



## 철근콘크리트 부재의 처짐과 균열폭에 대한 인장증강효과의 영향

최승원<sup>1)</sup> · 양준호<sup>2)</sup> · 김 우<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>한국콘크리트학회 콘크리트공학연구소 <sup>2)</sup>호진엔지니어링 <sup>3)</sup>전남대학교 토목공학과

## Influence of Tension Stiffening Effect on Deflection and Crack Width in RC Members

Seung-Won Choi,<sup>1)</sup> Jun-Ho Yang,<sup>2)</sup> and Woo Kim<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>KCI Research Center, Korea Concrete Institute, Seoul 635-4, Korea

<sup>2)</sup>Hyo Jin Engineering, Gwangju 500-804, Korea

<sup>3)</sup>Dept. of Civil Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

**ABSTRACT** When cracks occur in reinforced concrete structures, a steel carries all tensile force at crack section, while the concrete between cracks carries a part of the tensile force due to bond, so that the steel is less elongated. This is called the tension-stiffening effect, that plays an important role in verification of a serviceability limit state. But it is a complicated work to use a complex strain distribution between cracks, therefore an average strain is used to calculate deflection and crack width. In Eurocode 2, tension-stiffening effect expressed in the first order form or the second order form is used in calculating an average curvature for deflection. In this study for a flexural member deflection and crack width are calculated using various models for the tension-stiffening effect and the results are compared with the values of Eurocode 2 and KCI provisions. As results, the predicted values using the second order form are appeared to be well agreed with the experimental values and it could secure more analytical consistency.

**Keywords :** tension-stiffening effect, average curvature, deflection, crack width

### 1. 서 론

철근콘크리트 구조물에 균열이 발생하면 구조물의 강성은 감소하고 동시에 응력의 재분배가 발생한다. 균열 발생면에서는 철근이 모든 응력을 부담하게 되지만, 균열과 균열 사이 단면에서는 콘크리트와 철근 사이에 발생하는 부착응력에 의해 콘크리트가 인장력의 일부분을 부담하여 철근의 변형률이 감소하게 된다. 이처럼 주변 콘크리트에 의해 철근의 변형률이 감소하는 현상을 인장증강효과(tension stiffening effect)라고 한다. 이 인장증강효과는 균열 발생 후 작용력이 증가하면 점차 감소한다. 또한 인장증강효과는 사용한계상태(serviceability limit state) 즉, 처짐 및 균열폭의 검증에 중요한 역할을 한다.<sup>1)</sup>

Fig. 1과 같이 직접 인장 부재에 인장력( $N$ )이 작용하면 단면력은 철근이 부담하는 힘( $N_s$ )과 콘크리트가 부담하는 힘( $N_c$ )의 합으로 표현된다.

$$N = N_s + N_c = E_s \varepsilon_{sm} A_s + E_c \varepsilon_{cm} A_{ct} \quad (1)$$

여기서  $\varepsilon_{sm}$ 은 철근 평균 변형률,  $\varepsilon_{cm}$ 은 콘크리트 평균 변형률,  $E_s$ 는 철근 탄성계수,  $E_c$ 는 콘크리트 탄성계수,  $A_s$ 는 인장 철근량,  $A_{ct}$ 는 콘크리트 인장 면적을 나타낸다. 그런데 균열면에서의 인장력은 모두 철근이 부담하게 되므로 아래 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$N = E_s \varepsilon_{so} A_s \quad (2)$$

여기서  $\varepsilon_{so}$ 는 균열면에서 철근의 변형률을 의미한다. 식 (1)과 (2)로부터 유효철근비  $\rho_e = A_s/A_{ct}$ 와 탄성계수비  $n = E_s/E_c$ 를 도입하면 철근의 평균 변형률을 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{so} - \frac{\varepsilon_{cm}}{n\rho_e} \quad (3)$$

이와 같이 철근 주위의 콘크리트에 의해 철근의 변형률이  $\varepsilon_{cm}/n\rho_e$ 만큼 감소하는 현상이 인장증강효과이다. 그러나 인장증강효과에 직접적인 영향을 미치는 부착 거동에 대해 아직까지 명료하게 밝혀져 있지 않기 때문에

\*Corresponding author E-mail: wkim@chonnam.ac.kr

Received May 24, 2010, Revised August 24, 2010,

Accepted October 19, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

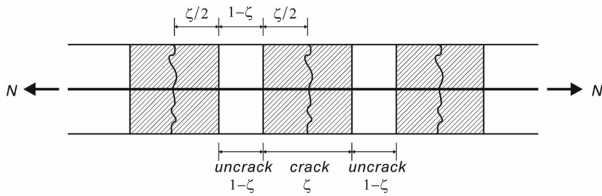


Fig. 1 Crack formation and distribution coefficient

이 효과를 정확하게 산정하기는 힘든 실정이다.

