

단철근 보의 최소철근비에 대한 고찰

최승원
조선이공대학교 토목건설과

A Study of Minimum Reinforcement Ratio of Singly Reinforced Beamy

Seung-Won Choi

Department of Civil and Construction, Chosun College of Science & Technology

요약 철근콘크리트 휨부재 단면은 휨강도를 확보함과 동시에 연성을 확보할 수 있도록 설계되어야 한다. 설계기준에서는 연성거동을 확보하기 위해 철근비나 중립축 깊이를 제한한다. 균형철근비 보다 적은 철근량이 배치된 단면은 연성이 확보되므로 균형철근비는 이론적인 최대철근비가 된다. 그러나 너무 적은 양의 철근량이 배치된 단면은 연성 거동과 관계 없이 균열 휨모멘트를 만족하지 못하고 취성 파괴될 수 있다. 또한, 최근 들어 고강도 재료의 사용이 증가함에 따라 최소철근비로 설계된 부재의 설계도 증가하고 있다. 이에 설계기준에서는 최소철근량에 대해서도 규정하고 있다. 콘크리트구조기준(2012)에서는 최소철근량에 대하여 철근과 콘크리트 강도의 향으로 직접적으로 규정하였다. 그러나 개정된 콘크리트구조 학회기준(2017)에서는 설계 휨강도와 균열 모멘트 사이의 관계를 통해 최소철근량을 간접적으로 제시하고 있다. 이는 피복두께에 대한 영향을 반영할 수 있지만, 재료 모델에 대한 정의가 필요하다. 따라서 이 연구에서는 콘크리트구조기준(2012)과 콘크리트구조 학회기준(2017)의 최소철근량에 대한 규정을 비교 검토하고, 다양한 해석 변수를 통해 최소철근량의 변화를 검토하여 합리적인 최소철근량 검토 방안에 대하여 고찰하였다.

Abstract A cross section in RC flexural members must be designed to satisfy flexural strength and ductility requirements simultaneously. In design provisions, ductile behavior is ensured by a sufficient reinforcement ratio or depth of the neutral axis. If the reinforcement ratio is less than the balanced reinforcement ratio, ductile behavior is secured, and this value is theoretically the maximum reinforcement ratio. But for a cross section with less steel, brittle failure can occur regardless of ductile behavior because of unqualifying a cracking moment. Recently, designs with a minimum steel ratio have been increasing along with the use of high-strength material, so in design provisions, a minimum amount of reinforcement is suggested. In the KCI(2012) standard, a minimum amount of reinforcement was suggested in terms of strength of steel and concrete. But in the revised KCI(2017) standard, a minimum amount of reinforcement was suggested by a relationship between the design flexural strength and cracking moment indirectly. This code can reflect the effect of cover thickness, but a material model must be defined. Therefore, the minimum amount of reinforcement in KCI(2012) and KCI(2017) was examined, and a rational review method was studied by parametric analysis.

Keywords : KCI(2012), KCI(2017), Minimum Amount of Reinforcement, Brittle Failure, Cracking Moment

*Corresponding Author : Seung-Won Choi(Chosun College of Science & Technology)

email: swchoi@cst.ac.kr

Received January 6, 2021

Accepted April 2, 2021

Revised February 3, 2021

Published April 30, 2021

1. 서론

철근콘크리트 구조물 단면은 소요 강도를 확보해야 하고 동시에 연성 거동을 하도록 설계되어야 한다. 이는 구조물의 안전과 재산 피해를 최소화하기 위한 필수적인 조치이다. 이를 위해 설계 기준에서는 철근비와 중립축 깊이를 통해 연성 거동을 유도하고 있는데 이는 궁극적으로 단면의 인장 철근량을 제한하는 것이다. 설계기준은 시대 상황에 맞춰 개정되는데, 2016년 국가 건설 기준 체계가 코드 체계로 전환되면서 기존의 콘크리트구조기준(2012)(Korea Structural Concrete Design Code 2012, 이하 KCI 2012)을 바탕으로 KDS 14(Korea Design Standard)가 제정되었다[1, 2]. 그리고 콘크리트구조 학회기준(2017)(KCI Model Code 2017, 이하 KCI 2017)을 바탕으로 한 KDS 14의 개정 작업이 진행 중에 있다[3]. KCI 2017에서는 KCI 2012와 같이 강도 설계법을 기반으로 재료 모델 및 재료 계수 등 일부 한계 상태설계법에 기반한 내용이 추가되었는데, 두 기준의 차이에 대한 면밀한 검토가 필요하다.

