

# 고강도콘크리트 부재의 균열폭 및 균열간격 계산에 관한 연구

## Calculation of Crack Width and Crack Spacing of High-Strength Concrete Members

정 기 오\*      이 기 열\*\*      김 대 중\*\*\*      김 우\*\*\*\*  
Jung, Gi Oh      Lee, Gi Yeol      Kim, Dae Joong      Kim, Woo

### ABSTRACT

This paper describes a calculation of an average crack spacing and the maximum crack width for the high-strength concrete tensile and flexural members. Based on the uniform bond stress distribution of the average steel and concrete strains over the transfer length, the crack spacing and the crack width are proposed to utilize influence of the concrete strength and the cover thickness. This analytical results presented in this paper indicate that the proposed equations can be more effectively estimated the maximum crack width and the average crack spacing of the reinforced concrete flexural and tensile members.

*Keywords* : bond stress, crack width, crack spacing, high-strength concrete, cover thickness

### 1. 서 론

내구성 측면에서 철근콘크리트 구조물의 균열 검토는 콘크리트 표면의 균열폭을 환경조건, 피복두께, 공용기간 등으로부터 정해지는 철근부식에 대한 허용 폭 이하로 제어하는 것을 원칙으로 한다<sup>1)</sup>. 따라서 휨 부재의 인장영역에 발생하는 균열폭을 정확히 예측하기 위해서는 부재의 단면조건, 재료특성, 철근과 콘크리트의 부착특성 및 하중단계 등을 모두 고려할 수 있는 계산식이 필요하다.

최근들어 강도설계법의 채택과 고강도 재료의 사용 증가는 부재의 단면 축소와 이에 따른 피복두께의 감소를 가져온다. 또한 콘크리트의 균열 발생은 상당히 불확실한 현상으로서 많은 변수들에 영향을 받으며, 균열폭 거동에 관한 연구는 현재까지도 많은 연구자들에 의해 수행되고 있다. 그러나 균열폭을 예측하는 식의 대부분은 보통강도콘크리트(NSC) 위주의 실험관찰에 근거한 경험식이며, 철근과 콘크리트의 부착특성과 힘의 평형조건 및 변형 적합조건을 고려할 수 있는 이론적 모델이 현재까지 정립되지 못하고 있는 실정이다.

\* 정희원, 전남대학교 토목공학과 석사과정

\*\* 정희원, 전남대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\* 정희원, 전남도립 남도대학 건설산업과 조교수

\*\*\*\* 정희원, 전남대학교 토목공학과 교수

균열폭 계산에 관한 기본적인 이론은 균열간격과 철근과 콘크리트의 변형률 차이로서 구성된다<sup>2)</sup>. 그러나 현재 여러 설계기준에서 채택하고 있는 최대 균열폭은 이론식을 실험적으로 수정하여 사용하거나, 이론과는 무관한 실험결과에 근거를 둔 경험식이 대부분이다. 또한 고강도콘크리트(HSC) 사용에 따른 부착응력의 균열면 집중문제, 균열간격의 감소, 취성적인 균열진전 및 인장증강효과의 감소 등과 같이 보통강도콘크리트와는 다른 부착 및 균열 특성을 적절히 반영하지 못하고 있는 실정이다<sup>3)</sup>. 따라서 휨 또는 인장을 받는 고강도콘크리트 구조물에서 발생하는 균열폭은 현행 설계기준에서 제시하는 계산식으로 구한 결과와 많은 차이가 있다.

