



재료 특성 변화에 따른 철근콘크리트 휨부재의 간접균열제어 방법 연구

최승원¹⁾ · 김 우^{2)*}

¹⁾한국콘크리트학회 콘크리트공학연구소 ²⁾전남대학교 토목공학과

Indirect Crack Controlling Method Affected by Variation of Material Characteristics in Reinforced Concrete Flexural Members

Seung-Won Choi¹⁾ and Woo Kim^{2)*}

¹⁾KCI Research Center, Korea Concrete Institute, Seoul 135-703, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

ABSTRACT Crack formations are inevitable in reinforced concrete structures. To estimate crack widths, empirical formulae are used widely and indirect crack controlling methods of limiting bar spacing and bar diameter are also used due to their simplicity. In EC2, the characteristic crack width is calculated by multiplying maximum crack spacing and average strain. In this study, limit values of maximum bar spacing and bar diameter are examined as the material characteristics are varied. Two models of tension stiffening effect and maximum crack spacing and their effects are evaluated. The obtained results are compared with the values obtained using KCI method. The results showed that a significant difference is found when two tension stiffening effect are employed, and an under-estimation is found when 2nd order tension stiffening effect and maximum crack spacing limit from Part II were implemented. Therefore, a rational indirect crack control method attained using the tension stiffening effect of 2nd order form is needed. Also, a consistency in serviceability analysis in flexural members needs to be secured. In order to achieve these goals, two crack controlling models are suggested.

Keyword : bar diameter, bar spacing, indirect crack control, tension stiffening effect, maximum crack spacing

1. 서 론

철근콘크리트 부재는 일반적으로 사용하중보다 훨씬 낮은 하중에서 균열이 발생할 뿐 만 아니라 하중과는 별개로 건조수축 등의 재료적인 원인에 의해서도 균열이 발생한다. 이러한 콘크리트의 균열은 상당히 불확실한 현상으로 다양한 변수의 영향을 받아 발생하므로 현재 균열폭을 예측하는 식의 대부분은 실험 및 경험에 근거하고 있다.¹⁾ 따라서 일반적으로 균열 검증을 위해서는 기존의 여러 제안식^{2,3)}을 통해 직접 균열폭을 산정하고 이를 허용 균열폭과 비교하는 방식이 사용되고 있다. 이 중 Gergely-Lutz²⁾의 경험적 균열폭 모델은 단순한 형태로 구성된 식을 통해 균열폭을 산정할 수 있으므로 실무에서 많이 사용되고 있고 우리나라에서는 2003년까지 채택되어 사용하였다. 유로코드 2(Eurocode 2, EC2)⁴⁾에서는 허용 균열폭과 비교를 위해 평균 변형률의 차와 최대균열간격의 곱으로 설계 균열폭을 직접 산정하고 있고,

2007년 개정된 콘크리트구조설계기준⁵⁾의 부록에서는 EC2와 동일한 방법으로 설계 균열폭을 산정하고 있다.

그러나 이러한 직접균열검증 방식은 철근의 응력이나 단면의 변형률을 계산하여 균열폭을 산정해야 하므로 실무에서 곧바로 적용하는데 번거로움이 따른다. 이에 최대철근간격과 최대철근직경을 제한함으로써 실무에서 쉽게 균열을 제어하는 간접균열제어가 동시에 채택되어 있다. 이러한 이유로 콘크리트구조설계기준에서는 Frosch³⁾의 연구를 바탕으로 피복두께를 고려한 철근 간격을 제한함으로써 균열을 제어하고 있다. 즉, 콘크리트 인장 연단에 가장 가까이에 배치된 철근의 중심 간격(s)이 식 (1)과 (2)에 의해 계산된 값 중에서 작은 값 이하일 때 균열은 허용값 이내에 있다고 간주하고 있다.

$$s = 375 \left(\frac{210}{f_s} \right) - 2.5t_c \tag{1}$$

$$s = 300 \left(\frac{210}{f_s} \right) \tag{2}$$

여기서 t_c 는 인장 철근이나 긴장재 표면과 콘크리트 표

*Corresponding author E-mail: wkim@chonnam.ac.kr
 Received September 10, 2010, Revised November 17, 2010,
 Accepted November 26, 2010
 ©2011 by Korea Concrete Institute

면 사이의 최소 두께로서 순피복두께이고, f_s 는 철근 응력이다. 이에 반해 EC2에서는 균열이 직접하중에 의해 주로 발생하고 최소 철근량을 만족하는 경우 최대철근직경 및 최대철근간격을 만족하도록 제어하고 있고, 이 값들은 균열폭 직접 계산식을 바탕으로 산정된 값이다.

CEB-FIP 모델코드 1990(MC90)^{6,7)}과 EC2에서 설계 균열폭(w_k)은 인장증강효과가 반영된 평균 변형률의 차($\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$)와 최대균열간격($s_{r,max}$)을 곱하여 산정 한다.

$$w_k = s_{r,max}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (3)$$

이 때 인장증강효과는 Fig. 1에서 보인 것과 같이 MC90과 EC2에서 식 (4)의 1차식 형태와 식 (5)의 2차식 형태로 주어진다. 이 중 식 (5)의 인장증강효과 모델은 식 (6)과 같이 휨부재 처짐 산정에 사용되는 분포계수(ξ)와 동일한 형태임을 알 수 있다.

$$\text{MC90 (1차식): } \varepsilon_{sm} = \frac{f_{so}}{E_s} \left(1 - \beta_1 \frac{f_{ctm}}{f_{so} \rho_e}\right) \quad (4)$$

$$\text{EC2 (2차식): } \varepsilon_{sm} = \frac{f_{so}}{E_s} \left(1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{f_{scr}}{f_{so}}\right)^2\right) \quad (5)$$

$$\xi = 1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{f_{scr}}{f_{so}}\right)^2 \quad (6)$$

여기서 E_s 는 철근 탄성계수, ε_{sm} 은 철근의 평균 변형률, f_{so} 는 균열면의 철근 응력, f_{scr} 은 인장균열 발생 직후의 철근 응력이다. β_1 는 하중 형태를 반영한 계수로써 단기 하중일 경우 0.6, 장기 하중일 경우 0.4이다. β_1 은 철근 형태를 반영한 계수로 이형철근일 경우 1.0, 원형철근일 경우 0.5의 값을 갖는다. β_2 는 하중 형태를 반영한 계수로써 단기 하중이 작용할 경우 1.0, 장기 반복하중이 작용할 경우 0.5의 값을 갖는다. 그리고 ρ_e 는 유효철근비로써 아래 식 (7)과 같이 유효 인장 면적에 대한 철근량의 비로 표현된다. f_{ctm} 은 콘크리트 평균인장강도이며 식 (8)과 같이 나타낸다.

$$\rho_e = \frac{A_s}{2.5(h-d) \cdot b} \quad (7)$$

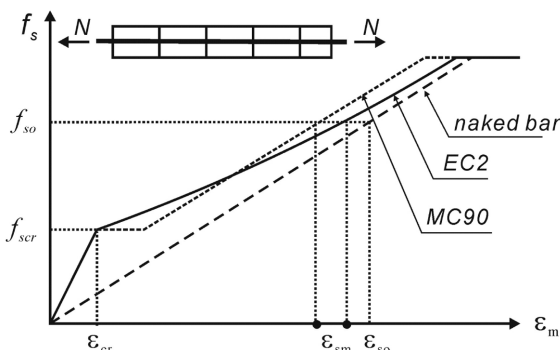


Fig. 1 Tension-stiffening effect

$$f_{ctm} = 0.3(f_{cm})^{2/3} \quad (8)$$

이 때 h 는 단면 높이, d 는 유효 높이, b 는 단면 폭이고, f_{cm} 은 콘크리트 평균압축강도로써 압축강도가 40 MPa 미만일 경우 $f_{ck} + 4$ 이다. f_{ck} 는 기준압축강도이다.

