

# 재료모델과 인장증강효과를 반영한 유효단면2차모멘트에 대한 고찰

최승원

조선이공대학교 토목건설과

## A Study on the Effective Moment of Inertia Reflecting Material Model and Tension Stiffening Effect

Seung-Won Choi

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

**요약** 처짐량은 철근콘크리트 휨부재의 사용성 검토에 필수적으로 고려되는 인자이다. 강도설계법에 기반한 설계기준에서 휨부재 처짐은 유효단면2차모멘트를 이용한 탄성공식을 통해 구한다. 이에 콘크리트구조 학회기준과 국가건설기준에서는 기존의 강도설계법에 따라 실험과 경험을 바탕으로 한 Branson의 제안식을 통해 유효단면2차모멘트를 구하고 있다. 그러나 Branson의 제안식은 특정 하중 하에서 도출된 결과물이라는 점에서 일반적으로 적용 가능한 유효단면2차모멘트 산정 방법이 필요하다. 이 설계기준에서는 재료 모델과 인장증강효과 모델에 대해서도 제시하고 있으므로, 이를 바탕으로 유효단면2차모멘트를 해석적으로 산정할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 휨곡률과 평균유효곡률 개념을 이용한 해석적 방법을 통해 유효단면2차모멘트를 산정하고 이를 Branson의 값과 비교하여 합리적인 유효단면2차모멘트 산정 방법에 대하여 고찰하였다. 해석 결과 1차식 형태의 인장증강효과를 사용한 유효단면2차모멘트는 현재 설계기준 값과 큰 차이를 보였고, 평균유효곡률 개념을 통한 유효단면2차모멘트는 현재 설계기준 값과 유사하였다. 그러나 하중 상태 계수 사용에 따라 처짐량에 차이가 발생했고, 이에 따라 적절한 하중 상태 계수 적용에 대한 검토가 필요할 것으로 판단되었다.

**Abstract** The amount of deflection is an essential factor to consider in reviewing the serviceability of RC flexural members. In the design criterion based on the Ultimate Strength Design, the elastic equation using an effective moment of inertia was used to calculate the deflection in flexural members. Accordingly, in the KCI 2017 and the KDS 14, an effective moment of inertia was obtained through the formula proposed by Branson based on experiments and experiences in accordance with the existing strength design method. On the other hand, given that Branson's proposed formula is the result obtained under a specific load, a method is needed to calculate the effective area moment of inertia that can be applied generally. In these design criteria, the material model and tension stiffening effect are presented, and an effective moment of inertia can be calculated analytically. Therefore, in this study, an effective moment of inertia was calculated through an analytical method using the concepts of curvature and effective curvature, and compared with Branson's value, a reasonable method for calculating the effective moment of inertia was discussed. As a result of the analysis, the effective moment of inertia showed a large difference from the current design standard value when using the 1st order form of tension stiffening effect, and the effective moment of inertia through the concept of effective curvature was similar to the current design standard value. By contrast, the load factor showed a difference in the amount of deflection. Hence, the application of the appropriate load factor needs to be reviewed.

**Keywords** : KCI 2017, KDS 14, Effective Moment of Inertia, Material Model, Tension Stiffening Effect

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

email: swchoi@cst.ac.kr

Received June 1, 2023

Accepted August 10, 2023

Revised July 7, 2023

Published August 31, 2023

## 1. 서론

철근콘크리트 구조물 설계를 위한 설계법은 지속적으로 변화 및 발전하고 있다. 과거 허용응력설계법에서 시작하여 강도설계법을 거쳐 현재 한계상태설계법까지, 구조물 설계를 위한 합리적 설계법이 제시되고 있는데 이러한 설계법의 가장 큰 차이 중 하나는 재료모델에 대한 정의라고 볼 수 있다. 우리나라에서는 강도설계법에 기반한 콘크리트구조기준(Korea Structural Concrete Design Code 2012, 이하 KCI 2012)[1]이 사용되다가 이후 강도설계법을 기반으로 하되 재료모델을 추가한 콘크리트구조 학회기준(2017)(KCI Model Code 2017, 이하 KCI 2017)[2]을 거쳐 현재는 국가건설기준(Korea Design Standard 2018, 이하 KDS 14)[3]으로 통합되어 사용되고 있다. KDS 14는 기본적으로 강도설계법에 기반한 설계법이지만, 부분적으로 한계상태설계법에서 사용하는 재료모델 등이 적용되었다. 뿐만 아니라 도로교설계기준(Korea Highway Bridge Design Code 2016, 이하 KHBDC)[4]은 2016년 개정과 함께 한계상태설계법으로 완전한 변환을 이루었다. 따라서 우리나라 철근콘크리트 구조물 설계를 위한 설계기준은 강도설계법과 한계상태설계법 사이의 전환기적인 단계에 있음을 알 수 있다.