본 연구에서는 고강도콘크리트 부재의 균열폭 계산을 위해서 콘크리트 강도와 피복두께의 변화에 따른 수정계수를 제안한 김 우 등<sup>4)</sup>의 연구결과와 복잡한 부착특성을 단순화시킨 등분포부착응력 개념을 이용하여 휨의 평형조건과 콘크리트 강도특성이 고려된 부착전달길이를 정의하였다. 부착전달길이 제안식에 피복두께의 영향에 대한 수정계수를 도입한 균열간격 계산식을 유도한 후, 이를 균열폭 계산에 이용하였다. 또한 변형적합조건이 고려된 철근과 콘크리트의 평균변형률 계산시 콘크리트 강도보정계수를 도입하여 콘크리트 강도에 따른 최대균열폭 계산식을 유도하였다<sup>3)</sup>. 또한 건조수축 및 크리프의 영향에 의한 철근 및 콘크리트의 변형률 차이를 기존 이론에 의한 일정값으로 반영하여 보다 정확한 균열폭을 계산할 수 있도록 하였다.

## 2. 균열폭 제안식

최대균열폭은 균열사이에서의 철근과 콘크리트의 변형률 차이로서 정의할 수 있다.

$$w_{\max} = l_{t, \max} (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} - \epsilon_{cs}) \quad (1)$$

여기서,  $l_{t, \max}$ 는 부착전달길이,  $\epsilon_{sm}$ 은 철근의 평균변형률,  $\epsilon_{cm}$ 은 콘크리트의 평균변형률,  $\epsilon_{cs}$ 는 크리프 및 건조수축에 의한 변형률이다. 본 연구에서는 콘크리트 강도 변화에 따른 부착전달길이와 두 재료의 평균변형률 차이를 계산할 수 있는 각각의 식을 유도한 후, 그 값들을 식 (1)에 대입하여 최대 균열폭 계산식을 제안하였다.

### 2.1 부착전달길이 및 균열간격

그림 1과 같은 인장부재에 균열이 발생하는 순간의 상태를 평형조건으로 표현하면 다음과 같다.

$$A_c f_{ct} = \pi d_b \int_0^{l_{t, \max}} u_x dx \quad (2)$$

여기서,  $A_c$ 는 콘크리트의 단면적,  $f_{ct}$ 는 콘크리트 인장강도,  $d_b$ 는 철근 직경,  $u_x$ 는 전달길이 방향으로 변하는 부착응력이다. 균열과 균열 사이의 철근 표면에서 발생하는 실제 부착응력분포는 비선형으로서 정확하게 파악한다는 것은 현실적으로 어렵다. 따라서 어떤 단순화 또는 이상화가 필요하게 되는데 본 연구에서는 부착응력의 변화에 따라 철근과 콘크리트의 변형률이 변화하는 구간에서 부착응력의 크기가 일정하다는 등분포부착응력 개념을 적용하여  $l_{t, \max}$ 를 다음과 같이 정의하였다.

$$l_{t, \max} = \frac{1}{u_m} \int_0^{l_{t, \max}} u_x dx \quad (3)$$

여기서,  $u_m$ 은 전달길이내의 평균부착응력이다.

식 (3)에 평형조건에 의한 식 (2)를 대입하여 정리하면  $l_{t, \max}$ 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

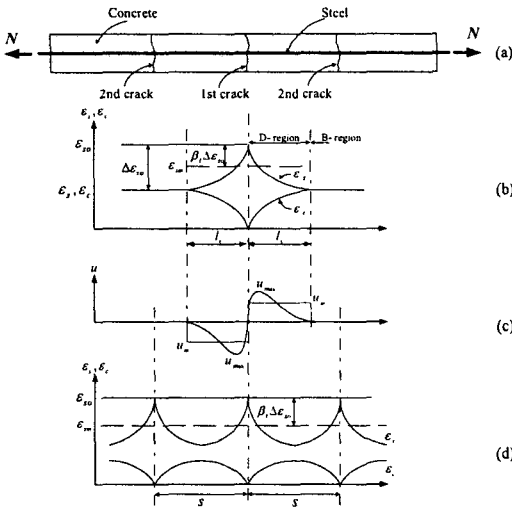


그림 1 인장부재의 부착응력과 변형을 분포; (a) 인장부재, (b) 균열발생단계에서의 변형을 분포, (c) 부착응력분포, (d) 안정화단계에서의 변형을 분포

MODEL CODE 1990(MC-90)<sup>2)</sup>에서 제시하는 다음과 같은 관계를 이용하였다.