최대균열간격은 EC2의 Part I(General & Building)과 Part II(Bridge)에서 다른 형태로 주어진다. Part I은 부착 특성과 피복두께를 고려한 식 (9)로 주어지고, Part II는 부착 특성만 고려된 식 (10)으로 나타낸다.

$$\text{EC2 Part I: } s_{r,max} = 3.4d_c + 0.425k_1k_2d_b / \rho_e \quad (9)$$

$$\text{EC2 Part II: } s_{r,max} = \frac{d_b}{3.6\rho_e} \quad (10)$$

여기서 d_c 는 피복두께, d_b 는 철근 직경, k_1 은 철근의 부착 특성을 고려한 계수로써 부착 성능이 큰 경우는 0.8, 부착 성능이 작은 철근은 1.6의 값을 갖는다. k_2 는 변형률의 분포를 고려한 계수로 휨일 경우 0.5, 순수 인장일 경우 1.0의 값을 갖는다. Part II에서 제시하고 있는 최대균열간격 식 (10)은 균열 사이의 평균부착응력 분포로부터 역학적으로 계산되는 식이나, Part I의 최대균열간격 식 (9)는 식 (10)에 피복두께에 대한 경험적인 부분을 적용하여 나타난 식이다. 따라서 최대철근간격과 최대철근 직경은 식 (4)~(10)과 같이 인장증강효과 모델과 최대균열간격에 따라 다른 값이 산정된다. 즉, MC90과 EC2 Part II 및 콘크리트구조설계기준 부록에서는 1차식 형태의 식 (4)의 인장증강효과 모델과 식 (10)의 최대균열간격을 통해 설계 균열폭을 산정하여 검증하도록 하고 있다. 또한 EC2 Part I은 이와 동일한 인장증강효과 모델과 식 (9)의 최대균열간격을 적용하여 설계 균열폭을 산정하고 있다.

Table 1은 현재 각 기준에서 제시하고 있는 설계 균열폭에 대한 인장증강효과와 최대균열간격을 나타낸 것이다. 현재 EC2에서는 식 (9)와 (10)과 같이 다른 형태의 최대균열간격이 제시됨에도 불구하고 동일한 철근 직경과 간격이 제시되어 있다. 또한 콘크리트구조설계기준 본문에서는 식 (1)과 (2)와 같이 탄성이론과 콘크리트 인장력을 무시한 균열폭으로부터 철근 간격을 제시하여 균열을 검증하지만, 구조설계기준 부록에서는 MC90과 EC2와 마찬가지로 인장증강효과가 고려된 식 (3)을 통해 설계 균열폭을 산정하여 허용 균열폭과 비교하고 있다.

Table 1 Combination of base theory in current codes

Code	Tension stiffening effect		Max. crack spacing	
	1st order (Eq. 4)	2nd order (Eq. 5)	Part I (Eq. 9)	Part II (Eq. 10)
KCI Appendix	°α	×	×	°α
MC90	°α	×	×	°α
EC2 Part I	°α	×	°α	×
EC2 Part II	°α	×	×	°α

이와 같이 현재 구조설계기준에서는 균열폭에 대한 직접 계산과는 별개로 철근 간격식을 제시하고 있으므로 설계 균열폭과 허용 균열폭의 비교에 의한 검증에서는 균열폭이 허용 균열폭 이내에 존재하여 안전할 수 있으나, 철근 간격에 의한 검증시에는 제한 조건을 만족시키지 못할 경우가 자주 발생한다.

따라서 이 연구에서는 휨부재에 대해 EC2에서 주어진 재료모델^{8,9)}을 토대로 앞선 식 (4)와 (5)로 주어진 인장증강효과 모델의 차이와 식 (9)와 (10)으로 주어진 최대균열간격 차이에 따른 철근의 최대 직경과 최대 간격 차이를 분석하였다. 또한 콘크리트구조설계기준에서 제시한 철근의 최대 간격과 Gergely-Lutz 제안식으로부터 철근의 최대 간격을 산정하여 EC2의 값과 비교, 분석하였다. 이 결과를 근거로 간접균열제어를 위한 인장증강효과 모델과 최대균열간격식을 제안하고, 최대철근간격과 최대철근직경을 제시하고자 하였다.

2. 간접균열제어를 위한 철근 간격 및 철근 직경식 유도

2.1 여러 기준의 철근 간격식 유도

간접균열제어를 위해 콘크리트구조설계기준에서는 앞선 식 (1)과 (2)를 통해 철근 간격을 산정하고 있다. 또한 많은 연구자와 설계기준에서는 균열폭을 측정하는 식이 제시되어 있으므로 이러한 균열폭 식으로부터 간접균열제어를 위한 철근 간격 및 철근 직경을 유도하고자 한다.

Fig. 2와 같이 직사각형 단면을 갖는 철근콘크리트 휨부재의 단면 폭(b)은 철근 중심 간격(s)과 철근 개수(m)의 곱으로 표현되고, 콘크리트 총인장면적(A_{ct})은 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$b = s \times m \quad (11)$$

$$A_{ct} = b \times 2y = b \times 2d_c \quad (12)$$

여기서 y 는 인장 연단에서 인장 철근 도심까지의 거리로써 피복두께 d_c 이고, 식 (13)과 같이 순피복두께(t_c)와 철근

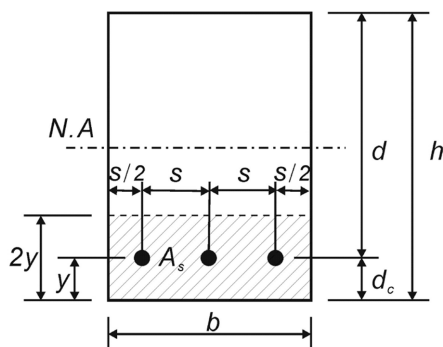


Fig. 2 Geometrical variables for crack width calculation

직경(d_b)의 향으로 표현할 수 있다.

$$y = d_c = t_c + d_b/2 \quad (13)$$

철근 총 단면적(A_s)은 식 (14)와 같이 철근 개수(m)와 철근 한 개 단면적(α_s)의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$A_s = m \times \alpha_s \quad (14)$$

철근 직경이 d_b 일 때 철근 한 개의 단면적은 $\pi d_b^2/4$ 이고 식 (7), (11) 그리고 (14)를 통해 철근 직경은 다음 식 (15)와 같이 유효철근비의 향으로 나타낼 수 있다.

$$d_b = \sqrt{\frac{10 \cdot s \cdot \rho_e \cdot (h-d)}{\pi}} = \sqrt{\frac{10 \cdot s \cdot \rho_e \cdot d_c}{\pi}} \quad (15)$$

Gergely-Lutz 제안식 : Gergely-Lutz는 식 (16)과 같이 많은 실험 자료의 통계적 분석을 바탕으로 보에서 인장 연단의 최대 균열폭을 예측하는 식을 다음과 같이 제안하고 있다.

$$w = 1.08 \beta_c f_s \sqrt[3]{d_c A} \times 10^{-5} \quad (16)$$

여기서 w 는 최대 균열폭, f_s 는 철근 인장응력, d_c 는 인장 연단에서부터 가장 가까운 인장 철근 중심까지의 거리, β_c 는 중립축에서 인장 연단까지의 거리와 중립축에서 철근의 도심까지의 거리의 비, A 는 콘크리트 총인장면적(A_{ct})을 철근의 개수로 나눈 콘크리트 유효인장면적으로써 식 (11)과 (12)를 통해 다음 식 (17)과 같이 표현된다.

$$A = \frac{2s \cdot m \cdot y}{m} = 2s \cdot y = 2s \cdot d_c \quad (17)$$

따라서 식 (12), (13)을 Gergely-Lutz의 균열폭 제안식 (16)에 대입하여 철근 간격(s)의 향으로 정리하면 식 (18)과 같이 철근 간격을 나타낼 수 있다.

$$s = \frac{1}{2(t_c + d_b/2)^2} \left[\frac{w_k \times 10^5}{1.08 \beta_c f_s} \right]^3 = \frac{1}{2d_c^2} \left[\frac{w_k \times 10^5}{1.08 \beta_c f_s} \right]^3 \quad (18)$$

Frosch 제안식 : Frosch는 식 (19)와 같이 설계 균열폭(w_k)을 제시하고 있다. Frosch는 식 (19)와 같이 철근 간격과 피복두께의 영향을 고려한 균열폭을 제시하였으며, 콘크리트 인장력을 무시하므로 균열폭을 다소 과대평가하는 경향이 있다.

$$w_k = 2 \frac{f_s}{E_s} \beta_c \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad (19)$$

이 식을 철근 간격의 향으로 정리하면 다음 식 (20)과 같다.

$$s = 2 \sqrt{\left(\frac{w_k \cdot E_s}{2 \cdot f_s \cdot \beta_c}\right)^2 - d_c^2} \quad (20)$$