이 때문에 CEB-FIP Model Code 1990 (MC90)<sup>2)</sup> 및 유로코드 2(Eurocode 2, EC2)<sup>3)</sup>에서는 부착응력-미끌림 관계의 등분포 가정과 평균 부착응력 개념에 근거한 평균 변형률을 다음 식과 Fig. 2와 같이 인장증강효과를 반영하고 있다.<sup>4)</sup>

$$\epsilon_{sm} = \frac{f_{so}}{E_s} \left( 1 - \beta_1 \frac{f_{scr}}{f_{so} \rho_e} \right) \quad (4)$$

$$\epsilon_{sm} = \frac{f_{so}}{E_s} \left( 1 - \beta_1 \beta_2 \left( \frac{f_{scr}}{f_{so}} \right)^2 \right) \quad (5)$$

여기서,  $f_{so}$ 는 균열면의 철근 응력,  $f_{scr}$ 은 인장균열 발생 직후의 철근 응력이다.  $f_{ctm}$ 은 콘크리트의 평균인장강도로서  $0.3(f_{cm})^{2/3}$ ,  $f_{cm}$ 은 콘크리트 평균압축강도로서 압축강도가 40 MPa 미만일 경우  $f_{ck} + 4$ 이다. 이 때  $f_{ck}$ 는 콘크리트 기준압축강도이다.  $\beta_1$ 는 하중 형태를 반영한 계수로서 단기 하중일 경우 0.6, 장기 하중일 경우 0.4이다.  $\beta_2$ 는 철근 형태를 반영한 계수로서 이형철근일 경우 1.0, 원형철근일 경우 0.5의 값을 갖는다.  $\beta_2$ 는 하중 형태를 반영한 계수로서 단기 하중이 작용할 경우 1.0, 장기 반복하중이 작용할 경우 0.5의 값을 갖는다. 그리고  $\rho_e$ 는 유효철근비로서 식 (6)과 같이 유효인장면적에 대한 인장 철근량의 비로서 표현된다.

$$\rho_e = \frac{A_s}{2.5(h-d) \cdot b} \quad (6)$$

이 때  $h$ 는 단면 높이,  $d$ 는 유효 높이,  $b$ 는 단면 폭을 나타낸다.

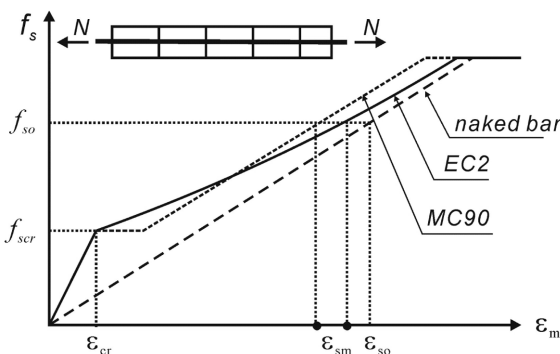


Fig. 2 Tension stiffening effect

일반적으로 균열면과 비균열면에서 철근과 콘크리트에 분포하는 변형률은 매우 불규칙하므로 휨곡률의 합으로 표현되는 처짐이나 균열면 사이의 철근과 콘크리트 신장량의 차이로 표현되는 균열폭의 산정은 매우 복잡하다. 그러나 균열면과 비균열면에 분포하는 철근의 변형률을 전 단면에 걸친 평균 변형률로 표현함으로써 처짐 및 균열폭의 산정은 훨씬 용이해 진다. 따라서 Fig. 1의 분포계수(distribution coefficient,  $\zeta$ )를 통해 이산적으로 분포된 균열을 평균적인 균열의 분포로 정의하고 있고 이는 주로 실험 결과를 이용하여 산정되고 있다. 또한 이러한 분포계수는 식 (4)와 (5)의 평균 변형률의 개념과 일치한다.

MC90에서는 Table 1의 1차 직선 형태의 분포계수를 적용하고 있고 이에 따라 식 (4)와 같이 1차식 형태의 철근의 평균 변형률을 정의하고 있다. EC2에서는 Table 1의 2차식 형태의 분포계수를 사용하여 균열의 분포를 나타내고 철근의 평균 변형률을 식 (5)와 같이 2차식 형태로 정의하고 있다.

이러한 인장증강효과를 통해 단면의 휨곡률( $1/r$ )은 Fig. 3에서 나타낸 변형률 분포를 통해 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{r} = \frac{\epsilon_c + \epsilon_{sm}}{d} \quad (7)$$

여기서  $\epsilon_c$ 는 압축측 연단의 콘크리트 변형률을 나타낸다.

EC2와 MC90에서는 이러한 평균 변형률을 이용하여 처짐과 균열폭에 대한 산정법을 제시하고 있다. 즉, 평균 변형률 및 평균 휨곡률을 산정하여 처짐을 산정하고 평균 변형률의 차와 최대 균열 간격의 곱으로서 균열폭

Table 1 Distribution coefficient

	Distribution coefficient ( $\zeta$ )
CEB-FIP MC90	$1 - \beta_1 \frac{f_{ctm}}{f_{so} \rho_e}$
Eurocode 2	$1 - \beta_1 \beta_2 \left( \frac{f_{scr}}{f_{so}} \right)^2$

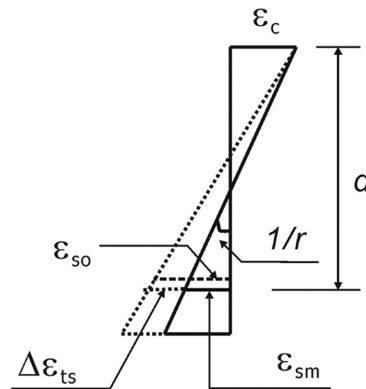


Fig. 3 Correction of strain distribution for the effect of tension stiffening

을 계산한다. 2007년 개정된 콘크리트구조설계기준<sup>5)</sup>의 부록에서는 MC90과 동일한 방법을 통해 균열폭을 검증하도록 하고 있다. 이 때 철근의 평균 변형률을 산정할 경우 MC90 및 EC2에서는 식 (4)를 사용하고 있다. 그러나 EC2에서 처짐 계산을 위한 평균 휨곡률 산정에는 Table 1과 식 (5)와 같이 2차식 형태의 분포계수를 사용하고 있다. EC2의 처짐과 균열폭 산정에 대한 이러한 규정을 살펴 볼 때 인장증강효과 및 분포계수를 일관된 형태가 아닌 교차된 형태 즉, 식 (4)와 (5)를 교차하여 사용하고 있어 해석의 일관성이 결여되어 있음을 알 수 있다. 그러나 이러한 교차 사용에 대한 근거는 없다.

