

# 철근콘크리트 휨부재의 사용성 모델 개발

## Development of Serviceability Model for RC Flexural Members

이 기 열\*      김 장 현\*      하 태 관\*      김 대 중\*\*      김 우\*\*\*  
Lee, Ki Yeol      Kim, Jang Hyun      Ha, Tae Gwan      Kim, Dae Joong      Kim, Woo

### ABSTRACT

This paper describes a proposal for crack width and deflection in RC flexural members. Because the serviceability provisions of the current codes are mainly based on only empirical relationships developed from test result and effective moment of inertia, crack width and deflections are contrary to the actual values. Based on nonlinear bond characteristics, tension stiffening effect, arch action and effective concrete tensile area. Then an equation is developed for predicting crack width and deflection in flexural members. The predicted results shows that as proposed model employed, crack width and deflections are different from estimated by the current KCI, MC 90 and EC 2 provisions, and the values predicted are in good agreement with experimentally measured values.

### 1. 서론

최근 들어 철근콘크리트 구조물의 대형화 및 장기간화, 고강도 재료의 사용 증가, 강도설계법과 같은 정밀한 설계기법의 적용에 따른 부재의 단면축소 및 피복두께의 감소는 부재의 주인장철근에 높은 인장력이 유발되는 경우가 많게 되었다. 이러한 현상들 때문에 휨을 주로 받는 철근콘크리트 구조물에는 과도한 처짐이나 균열폭이 발생하게 되며, 구조물의 내구성 및 사용성 측면에서 부재에 발생하는 이들의 예측을 보다 높은 수준의 정확성이 요구되어지고 있는 실정이다. 그러나 현행 콘크리트구조설계기준의 일반적인 휨 설계 규정은 인장영역의 콘크리트 역할은 보통 무시하고 주로 힘의 평형조건만을 고려하기 때문에 작용하중에 의한 균열 발생에 따른 부재의 강성 저하나 균열면에서의 철근과 콘크리트의 응력 재분배와 같은 현상이 충실히 반영되지 않게 됨으로써 사용성 평가에 있어서 정확한 결과를 예측하기는 어려워진다. 이와 함께 균열폭에 대해서는 역학적 해석에 의한 이론적 근거나 균열 거동에 큰 영향을 미치는 부착특성에 대한 고려가 없이 실험결과들을 통계적 방법에 의해 변수들 간의 상관관계 분석을 수행하여 얻은 결과를 단순화시켜 유도한 것이다. 그리고 처짐의 경우에는 부착특성을 직접적으로 반영할 수 없으며 단순히 균열 발생에 따른 부재의 휨강성 변화만을 평균개념으로 도입한 유효단면2차모멘트  $I_e$ 를 이용하여 계산하도록 규정하고 있다. 이상과 같은 배경을 바탕으로 본 연구에서는 균열폭과 처짐에 영향을 주는 주요한 변수들 중에서 현행 설계기준에서 정확하게 반영되지 못하고 있는 철근과 콘크리트 경계면에서 발생하는 비선형 부착특성을 정의하고, 이를 이용하여 힘의 평형조건 및 변형 적합조건에 의한 균열거동과 인장강화효과를 새롭게 유도한 후, 유효인장단면적과 아치작용을 포함하는 모든 변수들이 종합적으로 고려될 수 있는 사용성 모델을 개발하고자 한다.

### 2. 사용성 모델 개발을 위한 관계식 유도

#### 2.1 비선형부착특성과 부착전달길이

본 연구에서는 MC 90에서 규정하고 있는 부착응력-슬립 관계로부터 힘의 평형조건과 변형적합조건을 이용하여 균열폭 계산에 사용되는 슬립함수를 다음과 같이 정의하였다.

$$i_x = i_{\max} \left( \frac{s_x}{s_1} \right)^a \quad 0 \leq a < 1.0 \quad (1)$$

\* 정회원, 전남대학교 토목공학과 대학원

\*\* 정회원, 전남도립 남도대학 토목환경과 조교수

\*\*\* 정회원, 전남대학교 건설지구환경공학부 교수

$$s_x^{00} = \frac{df_{sx}}{d_x} \frac{(1-n\frac{1}{2})}{E_s} = \frac{4(1-n\frac{1}{2})}{E_s d_b} \dot{\epsilon}_x = \dot{\epsilon}_{max} \frac{4(1-n\frac{1}{2})}{E_s d_b} \left(\frac{s_x}{s_1}\right)^{\alpha} \quad (2)$$

여기서,  $\tau_x$ 는 길이방향으로의 부착응력,  $\tau_{max}$ 는 최대부착응력으로서  $2.5\sqrt{f_{cb}}$ ,  $s_1$ 은 1.0mm,  $s_x$ 는 길이방향으로의 미끌림 량,  $a$ 는 부착형상계수로서  $0 \leq a < 1$ 이다. 식 (1)를 이용하기 위해서는 우선적으로 형상 함수  $a$ 를 결정하여야 하는데, 여러 연구자들에 의해 수행되어진 실험결과를 분석한 결과 일반적인 휨 부재의 경우에 부합하는  $a$ 는 0.3에서 0.4 사이에 존재함을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는  $a$ 를 0.35로 가정하였다. 또한  $E_s$ 는 철근의 탄성계수,  $n$ 은 탄성계수 비,  $\rho$ 는 철근비이다.