직사각형 단철근 보에 휨이 작용할 경우 균열 휨모멘트(M_{cr})는 다음 식 (21)과 같이 정의할 수 있다.

$$M_{cr} = S \cdot f_r = \left(\frac{bh^2}{6}\right) \cdot f_{ctm} \quad (21)$$

여기서 S 는 단면계수이고, bh^2 은 다음 식 (22)와 같이 콘크리트 총인장면적(A_{ct})의 항으로 표현할 수 있다.

$$bh^2 = b \cdot (2.5(h-d)) \cdot \frac{h^2}{2.5(h-d)} = \frac{A_{ct} \cdot h^2}{2.5(h-d)} \quad (22)$$

또한 균열 휨모멘트는 식 (23)과 같이 철근 인장력과 중립축 깊이(x_{cr})의 항으로 표현할 수 있다.

$$M_{cr} = A_s f_{so} (d - \beta \cdot x_{cr}) \quad (23)$$

이 때 β 는 콘크리트 압축 합력의 작용점을 나타내는 계수로써 콘크리트 압축 변형률의 항으로 표현된다.^{8,9)} x_{cr} 은 균열 발생시 중립축 깊이이다. 따라서 식 (21)과 (23)이 같게 되는 철근량(A_s)을 산정할 수 있고, 유효철근비는 식 (7)을 통해 산정할 수 있다.

이와 같이 앞서 제시한 두 가지 인장증강효과 모델과 두 가지 최대균열간격을 이용하면 다음과 같이 철근 응력에 대한 네 가지 최대철근간격을 산정할 수 있다.

EC2 Part I(1차식 형태의 인장증강효과 모델과 Part I의 조합식): 식 (4)의 1차식 형태의 인장증강효과 모델(MC90)과 Part I에서 제시한 최대균열간격 식 (9)에 대한 조합에 따른 설계 균열폭은 아래 식 (24)와 같다. 이 식은 EC2 Part I에서 제시한 식이다.

$$w_k = \left(3.4d_c + 0.17 \frac{d_b}{\rho_e}\right) \left[\frac{f_{so}}{E_s} - 0.4 \frac{f_{ctm}}{\rho_e E_s} (1 + n \cdot \rho_e)\right] \quad (24)$$

여기서 n 은 탄성계수비이다. 식 (15)의 철근 직경과 식 (24)의 설계 균열폭으로부터 다음 식 (25)와 같이 철근 간격을 산정할 수 있다.

$$s = \frac{\pi \rho_e}{0.3d_c} \left[\frac{w_k}{\left[\frac{f_{so}}{E_s} - 0.4 \frac{f_{ctm}}{\rho_e E_s} (1 + n \cdot \rho_e)\right]} - 3.4d_c \right]^2 \quad (25)$$

EC2 Part II와 MC90(1차식 형태의 인장증강효과 모델과 Part II의 조합식): 식 (4)의 1차식 형태의 인장증강효과(MC90)와 Part II의 최대균열간격 식 (10)을 조합한 설계 균열폭은 아래 식 (26)과 같다. 이는 콘크리트구

조설계기준 부록과 MC90 그리고 EC2 Part II에서 제시한 식이다.

$$w_k = \frac{d_b}{3.6\rho_e} \left[\frac{f_{so}}{E_s} - 0.4 \frac{f_{ctm}}{\rho_e E_s} (1 + n \cdot \rho_e) \right] \quad (26)$$

식 (26)과 (15)의 철근 직경을 통해 다음 식 (27)과 같이 철근 간격이 산정된다.

$$s = \frac{\pi \cdot \rho_e}{10d_c} \left[\frac{3.6w_k}{\left[\frac{f_{so}}{E_s} - 0.4 \frac{f_{ctm}}{\rho_e E_s} (1 + n \cdot \rho_e)\right]} \right]^2 \quad (27)$$

2차식 형태의 인장증강효과 모델과 Part I의 조합식: 2차식 형태의 EC2 인장증강효과(식 (5))와 Part I의 최대균열간격 식 (9)를 고려한 설계 균열폭은 다음 식 (28)과 같다.

$$w_k = \left(3.4d_c + 0.17 \frac{d_b}{\rho_e}\right) \cdot \frac{f_{so}}{E_s} \left[1 - 0.5(1 + n \cdot \rho_e) \left(\frac{f_{scr}}{f_{so}}\right)^2 \right] \quad (28)$$

식 (28)과 (15)를 이용하면 철근 간격은 다음 식 (29)와 같이 유도된다.

$$s = \frac{\pi \cdot \rho_e}{0.3d_c} \left[\frac{w_k}{\left[\frac{f_{so}}{E_s} \left[1 - 0.5 \cdot (1 + n \cdot \rho_e) \left(\frac{f_{scr}}{f_{so}}\right)^2 \right] \right]} - 3.4d_c \right]^2 \quad (29)$$

2차식 형태의 인장증강효과 모델과 Part II의 조합식: 2차식 형태의 EC2 인장증강효과(식 (5))와 식 (10)의 Part II 최대균열간격식을 고려한 설계 균열폭은 다음 식 (30)과 같고, 이를 식 (15)와 연립하면 식 (31)과 같이 철근 간격을 산정할 수 있다.

$$w_k = \frac{d_b}{0.3\rho_e E_s} \left[1 - 0.5 \cdot (1 + n \cdot \rho_e) \left(\frac{f_{scr}}{f_{so}}\right)^2 \right] \quad (30)$$

$$s = \frac{\pi \cdot \rho_e}{10d_c} \left[\frac{3.6w_k}{\left[\frac{f_{so}}{E_s} \left[1 - 0.5(1 + n \cdot \rho_e) \left(\frac{f_{scr}}{f_{so}}\right)^2 \right] \right]} \right]^2 \quad (31)$$

식 (18), (20), (25), (27), (29) 및 (31)에서 주어진 철근 간격에 한계 균열폭이 주어지면 최대 철근 간격을 산정할 수 있다. 또한 인장증강효과에 반영된 계수 β_1 , β_2 및 β_3 는 각각 1.0, 0.5 그리고 0.4를 적용하였고, 최대균열간격을 표현하는 계수 k_1 과 k_2 는 각각 0.8과 0.5를 적용하여 휨부재의 부착성능이 큰 이형철근에 대한 해석을 수행하여 최대철근간격을 산정하였다.

2.2 여러 기준의 철근 직경식 유도

콘크리트구조설계기준에서는 간접균열제어를 위해 최대철근간격만을 제시하고 있는데 반해 EC2에서는 최대철근직경에 대한 규정을 동시에 제시하고 있다. 철근 직경은 철근 간격과 동일하게 설계 균열폭에 대한 관계식으로부터 유도할 수 있고, 인장증강효과 모델과 최대균열간격의 크기에 영향을 받는다. 또한 Gergely-Lutz 제안식과 Frosch 제안식으로부터 철근 직경을 산정할 수 있다.

EC2 Part I(1차식 형태의 인장증강효과 모델과 Part I의 조합식) : 1차식 형태의 인장증강효과와 Part I의 최대균열간격을 통한 설계 균열폭 식 (24)로부터 철근 직경은 다음 식 (32)와 같이 나타낼 수 있다.

$$d_b = \frac{\rho_e}{0.17} \left[\frac{E_s \cdot w_k}{f_{so} - 0.4f_{cim}(1+n \cdot \rho_e)/\rho_e} - 3.4d_c \right] \quad (32)$$

EC2 Part II와 MC90(1차식 형태의 인장증강효과 모델과 Part II의 조합식) : 1차식 형태의 인장증강효과와 Part II의 최대균열간격을 조합한 설계 균열폭 식 (26)은 다음 식 (33)과 같이 철근 직경으로 나타낼 수 있다.

$$d_b = \frac{3.6E_s \cdot \rho_e \cdot w_k}{f_{so} - 0.4f_{cim}(1+n \cdot \rho_e)/\rho_e} \quad (33)$$

2차식 형태의 인장증강효과 모델과 Part I의 조합식 : 2차식 형태의 인장증강효과와 Part I의 최대균열간격을 통한 설계 균열폭 식 (28)로부터 철근 직경은 다음 식 (34)와 같이 나타낼 수 있다.