부재의 연성거동을 위하여 KCI 2012에서는 인장철근 강도에 따른 순인장변형률 ϵ_t 를 제한하였다. 즉, 프리스트레스를 가하지 않은 휨부재에서 공칭 강도 하의 순인장변형률이 허용변형률 이상이 되도록 규정하였다. 이때, 허용변형률은 $f_y \leq 400$ MPa인 경우 0.004이고 $f_y > 400$ MPa인 경우에는 $2\epsilon_y$ 이다[1].

KCI 2017의 본문에서는 KCI 2012와 같은 방법을 제시하였고, 부록에서는 연성 파괴보장을 위한 3가지 방법을 제시하였다. 첫째, 최대 허용철근비 ρ_{max} 를 규정하는 방법, 둘째, 기존의 KCI 2012와 동일하게 최소 허용 변형률을 규정하는 방법, 셋째, 다음 식 (1)과 같이 재료 계수를 적용한 최대 허용중립축 깊이 c_{max} 를 규정하여 연성 파괴를 유도하는 방법이다.

$$c_{max} = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \phi_s \epsilon_y} d \tag{1}$$

여기서, ϵ_{cu} 는 콘크리트 극한변형률, ϵ_y 는 철근 항복변형률, ϕ_s 는 철근 재료 계수이며, d 는 유효깊이다.

또한, 최승원 등은 KCI 2017에서 제시하고 있는 재료 모델과 최대 허용변형률에 대한 규정을 결합하여 다음 식 (2)와 같이 최대철근비를 제안하였다[2].

$$\rho_{max} = 0.85\alpha \frac{\phi_c f_{ck}}{\phi_s f_y} \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_t} \tag{2}$$

여기서, α 는 압축 합력의 크기를 나타내는 계수, ϕ_c 는 콘크리트 재료 계수, f_y 는 철근의 설계기준항복강도, f_{ck} 는 콘크리트 설계기준압축강도이다.

이와 같이 KCI 2012와 KCI 2017에서는 철근콘크리트 단면의 연성 거동 확보를 위해 최대철근량에 대한 규정을 철근량에 대한 항 혹은 중립축 깊이 등 직·간접적으로 설정하고 있음을 알 수 있다. 그러나 연성 거동을 위해 너무 적은 양의 철근을 배치할 경우 단면의 휨강도가 균열 모멘트 M_{cr} 에 미치지 못하여 취성 파괴가 유발될 우려가 있다. 이러한 취성 파괴를 방지하기 위하여 설계 기준에서는 압축 철근의 유무와 관계 없이 최소철근량에 대해서도 규정하고 있다. 또한, 최근 재료 및 설계 기술의 발달과 더불어 고강도 철근의 사용이 빈번해지면서 최소철근량은 감소하고 있는 추세이고, 고강도 재료 사용이 일반화되고 있는 상황에서 최소철근비로 설계되는 부재가 증가할 가능성이 있다[4, 5]. 이에 단면의 최소철근량에 대한 합리적인 해석 방법과 산정 방법의 정립은 필수적이라고 할 수 있다.

최소철근량의 산정에 있어 KCI 2012에서는 단순히 재료 강도를 통해 직접적으로 산정하므로 계산이 간단하다는 장점이 있지만, 단면의 크기 등에 대한 영향 등을 반영하지 못한다는 단점이 있다. 이에 반해, KCI 2017에서는 설계 휨강도와 균열 모멘트와의 관계를 통해 간접적으로 최소 철근량을 산정하고 있다. 즉, 휨부재 내에 최소철근량 이상을 배치함으로써 균열 모멘트에 저항하도록 한다[6]. 이러한 접근은 직접적으로 철근량을 산정하지 않으므로 계산상 복잡함이 있으나, 재료 강도 및 단면 등의 영향을 효과적으로 반영할 수 있다. 이러한 방법을 통해 최소철근량을 산정할 경우 우선 설계 휨강도 산정에 적용되는 재료모델에 대한 합리적인 고려가 필요하다. KCI 2012에서는 등가직사각형 응력분포가 제시되었던데 반해, KCI 2017에서는 포물선-사각형 응력-변형률 곡선(이하 p-r곡선)이 추가적으로 제시되었다. 또한, 동일한 등가직사각형 응력분포에서도 압축력의 계산 방법이 상이하므로 이에 대한 고려가 필요하다.