철근콘크리트 구조물의 단면 강도는 반드시 외부하중에 대해 충분한 안전율을 확보해야 한다. 이에 더하여 충분한 연성 거동을 확보해야 하는데, 연성 거동 평가를 위해서는 처짐에 대한 검토가 필요하다. 동시에 처짐은 철근콘크리트 휨부재의 사용성 검토에 필수적인 인자이다. KCI 2017과 KDS 14에서는 부재의 강성도를 엄밀한 해석 방법으로 구하지 않는 한, 부재의 순간처짐은 콘크리트 탄성계수  $E_c$ 와 Eq. (1)과 같은 유효단면2차모멘트  $I_e$ 를 이용한 탄성공식을 통하여 구한다[2,3].

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

Where,  $M_{cr}$  : cracking moment,  $M$  : applied moment,  $I_g$  : moment of inertia of the gross cross-section,  $I_{cr}$  : moment of inertia of the cracked transformed section

상기 식은 근본적으로 1970년대 Branson이 54개 보 실험을 바탕으로 제안한 실험식으로 균열모멘트와 휨모멘트의 비율  $M/M_{cr}$ 이 2.2~4.0 사이인 경우에 대하여

유도된 식이다[5,6]. 그리고 Bischoff는  $I_g/I_{cr} = 2.2$ 인 범위 즉, 약 1.5 % 범위의 철근비를 갖는 단면에 대한 새로운 유효단면2차모멘트를 Eq. (2)와 같이 제시하였다[7].

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{I_{cr}}{I_g}\right)\right]} < I_g \quad (2)$$

이와 같이 강도설계법에서는 탄성거동을 통해 처짐을 산정할 경우 휨곡률 산정에 필요한 유효단면2차모멘트를 제시하고 있으나, 한계상태설계법에 기반한 KHBDC에서는 평균유효곡률  $(1/r)_e$ 을 이용하여 처짐을 산정하고 있다. 그리고 평균유효곡률 산정에 균열면 사이 콘크리트의 인장력 분담 효과에 의한 인장증강효과를 반영하고 있다. KCI 2017과 KDS 14에서는 KHBDC에서와 동일한 형태의 재료모델과 인장증강효과 모델을 제시하고 있는데, 이는 KCI 2017과 KDS 14에서도 유효단면2차모멘트를 해석적으로 산정할 수 있음을 보여준다.

최근 재료 기술의 발전과 더불어 철근비가 작은 부재의 설계 및 시공이 많아지고 있다. 이때, 건물의 슬래브와 같이 철근비가 작은 부재에서는 설계기준의 처짐 산정 방식에 따라 처짐량의 차이가 크게 발생할 수 있다[8]. 또한, 현재 설계기준에서 사용된 Branson 및 Bischoff 제안식 역시 특정 휨모멘트 비율에서 유도된 식이므로 그 범위를 넘어설 경우 산정값의 적합성에 대한 검증이 필요할 수 있다.

따라서 이 연구에서는 휨부재의 처짐 산정에 사용되는 유효단면2차모멘트에 대하여 설계기준에서 제시하는 내용을 검토하고, 이를 바탕으로 재료모델과 인장증강효과를 반영한 유효단면2차모멘트를 산정하여 그 차이를 현행 기준에 의한 값과 분석함으로써 해석의 일관성과 합리성을 확보한 유효단면2차모멘트 산정 방법에 대하여 고찰하였다.

## 2. 유효단면2차모멘트의 해석적 도출

KCI 2017과 KDS 14에서는 Eq. (1)과 같은 유효단면2차모멘트를 제시하고 있다. 그러나 이 식을 사용하여 처짐을 산정할 경우 낮은 철근비에서 처짐을 작게 산정할 수 있다[8]. 유효단면2차모멘트는 적절한 재료모델이 제시될 경우 휨곡률에 대한 해석적 검토를 통해 역산할 수 있는데, KCI 2017과 KDS 14에서는 등가직사각형