$$d_b = \frac{\rho_e}{0.17} \left[\frac{E_s \cdot w_k}{f_s \left[1 - 0.5(1+n \cdot \rho_e) \left(\frac{f_{scr}}{f_{so}} \right)^2 \right]} - 3.4d_c \right] \quad (34)$$

2차식 형태의 인장증강효과 모델과 Part II의 조합식 : 2차식 형태의 인장증강효과와 Part II의 최대균열간격을 통한 철근 직경은 식 (30)의 설계 균열폭으로부터 다음 식 (35)와 같이 나타낼 수 있다.

$$d_b = \frac{3.6E_s \cdot \rho_e \cdot w_k}{f_{so} \left[1 - 0.5(1+n \cdot \rho_e) \left(\frac{f_{scr}}{f_{so}} \right)^2 \right]} \quad (35)$$

Gergely-Lutz 제안식 : Gergely-Lutz에 의해 제안된 균열폭 식으로부터 철근 직경은 다음 식 (36)과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_b = \sqrt{\frac{5\rho_e}{\pi d_c} \left[\frac{w_k \times 10^5}{1.08\beta_c f_s} \right]^{3/2}} \quad (36)$$

Frosch 제안식 : Frosch는 식 (19)와 같이 설계 균열폭을 제안하였고 이로부터 식 (37)과 같이 철근 직경을 나타낼 수 있다.

$$d_b = \sqrt{\frac{20\rho_e d_c}{\pi} \left[\left(\frac{w_k E_s}{2\beta_c f_s} \right)^2 - d_c^2 \right]^{1/4}} \quad (37)$$

앞선 최대철근간격과 마찬가지로 식 (32)~(37)에 한계 균열폭과 각 계수를 적용함으로써 간접균열제어를 위한 최대철근직경을 산정할 수 있다.

3. 최대철근간격 및 최대철근직경 결과

3.1 관련 규정 및 해석 대상 제한

콘크리트구조설계기준에서는 사용하중 상태에서 인장연단에서 가장 가까이에 위치한 철근 응력은 사용하중 휨모멘트에 대한 해석으로 결정해야 하지만 근사값으로 기준항복강도(f_y)의 2/3를 사용할 수 있다고 규정하고 있다. 철근 간격에 대해서는 동일 평면에서 평행한 철근 사이의 수평 순간격은 25 mm 이상 혹은 철근의 공칭지름 이상으로 규정하고 있고, 수평 최대 간격은 450 mm 이하로 제시하고 있다. 또한 D25 이하의 철근 사용시 최소 피복두께는 50 mm이다.⁵⁾

간접균열제어를 위한 최대철근간격과 최대철근직경의 산정을 위해 사용된 콘크리트 기준압축강도는 24 MPa이고 기준항복강도 400 MPa, 공칭 지름 25 mm인 철근을 사용하였다. 또한 집차 재료의 고강도화가 이루어지고 있는 추세를 반영하여 기준항복강도 500 MPa인 철근에 대한 검토를 수행하였다. 기준항복강도 400 MPa과 500 MPa 일 경우 사용하중 상태에서 철근 응력은 각각 270 MPa, 330 MPa이다. 또한 습윤 환경 및 부식성 환경에서의 허용 균열폭인 0.3 mm 뿐만 아니라 일반 건조 환경하에서의 허용 균열폭인 0.4 mm에 대해서도 검토를 수행하였다. 해석에 사용된 단면은 100 × 400 mm(폭 × 높이)의 직사각형 단면이고 피복두께는 단면 높이의 10%로 가정하였으며, 철근비(ρ)는 0.5%와 1.0%로 가정하였다.

3.2 최대철근간격 결과 분석

Fig. 3은 EC2에서 제시한 최대철근간격을 이 연구 결과 중 EC2의 균열폭 산정 절차에 따른 결과와 비교한 것이다. EC2에서는 최대철근간격을 300 mm 이하로 제한하고 있으므로 해석 결과도 이에 준하였다. 그림에서와 같이 각 해석 모델은 현재 EC2에서 제시하는 값과 유사한 값을 나타냈다.

Table 2는 허용 균열폭에 대한 각 모델 별 최대철근간격을 나타낸 것이고, Fig. 4는 이 중 2차식 형태의 인장증강효과 모델을 사용한 결과와 콘크리트구조설계기준에 의한 최대철근간격을 비교한 것이다. 표와 그림에서 볼

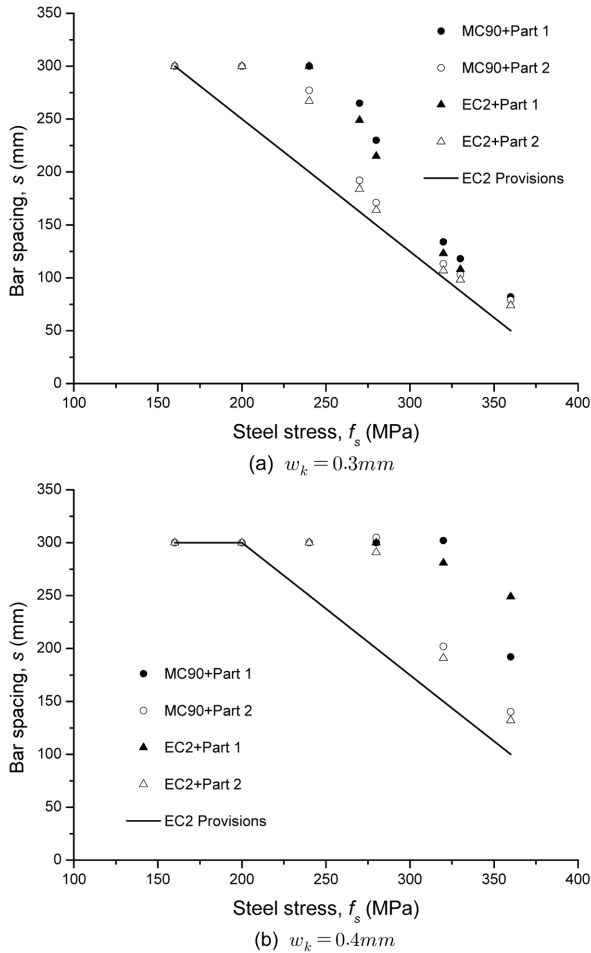


Fig. 3 Comparison of bar spacing suggested

수 있듯이 콘크리트구조설계기준에서 제시하고 있는 최대철근간격, Gergely-Lutz 제안식 및 Frosch 제안식에 의한 최대철근간격은 일반적인 사용하중 단계의 철근 응력 범위인 270~360 MPa 사이에서 EC2에 의한 해석값 내에 분포하고 있지만 상대적으로 과대평가하고 있는 것으로 나타났다. 즉, EC2에 의한 값이 작은 철근 간격을 허용하여 보수적인 값을 나타내었다. 특히, 철근 응력이 증가할수록 이러한 경향은 뚜렷하였다.

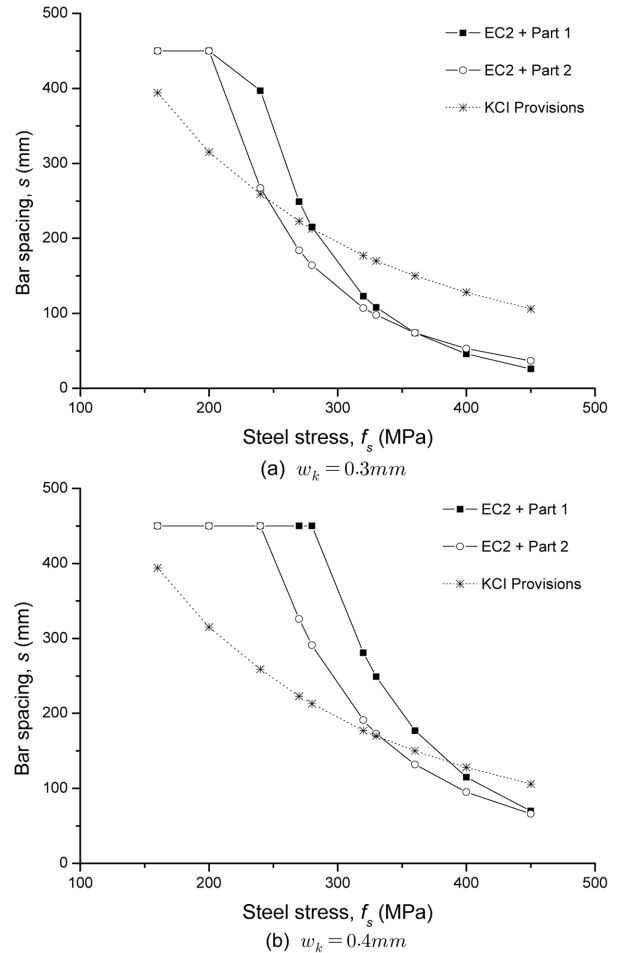


Fig. 4 Maximum bar spacing calculated

Fig. 5는 인장증강모델에 따른 최대철근간격을 나타낸다. 이 때 최대균열간격은 Part II의 식을 사용하였다. 그림에서와 같이 인장증강효과 모델의 차이는 크지 않았으나 1차식 형태의 인장증강효과 모델(MC90)을 사용한 경우 최대철근간격이 2차식 형태의 모델(EC2)을 사용한 값에 비해 약 3~8% 과대평가되는 것으로 나타났다. 따라서 2차식 형태의 모델에 의한 값이 작은 철근 간격을 허용하여 다소 보수적인 것으로 나타났다.