따라서 이 연구에서는 철근콘크리트 휨부재의 취성 파괴 방지 및 연성 거동과 관련된 최소철근량에 대한 규정에 대하여 기존의 KCI 2012에서 제시하고 있는 최소철근량에 대한 규정과 개정된 KCI 2017의 최소철근량에

대한 규정을 비교 고찰하였다. KCI 2017에서는 KCI 2012와 달리 콘크리트 및 철근의 재료 모델을 제시하고 있고 특히, 콘크리트 압축 모델로 두 가지 모델을 제시하고 있다. 이에 KCI 2017에 따라 p-r곡선과 등가직사각형 응력분포를 사용했을 때의 최소철근량의 차이를 살펴 보았다. 또한, 철근과 콘크리트 강도 및 단면의 유효깊이와 전체 깊이(h) 비율(h/d)에 따른 변화를 분석하였다.

2. 각 설계기준의 휨부재 최소 철근량

2.1 콘크리트구조기준(2012, KCI 2012)

KCI 2012에서는 해석에 의해 인장철근 보강이 요구되는 단면에 다음 식 (3)과 식 (4)에 의해 계산된 철근량 중 큰 값 이상으로 최소철근량 $A_{s,min}$ 을 규정하였다. KCI 2012에서는 재료 강도의 향으로 직접적으로 최소철근량을 제시하였고, 이를 $b_w d$ 로 나눈 값이 최소철근비이다. 식 (3)~(4)에서 볼 수 있듯이 최소철근비의 결정에 있어서 콘크리트 피복두께 등 단면의 크기 및 형태에 대한 고려가 필요 없음을 알 수 있다. 여기서, b_w 는 단면폭이다.

$$A_{s,min} = \frac{0.25 \sqrt{f_{ck}}}{f_y} b_w d \quad (3)$$

$$A_{s,min} = \frac{1.4}{f_y} b_w d \quad (4)$$

2.2 콘크리트구조 학회기준(2017, KCI 2017)

재료강도를 통해 직접적으로 최소철근량을 규정한 KCI 2012와는 달리 KCI 2017에서는 해석에 의해 인장철근 보강이 필요한 단면에 식 (5)와 같이 설계 휨강도 $\phi M_n (= M_d)$ 와 균열 모멘트 M_{cr} 의 관계를 통해 즉, 설계 휨강도가 균열 모멘트의 1.2 배 이상이 되도록 최소철근량을 간접적으로 규정하였다.

$$\phi M_n \geq 1.2 M_{cr} \quad (5)$$

따라서 KCI 2017에 따라 최소철근량 및 최소철근비를 산정하기 위해서는 적절한 재료 모델을 통해 설계 휨강도를 산정할 수 있어야 한다. KCI 2017에서는 설계 휨강도를 산정하기 위한 재료 모델로서 기존의 등가직사

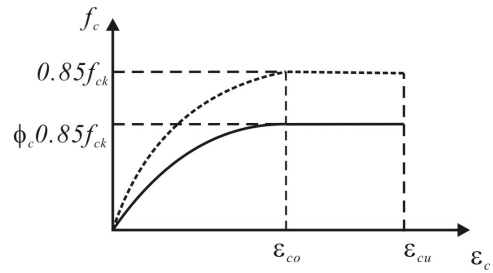


Fig. 1. Concrete compressive stress-strain model

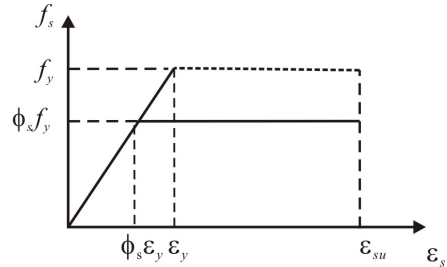


Fig. 2. Reinforcement stress-strain model

각형 응력분포 뿐만 아니라 Fig. 1에서와 같은 p-r곡선을 제시하고 있다. 또한, 철근의 재료 모델은 Fig. 2와 같은 탄-소성 관계를 제시하고 있다.