$$u_{m, NSC} = \beta \cdot f_{ct, NSC} \quad (7)$$

여기서,  $\beta$ 는 실험상수로서 단기하중의 경우 1.8이다. 식 (7)의 조건을 식 (6)에 대입하여 정리하면 콘크리트 강도에 따른 부착전달길이  $l_{t, max}$ 는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$l_{t, max} = 0.7 \frac{1}{\sqrt{f_{ck}}} \frac{d_b}{\rho} \quad (8)$$

일반적으로 균열간격  $s$ 와 부착전달길이  $l_{t, max}$ 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다고 알려져 있다<sup>2)</sup>.

$$l_{t, max} \leq s \leq 2l_{t, max} \quad (9)$$

또한 Broms<sup>5)</sup>, Abrishami<sup>6)</sup>, 김 우 등<sup>4)</sup>의 연구결과에 의하면 균열간격  $s$ 는 피복두께의 영향을 크게 받고 있다고 알려져 있다. 따라서 식 (9)와 김 우 등<sup>4)</sup>이 제안한 피복두께 보정계수를 고려하면 콘크리트 강도에 따른 휨 또는 인장부재의 평균균열간격을 다음과 같이 산정 할 수 있다.

$$s_{ave} = 1.5l_{t, max} \approx \frac{1}{\sqrt{f_{ck}}} \frac{d_b}{\rho} \sqrt{\frac{c/d_b}{2.5}} \quad (10)$$

여기서,  $c/d_b$ 는 피복두께에 대한 철근 직경의 비이다.

식 (10)으로 예측한 콘크리트 강도와 피복두께의 영향이 고려된 철근콘크리트 인장부재의 평균균열간격을 김 우 등<sup>4)</sup>이 수행했던 실험결과와 비교한 그림 2를 살펴보면, 얇은 피복두께에서 약간의 차이가 발생하지만 대체적으로 보통강도콘크리트(NSC)와 고강도콘크리트(HSC) 모두에서 피복두께에 상관없이 본 연구의 제안식이 비교적 정확하게 예측하고 있음을 확인할 수 있다.

$$l_{t, max} = \frac{f_{ct}}{u_m} \frac{A_s}{\pi d_b} \frac{1}{\rho} = \frac{1}{4} \frac{f_{ct}}{u_m} \frac{d_b}{\rho} \quad (4)$$

여기서,  $A_s$ 는 철근의 단면적,  $\rho$ 는 철근비( $A_s/A_c$ )이다. 한편 김 우 등<sup>3)</sup>이 최근에 수행한 연구결과에 따르면, 콘크리트 강도 증가에 따른 부착전달길이는 콘크리트 압축강도의 제곱근에 반비례하는 것으로 나타났으며, 그 결과를 다음과 같이 표현하였다.

$$l_{t, HSC} = \sqrt{\frac{f_{ck, NSC}}{f_{ck, HSC}}} \cdot l_{t, NSC} \quad (5)$$

이상의 조건들로부터 현실적인 정량화를 위하여  $f_{ck, NSC}$ 를 25 MPa로 가정하고, 식 (4)와 식 (5)의 관계를 이용하면 콘크리트 강도에 따른  $l_{t, max}$ 를 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$l_{t, max} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{25}{f_{ck}}} \frac{f_{ct, NSC}}{u_{m, NSC}} \frac{d_b}{\rho} \quad (6)$$

식 (6)에서 평균부착응력  $u_m$ 은 현실적으로 정확한 계산이 어렵기 때문에 본 연구에서는 CEB-FIP

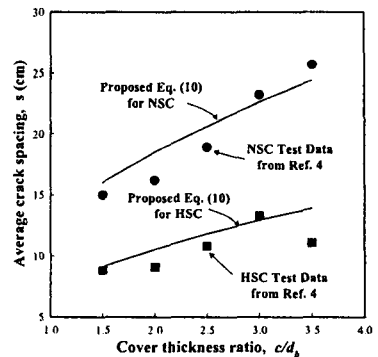


그림 2 평균균열간격 제안식과 실험결과의 비교

## 2.2 철근과 콘크리트의 평균변형률

균열과 균열 사이에서의 철근과 콘크리트의 변형률 분포는 그림 1에서 보인 바와 같이 부착응력 분포에 따라 상당히 복잡하다. 따라서 본 연구에서는 등분포부착응력 개념을 이용하여 재료의 비선형 응력분포를 그림 3과 같이 선형 응력분포로 가정한 후, 두 재료의 평균변형률을 산정하고자 한다.