Table 2 Maximum bar spacing (s) calculated (mm)

f_s (MPa)	$w_k = 0.3 mm$							$w_k = 0.4 mm$						
	MC90+ Part1	MC90+ Part2	EC2+ Part1	EC2+ Part2	KCI	Gergely- Lutz	Frosch	MC90+ Part1	MC90+ Part2	EC2+ Part1	EC2+ Part2	KCI	Gergely- Lutz	Frosch
160	450	450	450	450	394	450	319	450	450	450	450	394	450	431
200	450	450	450	450	315	450	251	450	450	450	450	315	450	342
240	417	277	397	267	259	331	205	450	450	450	450	259	450	282
270	265	192	249	184	223	233	179	450	341	450	326	223	450	249
280	230	171	215	164	213	210	171	450	305	450	291	213	450	239
320	134	113	123	107	177	141	145	302	202	281	191	177	334	206
330	118	103	108	98	170	129	139	269	183	249	173	170	305	199
360	82	79	74	74	150	99	124	192	140	177	132	150	236	180
400	51	57	46	53	128	73	106	127	102	115	95	128	172	158
450	29	40	26	37	106	51	87	78	71	70	66	106	121	136

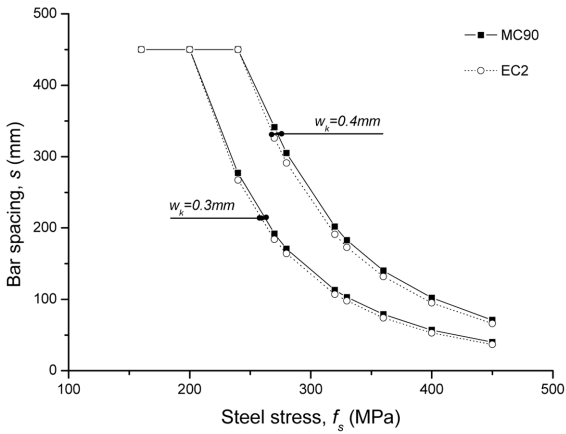


Fig. 5 Maximum bar spacing with tension stiffening effect

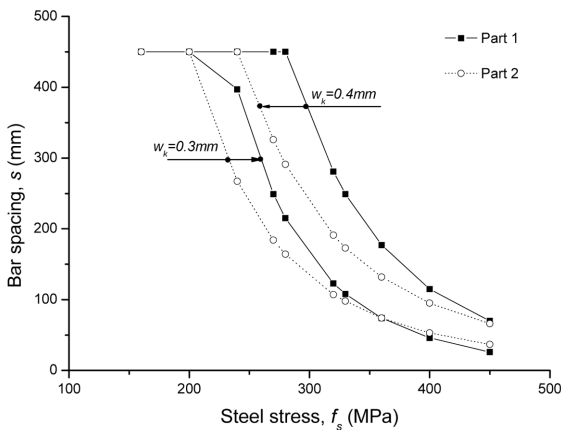


Fig. 6 Maximum bar spacing with maximum crack spacing

Fig. 6은 최대균열간격 차이에 따른 최대철근간격을 나타낸다. 이 때 인장증강효과는 2차식 형태 모델을 사용하였다. 허용 균열폭이 0.3 mm이고 철근 응력이 약 360 MPa 이하일 경우 Part I의 최대균열간격을 사용한 최대철근간격은 Part II의 값을 사용한 경우에 비해 약 10~49% 과대평가하여 Part II에 의한 값이 보수적인 값을 나타냈다. 그러나 철근 응력이 증가하면서 Part I의 최대균열간격을 사용한 경우의 최대 간격이 반대로 약 40%까지 감소하였다. 이러한 결과는 식 (29)와 (31)을 비교해 볼 때, 철근 응력이 작을 경우에는 피복두께(d_c)의 영향이 크지 않지만 철근 응력이 증가함에 따라 피복두께의 영향이 증가하고 이에 따라 철근 간격의 역전 현상이 발생하여 최대철근간격의 크기가 역전되는 것으로 사료된다. 그러나 사용하중 하에서 철근 응력은 항복응력의 2/3 수준임을 감안할 때, 일반적으로 사용되는 철근($f_y = 400$ MPa)을 사용할 경우 Part II의 최대균열간격을 사용한 값이 과소평가 되었다. 허용 균열폭이 0.4 mm인 경우에는 모든 철근 응력 범위 내에서 Part I의 최대균열간격을 사용한 철근 최대 간격이 약 6~47% 과대평가되고, 철근 응력이 증가함에 따라 최대철근간격의 차이는 점차 감소하였다. 이상의 허용 균열폭에 대한 최대철근간격을 통해 2차식의 인장증강효과 모델과 Part II의 최대균열간격을 사용

하면 작은 철근 간격을 허용함으로써 균열폭에 대해 보수적인 결과를 도출할 수 있는 것으로 나타났다.

Table 3은 순피복두께(t_c)에 따른 각 모델 별 최대철근간격을 나타낸다. Fig. 7은 Table 3의 해석 결과 중 Part II의 최대균열간격을 사용한 값과 각 기준에 의한 최대철근간격을 비교한 것이다. 이 때 허용 균열폭은 0.3 mm, 철근 응력은 270 MPa, 철근비는 0.5%와 1.0%이다. 해석 결과 허용 균열폭이 0.3 mm인 경우 Gergely-Lutz 제안식이나 Frosch 제안식 및 콘크리트구조설계기준에 의한 최대철근간격은 EC2 해석값에 비해 전반적으로 과대평가되어 EC2에 의한 값이 보수적인 값을 나타내었고 이는 앞선 철근 응력과 최대철근간격의 결과와 동일하다.

Fig. 8은 허용 균열폭에 따른 EC2 해석값과 콘크리트구조설계기준에 의한 값을 나타낸 것으로 이 두 값에 큰 차이가 발생함을 볼 수 있었다. 이는 식 (1)과 (2)가 균열폭 0.3 mm를 기본으로 하여 표현된 식이기 때문이다.⁵⁾ 이 외에 인장증강효과 모델 및 최대철근간격에 따른 최대철근간격의 해석 결과도 앞선 해석 결과와 동일한 경향을 나타내었다. 그러나 Table 2의 결과에서는 철근 응력이 작은 경우 Part I의 최대균열간격을 이용한 최대철근간격이 Part II의 값을 사용한 경우에 비해 큰 결과를 나타내었지만, Table 3에서 나타난 최대철근간격은 Part II에 의한 값이 일관되게 큰 값을 나타내었다. 이는 최대철근간격은 철근비에 따라 변화하는데 휨부재에서 약 0.2% 이하의 철근비를 갖는 경우에는 Part I의 최대균열간격이 더 큰 값을 보이지만, 이 보다 큰 철근비에서는 Part II의 값이 크기 때문이다.

3.3 철근 직경 결과 분석

Table 4와 Fig. 9는 Gergely-Lutz 제안식, Frosch 제안식 및 EC2에 의한 최대철근직경에 대한 해석 결과를 나타낸다. 일반적인 사용하중 범위에서 Gergely-Lutz 제안식과 Frosch 제안식에 의한 값은 EC2의 각 모델들에 의한 값의 분포 내에 존재하였다. 또한 Fig. 9에서와 같이 1차식 및 2차식의 인장증강효과 모델과 Part II의 최대균열간격을 사용한 경우 최대철근직경은 가장 작게 평가되어 보수적인 값을 보였고 이는 EC2에서 제시한 철근 직경과 유사한 값을 보였다.