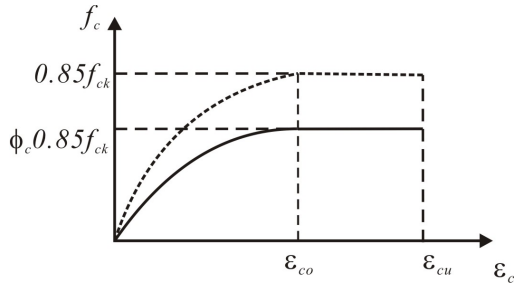


Fig. 1. Concrete compressive stress-strain model

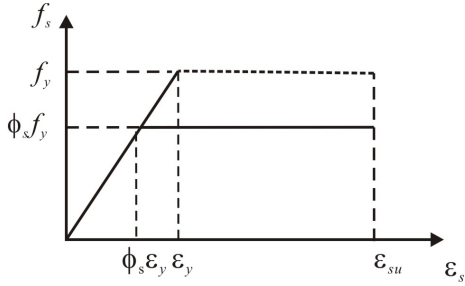


Fig. 2. Reinforcement stress-strain model

응력분포 뿐만 아니라 콘크리트의 포물선-직선 압축응력-변형률 관계(Fig. 1)(이하, p-r 곡선)와 철근의 탄소성 응력-변형률 관계(Fig. 2)를 제시하고 있다. 등가직사각형 응력분포는 압축합력의 크기 및 작용점의 위치를 파악하기 쉬우나 근본적으로 극한시의 응력상태를 나타내기 때문에 사용하중 단계에서의 단면 해석 즉, 처짐이나 균열 검토 등에 사용될 수 없다. 이에 반해, p-r 곡선은 전체 하중하에서의 응력분포를 나타내므로 극한상태 뿐만 아니라 사용하중 단계에서의 단면 해석이 일관적으로 가능하다. 이에 이 연구에서는 p-r 곡선을 사용한 단면 해석을 통해 유효단면2차 모멘트를 산정하였다. 즉, p-r 곡선과 인장증강효과를 반영하여 Eq. (3)과 같이 휨곡률  $1/r$ 을 산정할 수 있고(Fig. 3), 이로부터 휨곡률과 작용 휨모멘트  $M$ 은  $1/r = M/EI$ 의 관계를 갖으므로 Eq. (4)와 같이 유효단면2차모멘트를 유도할 수 있다.

$$\left(\frac{1}{r}\right) = \frac{\epsilon_c + \epsilon_{sm}}{d} \quad (3)$$

$$I_e = \frac{M}{E_c(1/r)_e} \quad (4)$$

Where,  $\epsilon_c$  : compressive strain in extreme fiber,  $\epsilon_{sm}$  : average steel strain considering tension stiffening effect,  $d$  : effective depth

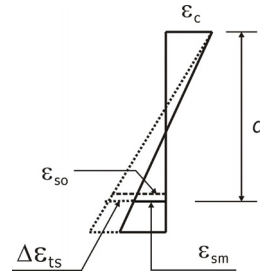


Fig. 3. Correction of strain distribution for the effect of tension stiffening

철근의 평균변형률  $\epsilon_{sm}$ 은 CEB-FIP Model Code 1990[9](이하 MC90)에서는 Eq. (5)를 통해 산정하고, 유로코드 2 (Eurocode 2, 이하 EC2)[10]에서는 Eq. (6)과 같이 산정한다. 그리고 KCI 2017의 부록, KDS 14 및 KHBDC에서는 MC90과 동일한 Eq. (5)의 인장증강효과를 통해 균열폭을 산정한다. 그러나 KHBDC에서 처짐을 산정할 때는 Eq. (6)의 분배계수를 적용하고 있다. 또한, KCI 2017과 KDS 14에서는 계수  $\beta_t$ 를 하중상태에 따른 변수가 아닌 장기 및 반복하중인 경우의 0.4로 고정값을 사용하고 있다.

$$\epsilon_{sm} = \frac{f_{so}}{E_s} \left(1 - \beta_t \frac{f_{cte}}{f_{so}\rho_e}\right) \quad (5)$$

$$\epsilon_{sm} = \frac{f_{so}}{E_s} \left(1 - \beta \left(\frac{f_{scr}}{f_{so}}\right)^2\right) \quad (6)$$

Where,  $E_s$  : steel modulus of elasticity,  $f_{so}$  : steel stress,  $f_{cte}$  : concrete effective tensile stress,  $\rho_e$  : effective steel ratio,  $\beta_t$  : integration factor for the strain distribution(0.6 for short-term loading and 0.4 for long-term loading),  $f_{scr}$  : steel stress at cracking,  $\beta$  : coefficient which takes account of the duration of the loading(1.0 for single, short-term loading)