Fig. 3은 단면에 작용하는 압축응력 분포와 힘의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 3(c)의 p-r곡선을 사용할 경우 콘크리트 설계 강도 $f_d = 0.85 \phi_c f_{ck}$ 이고, 철근의 설계 강도는 $\phi_s f_y$ 이며, 이로부터 압축 합력 C 와 인장력 T 는 각각 식 (6)과 식 (7)과 같이 산정한다. 그리고 이 두 힘의 우력 모멘트는 설계 휨강도(식 (8))가 된다.

$$C = \alpha (0.85 \phi_c) f_{ck} b c \quad (6)$$

$$T = \phi_s A_s f_y \quad (7)$$

$$M_d = C(d - \beta c) = T(d - \beta c) \quad (8)$$

여기서, α 는 압축합력의 크기를 나타내는 계수, β 는 콘크리트 압축합력 작용점 위치를 나타내는 계수이며, A_s 는 인장철근의 단면적이다.

KCI 2017에서는 이상의 p-r곡선 뿐만 아니라 기존의 등가직사각형 응력분포를 동시에 사용하고 있다. 그러나 KCI 2012 등가직사각형 응력분포에서와는 다르게 콘크리트 압축력을 산정한다. 즉, Fig. 3(d)와 (e)에서와 같이 두 설계기준에서는 동일한 등가직사각형 응력분포를 이용하지만, KCI 2017에서 압축응력 크기는 계수 η 를 사용하여 $\eta(0.85 f_{ck})$ 로 구한다. 이에 반해, KCI 2012에서

Table 1. Variables for equivalent rectangular stress block in KCI 2017

f_{ck} [MPa]	≤ 40	50	60	70	80	90
η	1.00	0.97	0.95	0.91	0.87	0.84
β_1	0.80	0.80	0.76	0.74	0.72	0.70

는 단순히 $0.85f_{ck}$ 를 통해 압축 응력의 크기를 구하였다. 또한, 등가직사각형 응력분포의 깊이 a 는 중립축 깊이 c 에 계수 β_1 을 곱하여 계산한다는 점에서는 동일하다. 그러나 KCI 2017에서 계수 β_1 은 Table 1에서 나타난 값을 사용하는데 반해, KCI 2012에서는 $f_{ck} \leq 28$ MPa인 경우 $\beta_1 = 0.85$ 이고, 이후 f_{ck} 가 증가함에 따라 식 (9)의 관계를 갖는다.

$$\beta_1 = 0.85 - 0.007(f_{ck} - 28) \geq 0.65 \quad (9)$$

KCI 2017에서 압축 합력은 식 (10)과 같이 계산되고, 철근 인장력은 식 (11)과 같이 계산된다. 이 두 힘의 우력 모멘트는 공칭 휨강도 M_n 이 되고 이 값에 강도감소계수 ϕ 를 곱함으로써 설계 휨강도를 산정할 수 있다. 이상과 같이 KCI 2012와 KCI 2017에서는 동일하게 등가직사각형 응력분포를 사용하지만, 압축응력 크기 및 깊이를 나타내는 계수가 다르다.

$$C = \eta(0.85f_{ck})ab \quad (10)$$

$$T = A_s f_y \quad (11)$$

$$\phi M_n = \phi C(d - a/2) = \phi T(d - a/2) \quad (12)$$

한편, p-r 곡선을 사용한 경우 설계 휨강도는 재료 계수(ϕ_c, ϕ_s)를 적용한 재료의 설계 강도를 사용하여 계산

하지만, 등가직사각형 응력분포를 사용한 설계 휨강도는 공칭 휨강도를 구하고 이후 강도감소계수 ϕ 를 곱하여 설계 휨강도를 구한다. 즉, p-r곡선을 사용할 경우 재료 차원의 강도감소계수를 적용하고 있는데 반해, 등가직사각형 응력분포를 이용할 경우 재료가 아닌 부재의 안전율을 고려한 감소계수를 적용하고 있다는 점에서 큰 차이가 있다.