따라서 이 연구에서는 EC2에서 제시하고 있는 처짐과 균열폭의 산정에 관한 규정을 분석하고, EC2에서 제시한 재료 모델<sup>6,7)</sup>을 바탕으로 인장증강효과와 분포계수의 통일된 적용 및 현 기준과 같이 이들의 조합된 적용의 결과에 대해 비교 검토하여 통일된 해석법을 제안하고자 하였다.

## 2. 처짐 및 균열폭 산정

### 2.1 처짐

EC2에서는 간편식으로서 평균 휨곡률을 사용하여 처짐을 산정하고 있다. 이 때 평균 휨곡률은 비균열 단면과 균열 단면에 발생하는 휨곡률의 조합으로 아래 식 (8)과 같이 표현된다.

$$(1/r)_e = \zeta(1/r)_{II} + (1 - \zeta)(1/r)_I \quad (8)$$

여기서,  $(1/r)_e$ 은 평균 휨곡률,  $(1/r)_I$ 과  $(1/r)_{II}$ 는 각각 비균열 단면과 균열 단면의 휨곡률로서 MC90에서는 균열 단면에서 식 (4)의 1차식을 통해 평균 변형률을 산정하고 있다.  $\zeta$ 는 분포계수로서 균열과 균열 사이의 특성 즉, 비균열 단면과 균열 단면의 휨곡률을 평균적인 휨곡률로 변환하기 위해 적용되는 계수이고 비균열 단면에서는 0이다. EC2에서는 Table 1의 2차식의 형태로 분포계수를 정의하고 있다. 이 연구에서는 비균열 단면의 휨곡률 $((1/r)_I)$ 은  $M_{cr}/EI_g$ 로 계산하였고, 균열 단면의 휨곡률 $((1/r)_{II})$ 을 EC2에서 주어진 p-r 곡선<sup>5,6)</sup>과 Fig. 3과 식 (7)에서와 같이 인장증강효과를 고려하여 산정하여 재료 비선형성을 반영하였다. 처짐( $\Delta$ )은 식 (8)의 평균 휨곡률로부터 식 (9)와 같이 계산된다. 이 때  $l$ 은 유효지간을 나타내며,  $k$ 는 하중과 지점의 조건에 따른 휨모멘트도의 형태에 관계되는 계수이다.<sup>3,6)</sup>

$$\Delta = k \cdot l^2 \cdot (1/r)_e \quad (9)$$

현행 콘크리트설계기준에서는 처짐을 아래 식 (10)의 유효단면2차모멘트( $I_e$ )를 사용하여 탄성 공식을 통해 산정하도록 하고 있다. 즉, 식 (10)으로부터 구한 유효단면2차모멘트와 콘크리트 탄성계수( $E_c$ )로부터 부재의 최대 휨모

멘트( $M_a$ )에 대한 휨곡률은 식 (11)과 같이 계산한다. 이러한 탄성 휨곡률을 앞선 식 (9)에 적용함으로써 처짐을 산정한다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \quad (10)$$

$$\left(\frac{1}{r}\right)_e = \frac{M_a}{E_c I_e} \quad (11)$$

여기서,  $I_g$ 는 전단면2차모멘트,  $I_{cr}$ 은 균열환산단면2차모멘트,  $M_{cr}$ 은 균열 휨모멘트를 나타낸다. 위 식은 단순히 작용 하중과 균열 휨모멘트의 관계로부터 단면의 강성을 계산하므로 실무에서 간편하게 사용할 수 있다.

앞선 식 (8)과 (10)을 살펴볼 때 두 식은 동일한 형태로 구성되어 있음을 알 수 있다. 즉 전단면과 비균열 단면에 대한 휨곡률을 분포계수를 통해 평균 휨곡률을 산정하고 있다. 이 때 사용된 분포계수로 EC2는 2차식을 사용하고 콘크리트구조설계기준에서는 3차식을 사용하였다. 그러나 평균 휨곡률을 산정할 때 EC2는 재료 비선형성을 고려하였지만, 콘크리트구조설계기준에서는 작용 하중에 대한 탄성식을 적용하고 있음을 알 수 있다.

### 2.2 균열폭

균열폭은 균열면 사이의 철근과 콘크리트 신장량의 차이로 나타낼 수 있다. 이에 따라 EC2 및 콘크리트구조설계기준에서는 설계 균열폭( $w_k$ )을 식 (12)와 같이 최대 균열 간격( $s_{r,max}$ )과 철근의 평균 변형률( $\epsilon_{sm}$ )과 콘크리트 평균 변형률( $\epsilon_{cm}$ )의 차이의 곱으로 제시하고 있다.

$$w_k = s_{r,max}(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad (12)$$

이 때 최대 균열 간격은 균열 안정화 단계에서 유효철근비와 철근 직경에 대한 항으로 주어지고 있다. 식 (13)은 EC2의 Part (general rules and rules for building)에서 제시한 최대 균열 간격이고, 식 (14)는 Part (concrete bridge)에서 제시한 최대 균열 간격이다.<sup>3)</sup> MC90 및 콘크리트구조설계기준에서는 안정상태 균열에 대해 식 (14)를 이용하여 최대 균열 간격을 산정하고 식 (12)로부터 설계 균열폭을 산정하고 있다.

$$s_{r,max} = 3.4c + 0.425k_1k_2d_b/\rho_e \quad (13)$$

$$s_{r,max} = \frac{d_b}{3.6\rho_e} \quad (14)$$

여기서,  $c$ 는 피복 두께,  $d_b$ 는 철근 직경,  $\rho_e$ 는 유효철근비를 나타낸다.  $k_1$ 은 철근의 부착 특성을 고려한 계수로서 부착 성능이 큰 경우는 0.8, 부착 성능이 작은 철근은 1.6

의 값을 갖는다.  $k_2$ 는 변형률의 분포를 고려한 계수로서 휨일 경우 0.5, 순수 인장일 경우 1.0의 값을 갖는다.