이러한 모델을 적용하여 KCI 2017과 KDS 14에서는 휨곡률의 개념으로 유효단면2차모멘트를 산정하고 있다. 이 연구에서는 앞서 설명한 KCI 2017과 KDS 14의 재료모델과 인장증강효과를 이용하여 계산된 값 중, Eq. (5)의 1차식 형태의 인장증강효과를 반영한 값(이하 KDS 1st), Eq. (6)의 2차식 형태의 인장증강효과를 반영한 값(이하 KDS 2nd)을 산정하여 비교하였다. 또한, KHBDC에서는 Eq. (7)과 같이 평균유효휨곡률을 산정한

다. 이때,  $(1/r)_{crack}$ 과  $(1/r)_{uncrack}$ 은 각각 균열 및 비균열 단면에서의 휨곡률이고,  $\zeta$ 는 분배계수로서 앞서 설명한 인장증강효과 식의 괄호 안의 값으로 표현되며 각각 Eq. (8)과 Eq. (9)와 같다.

$$\left(\frac{1}{r}\right)_e = \zeta \left(\frac{1}{r}\right)_{crack} + (1-\zeta) \left(\frac{1}{r}\right)_{uncrack} \quad (7)$$

$$\zeta = 1 - 0.4 \frac{f_{ctc}}{f_{so}\rho_e} \quad (8)$$

$$\zeta = 1 - \beta \left(\frac{f_{sr}}{f_{so}}\right)^2 \quad (9)$$

KHBDC의 평균유효곡률 개념을 적용하여 Eq. (7)을 Eq. (10)과 같은 유효 휨강성으로 표현할 수 있고, 이를 Eq. (11)과 같은 유효단면2차모멘트의 항으로 나타낼 수 있다. 이 연구에서는 Eq. (8)의 분배계수를 Eq. (11)에 대입하여 산정된 유효단면2차모멘트(이하 KHBDC 1st)와 Eq. (9)의 분배계수를 Eq. (11)에 대입하여 산정된 값(이하 KHBDC 2nd)을 비교 분석하였다.

$$\left(\frac{1}{r}\right)_e = \left(\frac{M}{EI_e}\right) = \zeta \left(\frac{M}{EI_{cr}}\right) + (1-\zeta) \left(\frac{M}{EI_y}\right) \quad (10)$$

$$I_e = \frac{I_{cr}}{\zeta + (1-\zeta)I_{cr}/I_y} \quad (11)$$

### 3. 직사각형 단면을 갖는 휨부재의 유효단면2차모멘트

#### 3.1 해석 변수

Branson의 유효단면2차모멘트 값과 앞 절의 해석적 절차에 의한 값을 비교하기 위하여 Table 1에서와 같은 해석 변수를 설정하였다. 해석을 위한 단면은 250 mm × 550 mm 인 직사각형 단면이고, 피복두께는 50 mm 이다. 콘크리트 설계기준 압축강도  $f_{ck}$ , 철근 설계기준 항복강도  $f_y$  및 철근비  $\rho$ 에 따른 유효단면2차모멘트의 변화를 살펴보았다. 철근비는 최소 철근비와 최대 철근비 사이의 값으로 KDS 14에 따라 산정하였다.  $f_y = 400$  MPa 일 때, 최소 철근비는 약 (0.2~0.5) %, 최대 철근비는 약 (1.5~5.5) % 이므로, 이 연구에서는 0.5 %, 1.0 % 및 2.0 %의 철근비를 변수로 선정하였다.

Table 1. Analysis variables

$f_{ck}$ [MPa]	20, 30, 40, 60, 90
$f_y$ [MPa]	300, 400, 500
$\rho$ [%]	0.5, 1.0, 2.0

#### 3.2 유효단면2차모멘트 해석 결과

##### 3.2.1 콘크리트 압축강도에 따른 변화

Table 2에서는 이 연구의 유효단면2차모멘트 해석값을 Branson의 값에 대한 비율로 나타내었다. Table 2의 괄호 안의 값은  $M/M_y$ 이다.  $f_y = 400$  MPa이고  $\rho = 1.0$  % 인 경우  $M/M_{cr} = (2.0 \sim 4.0)$ 에서 압축강도가 증가함에 따라 Bischoff의 값은 Branson의 값 보다 커지는 경향을 보였으나, 그 차이는 약 (1~4) %로 작다. KDS 1st 해석값은 Branson의 값에 비해  $f_{ck} = 20$  MPa인 경우에는 약 (9~12) % 감소하였다. 그러나  $f_{ck} \geq 30$  MPa인 경우에는 이와 반대 경향을 나타냈고, 압축강도가 증가함에 따라 증가 비율은 더욱 증가하여  $f_{ck} = 90$  MPa일 때 KDS 1st 해석값이 약 (14~19) % 크게 산정되었다. KDS 2nd 해석값 또한 이와 유사한 경향을 보였으나, Branson의 값에 대한 차이는 KDS 1st 해석 결과에서 더 크게 나타났다. 이러한 경향은 압축강도가 30 MPa 보다 작거나 60 MPa 보다 크고, 항복 모멘트에 도달할 수록 뚜렷하게 나타났는데, 최근 고강도 콘크리트 사용이 증가하고 있다는 점을 감안할 때, KDS 14 해석적 방법을 통해 유효단면2차모멘트를 산정하면 Branson의 값 보다 크게 산정되어 처짐이 작게 평가될 수 있으니 주의 기울여야 할 것으로 판단된다.