균열 모멘트는 인장 연단의 인장응력이 콘크리트 파괴 계수에 도달했을 때의 모멘트로 정의되고 다음 식 (13)과 같이 산정할 수 있다.

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \quad (13)$$

여기서, f_r 은 콘크리트 파괴계수로써 $0.63\sqrt{f_{ck}}$ 이고, y_t 는 중립축에서 인장연단까지의 거리이며 I_g 는 철근을 무시한 콘크리트 전체 단면의 중심축에 대한 단면2차모멘트이다.

이상에서 구한 p-r곡선과 등가직사각형 응력분포를 통해 구한 설계 휨강도와 균열 모멘트의 관계가 $M_d = 1.2M_{cr}$ 인 철근량이 최소철근량이고, 이 값을 단면의 면적 $b_w d$ 으로 나눈 값이 최소철근비가 된다.

3. 직사각형 단면을 갖는 힘부재의 최소철근비

3.1 해석 변수

KCI 2012 및 KCI 2017에 의한 최소철근비에 대한 비교를 위하여 설정한 해석 변수를 Table 2에 나타내었

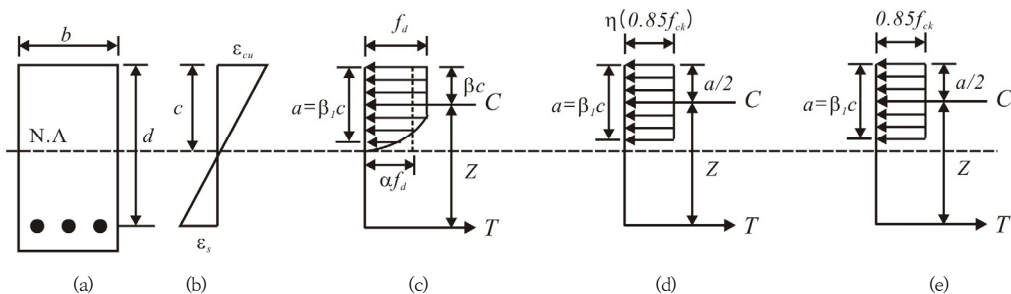


Fig. 3. Distribution of stress and strain

- (a) Cross section (b) Strain distribution (c) Stress in KCI 2017(p-r curve) (d) Stress in KCI 2017(equivalent rectangular)
- (e) Stress in KCI 2012

다. 콘크리트 설계기준 압축강도 f_{ck} , 철근 설계기준 항복강도 f_y 및 단면 유효깊이와 전체깊이 비율 h/d 에 따른 최소 철근비의 변화, 그리고 콘크리트 재료 모델에 따른 변화를 살펴보았다. 이 때 해석 단면은 직사각형 단면으로 가정하였다.

Table 2. Analysis variables

f_{ck} [MPa]	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90
f_y [MPa]	300, 400, 500, 600
h/d	1.1, 1.2, 1.3

3.2 최소철근비 해석 결과

Fig. 4에서는 콘크리트 설계기준 압축강도에 따른 최소 철근비의 변화를 나타내었다. 이 때, $f_y = 300$ MPa이고, $h/d = 1.1$ 이다. 압축강도가 증가함에 따라 최소철근비는 증가하는 경향을 나타냈으나, KCI 2012의 최소철근비는 $f_{ck} \leq 30$ MPa인 경우 압축강도에 관계 없이 동일하였다. 이는 KCI 2012에서는 식 (3)과 식 (4) 중 큰 값이 최소철근량이 되는데, $f_{ck} \leq 30$ MPa인 경우에는 철근 강도에 관계없이 f_{ck} 가 포함된 식 (3)이 식 (4) 보다 작게 나타나기 때문이고, 이는 식 (3) 자체가 $f_{ck} \geq 30$ MPa에 적용할 수 있는 식으로 제안되었기 때문이다[7].

KCI 2017의 재료 모델에 따른 최소철근비를 살펴보면 p-r곡선을 사용한 최소철근비는 등가직사각형 응력분포를 사용한 최소철근비의 약 95 % 수준으로 평가되었다. p-r곡선을 사용한 최소철근량은 등가직사각형 응력분포에 비해 최소철근량을 작게 산정하므로 휨부재의 취

성 파괴 가능성은 더 큰 것으로 판단된다. 다른 조건은 동일하고 철근의 항복강도만 증가한 경우 즉, $f_y = 600$ MPa인 경우 최소철근비는 재료 모델과 설계 기준에 관계 없이 Fig. 4에서 보인 경향과 동일하게 나타났다.