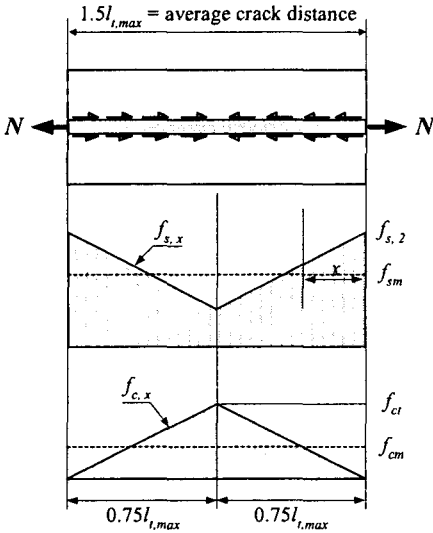


그림 3 균열사이에서의 등분포부착응력에 의한 철근과 콘크리트의 응력 분포

먼저, 철근의 평균변형률을 구하기 위하여 평균균열간격  $1.5l_{t,max}$ 사이에서의 철근 응력 변화를 살펴보면, 균열면에서부터  $1.5l_{t,max}$ 떨어진 지점까지의 응력 변화를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{s,x} = f_{s,2} - \frac{0.75l_{t,max} u_m \pi d_b}{A_s} \quad (11)$$

식 (11)에 식 (4)를 대입하여 균열과 균열 사이에서의 응력 변화를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f_{s,x} = f_{s,2} - 0.75 \frac{f_{ct}}{\rho} \quad (12)$$

철근의 변형률 분포를 알기 위하여 식 (12)의 양변을 탄성계수  $E_s$ 로 나누고 평균값을 취하면, 다음과 같이 철근의 평균변형률을 구할 수 있다.

$$\epsilon_{sm} = \epsilon_s - 0.375 \frac{f_{ct}}{E_s \cdot \rho} \quad (13)$$

영향을 반영할 수 있도록 김 우 등<sup>4)</sup>이 제안한 보정계수를 도입하여 다시 정리하면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\epsilon_{sm} = \epsilon_s - 0.375 \sqrt{\frac{25}{f_{ck}}} \sqrt{\frac{c/d_b}{2.5}} \frac{f_{ct}}{E_s \cdot \rho} \quad (14)$$

콘크리트의 평균변형률은 철근의 평균변형률 계산방법과 동일하다. 그림 2에 보인바와 같이 균열면에서부터  $1.5l_{t,max}$ 떨어진 지점까지의 콘크리트 응력 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{c,x} = \frac{0.75l_{t,max} u_m \pi d_b}{A_c} \quad (15)$$

식 (15)에 식 (4)의 관계를 대입하고, 철근의 평균변형률을 구하는 식 (12), (13)의 방법과 동일하게 정리한 후, 콘크리트 강도와 피복두께의 영향을 반영할 수 있도록 보정계수를 도입하면 콘크리트의 평균변형률은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\epsilon_{cm} = \epsilon_s - 0.375 \sqrt{\frac{25}{f_{ck}}} \sqrt{\frac{c/d_b}{2.5}} \frac{f_{ct}}{E_c} \quad (16)$$

식 (14)와 식 (16)의 관계를 이용하면 직접인장부재에서 철근과 콘크리트의 평균변형률 차이를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \epsilon_s - 0.375 \sqrt{\frac{25}{f_{ck}}} \cdot \sqrt{\frac{c/d_b}{2.5}} \cdot \frac{f_{ct}}{E_s \cdot \rho} (1 + n\rho) \quad (17)$$