KHBDC의 평균유효곡률 개념을 사용한 결과는 KDS의 휨곡률에 의한 해석값 경향과 유사하였다. 특히, KHBDC 2nd의 해석값은 Branson의 값과 압축강도 크기에 관계 없이 유사하였다. 전반적으로 평균유효곡률 개념에 의한 유효단면2차모멘트는 KDS 해석값에 비해 현재 설계기준과 유사한 값을 보였다. 즉, 압축강도가 증가함에 따라 KDS 14의 인장증강효과를 반영한 유효단면2차모멘트는 항복 휨모멘트에 도달 할 때 약 (4~19) % 증가하거나, 약 (20~23) % 감소하지만, KHBDC에 의한 값은 약 (1~8) % 범위에서 일관되게 증가하였다.

##### 3.2.2 철근 항복강도에 따른 변화

$f_{ck} = 30$  MPa이고  $\rho = 1.0$  %인 경우 항복강도에 따른 유효단면2차모멘트는 앞선 압축강도에 따른 결과와

Table 2. Ratio of effective moment of inertia

$f_{ck}$ [MPa] $f_y$ [MPa] $\rho$ [%]	Ratio between Branson's $I_e$ and each design codes						
		$M/M_{cr}$					
		1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
20, 400, 1.0	Bischoff	0.98	1.01	1.02	1.02	1.01	1.01
	KDS 1st	0.85	0.91	0.89	0.88	0.84	0.80
	KDS 2nd	0.87	0.87	0.84	0.83	0.80	0.77
	KHBDC1st	0.95	1.04	1.05	1.07	1.06	1.05
	KHBDC2nd	0.96	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01
30, 400, 1.0	Bischoff	0.95	1.00	1.02	1.02	1.01	
	KDS 1st	0.94	1.02	1.04	1.01	0.98	
	KDS 2nd	0.96	0.98	0.97	0.95	0.93	
	KHBDC1st	0.93	1.04	1.08	1.07	1.06	
	KHBDC2nd	0.95	0.99	1.01	1.01	1.01	
40, 400, 1.0	Bischoff	0.93	0.98	1.01	1.01	(4.5) 1.01	
	KDS 1st	0.96	1.06	1.10	1.08	(4.5) 1.06	
	KDS 2nd	0.99	1.01	1.02	1.00	(4.5) 1.00	
	KHBDC1st	0.91	1.03	1.08	1.08	(4.5) 1.07	
	KHBDC2nd	0.93	0.98	1.01	1.01	(4.5) 1.01	
60, 400, 1.0	Bischoff	0.90	0.97	1.01	(3.7) 1.01		
	KDS 1st	0.99	1.11	1.16	(3.7) 1.15		
	KDS 2nd	1.03	1.05	1.07	(3.7) 1.06		
	KHBDC1st	0.88	1.02	1.08	(3.7) 1.08		
	KHBDC2nd	0.91	0.97	1.01	(3.7) 1.01		
90, 400, 1.0	Bischoff	0.88	0.96	1.00			
	KDS 1st	1.00	1.14	1.19			
	KDS 2nd	1.05	1.07	1.09			
	KHBDC1st	0.87	1.01	1.08			
	KHBDC2nd	0.90	0.96	1.01			
30, 300, 1.0	Bischoff	1.02	1.03	1.02	1.01	1.01	(7.3) 1.00
	KDS 1st	1.08	1.08	1.04	1.00	0.97	(7.3) 0.91
	KDS 2nd	1.12	1.04	0.98	0.95	0.93	(7.3) 0.88
	KHBDC1st	1.01	1.04	1.05	1.04	1.03	(7.3) 1.02
	KHBDC2nd	1.02	1.02	1.02	1.01	1.01	(7.3) 1.00
30, 500, 1.0	Bischoff	0.95	1.00	1.02	1.02	1.01	(6.4) 1.00
	KDS 1st	0.94	1.02	1.04	1.01	0.98	(6.4) 0.94
	KDS 2nd	0.96	0.98	0.97	0.95	0.93	(6.4) 0.90
	KHBDC1st	0.93	1.04	1.08	1.07	1.06	(6.4) 1.05
	KHBDC2nd	0.95	0.99	1.01	1.01	1.01	(6.4) 1.01
30, 400, 0.5	Bischoff	0.78	0.88	(2.6) 0.96			
	KDS 1st	0.73	0.90	(2.6) 0.99			
	KDS 2nd	0.75	0.84	(2.6) 0.91			
	KHBDC1st	0.74	0.94	(2.6) 1.04			
	KHBDC2nd	0.77	0.88	(2.6) 0.96			
30, 400, 2.0	Bischoff	0.95	1.00	1.02	1.02	1.01	(9.5) 1.00
	KDS 1st	1.24	1.23	1.16	1.09	1.04	(9.5) 0.94
	KDS 2nd	0.96	0.98	0.97	0.95	0.93	(9.5) 0.90
	KHBDC1st	1.17	1.21	1.19	1.15	1.12	(9.5) 1.05
	KHBDC2nd	0.95	0.99	1.01	1.01	1.01	(9.5) 1.01