Fig. 5는 철근 설계기준 항복강도에 따른 최소철근비의 변화를 나타낸 것이다. 이 때, $f_{ck} = 30$ MPa이고, $h/d = 1.1$ 이다. 항복강도가 증가함에 따라 최소철근비는 감소하였다. KCI 2012의 최소철근비는 KCI 2017의 등가직사각형 응력분포를 사용한 값에 비해 약 40 %, p-r곡선을 사용한 값에 비해 약 47 % 크게 평가되었다. 두 재료 모델에 따른 최소철근비는 p-r곡선을 사용한 경우의 값이 등가직사각형 응력분포를 사용한 값의 약 95 % 수준으로 평가되었다. 즉, 항복강도에 따른 해석 결과에서도 KCI 2012에 의한 최소철근비가 KCI 2017에 의한 값 보다 크게 산정되어 소요 휨강도 확보 측면에서 보수적임을 알 수 있다.

Fig. 6은 단면의 높이 비율(h/d) 즉, 피복두께 비율에 따른 최소철근비의 해석 결과이다. 이 때, $f_{ck} = 30$ MPa이고, $f_y = 300$ MPa이다. 식 (3) 및 식 (4)를 이용하는 KCI 2012에 의한 최소철근비는 피복두께의 변화를 반영하지 못한다. 이에 반해, KCI 2017에서는 설계 휨강도와 균열 모멘트 사이의 관계를 통해 최소철근비를 산정하므로 피복두께를 반영할 수 있다. 피복두께가 증가함에 따라 최소철근비는 증가하였다. 전반적으로 KCI 2012에 의한 최소철근비는 KCI 2017에 의한 최소철근비에 비해 약 17~47 % 크게 산정되었으나, $h/d \geq 1.3$ 인 경우에는 차이가 거의 발생하지 않았다. 사용된 재료 모델에 따른 결과를 살펴보면 p-r곡선을 사용한 최소철근비