철근과 콘크리트의 평균 변형률의 차는 MC90에서 제시한 1차식 형태의 평균 변형률(식 (4))을 이용하여 아래 식 (15)와 같이 표현할 수 있는데, 현재 EC2에서는 식 (5)와 같이 2차식 형태의 평균 변형률을 제시하고 있음에도 불구하고 MC90에서 제시한 1차식 형태의 평균 변형률로부터 유도된 다음 식을 사용하고 있다. 식 (15)는 MC90과 콘크리트구조설계기준에서 제시하고 있는 평균 변형률의 차이이다.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{f_{so}}{E_s} - \frac{\beta_1 f_{ctm}(1 + n\rho_e)}{E_s \rho_e} \quad (15)$$

그런데 철근과 콘크리트의 평균 변형률의 차를 2차식 형태의 평균 변형률(식 (5))을 이용하여 유도하면 아래 식 (16)이 산출된다.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{f_{so}}{E_s} \left( 1 - (1 + n\rho_e)\beta_1\beta_2 \left( \frac{f_{scr}}{f_{so}} \right)^2 \right) \quad (16)$$

이 외에 Euro-Design Handbook<sup>6)</sup>에서는 설계 균열폭을 아래식과 같이 평균 균열 간격( $s_{rm}$ )과 철근의 평균 변형률의 곱으로 표현하고 있다.

$$w_k = \beta \cdot s_{rm} \cdot \varepsilon_{sm} \quad (17)$$

여기서  $\beta$ 는 평균 균열폭과 설계 균열폭 사이의 관계를 나타내는 계수로서 1.7을 사용한다. 이 때 철근의 평균 변형률은 식 (5)와 같이 EC에서 제시한 형태(2차식)를 사용하고 있다. 평균 균열 간격( $s_{rm}$ )은 다음 식 (18)과 같이 제시하고 있다. 일반적으로 최대 균열 간격과 평균 균열 간격사이에는 식 (19)와 같은 관계를 가지고 있다. 따라서 식 (18)에서 보인 평균 균열 간격과 식 (12)의 최대 균열 간격은 유사한 형태로 표현되고 있음을 알 수 있다.

$$s_{rm} = 50 + 0.25k_1k_2d_b/\rho_e \quad (18)$$

$$s_{r, \max} = 1.7s_{rm} \quad (19)$$

Gergely-Lutz<sup>8)</sup>는 많은 실험 자료의 통계적 분석을 바탕으로 보에서 인장 연단의 최대 균열폭을 예측하는 식을 제안하였고 간편한 적용성 때문에 실무에서 많이 사용되고 있다.

### 3. 해석 대상 및 해석 결과

#### 3.1 처짐 해석 대상 및 변수

인장증강효과 및 분포계수에 따른 처짐의 비교를 위해

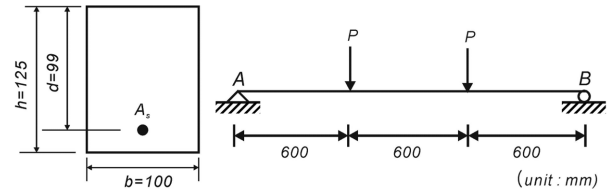


Fig. 4 Geometry of beam examined for deflection

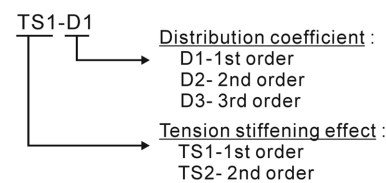
Fig. 4와 같이 Tan 등<sup>9)</sup>이 수행한 집중 하중을 받는 단순보의 실험값과 비교하였다. 100 × 125 mm(폭 × 높이), 유효 깊이는 99 mm를 갖는 직사각형 단면이고 인장 철근량은 157 mm<sup>2</sup>이며 보의 지간(L)은 1.8 m이다. 재령 28일 후 콘크리트 압축강도( $f_c'$ )는 41.2 MPa, 철근의 항복강도( $f_y$ )는 460 MPa이다.

식 (8)과 같이 EC2의 평균 곡률 개념을 이용하여 처짐을 산정할 경우 이 연구에서 사용된 실험보의 하중 및 지점의 특성에 따라  $k$ 는 0.106의 값을 갖는다.

