

# 인장증강효과를 고려한 철근콘크리트 단순보와 연속보의 유효 단면2차모멘트에 대한 실험적 검증

## Experimental Evaluation on Effective Moment of Inertia of Reinforced Concrete Simple Beams and Continuous Beams Considering Tension Stiffening Effect

이 승 배\*      윤 형 재\*\*      김 강 수\*\*\*      김 상 식\*\*\*\*  
Lee, Seung Bae    Yoon, Hyeong Jae    Kim, Kang Su    Kim, Sang Sik

### ABSTRACT

A model for the effective moment of inertia  $I_e$  as expressed in Branson's equation, in which reduction of the flexural rigidity of RC beams due to cracking are aptly taken into account, is presented. However, KCI Code isn't considered tension stiffening as it is in debonding of reinforcing bar. Therefore, this equation need to set up suitable to our design Code.

The experimental work consisted of casting and testing a total of 6 simply supported reinforced concrete beams and a total of 4 continuous reinforced concrete beams under two point concentrated loads. Main parameters are concrete strength, coverage, bond between concrete and reinforcing bars, are known as have an effect on deflection and tension stiffening. Every test beams had the same 250×350 mm rectangular section, with a simply supported clear span of 4,400 mm and a continuous clear span of 6,500 mm. Comparison of the test results with values obtained using the KCI Code equation of the effective moment of inertia showed a noticeable difference.

### 요 약

철근콘크리트 휨 부재에서 현행 설계기준들의 처짐 계산 규정은 콘크리트의 균열 후 보의 휨강성이 감소하는 것을 반영한 유효 단면2차모멘트  $I_e$ 의 개념을 적용하여 부재의 최대 처짐을 계산하는 방법이다. 그러나 균열 발생에 따른 부재의 강성 변화를 전 경간에 걸쳐 동일하게  $I_e$ 로만 적용하여 인장증강효과 등을 직접적으로 반영하지 못하고 있다. 단순보와 연속보에서의 단면2차모멘트를 기준식이 정확히 나타내고 있는지 검증하고 이를 수정하여 보다 정확한 단면2차모멘트 예측식을 제안하고자 한다. 따라서 이 연구에서는 철근콘크리트 단순보와 연속보에서의 유효 단면2차모멘트를 이론값, 실험값과 비교, 분석하고 인장증강효과가 유효 단면2차모멘트에 미치는 영향을 실험을 통하여 검증하였다. 단순보에서는 콘크리트 강도 및 피복두께에 따른 주근의 비부착을 변수로 하여 총 6개의 시험체를 제작하였고, 연속보에서는 주근의 비부착 위치에 따라 총 4개의 시험체를 제작하였다. 실험 결과 단순보와 연속보 모두 국내 콘크리트구조설계 기준식에 의한 유효단면 2차모멘트의 이론값과 실험값이 유사한 양상을 보이는 것으로 나타났으나, 연속보에서는 이론값과 실험값의 오차가 큰 것으로 나타났다. 단순보에서는 피복두께가 두꺼운 시험체 및 고강도 시험체가 주근의 비부착에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 연속보에서는 중앙부의 비부착이 단순보의 유효 단면2차모멘트에 비해 큰 영향일 미치는 것으로 관찰되었다.

\* 정회원, 인하대학교 대학원

\*\* 정회원, 인하대학교 석사

\*\*\* 정회원, 서울시립대학교 도시과학대학 건축학과

\*\*\*\* 정회원, 인하대학교 건축학부 교수

## 1. 서론

보의 처짐을 결정하기 위해서는 먼저 단면2차모멘트를 구하여야 한다. 단면2차모멘트는 보에 발생하는 균열의 개수나 균열 깊이에 따라 변하게 된다. 즉, 균열 발생 이후에는 보의 곡률과 중립축이 변하여 보의 휨강성이 감소한다. 단면2차모멘트는 균열이 발생하기 전에는 전체 단면2차모멘트를 사용하고, 균열이 발생한 이후에는 균열 단면2차모멘트까지 보 길이를 따라 변하기 때문에 처짐 계산이 복잡하게 된다. 따라서 균열이 발생한 보의 단면2차모멘트는 전체 단면2차모멘트와 균열 단면2차모멘트 사이의 값을 가지는 유효 단면2차모멘트를 사용하고 있다. 단순보와 연속보에서 주근의 비부착에 따른 단면2차모멘트의 감소를 기준식이 정확히 나타내고 있는 지 검증할 필요가 있다.