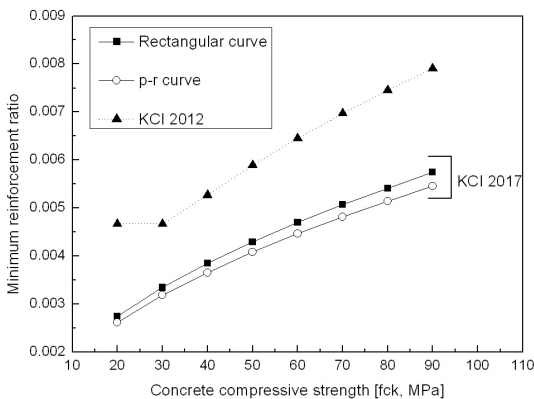


Fig. 4. Minimum reinforcement ratio to concrete strength

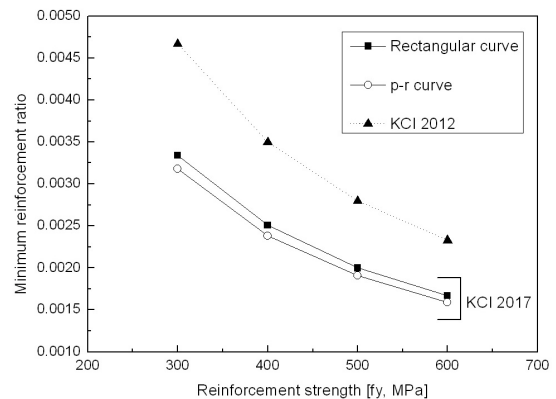


Fig. 5. Minimum reinforcement ratio to reinforcement strength

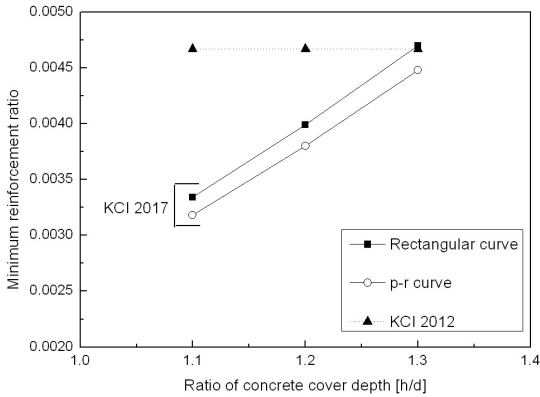


Fig. 6. Minimum reinforcement ratio to h/d

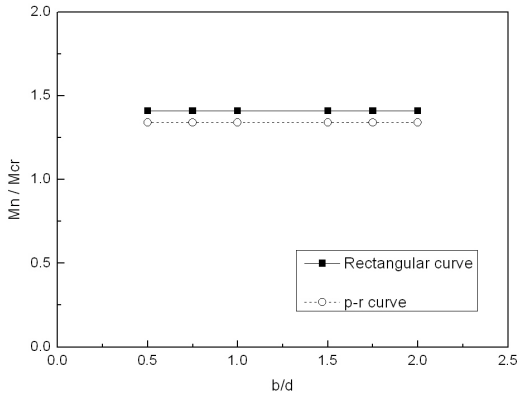


Fig. 7. Relationship between M_n/M_{cr} and b/d

는 피복두께 비율에 관계 없이 증가직사각형 응력분포를 사용한 값 보다 작게 평가되었다.

이상에서 살펴본 바와 같이 KCI 2012에 의한 최소철근비는 KCI 2017에 의한 최소철근비 보다 크게 산정되어 휨강도 확보에 보수적인 결과를 나타내었다. 즉, 최소철근비는 p-r곡선, 증가직사각형 응력분포 그리고 KCI 2012에 의한 값 순으로 크게 산정되어 취성 파괴 방지라는 측면에서 KCI 2012가 가장 보수적이었다. 그러나 두 재료 모델의 차이에 따른 최소철근비의 차이는 약 5% 수준으로 유사하였다.

3.3 최소철근비를 갖는 단면의 설계 휨강도와 균열 모멘트

KCI 2017의 최소철근비는 설계 휨강도가 균열 모멘트의 1.2배가 되는 값이다. Fig. 7은 앞 절에서 구한 최소철근량을 통한 공칭 휨강도와 균열 모멘트의 비율을 산정한 결과이다. 증가직사각형 응력분포를 사용한 경우 공칭 휨강도는 변수에 관계 없이 균열 모멘트의 1.41배로 나타났으나, p-r곡선을 사용한 경우는 1.34배로 나타났다. 이는 최소철근량 산정시 증가직사각형 응력분포를 사용할 경우에는 강도감소계수를 사용하는데 반해, p-r곡선을 사용할 때에는 재료 계수를 사용하기 때문이고, 재료 계수를 적용한 최소철근비는 강도감소계수를 적용한 경우에 비해 취성 파괴의 관점에서 취약할 수 있는 것으로 판단된다.

KCI 2012의 최소철근비를 갖는 휨단면을 가정할 경우 증가직사각형 응력분포를 통한 설계 휨강도는 균열 모멘트의 약 1.63~2.01배 수준이고, 동일한 철근량이 배치된 휨단면을 p-r곡선을 통해 산정한 설계 휨강도는

균열 모멘트의 약 1.21~1.48배로 나타났다. 이 결과를 통해 앞 절의 해석 결과와 마찬가지로 KCI 2012의 최소철근비는 KCI 2017의 최소철근비에 비하여 휨강도 측면에서 보수적임을 알 수 있다. 또한, 두 가지 재료 모델 중 최소철근량을 작게 평가하는 p-r곡선을 이용한 최소철근량이 배치된 휨단면에서 증가직사각형 응력분포를 통해 설계 휨강도를 산정할 경우 설계 휨강도는 균열 모멘트의 1.14배로 나타났다. 현행 규정에서는 설계 휨강도가 균열 모멘트의 1.2배가 되도록 최소철근비를 규정하고 있다. 그러나 p-r곡선을 통해 최소철근량을 산정하고 이 철근량을 배치한 단면에 증가직사각형 응력분포를 적용한 설계 휨강도를 산정할 경우 설계 기준의 $\phi M_n \geq 1.2M_{cr}$ 의 관계를 만족시킬 수 없는 것으로 나타났다. 이에 반해, 증가직사각형 응력분포를 이용하여 최소철근량을 계산하고, 이 철근량이 배치된 단면에 대하여 p-r 곡선을 이용하여 설계 휨강도를 구하면 $M_d = 1.2M_{cr}$ 가 되어 설계 기준에서 제시하는 최소철근량의 규정을 만족함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 최소철근량을 배치한 휨단면을 설계할 경우 p-r곡선과 증가직사각형 응력분포를 동시에 사용할 경우 규정에 위배될 수 있으므로 재료 모델의 교차 사용시에 주의가 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