식 (2)는  $s_x^{00} - ks_x^{\alpha} = 0$ 로 일반화 시킬 수 있는 2계 비선형미분방정식의 형태로서, 이 식의 해인  $s_x$ 를 구하기 위해서는 양변에  $2s'_x$ 를 곱한 후 변수분리법을 이용하여 풀면 다음과 같은  $s_x$ 함수가 구해진다.

$$s_x = \left\{ \frac{2(1-a)^2(1-n\rho)\tau_{max}}{(1+a)E_s} \frac{x^2}{s_1^2 d_b} \right\}^{\frac{1}{1-a}} \quad (3)$$

또한, 식 (3)을 식 (1)에 대입하여 다음과 같은 비선형 부착응력-슬립 함수를 얻을 수 있다.

$$\tau_x = \tau_{max} \left(\frac{1}{s_1}\right)^{\alpha} \left\{ \frac{2(1-a)^2(1-n\rho)\tau_{max}}{(1+a)E_s} \frac{x^2}{s_1^2 d_b} \right\}^{\frac{1}{1-a}} \quad (4)$$

균열단면 사이에서 부착에 의해 철근으로부터 전달되어지는 응력을 콘크리트가 부담할 수 있는 구간인 부착전달길이  $l_t$ 는 식 (4)와 힘의 평형조건으로써 구할 수 있는데, 이를 표현하면 다음과 같다.

$$l_t = \frac{1}{1-a} \left\{ \frac{(1+a)(s_1^2 d_b)}{\tau_{max}} \right\}^{\frac{1}{1-a}} \left\{ \frac{f_c}{4(1+n\rho)} \right\}^{\frac{1}{1-a}} \left\{ \frac{E_s}{2(1-n\rho)} \right\}^{\frac{1}{1-a}} \quad (5)$$

## 2.2 인장강화효과와 아치작용

전단경간 대 유효깊이의 비  $a/d$ 가 상대적으로 짧은 철근콘크리트 휨부재에서는 아치작용에 의해 철근응력이 탄성이론으로 계산한 값보다 크게 발생한다고 알려져 있다. 그런데 본 연구 개발하고자 하는 균열폭과 처짐은 모두 인장철근의 응력 또는 변형률에 직접적인 영향을 받고 있기 때문에 아치작용을 고려하여야만 정확한 사용성 모델이 완성될 수 있을 것이다. 이를 위하여 본 연구의 목적과 가장 부합할 수 있는 다음과 같은 박대성(2003)이 제안한 아치작용 모델을 이용하였다.

$$\epsilon_a = \frac{1}{A_s E_s} \frac{M_x}{j_0 d} \left( \frac{M_{max}}{M_x} \right)^r \quad (6)$$

균열이 발생한 단면에서 철근과 콘크리트의 경계면에서 발생하는 부착응력에 의하여 철근에 유발되는 응력을 콘크리트가 계속적으로 부담함으로써 철근에 발생하는 응력을 감소시키며, 이에 따라 부재의 강성이 상대적으로 증가되는 현상을 인장강화효과라고 하고, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_x = \epsilon_s - \frac{4}{E_s d_b} \int_0^x \tau_x dx \quad (7)$$

식 (7)과 같이 정의되는 인장강화효과에 대해서 식 (4)의 비선형 부착특성과 식 (6)의 아치작용을 고려하면 다음과 같은 인장강화효과 모델을 유도할 수 있다.

$$\epsilon_x = \epsilon_s - \frac{K}{E_s d_b} \left( \frac{x^{1+\alpha}}{s_1^2 d_b} \right)^{\frac{1}{1-a}} + \frac{1}{A_s E_s} \frac{M_x}{j_0 d} \left\{ \left( \frac{M_{max}}{M_x} \right)^r - 1 \right\} \quad (8)$$