유사하였다. Bischoff의 값은 Branson의 값과 약 (1~2) % 차이를 보여 항복강도에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. KDS 1st 해석값은 Branson의 값에 비해 약 (1~8) % 크지만, KDS 2nd 해석값은 반대로 약 (2~5) % 작게 나타났다. KHBDC 1st 해석값은 Branson의 값에 비해 약 (4~8) % 크고, KHBDC 2nd 해석값은 약 1 %의 근소한 차이를 보였다. 즉, 항복강도에 따른 유효단면2차모멘트는 KDS 14의 휨곡률 개념을 이용할 경우, 2차식 형태의 인장증강효과를 사용한 값이 1차식 형태의 인장증강효과를 반영한 값에 비해 Branson의 값과 유사하였다. 그러나 평균유효곡률 개념과 2차식 형태의 인장증강효과를 사용하면 Branson의 값과 거의 유사하였다.

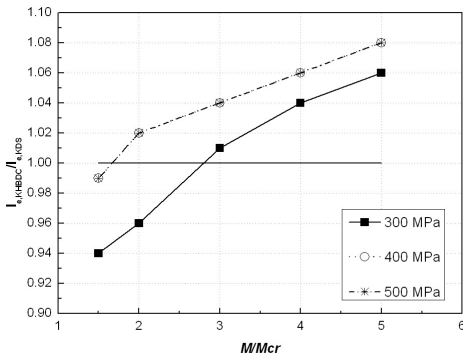
### 3.2.3 철근비에 따른 변화

$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$ ,  $f_y = 400 \text{ MPa}$ 이며  $\rho = 0.5 \%$ 일 때 유효단면2차모멘트는 Branson의 값에 비해 큰 수준으로 작았다. 특히, 낮은 휨모멘트 하에서 그 차이는 더욱

크게 나타났고,  $1.5 M_y$  수준에서 모든 해석값이 Branson의 값에 비해 약 (23~27) % 작았다. 그러나 항복 모멘트에 근접할수록 이 차이는 작아져서 항복 모멘트에 도달하면 약 (1~4) % 차이만 발생하였다.  $\rho = 2.0 \%$ 이고  $M/M_{cr} \leq 3.0$ 인 경우 KDS 1st 해석값은 Branson의 값에 비해 약 16 % 이상 컸지만, KDS 2nd 해석값은 약 3 % 작았고, 이는  $\rho = 1.0 \%$ 인 경우에도 유사하였으나 그 차이는 더 작았다. 이를 통해 살펴볼 때 건물의 슬래브와 같이 철근비가 작은 부재인 경우 현 설계기준인 Branson의 식을 사용하면 상대적으로 큰 유효단면2차모멘트가 산정되고 이에 따라 처짐은 작게 평가될 우려가 있음을 알 수 있다[8].