MC90 및 EC2에서는 식 (4)와 같이 1차식 형태의 평균 변형률 관계식을 사용하고 있다. 그러나 근사 계산을 통해 처짐을 산정할 경우 사용되는 분포계수는 식 (5) 및 Table 1의 2차식 형태를 사용하고 있다. 따라서 이 연구에서는 1차식 및 2차식 형태의 평균 변형률을 사용하여 인장증강효과에 따른 처짐과 균열폭의 차이를 살펴보았다. 또한 평균 휨곡률 산정시 필요한 분포계수도 현재의 2차식 형태뿐만 아니라 1차식 형태를 적용하여 처짐에 대한 분포계수의 영향을 살펴보았다. 현행 콘크리트구조설계기준에 의해 처짐을 계산할 경우 사용되는 유효단면 2차모멘트(식 (10))에는 3차식 형태의 분포계수가 적용되고 있음을 볼 수 있다. 그러나 이러한 형태의 분포계수에 대한 적용은 근거가 불명확하다. 따라서 이 연구에서는 3차식 형태의 분포계수에 대한 영향도 동시에 살펴봄으로써 처짐에 대한 인장증강효과 및 분포계수의 영향을 분석해 보았다. Table 2는 해석에 사용된 철근의 평

Table 2 Variables examined for deflection

Distribution coefficient ( $\zeta$ )	Average steel strain ( $\varepsilon_{sm}$ )	
	$\frac{f_{so}}{E_s} \left( 1 - \beta_1 \frac{f_{ctm}}{f_{so} \rho_e} \right)$	$\frac{f_{so}}{E_s} \left( 1 - \beta_1 \beta_2 \left( \frac{f_{scr}}{f_{so}} \right)^2 \right)$
$1 - \beta_1 \frac{f_{ctm}}{f_{so} \rho_e}$	TS1-D1	TS2-D1
$1 - \beta_1 \beta_2 \left( \frac{f_{scr}}{f_{so}} \right)^2$	TS1-D2	TS2-D2
$1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3$	TS1-D3	TS2-D3



균 변형률 및 분포계수와 그 해석 변수를 나타낸다.

### 3.2 균열폭 산정 대상 및 해석 변수

균열폭에 대한 인장증강효과의 영향을 살펴보기 위하여 Fig. 5와 같이 집중 하중이 작용하는 고원준 등<sup>10)</sup>이 수행한 복철근보의 실험 결과와 비교하였다.

150 × 250 mm(폭 × 높이), 유효 깊이는 220 mm를 갖는 직사각형 단면이고 인장 철근량은 2-D16(397 mm<sup>2</sup>), 압축 철근량은 2-D10(142 mm<sup>2</sup>)이며, 보의 지간 길이(L)는 2.0 m이다. 재령 28일 후 콘크리트 압축강도( $f_c'$ )는 30.4 MPa, 철근의 항복강도( $f_y$ )는 400 MPa이다.

식 (12)와 같이 균열폭은 평균 변형률의 차와 최대 균열 간격의 곱으로 산정한다. 이 때 평균 변형률의 차는 철근의 평균 변형률의 형태에 따라 식 (15), (16)과 같이 표현된다. Table 3은 이러한 철근의 평균 변형률의 형태를 고려하여 균열폭을 산정하기 위한 해석 변수를 나타낸다.

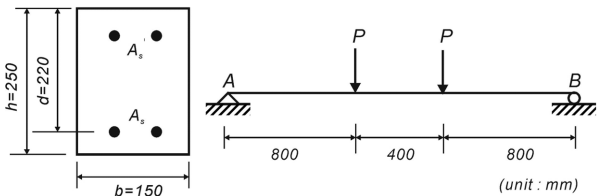


Fig. 5 Geometry of beam examined for crack width

Table 3 Variables examined for crack width

Name	Average steel strain ( $\epsilon_{sm}$ )
TS1	$\frac{f_{so}}{E_s} \left( 1 - \beta_1 \frac{f_{ctm}}{f_{so} \rho_e} \right)$
TS2	$\frac{f_{so}}{E_s} \left( 1 - \beta_1 \beta_2 \left( \frac{f_{scr}}{f_{so}} \right)^2 \right)$

TS1  
 Tension stiffening effect :  
 TS1-1st order  
 TS2-2nd order

### 3.3 처짐 해석 결과

Table 4와 Figs. 6~8은 처짐에 대한 실험 결과와 재료 모델을 기반으로 하여 인장증강효과를 반영한 처짐의 해석 결과를 나타낸다. 이 때 처짐은 현행 콘크리트구조설계기준에 의한 결과와도 비교하였다.