이 연구에서는 철근콘크리트 단순보와 연속보를 대상으로 설계 기준상의 유효 단면2차모멘트 산정식과 실험을 통하여 구한 유효 단면2차모멘트를 비교, 분석하여 콘크리트구조설계 기준식을 검증한 후, 설계 기초자료를 제공하는데 목적을 두었다. 또한 인장증강효과가 철근콘크리트 휨 부재의 유효 단면2차모멘트에 미치는 영향을 분석하고, 이로부터 유효 단면2차모멘트의 기준식을 보완하기 위하여 이 연구는 수행되었다.

## 2. 시험체 설계 및 실험 방법

### 2.1 실험체 계획

이 연구에 사용된 시험체는 표.1에 나타낸 바와 같이 총 10 개의 철근콘크리트 단순보와 연속보이며, 공통적인 주요 실험 변수는 주근의 부착 여부로 하였고, 이 중 단순보 시험체는 콘크리트 강도와 피복 두께에 대한 변수를 추가하였다. 시험체 단면은 그림1과 같으며, 주근의 비부착은 석고를 이용하여 철근의 리브와 마디를 매운 뒤 테이프를 감는 방법을 이용하였다. 단순보의 비부착 길이는 중앙부 1,600 mm 구간이며, 연속보에서의 비부착 길이는 중앙부 1,600 mm 및 단부 1,600 mm 구간으로 하였다.

### 2.2 실험 방법

제하 실험은 그림 2와 같이 시험체의 상부에 2 점 집중하중으로 분당 5 kN의 가력속도로 단조가력 하였으며, 시험체의 중앙부 및 가력점에 자동변위계를 설치하여 처짐을 측정하였다. 실험에 사용된 유압 실린더와 로드셀의 용량은 모두 1000 kN 이며, 매 초당 하중 및 부재의 변위를 데이터로거를 통해 수집하였다.

표. 1 시험체의 제원

시험체 명	지지조건	시험체 배합강도 (MPa)	공시체 압축강도 (MPa)	주근 중심까지의 거리(mm)	주인장 철근	주근의 비부착 여부 (mm)
SG-X-A0	단순보	24	28	40	3-D19	부착
SG-X-A3						비부착
SG-Y-A0				부착		
SG-Y-A3				비부착		
SH-X-A0				부착		
SH-X-A3	70	76.4	40		비부착	
CG-T0-B0	연속보	24	27.7	40	단부와 중앙부 모두 3-D19 (압축철근은 2-D19)	단부-비부착
CG-T0-B3						중앙-비부착
CG-T3-B0						단부-부착
CG-T3-B0						중앙-비부착
CG-T3-B3						단부-비부착
CG-T3-B3						중앙-부착
CG-T3-B3						단부-비부착
CG-T3-B3						중앙-비부착