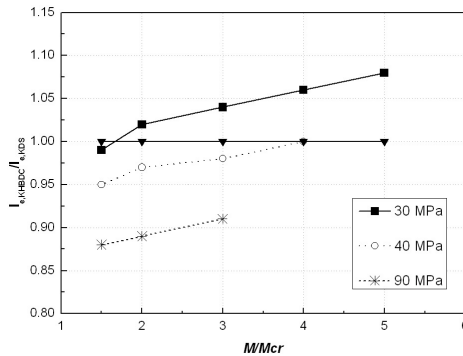
### 3.2.4 인장증강효과에 따른 변화

전반적으로 1차식 형태의 인장증강효과를 사용한 값이 2차식 형태의 인장증강효과를 사용한 값에 비해 Branson



(a) for steel strength

Fig. 4. Ratio of  $I_{e,KHBDC}$  to  $I_{e,KDS}$



(b) for concrete compressive strength

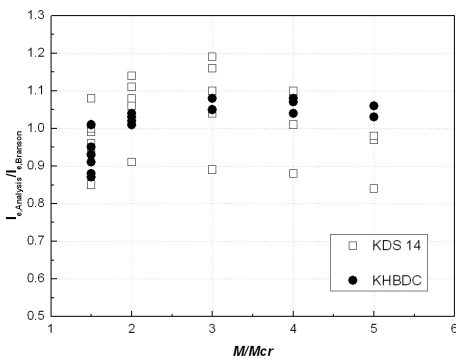


Fig. 5. Distribution of  $I_e$  for KCI and KHBDC

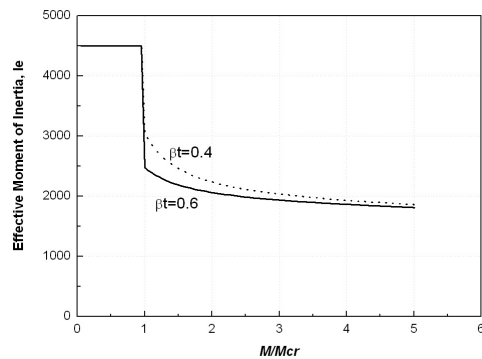


Fig. 6. Result of  $I_e$  for  $\beta_t$

의 값과 큰 차이를 보였다. 이러한 경향은 재료 강도가 크고, 철근비가 작을수록 뚜렷하였다. 즉, KCI 2017과 KDS 14에서 사용하고 있는 1차식 형태의 인장증강효과를 사용하여 처짐을 산정할 경우 Branson에 의한 처짐과 더 큰 차이가 발생할 수 있는 것으로 나타났다.

### 3.2.5 해석방법에 따른 변화

Fig. 4에서는 KDS 1st 해석값에 대한 KHBDC 1st 해석값의 비율을 나타내었다. Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이  $M/M_{cr} \geq 3$ 이고,  $f_y = 300$  MPa일 때 KDS와 KHBDC 해석값은 약 (1~6) % 차이를 나타냈다. 또한, 철근 항복강도가 낮을 경우에는 낮은 하중단계 그리고 철근 항복강도가 높을 때에는 높은 하중단계에서 해석방법에 따른 유효단면2차모멘트의 차이가 크게 나타났다. 철근 강도에 대해서는 전반적으로 KHBDC 해석값이 크게 나타났다. Fig. 4(b)에서와 같이 콘크리트 압축강도에 대해 살펴보면  $f_{ck} \leq 30$  MPa인 경우에는 대부분의 하중단계에서 KHBDC 해석값이 더 크게 나타났지만,  $f_{ck} \geq 40$  MPa인 경우에는 반대로 모든 하중 단계에서 KHBDC 해석값이 더 작게 나타났다. 특히, 압축강도가 증가함에 따라 두 해석 방법에 따른 유효단면2차모멘트의 차이는 크게 나타났다. 그러나 하중단계에 대한 유효단면2차모멘트를 나타낸 Fig. 5를 보면, 전반적으로 KHBDC 해석값이  $M/M_{cr}$ 이 1~5인 범위에서 Branson의 값과 유사하였다. 그리고  $M/M_{cr} \geq 2.0$ 인 경우 평균 유효곡률 개념을 통한 유효단면2차모멘트는 Branson의 값 보다 크고 이에 따라 처짐은 작게 산정될 수 있는 것으로 나타났다. 해석 방법에 따른 이러한 경향은 인장증강효과의 형태와 관계없이 동일하였다.

앞서 살펴본 바와 같이 KDS 14에서 사용하는 인장증강효과 Eq. (5)에서 계수  $\beta_i$ 는 하중상태에 따라 변하는 값이 아닌 0.4로 고정된 값이다. KCI 2017과 KDS 14에서는 순간처짐을 산정한 후 계수  $\lambda_{\Delta}$ 를 반영하여 장기 처짐을 산정한다. 그런데 현재 설계기준에서는 순간처짐을 산정할 때 사용하는 하중계수를 단기하중 계수가 아닌 장기 반복하중 계수가 사용되고 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 하중 상태를 반영한 계수  $\beta_i$ 에 따른 유효단면2차모멘트를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이  $M/M_{cr}$ 이 1~5일 때  $\beta_i = 0.6$ 인 유효단면2차모멘트는  $\beta_i = 0.4$ 인 경우에 비해 작다. 이는 현재 KCI 2017과 KDS 14에서 사용되는 하중계수를 적용하면 실제 순간

처짐량을 작게 평가할 우려가 있음을 의미하므로 하중계수에 대한 적절한 평가가 필요한 것으로 판단된다.