Fig. 6에서 볼 수 있듯이 재료 모델을 통해 단면의 곡률 특성을 반영한 경우(TS1-D2, TS2-D2)는 항복 전·후

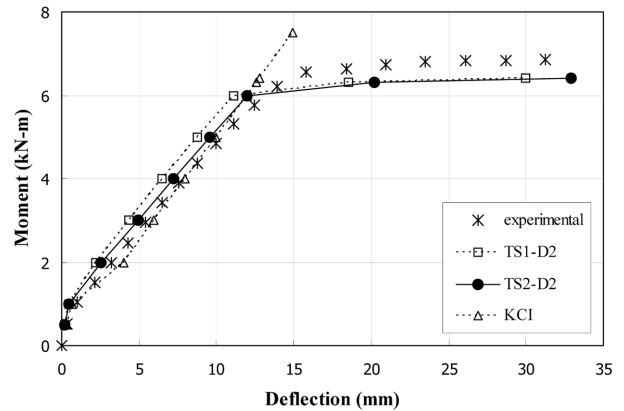


Fig. 6 Deflection relationship from various tension stiffening effect

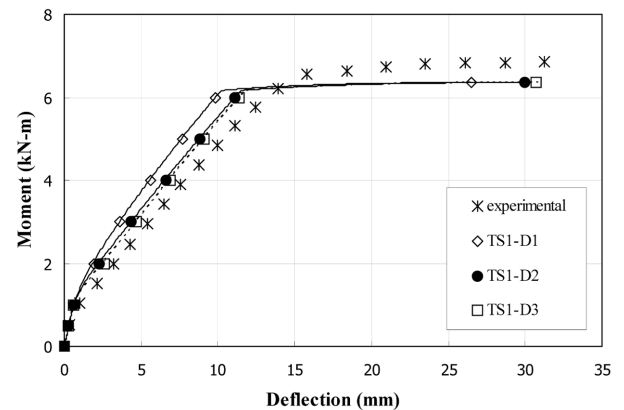


Fig. 7 Deflection relationship from various distribution coefficient

Table 4 Deflection calculated

Moment (kN·m)	Deflection (mm)							
	Experimental	KCI	TS1-D1	TS2-D1	TS1-D2	TS2-D2	TS1-D3	TS2-D3
0.0	0.00	0.00 (-)	0.00 (-)	0.00 (-)	0.00 (-)	0.00 (-)	0.00 (-)	0.00 (-)
0.5	0.36	0.34 (1.13)	0.30 (1.00)	0.30 (1.00)	0.30 (1.00)	0.30 (1.00)	0.30 (1.00)	0.30 (1.00)
1.0	1.02	0.68 (1.13)	0.60 (1.00)	0.60 (1.00)	0.60 (1.00)	0.60 (1.00)	0.60 (1.00)	0.60 (1.00)
2.0	3.30	3.99 (1.47)	1.91 (0.83)	2.17 (0.94)	2.30 (1.00)	2.65 (1.15)	2.58 (1.12)	2.99 (1.30)
3.0	5.42	5.98 (1.38)	3.60 (0.83)	4.08 (0.94)	4.34 (1.00)	4.95 (1.14)	4.67 (1.08)	5.34 (1.23)
4.0	7.60	7.97 (1.21)	5.61 (0.85)	6.25 (0.95)	6.60 (1.00)	7.36 (1.11)	6.92 (1.05)	7.72 (1.17)
5.0	10.1	9.97 (1.13)	7.68 (0.87)	8.41 (0.95)	8.83 (1.00)	9.68 (1.10)	9.13 (1.03)	10.01 (1.13)
6.0	13.0	11.96 (1.08)	9.85 (0.89)	10.64 (0.96)	11.12 (1.00)	12.01 (1.08)	11.39 (1.02)	12.32 (1.11)
6.4	15.5	12.76 (0.43)	26.50 (0.88)	29.02 (0.97)	30.00 (1.00)	32.90 (1.10)	30.75 (1.03)	33.07 (1.10)

( ) : TS1-D2(KCI Provisions Appendix) ratio to the analytical results

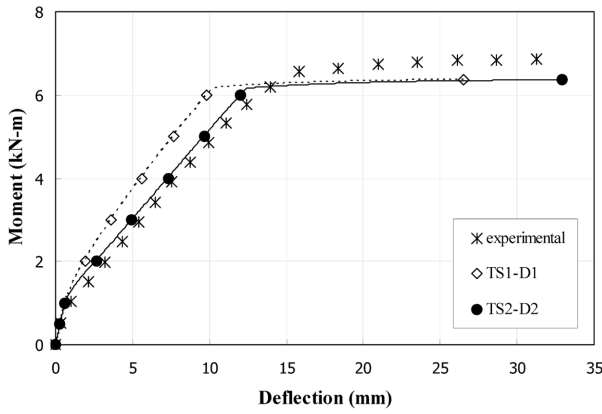


Fig. 8 Comparison of deflection

의 처짐을 비교적 잘 예측하고 있는 것으로 나타났다. 현행 EC2의 분포계수를 이용하고 각각의 인장증강효과를 반영한 경우(TS1-D2, TS2-D2)에 TS2-D2에 대한 처짐이 약 8~15% 정도 크게 해석되었다. 이는 2차식 형태의 평균 변형률을 사용함으로써 곡률이 크게 산정되므로 결국 처짐의 증가를 나타내는 것으로 사료된다. 결국 동일한 분포계수를 사용할 경우 2차식 형태의 인장증강효과를 사용함으로써 처짐을 크게 산정하게 되므로 설계시 안전측에 해당하는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 동일한 평균 변형률 관계식을 사용하고 분포계수의 형태를 변화시킨 경우에 대한 처짐의 추이를 나타낸다. 분포계수의 차수가 증가함에 따라 처짐은 약 13~35% 증가하는 것으로 나타났다. 특히 1차식 형태의 분포계수를 사용한 경우(TS1-D1)는 현행 EC2 기준에 따라 2차식의 분포계수를 사용한 경우(TS1-D2)에 비하여 약 11~17% 정도 처짐을 과소평가하였다. 즉, 2차식 형태의 분포계수를 사용함으로써 안전측의 처짐을 산출할 수 있었고 실험값과도 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 8은 각각 동일한 형태의 인장증강효과 및 분포계수를 사용한 경우(TS1-D1, TS2-D2)에 대한 처짐의 해석 결과를 나타낸다. 2차식 형태의 인장증강효과 및 분포계수를 사용한 경우(TS2-D2)에 약 24~39% 정도 처짐을 과대평가하는 것으로 나타났고 실험 결과에도 근접한 결과를 보였다. 이는 하중이 증가함에 따라 2차식 형태의 인장증강효과에 의한 철근의 평균 변형률이 크게 산정되고

이로 인해 곡률이 증가하기 때문에 곡률의 합의 형태로 표현되는 처짐 역시 크게 산정되는 것으로 사료된다.