Fig. 10은 인장증강효과 모델에 따른 최대철근직경을 나타낸다. 이 때 최대균열간격은 Part II의 값을 사용하였다. 1차식 형태의 인장증강효과 모델에 의한 최대철근직경은 2차식 형태에 의한 값과 거의 동일한 값을 나타내었다. 이는 최대철근간격에서도 두 인장증강효과 모델에 따른 차이가 없다는 것과 동일한 결과를 나타낸다. 철근 직경에 대한 식 (33)과 (35)를 살펴볼 때 균열시 중립축 깊이(x_{cr})를 0.2h로 가정하면 콘크리트 평균인장강도(f_{cm})는 $1.25f_{so} \cdot \rho_e$ 이므로 결국 식 (33)과 (35)의 분모 부분은 동일한 형태로 환산된다. 그러나 철근 응력이 증가함에 따라 중립축 깊이는 0.2h보다 작아지므로 두 식이 정

Table 3 Results of maximum bar spacing (s) (mm)

t_c (mm)	$\rho = 0.5\%, w_k = 0.3 \text{ mm}$													
	$f_s = 270 \text{ MPa}$							$f_s = 330 \text{ MPa}$						
	MC90+ Part1	MC90+ Part2	EC2+ Part1	EC2+ Part2	KCI	Gergely- Lutz	Frosch	MC90+ Part1	MC90+ Part2	EC2+ Part1	EC2+ Part2	KCI	Gergely- Lutz	Frosch
20	216	203	150	162	233	298	173	87	120	54	95	189	163	137
40	55	126	25	81	192	114	153	25	74	25	51	139	63	109
60	25	91	25	55	142	60	115	25	54	25	36	89	33	44
80	25	71	25	42	92	37	25	25	42	25	27	39	25	25
100	25	59	25	34	42	25	25	25	35	25	25	25	25	25
150	25	41	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
	$\rho = 0.5\%, w_k = 0.4 \text{ mm}$													
20	450	361	368	288	233	450	238	234	214	161	169	189	387	191
40	183	223	76	144	192	271	223	62	132	25	92	139	148	173
60	64	162	25	98	142	142	200	25	96	25	63	89	78	141
80	25	127	25	75	92	87	164	25	75	25	49	39	48	81
100	25	104	25	60	42	59	102	25	62	25	40	25	32	25
150	25	75	25	41	25	28	25	25	43	25	27	25	25	25
	$\rho = 1.0\%, w_k = 0.3 \text{ mm}$													
20	274	310	189	255	233	298	173	113	197	75	165	189	163	137
40	49	193	25	149	192	114	153	25	122	25	98	139	63	109
60	25	140	25	106	142	60	115	25	88	25	70	89	33	44
80	25	110	25	82	92	37	25	25	69	25	55	39	25	25
100	25	90	25	67	42	25	25	25	57	25	45	25	25	25
150	25	63	25	47	25	25	25	25	39	25	31	25	25	25
	$\rho = 1.0\%, w_k = 0.4 \text{ mm}$													
20	450	450	450	450	233	450	238	334	351	244	293	189	387	191
40	214	344	119	264	192	271	223	71	217	35	174	139	148	173
60	54	249	25	188	142	142	200	25	157	25	125	89	78	141
80	25	195	25	146	92	87	164	25	123	25	97	39	48	81
100	25	161	25	120	42	59	102	25	101	25	80	25	32	25
150	25	111	25	83	25	28	25	25	70	25	55	25	25	25

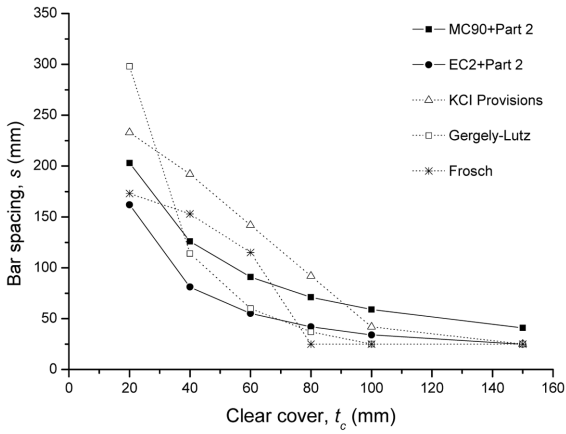
확하게 일치하지는 않지만 두 식에 의한 값이 매우 작게 되어 인장증강효과 모델에 따른 최대철근직경의 차이는 거의 발생하지 않는 것으로 사료된다.

Fig. 11은 최대균열간격에 따른 최대철근직경을 나타낸다. 이 때 인장증강효과는 2차식 형태 모델을 사용하였

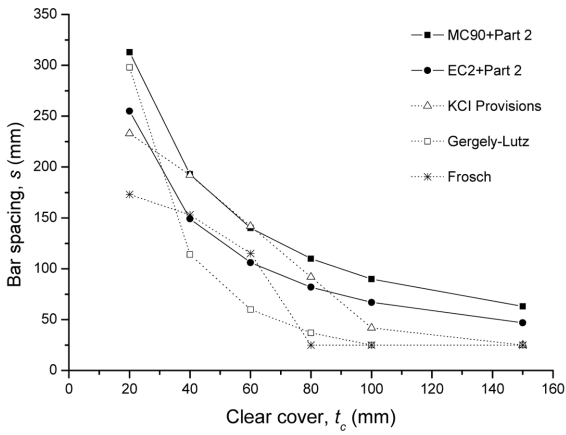
다. Part II의 최대균열간격을 사용한 최대철근직경은 Part I의 값에 대해 약 72~100% 수준으로 나타났다. 즉, Part II의 최대균열간격을 사용한 값이 작은 철근 직경을 허용 함으로써 보수적임을 알 수 있다.

Table 4 Results of maximum bar diameter (d_b) according to steel stress (mm)

f_s (MPa)	$w_k = 0.3 \text{ mm}$						$w_k = 0.4 \text{ mm}$					
	MC90+ Part1	MC90+ Part2	EC2+ Part1	EC2+ Part2	Gergely- Lutz	Frosch	MC90+ Part1	MC90+ Part2	EC2+ Part1	EC2+ Part2	Gergely- Lutz	Frosch
140	78	56	78	56	57	27	108	74	109	74	88	32
160	57	42	57	42	44	24	80	56	80	56	68	28
200	34	26	34	26	28	19	48	35	48	35	43	22
240	22	18	22	18	20	15	32	24	32	24	30	18
270	16	14	16	14	15	13	24	19	24	19	24	16
330	10	9	10	9	10	11	15	12	15	12	16	13
360	8	8	8	8	9	10	12	10	12	10	13	12
400	6	6	6	6	7	9	9	8	9	8	11	10