## 4. 결론

이 연구에서는 처짐 산정에 사용되는 KCI 2017과 KDS 14의 유효단면2차모멘트에 대하여 살펴보았다. 유효단면2차모멘트는 실험적, 경험적 토대 뿐만 아니라 해석적으로도 산정할 수 있는데, 이 연구의 해석 결과를 토대로 한 연구 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) p-r곡선과 인장증강효과 모델을 통해 유효단면2차모멘트를 산정할 수 있다. KCI 2017과 KDS 14에서는 휨곡률 개념을 제시하고 있고, KHBDC에서는 평균유효곡률 개념을 제시하고 있으므로 재료모델과 휨곡률 개념을 더하여 유효단면2차모멘트를 산정하였다. 이러한 유효단면2차모멘트 산정 방법은 해석의 일관성을 유지할 수 있다는 특징이 있다.
- 2) 평균유효곡률 개념을 이용한 KHBDC에 의한 유효단면2차모멘트는 휨곡률 개념을 이용한 KDS의 유효단면2차모멘트에 비하여  $M/M_{cr}$ 이 1~5인 범위에서 Branson의 값과 유사하였다.
- 3) 콘크리트 압축강도 변화에 따라 휨곡률 개념을 이용한 KDS의 유효단면2차모멘트 값은 Branson의 값에 비해 가장 큰 차이 나타냈고 특히, 1차식 인장증강효과를 사용한 경우에서 그 차이가 뚜렷하였다. 철근 항복강도에 따른 경향은 이와 유사하였다.
- 4) 1차식 형태 인장증강효과를 사용한 유효단면2차모멘트는 설계기준의 값과 큰 차이를 보였고, 이러한 경향은 철근 항복강도가 크고 철근비가 작은 경우 뚜렷하였다.
- 5) 현재 KCI 2017과 KDS 14에서는 하중상태에 따른 계수  $\beta_i$ 를 변동값이 아닌 장기하중에 의한 값으로 고정함으로써 유효단면2차모멘트를 큰 값으로 유도한다. 이에 순간 처짐은 작게 산정되므로 하중계수 적용에 적절한 고려가 필요한 것으로 판단된다.

## References

- [1] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea Structural Concrete Design Code, p.342, Korea Concrete Institute, 2012, pp.96-110.

- [2] Korea Concrete Institute, KCI Model Code, p.637, Korea Concrete Institute, 2017, pp.121-158, pp.128-158.
- [3] Korean Institute of Bridge and Structural Engineers, Korea Highway Bridge Design Code(Limit State Design), p.9-80, Gunsulbook, 2015, pp.5-121-5-130.
- [4] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Concrete Structure Flexure and Compression Design Code(KDS 14 20 20), p.23, Korea Construction Standards Center, 2021, pp.5-9.
- [5] D. E. Branson, Instantaneous and Time-Dependent Deflections of Simple and Continuous Reinforced Concrete Beams, HPR Report No. 7, Part 1, Alabama Highway Department, USA, pp.1-78.
- [6] D. E. Branson, "Compression Steel Effect on Long-Time Deflections", *ACI Journal*, Vol.68, No.8, pp.555-559, Aug. 1971.
- [7] P. H. Bischoff, A. Scanlon, "Effective Moement of Inertia for Calculating Deflections of Concrete Members Containing Steel Reinforcement and Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement", *ACI Structural Journal*, Vol.104, No.1, pp.68-75, Jan./Feb. 2007.
- [8] H. S. Yum, W. Kim, "Effective Moment of Inertia of Flexural Members Based on the Concrete Stress-Strain Curve in EC-2", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.28, No.6, pp.655-663, Dec. 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2016.28.6.655>
- [9] Fib, Structural Concrete-Manual Textbook Volume 1, International Federation for Structural Concrete, p.224, Sprint-Druck Stuttgart, 1999, pp.189-205.
- [10] CEN, Eurocode 2 : Design of Concrete Structures, p.227, EN, 2002, pp.124-131.

---

최 승 원(Seung-Won Choi)

[정회원]



- 2003년 2월 : 서울대학교 지구환 경시스템공학부 (공학석사)
- 2008년 8월 : 서울대학교 지구환 경시스템공학부 (공학박사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 조선이공대 학교 토목건설과 부교수

<관심분야>

콘크리트 구조 및 재료