재료 모델을 바탕으로 한 휨곡률을 통해 산정된 처짐은 Figs. 6~8과 같이 부재의 항복 전·후 및 극한한계상태에 이르기까지 처짐을 예측할 수 있다. 지진하중 등 극단하중이 작용할 때 사용하중의 개념은 일반적인 부재의 항복 전까지가 아닌 항복 이후 극한한계상태까지를 의미할 수 있다. 따라서 극한한계상태까지의 처짐을 일관되게 산정할 수 있어야 하고 이는 현재 성능중심설계로 변화하는 설계 현황을 반영할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 교각의 내진 성능을 평가하는 주요 인자인 변위연성도가 항복변위와 극한변위의 비로서 표현되고 있으므로 이 연구와 기존 연구<sup>7)</sup>의 결과에서와 같이 일관된 해석법을 통해 극한한계상태까지의 처짐을 산정할 수 있어야 할 것으로 판단된다.

### 3.4 균열폭 해석 결과

재료 모델을 바탕으로 EC2의 산정법을 따라 산정한 균열폭을 Gergely-Lutz의 제안식에 의한 균열폭 및 실험값과 비교하였다. Table 5와 Fig. 9는 인장증강효과에 따른 균열폭의 변화를 나타낸다.

Fig. 9에서 볼 수 있듯이 항복상태에 도달하기 전에는 각 해석 기법에 따라 균열폭이 실험값과 비교적 유사한 결과를 나타내고 있음을 보였다. 그러나 항복상태에 도달한 후에는 Gergely-Lutz에 의한 제안식을 통해서도 더 이상 균열폭의 예측이 불가능하였지만, 재료 모델을 바탕으로 한 EC2에 의해 균열폭을 산정할 경우 항복 이후 극한 한계상태까지 균열폭의 일관된 예측이 가능한 것으로 나타났다. 현재 MC90 및 EC2에서 사용하고 있는 인장증강효과를 반영한 결과(TS1)는 2차식 형태의 인장증강효과를 사용한(TS2) 균열폭의 약 72~86% 수준으로 평가되었다. 즉, 2차식 형태의 인장증강효과를 사용함으로써 설계시 안전측의 결과를 유도할 수 있음을 알 수 있다.

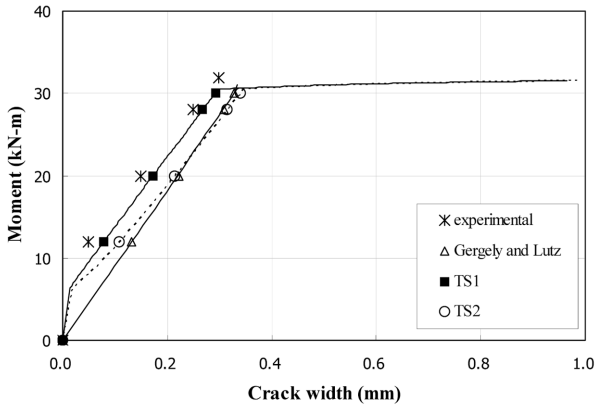
재료 모델을 바탕으로 한 평균 변형률을 통해 부재의 항복 전·후 및 극한한계상태에 이르기까지 균열폭을 일관되게 산정할 수 있다. 이는 앞선 처짐 결과와 마찬가지로 성능중심설계에서 사용성의 개념이 부재 항복 이전

Table 5 Crack width calculated

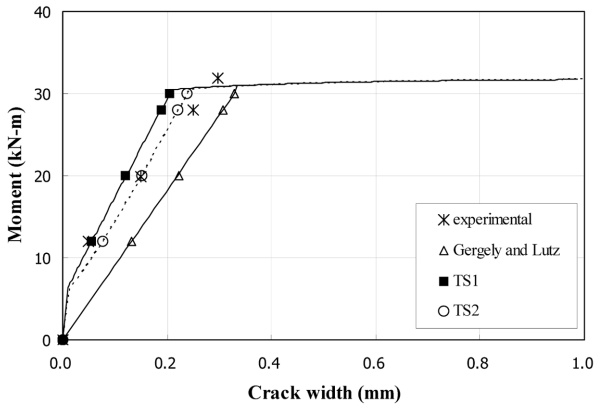
Moment (kN·m)	Crack width (mm)							
	Experimental	Gergely-Lutz	Part I		Part II			
			TS1	TS2	TS1	TS2	TS1*	TS2*
0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0.049	0.132 (2.40)	0.079 (1.44)	0.108 (1.96)	0.055 (1.00)	0.076 (1.38)	0.060 (1.09)	0.075 (1.36)
20	0.150	0.222 (1.83)	0.173 (1.43)	0.214 (1.77)	0.121 (1.00)	0.151 (1.25)	0.122 (1.00)	0.144 (1.19)
28	0.250	0.308 (1.64)	0.268 (1.43)	0.315 (1.67)	0.188 (1.00)	0.221 (1.18)	0.184 (0.98)	0.209 (1.11)
30	0.298	0.329 (1.60)	0.292 (1.42)	0.340 (1.66)	0.205 (1.00)	0.239 (1.17)	0.200 (0.98)	0.225 (1.10)

( ): TS1 (part II) ratio to the analytical results

TS1\*, TS2\* : crack spacing according to the Euro-Design Handbook



(a) EC2-Part I (general & building)



(b) EC2-Part II (concrete bridge)

Fig. 9 Comparison of crack width

까지를 의미할 수 없기 때문에 극한한계까지의 균열폭을 일관되게 산정할 수 있어야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 재료 모델과 EC2의 절차를 바탕으로 인장증강효과 형태를 반영한 휨부재의 처짐 및 균열폭 특성에 대하여 분석하였다. 현재 EC2에서는 1차식 형태의 인장증강효과와 2차식 형태의 분포계수를 교차 사용하므로 논리의 일관성이 결여되어 있다. 따라서 이 연구에서는 1차식 및 2차식 형태의 인장증강효과와 분포계수를 각각 적용함으로써 처짐과 균열폭을 산정하였고, 이를 통해 일관된 형태의 인장증강효과와 분포계수를 적용하여 처짐 및 균열폭 산정이 가능하여 해석의 일관성을 확보할 수 있음을 보였다. 이 연구의 해석 결과를 토대로 한 연구 내용을 요약하면 다음과 같다.