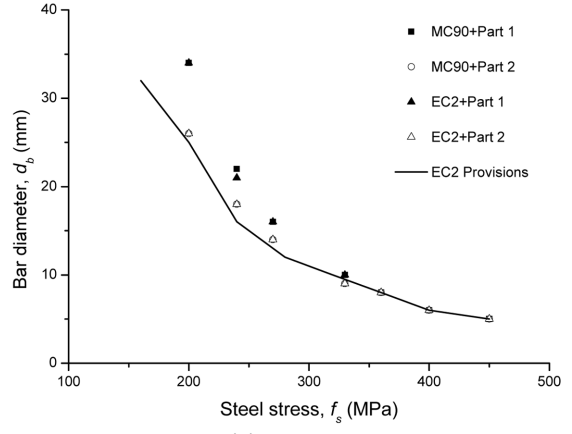


(a) $\rho = 0.5\%$

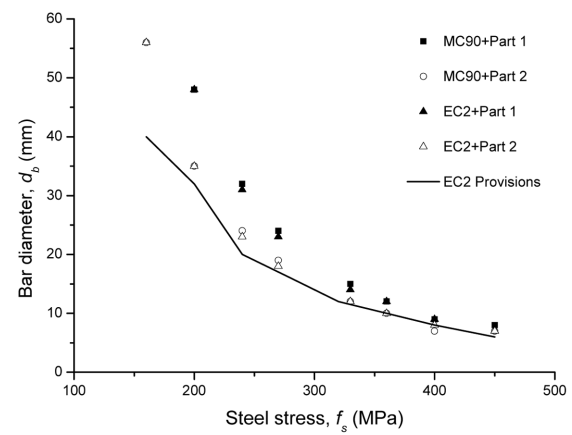


(b) $\rho = 1.0\%$

Fig. 7 Maximum bar spacing from each code



(a) $w_k = 0.3mm$



(b) $w_k = 0.4mm$

Fig. 9 Maximum bar diameter from each code

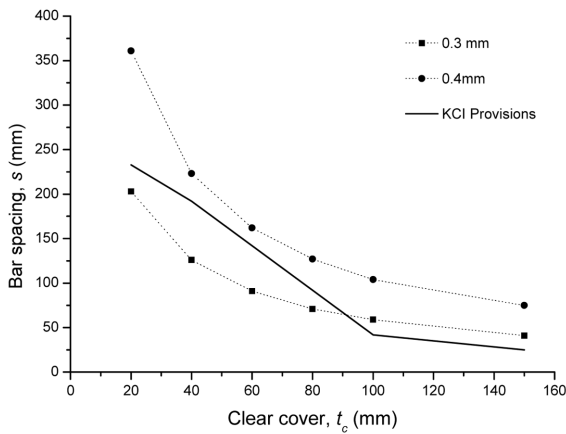


Fig. 8 Maximum bar spacing with allowable crack width

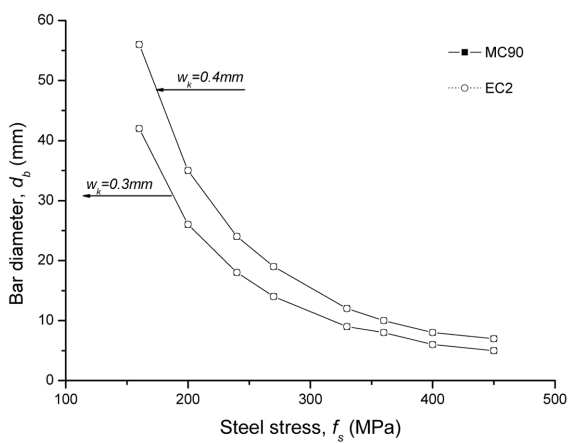


Fig. 10 Maximum bar diameter with tension stiffening effect

3.4 현재 콘크리트구조설계기준과 해석 결과의 비교

앞 절의 해석 결과에서와 같이 최대철근간격과 최대철근직경은 사용된 인장증강효과 모델 및 최대균열간격에 따라 변화한다. 따라서 이에 대한 정립이 우선되어야 할 것이다. 또한 현재 콘크리트구조설계기준의 간접균열제어와 직접균열검증 사이의 불일치가 존재함을 볼 수 있다. 즉, 현재 콘크리트구조설계기준에서는 직접 균열폭을 계산하여 검증할 경우 1차식 형태의 인장증강효과 모델

과 EC2 Part II 및 MC90에서 제시한 최대균열간격을 이용하여 설계 균열폭을 산정하도록 하고 있다. 그러나 균열제어를 위해 제시된 철근 간격은 콘크리트 인장력을 무시한 탄성이론을 통한 균열폭으로부터 산정된 철근 간격이다.

Fig. 12는 한계 균열폭 0.3 mm, 철근비 0.5%일 때 콘크리트구조설계기준에서 제시하고 있는 철근 간격과 EC2에서 제시하고 있는 철근 간격 그리고 구조설계기준 부록에서 제시한 균열폭으로부터 산정한 철근 간격을 비교

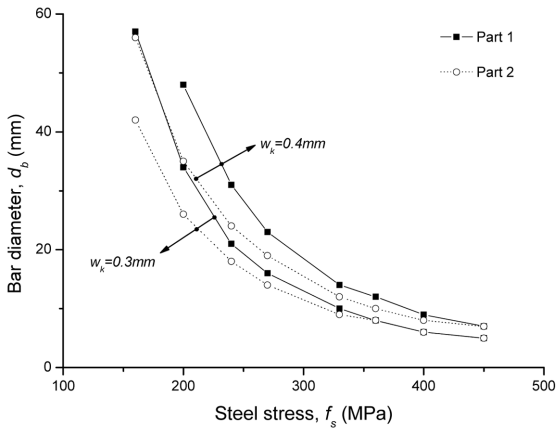
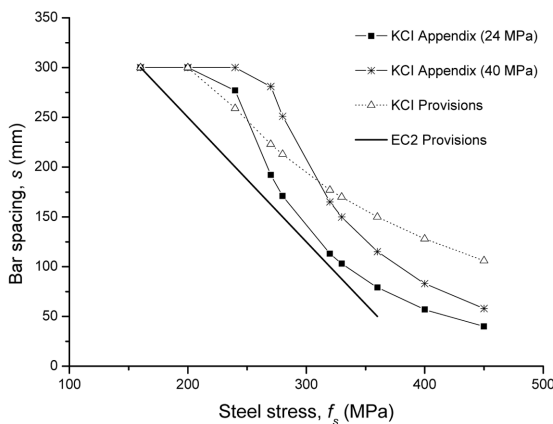
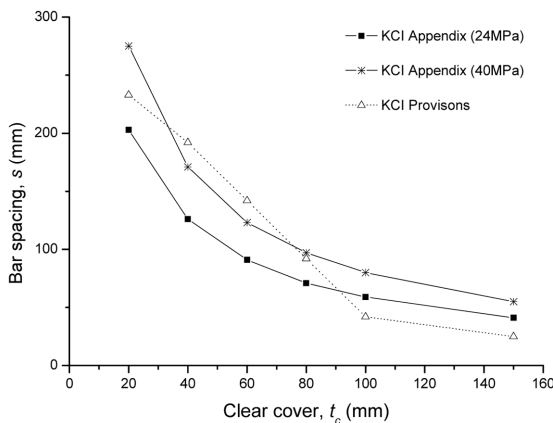


Fig. 11 Maximum bar diameter relationship according to maximum crack spacing



(a) Bar spacing versus steel stress



(b) Bar spacing versus clear cover

Fig. 12 Comparison for each code

한 것이다. 이 때 콘크리트 기준압축강도는 24 MPa와 40 MPa이다. 그림에서와 같이 현재 콘크리트구조설계기준에 의한 철근 간격은 다른 기준에 의한 해석값과 큰 차이를 보였다. Fig. 12(a)에서와 같이 일반적인 사용하중 범위인 약 240~360 MPa 수준에서 콘크리트구조설계기준 부록에 의한 철근 간격은 현 설계기준에 비해 작게 평가되었다. 특히 철근 응력이 증가하면서 이러한 경향은 뚜렷하게 나타났다. 이와 같이 콘크리트 강도에 의

해 철근 간격에 대한 차이가 발생할 수 있는 것으로 나타났다. EC2 모델에 의해서는 이러한 콘크리트 강도의 영향을 반영할 수 있는데 반해 현 설계기준에서는 이러한 영향을 반영하지 못하였다. 이는 현 구조설계기준과 같이 단순히 철근 응력에 관한 식으로는 정확한 균열 제어의 수행이 어려움을 보여준다. Fig. 12(b)는 철근 응력 270 MPa일 때 순피복두께에 따른 철근 간격의 해석 결과로서 앞선 결과와 동일한 결과를 나타내었다. 이와 같이 콘크리트구조설계기준에서 제시한 두 모델에 의한 해석값이 큰 차이를 보이는 것은 두 모델의 기반이 서로 다르기 때문이며 따라서 해석 및 검증의 일관성을 확보할 수 없음을 보여준다. 즉, 직접균열검증과 간접균열제어 사이의 모순이 발생하여 두 방법 중 한 가지를 만족할 때 다른 한 방법을 만족하지 못하는 경우가 발생할 수 있음을 의미한다.

예를 들면 Fig. 12(b)에서 콘크리트 강도가 24 MPa이고 피복 두께가 60 mm 인 경우 현 설계기준에 의해 최대철근간격은 142 mm이다. 그러나 설계기준 부록에 의한 최대철근간격은 91 mm로써 현 설계기준의 최대 간격보다 작은 값을 나타낸다. 따라서 만약 현 설계기준에 의해 철근을 배치(142 mm) 했을 경우 설계기준 부록에 의해 산정한 균열폭은 허용 균열폭(0.3 mm)을 초과하게 된다. 따라서 이 연구의 결과를 토대로 현 콘크리트구조설계기준의 이러한 균열 검증법의 모순을 최소화하고 직접균열제어와 간접균열제어 해석의 일관성을 확보할 수 있는 다음 두 가지를 제안할 수 있다.