식 (17)를 단순화하기 위하여 콘크리트 인장강도  $f_{ct}$ 를 MC-90<sup>2)</sup>의 정의에 따라  $0.53(f_{ck})^{1/2}$ 로 대입하여 정리하고, 우변 마지막항의  $n\rho$ 를 현실적인 철근비와 콘크리트 강도를 고려하여 0.15로 가정한 후,

철근의 응력상태로 나타내면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{1}{E_s} \left( f_s - 0.45\sqrt{10} \cdot \sqrt{\frac{c/d_b}{f_{ck}}} \cdot \frac{f_{ct}}{\rho} \right) = \frac{1}{E_s} \left( f_s - 0.8 \frac{\sqrt{c/d_b}}{\rho} \right) \quad (18)$$

### 2.3 고강도콘크리트 부재의 최대균열폭

콘크리트 강도의 변화와 피복두께의 영향을 반영할 수 있는 부착전달길이에 의한 식 (8)과 균열 사이에서의 철근과 콘크리트의 평균변형률의 차이인 식 (18)을 이용하면 직접인장부재의 최대균열폭은 다음과 같다.

$$w_{max} = 2l_{t,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs}) = 1.4 \frac{d_b}{\rho} \cdot \frac{1}{\sqrt{f_{ck}}} \cdot \left\{ \frac{1}{E_s} \left( f_s - 0.8 \frac{\sqrt{c/d_b}}{\rho} \right) - E_s \varepsilon_s \right\} \quad (19)$$

여기서 부착전달길이를  $2l_{t,max}$ 로 고려한 이유는 양쪽 균열면에서 콘크리트의 응력이  $f_{ct}$ 에 도달할 수 있는 최소거리가  $l_{t,max}$ 이기 때문에, 새로운 균열이 발생할 수 없는 최대부착전달길이(균열간격)은  $2l_{t,max}$ 가 되기 때문이다. 식 (19)를 균열폭 단위인 mm로 환산해서 정리하면 최대균열폭  $w_{max}$  계산식은 다음과 같다.

$$w_{max} = \frac{1.4}{\sqrt{f_{ck}}} \frac{d_b}{E_s \cdot \rho} \cdot \left( f_s - 0.8 \frac{\sqrt{c/d_b}}{\rho} - E_s \varepsilon_s \right) \quad (mm) \quad (20)$$

여기서, 철근과 콘크리트의 응력  $f_s$ ,  $f_{ck}$  및 탄성계수  $E_s$ 의 단위는 MPa이며, 철근 직경  $d_b$ 의 단위는 cm이다.

### 3. 균열폭 계산식의 검증

본 연구에서 제안한 균열폭 계산식을 실험결과와 비교하기 위하여 고원준 등<sup>7)</sup>과 Bilal et al.<sup>8)</sup>이 수행한 실험결과와 여러 설계기준<sup>1),2)</sup>에서 제시하는 균열폭 제안식들을 콘크리트 강도별로 비교하여 그림 4에 나타내었다.