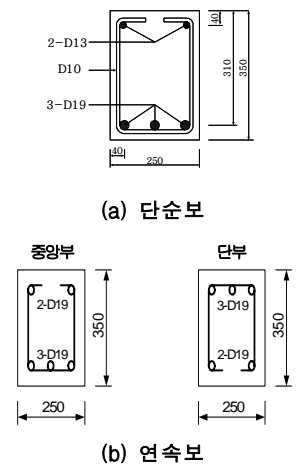


그림 1. 시험체의 단면

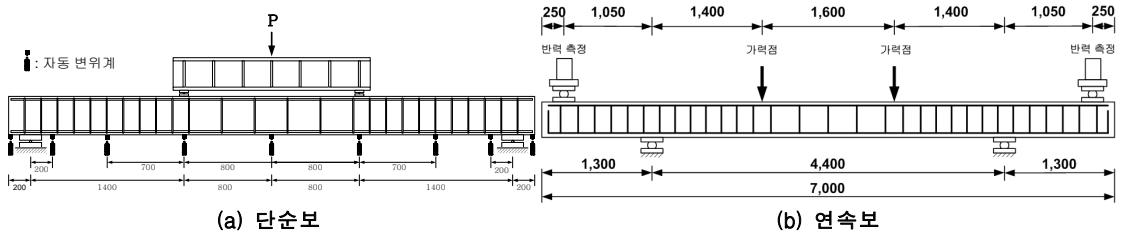


그림 2. 가력 상황 및 자동 변위계 위치

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 유효 단면2차모멘트에 대한 이론적 고찰

현행 국내 콘크리트 구조설계기준의 보 처짐 계산에 있어서는 균열로 인한 단면손실을 고려하기 위하여 Branson<sup>2)</sup>이 제안한 유효 단면2차모멘트  $I_e$ 를 사용하고 있으며, 일방향 휨을 받는 철근콘크리트 부재의 처짐 계산을 위한 유효 단면2차모멘트  $I_e$ 는 다음과 같이 정의되고 있다.

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

연속보에서는 부재 전반적인 단면2차모멘트  $I_{e,av}$ 를 부재의 중앙부와 양 단부의 유효 단면2차모멘트를 고려하여

$$I_{e,av} = 0.7 I_{em} + 0.15 (I_{e1} + I_{e2}) \quad (2)$$

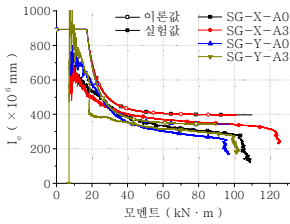
으로 정의하고 있다.

단순보와 연속보 시험체의 유효 단면2차모멘트 실험값은 하중 가력에 따른 중앙부와 가력점의 처짐을 측정하고, 이로부터 기하학적 관계를 이용하여 순수 휨 구간의 곡률을 구한 뒤, 모멘트-곡률 관계를 사용하여 구하였다.

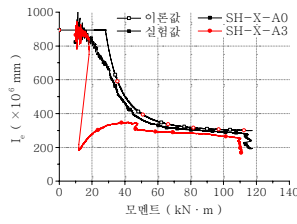
#### 3.2 실험 결과 및 분석

유효 단면2차모멘트의 실험값은 그림 3 및 그림 4와 같이 단순보와 연속보 모두 이론에 의한 유효 단면2차모멘트와 유사한 양상을 보이는 것으로 나타났다. 주근의 비부착에 따른 유효 단면2차모멘트의 이론값과 실험값의 비율을 나타낸 그림 3의 (c)를 보면 균열 모멘트 근방에서는 부차 시험체가 비부차 시험체보다 유효 단면2차모멘트 값이 더 크게 측정이 되었다. 일반강도의 단순보 시험체에서는 점차 하중이 증가할수록 비부차 시험체가 부차 시험체보다 유효 단면2차모멘트 값이 더 크게 측정이 되었으며, 피복두께가 두꺼운 시험체는 피복두께가 얇은 시험체에 비해 균열 후 유효 단면2차모멘트 값의 저하가 더 크게 나타났다. 그림 3의 (a)와 (b)에 나타난 바와 같이 일반강도 시험체에 비해 고강도 시험체에서는 균열 초기에 유효 단면2차모멘트의 값이 급격히 저하된 것으로 측정되어 주근의 비부착이 고강도 콘크리트의 유효 단면2차모멘트에 큰 영향을 미치는 것이 확인되었다.