이 연구에서는 KCI 2012과 KCI 2017에서 제시하고 있는 최소철근비의 차이에 대하여 살펴보았다. 특히, KCI 2017에서는 두 가지 재료 모델을 제시하고 있으며

로 재료 모델에 따른 최소 철근비를 분석하였다. 이 연구의 해석 결과를 토대로 한 연구 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) KCI 2012에서는 피복 두께 등에 대한 고려 없이 단순히 재료 강도에 따라 최소철근비를 산정하여 계산이 간편하였다. 그러나 KCI 2017에서는 설계 휨강도와 균열 모멘트 사이의 관계를 통해 최소 철근비를 산정하므로 재료 강도 뿐만 아니라 단면 형상 및 크기 등을 고려할 수 있는 합리성을 갖으나, 계산이 다소 복잡하다.
- 2) 최소철근비는 p-r곡선, 등가직사각형 응력분포 그리고 KCI 2012 순으로 작게 산정되어 KCI 2012가 가장 보수적인 것으로 나타났다.
- 3) 콘크리트 압축강도 및 피복두께 비율이 증가함에 따라 최소철근비는 증가하였고, 철근 항복강도가 증가함에 따라 최소철근비는 감소하였다.
- 4) p-r곡선을 사용한 최소철근비는 등가직사각형 응력분포를 사용한 값의 약 95 % 수준으로 나타났다.
- 5) 등가직사각형 응력분포를 사용한 최소철근비의 공칭 휨강도는 균열 모멘트의 1.41배이지만, p-r곡선을 사용한 경우에는 1.34배로 등가직사각형 응력분포를 이용한 설계시 보수적인 설계가 가능한 것으로 판단된다.
- 6) p-r곡선을 통해 계산된 최소철근비가 배치된 횡단면을 등가직사각형 응력분포를 적용하여 산정한 설계 휨강도는 균열 모멘트의 1.14배이다. 그러나 반대의 경우에는 $M_d = 1.2M_{cr}$ 이다. KCI 2017에서는 $M_d \geq 1.2M_{cr}$ 이 되도록 최소 철근량을 규정하고 있으므로 두 재료 모델의 교차 사용시에 주의가 요구된다.

References

- [1] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, "Korea Structural Concrete Design Code", p.342, KCI, 2012, pp.96-110.
- [2] S. W. Choi, M. H. Lee, G. Y. Lee, "Maximum Steel Ratio of Reinforced Concrete Flexural Members Using Material Factor", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 32, No. 2, pp.127-136, April, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2020.32.2.127>
- [3] Korea Concrete Institute, "KCI Model Code", p.637,

Kimoondang, 2017, pp.128-158.

- [4] S. J. Park, T. S. Kang, D. Y. Moon, "A Study on the Flexural Reinforcement for Prevention of Brittle Failure Specified in KCI and EN Codes", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 26, No. 2, pp.211-218, April, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2014.26.2.211>
- [5] C. S. Kim and H. G. Park, "Longitudinal Reinforcement Ratio for Performance-based Design of Reinforced Concrete Columns", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 2, pp.187-197, April, 2010. DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2010.22.2.187>
- [6] W. Kim, "Limit State Design of Concrete Structures", p.692, Dongwha publication, 2015, pp.265-266.
- [7] M. Y. Kim, J. Y. Cho, H. J. Lee, "Minimum Reinforcement Specifications for Flexural Reinforced Concrete Members", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 30, No. 2, pp.179-187, April, 2018. DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2018.30.2.179>

최 승 원(Seung-Won Choi)

[정회원]



- 2003년 2월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부 (공학석사)
- 2008년 8월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부 (공학박사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 조선이공대학교 토목건설과 부교수

<관심분야>

콘크리트 구조 및 재료