여 다음과 같이 균열폭 계산식을 제안하였다.

$$w = 2s = 2 \left( s_c + \left( \epsilon_{so} - \frac{\sum_0 \int_0^{l_{sp}} \tau_f dx}{A_s E_s} \right) \cdot l_{sp} \right) \quad (9)$$

### 3. 제안식의 검증

이 논문에서 제안한 균열폭 계산식의 정확성 및 타당성을 검토하기 위해 여러 연구자들이 실험하였던 결과에 대해

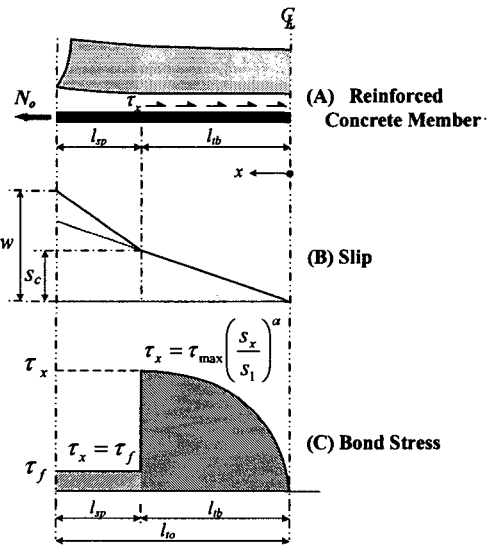


그림 4 균열안정화단계에서의 부착응력, 미끌림 분포

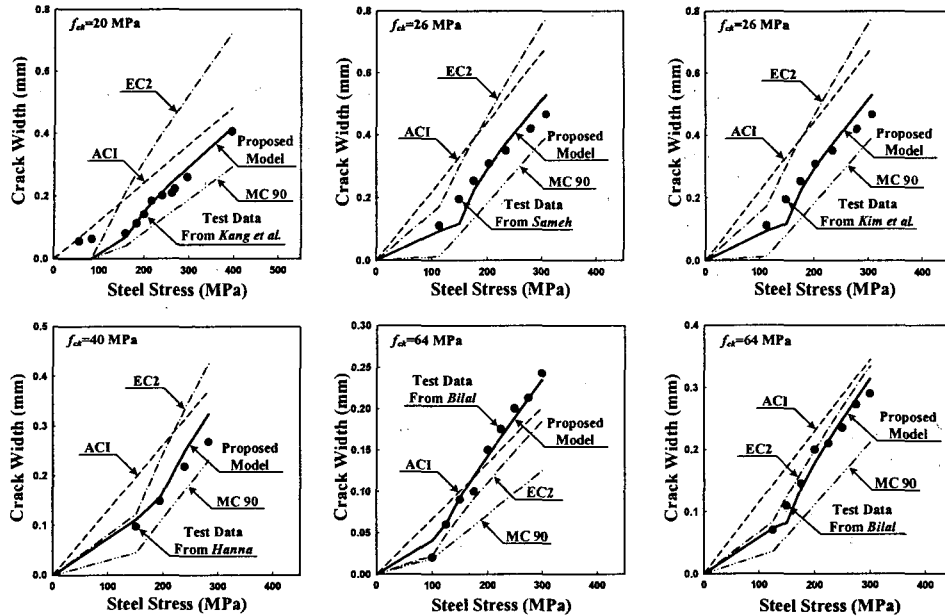


그림 5 균열폭에 대한 실험결과의 제안식과 설계기준들과의 비교

서 현행 설계기준들에서 제시하는 규정들과 제안식을 각각 비교해서 그림 5에 정리하였다. 그 결과를 살펴보면, ACI와 EC 2의 경우 대부분의 실험체에서 균열폭을 과대평가하고 있으며, 이와는 반대로 MC 90은 균열폭 예측을 상당히 과소평가하고 있음을 알 수 있었다. 그러나, 제안식은 다른 설계기준들보다 비교적 정확하게 그 결과를 예측하고 있는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

이 논문은 균열안정화단계에서 부재의 강성증가가 일정하다는 가정 하에 쪼갬균열과 실제 부착응력-미끄러짐 관계를 적용하여 미끄러짐 량의 합으로서 균열폭 제안식을 나타내었다. 그 결과 현행 설계기준들보다 이 논문의 균열폭 제안식이 부재의 단면형상이나 재료특성의 변화에 상관없이 비교적 정확하게 그 결과를 예측하고 있는 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

1. Bilal, S.H., and Mohamad, H.H. (2001) Effect of Fiber Reinforcement on Bond Strength of Tension Lap Splices in High-Strength Concrete, ACI Structural Journal, Vol. 98, No. 5, pp. 638-647
2. Hanna (1996) The Effect of Thick Concrete Cover on the Maximum Flexural Crack Width under Service Load, ACI Structural Journal, Vol. 93, No. 3, pp. 257-265
3. Jiand, D. H., Shah, S. P., and Andonian, A. T. (1984) Study of the Transfer of Tensile Forces by Bond, ACI Structural Journal, Vol. 81, No. 3, pp. 251-259
4. Saeed M. Mirza and Jules Houde, (1979) "Study of bond Stress-Slip Relationships in reinforced Masonry", ACI Structural Journal, Vol. 76, No. 1, pp. 19-46