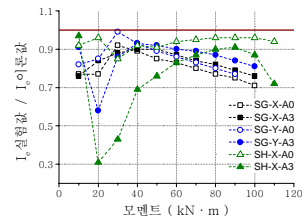
연속보의 경우 전 구간 부착된 시험체의 균열 발생 이후 유효 단면2차모멘트는 그림 4의 (a)에 나타난 설계 기준값인  $I_{e,av}$  값과, 그림 4의 (b)에 나타난 중앙부만의  $I_{em}$  과 각각 43 퍼센트 및 60 퍼센트의 차이를 보인 후 오차가 점점 감소하는 일정한 양상을 보이고 있다. 따라서 연속보의 유효 단면2차모멘트 평가 시에는 중앙부의 유효 단면2차모멘트만 평가하는 것 보다는 단부의 영향을 고려한 설계기준값인 평균 유효 단면2차모멘트를 반영하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 그러나 전체적으로 이론값과 실험값의 오차가 최소 9 퍼센트에서 최대 96 퍼센트로 측정이 되어 이에 대한 연구가 추가로 필요한 것으로 나타났다. 그림 4의 (c)와 같이 중앙부에 비부착이 있는 시험체가 중앙부에 비부착이 없는 시험체에 비해 균열 모멘트 부근에서 유효 단면2차모멘트가 급격히 감소한 것으로 관찰되었으며,



(a) 일반강도

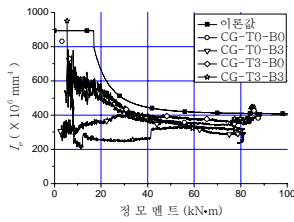


(b) 고강도

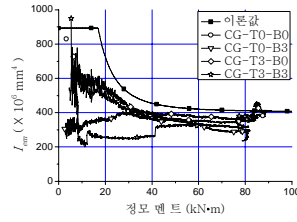


(b) 이론값과 실험값 비교

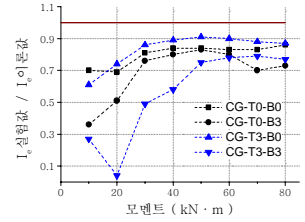
그림 3. 단순보의 유효 단면2차모멘트 비교



(a) 일반강도



(b) 고강도



(b) 이론값과 실험값 비교

그림 4. 연속보의 유효 단면2차모멘트 비교

단순보 시험체에 비해 유효 단면2차모멘트의 감소량이 커 주근의 비부착이 더 큰 영향을 미치는 것이 확인되었다. 그러나 지지점의 비부착은 중앙부의 유효 단면2차모멘트에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 관찰되었다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 철근콘크리트 단순보와 연속보에서 주근의 비부착을 주요 변수로 하여 유효 단면2차모멘트의 기준값을 실험적으로 검증하였으며, 위의 분석 결과를 통해 얻어진 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 유효 단면2차모멘트  $I_e$  값은 실험 변수와 상관없이 실험값과 이론값이 유사한 양상을 보이는 것으로 나타났으며, 연속보의 유효 단면2차모멘트 평가시에는 중앙부의 유효 단면2차모멘트만 이용하여 평가하는 것 보다는 콘크리트구조설계기준에서 제시하고 있는 단부와 중앙부의 평균 유효 단면2차모멘트를 반영하는 것이 적절한 것으로 판단된다.
- 2) 단순보에서 인장증강효과가 유효 단면2차모멘트에 미치는 영향은 일반강도보다 고강도 시험체에 더 큰 것으로 나타났으며, 특히 균열 모멘트 부근에서 그 영향이 큰 것으로 나타났다. 연속보에서는 중앙부의 비부착은 유효 단면2차모멘트에 큰 영향을 미치지 않지만, 단부의 비부착은 그 영향이 작은 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 04핵심기술C02-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 김상식, 철근콘크리트 구조설계(3판), 문운당, 2005.
2. Branson, Dan E., "Design Procedures for Computing Deflection", ACI Journal, Vol.65, No.9, Sept. 1968, pp. 736~742.