그런데 식 (8)과 같은 인장강화효과를 보다 효과적이면서 적용성을 높이기 위해서 부착전달길이  $l_t$  내에서의 평균변형률  $\epsilon_{sm}$  개념을 사용하는 것이 일반적이다. 이에 본 연구에서도 처짐 계산 시 인장철근에 발생하는 철근의 변형률로서 부재의 곡률을 계산하여야 하는데, 그 과정의 복잡성과 방대함을 줄이기 위하여 평균변형률 개념을 이용하고자 식 (8)에 대해서  $l_t$ 와 비선형부착특성 및 아치작용을 고려하여 다음과 같은 평균변형률  $\epsilon_{sm}$  관계를 유도하였다.

$$\epsilon_{sm} = \epsilon_s - \left[ 1 + n\rho - \frac{1+\alpha+2n\rho}{2} \left( \frac{M_{max}}{M_x} \right)^r \right] \frac{f_c}{E_s \rho} \quad (9)$$

### 2.3 유효인장단면적

현행 설계기준의 유효인장단면적 규정은 인장철근 주위의 인장영역 콘크리트 단면적을 철근 개수로 나누는 것이다. 그런데, 이를 이용하여 계산한 균열폭 예측값과 실험결과를 비교하면 상당한 차이가 발생함을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 인장철근의 직경과 피복두께의 변화에 대한 상대적인 고려가 되지 않기 때문이라 판단된다. 이를 해결하기 위해서 본 연구자가 수행하였던 실험결과(2003)를 분석하여 한 번의 길이가  $6.0d_b$ 인 정사각형 또는 부재의 단면과 철근의 배치 형태에 따라서 단측면의 길이가  $2.5d_b$ 보다 작을때 실제 피복두께만을 단측면의 길이로 하는 직사각형이 타당하다는 결론을 얻었다. 이에 대해서 일반적인 휨부재의 단면에 적용할 수 있는 형태로 표현하면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\rho_{ef} = \frac{A_s}{b \times (3d_s + c)} \quad (10)$$

## 3. 사용성 모델

### 3.1 균열폭 계산식

균열폭은 임의의 균열간격 내의 양쪽 균열면에서 발생하는 철근과 콘크리트의 변형률 차 또는 슬립량으로 정의할 수 있는데 이를 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w = \int_0^{l_i} (\epsilon_{sx} - \epsilon_{cx}) dx = s_l + s_r = 2s_l \quad (11)$$

식 (11)을 다시 정리하면 균열폭은 부착전달길이  $l_i$ 사이의 균열면에서 발생하는 슬립량의 2배에 해당하는 값으로써, 이는 식 (4)의  $x$ 를  $l_i$ 에 대한 식 (5)을 치환하여 구할 수 있다. 그리고 이 결과에 대해서 식 (6)의 아치작용에 의한 철근응력의 변화와 유효인장단면적 식 (10)을 각각 고려하고 이미 정의한  $s_l=1.0\text{mm}$ 와  $a=0.35$ 를 대입하여 다음과 같은 균열폭 제안식을 얻을 수 있다.

$$w = 2s_l = 2 \left\{ \frac{0.17(1 - \rho_{ef}) d_b^2 \rho_{ef}}{(1 + \rho_{ef})^2 \tau_{\text{max}} E_s} \left( \frac{M_{\text{max}}}{M_x} \right)^{2.7} \right\}^{0.75} \quad (12)$$

본 연구에서 제안한 균열폭 계산식의 타당성을 검증하기 위하여 여러 연구자들이 수행하였던 실험 결과에 대해서 현행 설계기준들에서 제시하는 규정들과 제안식을 비교하여 그림 1에 정리하였다.

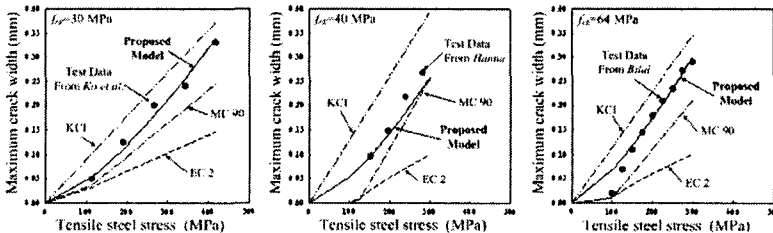


그림 1 균열폭 제안식에 대한 실험결과 및 설계기준 규정과의 비교

이 그림을 살펴보면, 본 연구의 제안식은 초기 균열하중 단계에서 다소의 예측결과 차이가 존재하지만, 하중이 증가함에 따라서 결과의 예측은 다른 설계기준식들에 비하여 콘크리트 강도와 단면 체원에 영향을 받지 않고 비교적 정확하게 결과를 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나, 콘크리트구조설계기준의 경우는 모든 실험체에서 균열폭을 과대평가하고 있음을 알 수 있다. 이와는 반대로 MC 90의 경우는 균열폭 예측을 상당히 과소평가하고 있음을 확인할 수 있으며, EC 2의 경우에는 실험체의 기하학적 조건이나 재료특성에 따라서 예측결과의 변동이 심하다는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 앞 절에서 밝힌 바와 같이 현행 설계기준들이 가지고 있는 문제들 때문에 유발되는 것이라 판단된다.