1) 콘크리트구조설계기준 및 EC2에 의한 처짐 및 균열폭 해석 결과 항복상태에 이르기 전까지는 비교적 해석 기법에 관계없이 유사한 값을 보였다. 그러나 콘크리트구조설계기준에 의해서는 부재 항복 이후의 거동의 예측이 어렵지만, 재료 모델을 통한 평균변형률 및 휨곡률을 통해서 극한한계상태에 이르기까지 처짐과 균열폭을 일관되게 산정할 수 있음을 보였다.

- 2) EC2의 처짐 산정법에 따라 처짐을 산정할 때, 2차식 형태의 인장증강효과와 분포계수를 동일하게 반영할 경우 1차식 형태로 반영한 결과에 비하여 약 24~39% 과대평가하였다. 또한 현재 EC2와 같이 1차식과 2차식의 조합 형태로 반영한 결과에 비해서도 약 8~15% 과대평가하고 있음을 알 수 있다.
- 3) EC2의 균열폭 산정법에 따라 균열폭을 산정할 경우 1차식 형태의 인장증강효과를 반영한 경우가 2차식 형태의 인장증강효과를 반영한 균열폭의 약 72~86% 수준으로 과소평가되었다.
- 4) 현재 EC2에서는 균열폭 및 처짐을 산정하기 위하여 1차식 및 2차식 형태의 인장증강효과 및 분포계수를 서로 교차하여 사용하므로 균열 후 인장 거동에 대한 일관된 접근이 이루어지고 있지 않다.
- 5) 연구 결과 인장증강효과와 분포계수의 차이에 따라 처짐 및 균열폭에 큰 차이를 보이지 않으므로 균열 후 인장 거동에 대해 일관된 형태의 적용이 가능하고 이에 따라 해석의 일관성을 확보할 수 있을 것으로 사료된다. 특히, 2차식 형태의 인장증강효과 및 분포계수를 동일하게 사용함으로써 현 기준에 비해 처짐 및 균열폭을 다소 과대평가하게 되므로 안전측의 설계가 가능한 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 이기열, 김우, “비선형 부차 특성에 기반한 철근콘크리트 휨부재의 균열폭과 처짐 해석,” 콘크리트학회 논문집, 20권, 4호, 2008, pp. 459~467.
2. Fib, *Structural Concrete-Manual Textbook Volume 1*, International Federation for Structural Concrete, Switzerland, 1999, pp. 189~205.
3. European Committee for Standardization, *Eurocode 2-Design of Concrete Structures*, 2002, pp. 124~131.
4. 이기열, 하태관, 김우, “비선형 부차 특성에 기반한 철근콘크리트 부재의 인장증강효과 모델,” 콘크리트학회 논문집, 19권, 6호, 2007, pp. 745~754.
5. 국토해양부, 콘크리트구조설계기준, 한국콘크리트학회, 2007, 76 pp.
6. Karlsruhe, J. E., *Concrete Structures Euro-Design Handbook*, Ernst & Sohn, 1994, pp. 237~250.
7. 최승원, 김우, “콘크리트 응력-변형률 관계에 기반한 철근콘크리트 부재의 처짐 산정,” 대한토목학회 논문집, 30권, 4A호, 2010, pp. 383~389.
8. Gergely, P. and Lutz, L. A., “Maximum Crack Width in Reinforced Flexural Members,” *Causes, Mechanism, and Control of Cracking in Concrete*, SP-20, ACI, 1968, pp. 87~117.
9. Tan, K. H., Paramasivam, P., and Tan, K. C., “Instantaneous and Long-Term Deflections of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams,” *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 4, 1994, pp. 384~393.
10. 고원준, “부차응력과 상대슬립을 고려한 철근콘크리트 부재의 휨균열 산정,” 성균관대학교 대학원, 박사학위논문, 2002, 168 pp.

---

**요 약** 철근콘크리트 구조물에 균열이 발생하면 균열과 균열 사이 단면의 콘크리트는 부착에 의해 인장력을 전달하게 되고 이에 따라 철근의 변형은 줄어든다. 이러한 현상을 인장증강효과라 하고, 처짐 및 균열폭과 같은 사용한계상태의 검증에 중요한 역할을 한다. 그러나 균열 사이의 복잡한 변형률 분포 때문에 사용성한계상태의 검증에 어려움이 따르므로 일반적으로 평균 변형률을 사용하여 처짐과 균열폭을 산정하고 있다. EC2에서는 1차식 및 2차식 형태의 인장증강효과를 사용하여 평균 곡률을 산정하고 이로부터 처짐량을 산정하고 있다. 이 연구에서는 휨부재에 대하여 인장증강효과에 대한 다양한 모델을 적용하여 처짐과 균열폭을 산정하고 EC2와 콘크리트구조설계기준에 의한 결과와 비교하였다. 해석 결과 2차식 형태의 인장증강효과를 일관되게 적용함으로써 실험 결과에 더 부합된 결과를 얻을 수 있었고 해석의 일관성도 도모할 수 있는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 인장증강효과, 평균 곡률, 처짐, 균열폭