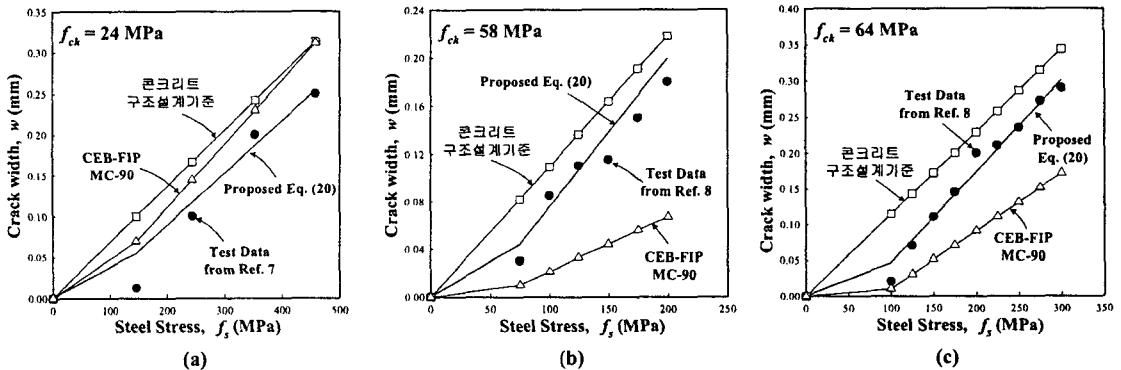


그림 4 본 연구의 제안식과 실험결과 및 설계기준과의 균열폭 비교

보통강도콘크리트의 경우인 그림 4(a)을 살펴보면, 설계기준들에서 제시하는 예측식은 실험결과를 과대평가하고 있음을 알 수 있다. 반면에 본 연구의 균열폭 제안식 (20)에 의한 값은 초기균열발생단

계에서 실험결과와 다소간의 차이가 발생하지만, 사용하중단계에서는 상당히 근접하고 있음을 알 수 있다. 고강도콘크리트의 경우인 그림 4(b), 4(c)를 살펴보면, 콘크리트구조설계기준의 식으로 예측한 값은 실험결과를 과대평가하고, 이와는 반대로 MC-90의 경우에는 상당히 과소평가하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 본 연구의 제안식 (20)에 의한 균열폭은 모든 하중단계에서 실험결과를 비교적 정확하게 예측하고 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

콘크리트 강도와 피복두께의 변화에 따른 부착전달길이와 철근과 콘크리트의 평균변형률을 유도한 후, 이를 이용하여 고강도콘크리트 부재의 최대균열폭 식을 제안하였다. 이로부터 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 연구에서 제안한 부착전달길이 식을 이용하면 콘크리트 강도와 피복두께의 변화에 따른 균열간격의 변화를 적절히 예측할 수 있는 것으로 나타났다.
2. 현행 설계기준에서 제시하는 균열폭 계산식으로는 콘크리트 강도 변화를 적절히 반영할 수 없는 것으로 나타났다.
3. 콘크리트 강도 변화와 피복두께의 영향을 반영한 본 연구의 균열폭 제안식은 휨 또는 인장부재의 균열폭을 비교적 정확하게 예측하는 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

이 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 R01-1999-00312)지원으로 수행된 결과의 일부이며, 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

1. 한국콘크리트학회, 건설교통부 제정, 콘크리트구조설계기준, 한국콘크리트학회, 1999.
2. CEB-FIP, *CEB-FIP Model Code 1990*, Comite Euro-International Du Beton, Paris, 1991.
3. 김 우, 이기열, 문 인, “고강도콘크리트 인장부재의 부착특성과 균열거동에 관한 연구(2),” 대한토목학회 논문집, 제 21권 5-A호, 2001, pp. 699-706.
4. 김 우, 이기열, 염환석, “고강도콘크리트 인장부재의 부착특성과 균열거동에 관한 연구(1),” 대한토목학회 논문집, 제 21권 5-A호, 2001, pp. 687-697.
5. Broms B.B., “Crack Width and Crack Spacing in Reinforced Concrete Members,” *ACI Structural Journal*, Vol. 62, No. 9, 1965, pp. 1095-1108.
6. Abrishami, H.H. and Mitchell, D., “Influence of Splitting Cracks on Tension Stiffening,” *ACI Structural Journal*, Vol. 93, No. 6, 1996, pp. 703-710.
7. 고원준, 장원석, 박선규, “철근콘크리트 부재의 최대 휨균열 산정에 대한 연구,” 대한토목학회 논문집, 제 21권, 2-A호, 2001, pp. 235-243.
8. Bilal S. Hamad, Mohamad H. Harajli, Ghaida Jumaa, “Effect of Fiber Reinforcement on Bond Strength of Tension Lap Splices in High-Strength Concrete,” *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 5, 2001, pp. 638-647.