### 3.2 처짐 계산식

본 연구에서는 철근콘크리트 휨부재의 실제 처짐을 정확하게 표현하기 위하여 철근의 변형률과 곡률 관계를 이용하였다. 철근의 평균변형률은 비선형 부착특성과 아치작용의 효과가 모두 반영되어 있

는 식 (9)에 본 연구에서 제안한 식 (10)의 유효인장단면적  $\rho_{ef}$ 를 적용하여 계산할 수 있다. 이와 같은 관계로부터 균열이 발생한 단면에서의 곡률을 다음과 같이 구한 후, 이 값을 길이에 대해서 이중적분을 수행하면 임의의 위치에서의 처짐을 계산할 수 있다.

$$\phi_{cr} = \frac{\epsilon_{sm}}{d - c_{cr}} = \frac{\epsilon_g}{d - c_{cr}} - \frac{\left(1 + \eta \rho_{ef} - \frac{1 + \alpha + 2\eta \rho_{ef}}{2} \left(\frac{M_{max}}{M_x}\right)^\eta\right) \frac{f_c}{E_f \rho_{ef}}}{d} \quad (13)$$

본 연구에서 제안한 처짐 계산식을 검증하기 위하여 여러 연구자들이 수행하였던 실험결과에 대해서 현행 설계기준들에서 제시하는 규정들과 제안식을 비교하여 그림 2에 정리하였다.

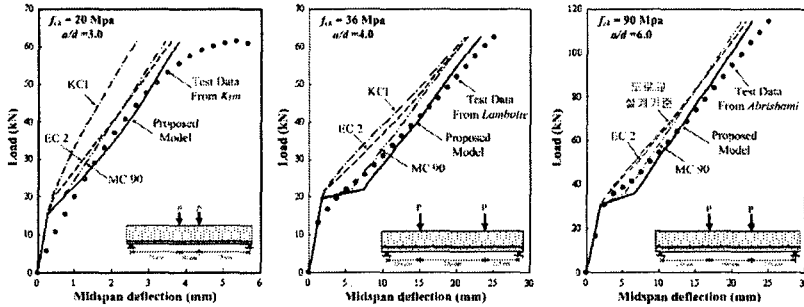


그림 2 처짐 제안식에 대한 실험결과와 설계기준 규정과의 비교

이 그림을 살펴보면, 본 연구의 제안식은 초기 균열하중 단계에서 다소의 예측결과 차이가 존재하지만 하중이 증가함에 따라서 결과의 예측은 다른 설계기준식들에 비하여 비교적 실험값에 근접한 결과를 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나, ACI 나 MC 90 및 EC 2의 경우는 모든 실험체에서 처짐을 과소평가하고 있음을 알 수 있다. 특히  $a/d$ 가 짧은 휨부재의 경우에는 실제 실험결과와는 상당한 차이가 존재하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 앞 절에서 밝힌바와 같이 현행 설계기준들이 가지고 있는 부착응력에 대한 평균개념의 적용과 아치작용에 대한 고려가 없기 때문이라 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 비선형 부착응력-슬립 관계를 유도하고, 이 관계와 평형조건 및 적합조건을 고려하는 인장강화효과, 부착전달길이, 아치작용 및 유효인장단면적을 정의한 후, 이 관계들을 이용하여 균열 폭과 처짐을 비교적 정확하게 예측할 수 있는 사용성 모델을 제안하였다. 본 연구에서 제안하는 균열 폭과 처짐 계산식은 부재의 단면형상이나 재료특성의 변화에 상관없이 현행 설계기준들의 사용성 규정에 비하여 비교적 정확하게 그 결과를 예측하고 있는 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

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

#### 참 고 문 헌

1. 한국콘크리트학회, "콘크리트 구조설계기준 및 해설", 한국콘크리트학회, 2003.
2. 박대성, "휨과 전단이 작용하는 RC보의 주인장철근력에 관한 연구", 전남대학교박사학위논문, 2003.
3. ACI Committee 318, "Building Code Requirement for Reinforced Concrete and Commentary", ACI, 2002
4. fib, "Structural Concrete Manual", International Federation for Structural Concrete, 1999.
5. W, Kim, K.Y. Lee, H.S. Yum, "Tension Stiffening Effect of High-Strength Concrete in Axially Loaded Members", *KCI Structural Journal*, Vol. 15, No. 6, pp. 915-923.