먼저 현 설계기준과 동일한 형태를 유지하는 간단한 방법으로 콘크리트구조설계기준 부록의 균열 검증에 사용된 인장증강효과 모델 및 최대균열간격을 이용하여 직접 균열폭을 산정하고 동시에 이로부터 간접균열제어를 위한 최대철근간격과 최대철근직경을 산정한다. 즉, 1차식 형태의 인장증강효과 모델과 EC2 Part II의 최대균열간격을 이용하여 직접균열검증 및 간접균열제어를 수행한다. 해석 결과 이 모델에 의한 해석값은 현재 콘크리트구조설계기준에 의한 값보다 작은 값을 보여 보수적인 결과를 보였다.

다음으로 보다 합리적인 방법으로써 2차식 형태의 인장증강효과 모델과 EC2 Part I의 최대균열간격을 이용하여 직접균열검증 및 간접균열제어를 수행하는 것이다. 2차식 형태의 EC2 인장증강효과 모델은 실제 균열거동을 모사하는데 더 적합하고 또한, 처짐 계산시 사용되는 분포계수가 2차식 형태의 인장증강효과 모델과 동일하다는 점에서 처짐과 균열폭 계산의 일관성을 확보할 수 있다. 또한 EC2 Part I의 최대균열간격은 부착 특성 뿐만 아니라 피복두께에 대한 영향을 직접적으로 반영하므로 실제 균열간격을 효과적으로 모사할 수 있다. 이 경우 사용하중단계 즉, 철근 응력 240~330 MPa에서 기존의 콘크리트구조설계기준 부록(EC2 Part II, MC90)의 모델에 의한 값에 비해 다소 큰 값을 나타내지만, 고강도 철근이 사용된 경우인 360 MPa 이상의 응력 수준에서는 콘

크리트구조설계기준 및 설계기준 부록에 의한 값과 유사하거나 작은 값을 나타내어 효과적으로 간접균열제어를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 연구에서는 균열 제어를 위해 EC2에서 제시한 최대철근간격과 최대철근직경이 직접 균열폭 계산으로부터 산정되고 있음을 보이고, 이 값에 대한 인장증강효과 모델 및 최대균열간격에의 영향을 파악하고 이를 콘크리트 구조설계기준에 의한 값과 비교하였다. 이 연구의 해석 결과를 토대로 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) EC2에서 제시하는 재료 모델을 통해 직접 균열폭을 산정함으로써 최대철근간격과 최대철근직경을 산정하였고, 따라서 균열폭에 영향을 주는 인장증강효과 모델 및 최대균열간격이 간접균열제어에 영향을 주는 인자임을 보였다. 따라서 MC90과 EC2에서 제시한 1차식 및 2차식 형태의 인장증강효과 모델과 EC2의 Building편(Part I)과 Bridge편(Part II)에서 제시한 최대균열간격을 반영하여 최대철근간격과 최대철근직경을 산정하였다.
- 2) 철근 응력에 대한 최대철근간격 해석 결과 콘크리트구조설계기준에 의한 값은 EC2 모델에 의한 해석값 내에 있었지만, 철근 응력이 증가함에 따라 최대철근간격을 과대평가하였다. 따라서 EC2 모델에 의한 값이 보수적인 결과를 보이는 것으로 나타났다. 또한 2차식 형태의 인장증강효과 모델과 Part II 최대균열간격을 사용함으로써 일반적으로 작은 최대철근간격을 허용하여 보수적인 값을 나타내었다. 그러나 철근 응력이 증가함에 따라 Part I의 최대균열간격을 사용한 철근 간격이 점차 과소평가되는 경향을 보였다.
- 3) 철근 응력에 대한 최대철근직경 해석 결과 Gergely-Lutz 및 Frosch의 제안식에 의한 값은 EC2 각 모델의 해석값 범위 내에 존재하였다. 또한 1차식 및 2차식 형태의 인장증강효과 모델과 Part II 최대균열간격을 사용할 경우 일반적인 사용하중 범위에서 작은 철근 직경을 산정하여 보수적인 결과를 나타내었으나, 철근 응력이 증가함에 따라 최대균열간격에 따른 철근 직경의 차이는 감소하였다. 이 때 인장증강효과 모델에 의한 철근 직경의 차이는 거의 발생하지 않았다.
- 4) 콘크리트구조설계기준에 의한 간접균열제어는 콘크리트 인장력을 무시하고 탄성이론을 적용한 균열폭에 기반하고 있지만 구조설계기준 부록의 균열폭은 인장증강효과를 반영하고 있다. 따라서 콘크리트구

조설계기준을 통해 최대철근간격을 만족하더라도 동시에 구조설계기준 부록에 의한 균열폭은 허용 균열폭을 만족하지 못할 우려가 있다. 그러나 이 연구에서 보인 EC2를 바탕으로 한 간접균열제어는 균열폭에 대한 직접 계산으로부터 최대철근간격과 최대철근직경을 산정하므로 이러한 문제가 발생하지 않고 일관되게 균열을 검증할 수 있다.

- 5) 이를 통해 간접균열제어와 직접균열검증 사이의 일관성을 확보할 수 있는 다음 두 가지 모델을 제안할 수 있다. 먼저 콘크리트구조설계기준 부록의 균열검증 모델을 사용하여 직접균열검증을 수행하고, 동일한 모델을 통해 최대철근직경 및 최대철근간격을 산정한다. 다음으로 2차식 형태의 EC2 인장증강효과 모델과 Part I의 최대균열간격을 통해 설계 균열폭을 산정하여 직접균열검증을 수행하고 이 모델을 통해 최대철근직경과 최대철근간격을 산정한다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 지원 사업인 성능중심의 콘크리트구조설계기준 개발 과제에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 김우 외, 콘크리트구조설계, 동화기술, 2007, pp. 254~258.
2. 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.
3. Frosch, R. J., "Another Look at Cracking and Crack Control in Reinforced Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 3, 1999, pp. 437~442.
4. European Committee for Standardization, *Eurocode 2-Design of Concrete Structures*, Brussels, 2002, pp. 122~127.
5. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준 해설, 기문당, 2007, pp. 124~125.
6. Fib, *Structural Concrete-Manual textbook Volume 1*, International Federation for Structural Concrete, Switzerland, 1999, pp. 189~205.
7. Fib, *Structural Concrete-Manual Textbook Volume 2*, International Federation for Structural Concrete, Switzerland, 1999, pp. 87~92.
8. 최승원, 김우, "콘크리트 응력-변형률 관계에 기반한 철근콘크리트 부재의 처짐 산정," 대한토목학회논문집, 30권, 4A호, 2010, pp. 383~389.
9. Joshef, E., Karlsruhe, *Concrete Structures Euro-Design Handbook*, Ernst & Sohn, 1994, pp. 187~194.

요 약 철근콘크리트 부재의 균열은 필수불가결한 현상이다. 따라서 효과적으로 균열폭을 측정하기 위한 많은 경험식이 제시되었고, 또한 간편한 적용성 때문에 철근 간격과 직경의 제어를 통한 간접균열제어법이 제시되고 널리 사용되고 있다. EC2에서는 최대균열간격과 평균변형률의 곱으로 설계 균열폭을 산정한다. 이 연구에서는 재료 특성에 따른 최대철근간격과 최대철근직경을 산정하였다. 특히 인장증강효과 모델과 최대균열간격에 따른 영향을 분석하였고, 이를 콘크리트구조설계기준에서 제시한 값과 비교하였다. 해석 결과 인장증강효과 모델에 따라 큰 차이가 발생하였고, 2차식 형태의 인장증강효과 모델과 Part II의 최대균열간격을 사용함으로써 과소평가되었다. 따라서 2차식 형태의 인장증강효과 모델을 사용함으로써 합리적인 간접균열제어가 가능하다. 또한 이를 통해 휨부재의 사용성 검증에 일관성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 이와 함께 균열제어를 위한 두 가지 모델을 제안하였다.

핵심용어 : 철근직경, 철근간격, 간접균열제어, 인장증강효과, 최대균열간격