

# RC 보에서 하중형태에 따른 내부아치궤적 변화에 대한 연구

## Variation of Internal arch Trajectory with Type of Load in RC Beams

오 세 왕\*      박 대 성\*\*      김 우\*\*\*  
Oh, Se Wang      Park, Dae Sung      Kim, Woo

### ABSTRACT

The RC beams subjected to bending and shear are an important substructure. After flexural cracking, the internal stress state in the beam could not be explained by the classical beam theory. In this study the internal force state factor is introduced to explain the stress state change in the RC beams. The internal force state factor of uniform load was expanded by superposition method using internal force state factor of point load. As the load types change, the operator that would be calculated the internal force state factor was proposed.

### 1. 서 론

휨과 전단에 저항하는 철근콘크리트 보의 구조물에서 중요한 부재이다. 휨균열 발생 이전에는 고전적인 보이론에 의해 보 내부의 응력상태는 설명이 가능하지만 휨균열 발생후의 보 내부의 응력상태는 복잡하게 변화한다. 이에 많은 학자들의 집중적인 연구과제가 되어 왔다.

일반적으로 전단경간 길이가 짧은 철근콘크리트 보( $1 < a/d \leq 2.5$ )의 전단력은 하중점과 지점을 연결하는 경사압축대(diagonal strut)가 저항하는 아치작용이 지배를 하게 되며, 전단경간이 상대적으로 긴 보( $2.5 < a/d < 6 \sim 8$ )는 휨응력에 의한 보작용(beam action)과 아치작용(arch action)이 동시에 작용하게 된다. 이와 같이 아치작용은 보의 전단거동을 지배하는 주요한 구성요인이다. 보에서 전단력과 휨모멘트의 변화율의 관계를 이용하면 보작용과 아치작용의 두 항으로 표현된다.

$$V = \frac{dM}{dx} = \frac{d}{dx}(Tz) = z \frac{dT}{dx} + T \frac{dz}{dx} \quad (1)$$

휨부재 해석에서  $z$ 가 부재축을 따라 일정하다는 선형탄성 보이론의 일반적 가정을 적용하면 두 번째 항  $dz/dx = 0$ 이 되며, 이 때의 전단력은 "보작용"에 의해서만 저항하게 된다.

$$V_b = z \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

\* 정회원, 전남대학교 토목공학과 석사과정  
\*\* 정회원, 전남대학교 토목공학과 박사과정  
\*\*\* 정회원, 전남대학교 토목공학과 교수

만약 주인장철근이 콘크리트와 부착이 되어있지 않고 단부에만 정착되어 있다면, 식(1)의 첫 번째항  $dT/dx = 0$ 이 되는데 이 경우의 전단력은 “아치작용”에 의해서 저항하게 된다.

$$V_a = T \frac{dz}{dx} \quad (3)$$

아치작용에 의한 전단저항은 그림 1(c)에 나타난 것과 같이 경사진 압축합력의 수직성분에 해당하는 물리적 의미를 갖고 있다. 즉, 전단경간내의 한 단면에 작용하는 경사진 압축합력의 수평성분은 그 단면의 철근 인장력  $T$ 와 같고, 경사각은  $dz/dx$ 로 표현되기 때문이다. 이 현상을 보의 전 경간에 연속적으로 나타내면 그림 1(a)와 같은 아치형상으로 변화된다.

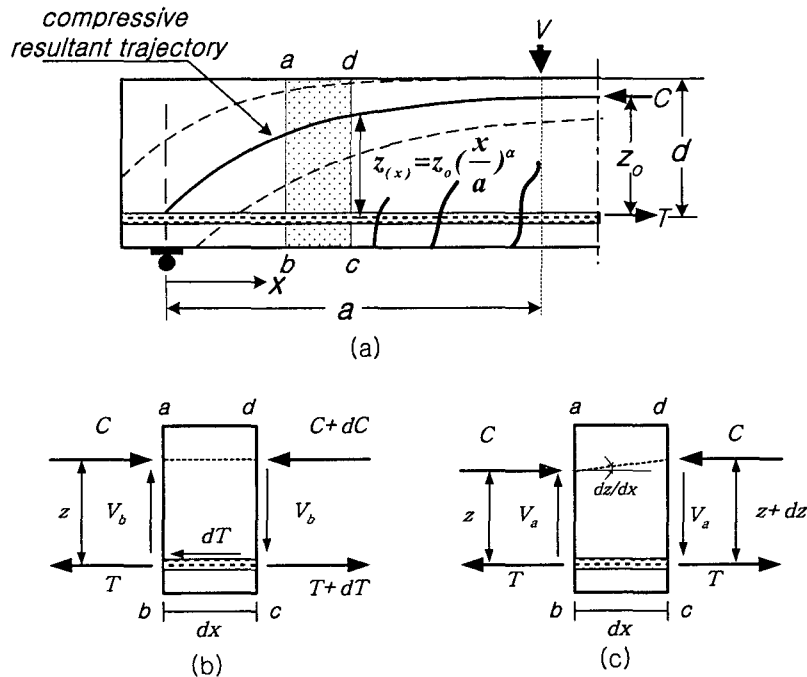


그림 1 전단저항 메커니즘

그림 1(a)에 나타난 콘크리트 압축합력의 궤적으로 구성된 아치현상을 파악하기 위해 식(1)을 집중하중을 받는 단순보의 경우에 적용해보자. 이러한 경우 지점에서  $x$  만큼 떨어진 단면의 모멘트  $M(x) = Vx$  이고, 철근인장력  $T(x) = M(x)/z(x) = Vx/z(x)$ 가 되는 관계와 식(2)의  $V_b$ 를 식(1)에 대입하면 다음과 같이 표현된다.

$$V = V_b + V \frac{xdz}{zdx} \quad (4)$$

이 식을 다시 정리하면,

$$\frac{dz}{z} = \left(1 - \frac{V_b}{V}\right) \frac{dx}{x} \quad (5)$$

이 식의 양변을 적분하고,  $x = a$ 에서  $z = z_0$  (여기서  $z_0$ 는 순수휨구간의 내부모멘트길이)라는 경계조건을 적용하면, 전단경간에서 모멘트팔길이  $z(x)$ 로 표현된 콘크리트 압축합력의 궤적은 다음과 같

이 지수함수의 형태로 표현된다.

$$z(x) = z_0 \left(\frac{x}{a}\right)^\alpha \quad (6)$$

여기서,  $\alpha$ 는 매개변수로,

$$\alpha = 1 - \frac{V_b}{V} = 1 - \frac{z}{V} \frac{dT}{dx} \quad (7)$$

식(7)으로 표현된 지수  $\alpha$ 는 아치작용의 정도를 나타내 주는 상태지수로서 내력상태계수(internal force state factor)라고 정의한다.

최근에 Kim et.al(1998)은 집중하중을 받는 직사각형 단면의 전단 보강이 된 단순보를 실험하여 주인장철근력 값을 측정해 내부모멘트팔길이를 구하고, 통계적인 회귀분석기법을 사용하여 아치현상을 정량화한 다음 식을 제안하였다.

$$\alpha = 0.6 \left(\frac{d}{a}\right)^{1.4} (\rho)^{-0.2} \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (8)$$

실제 철근콘크리트 보에서  $\alpha$ 는 그림 2와 같이 경간 길이, 휨균열의 정도, 철근의 부착상태에 따라 탄성과 소성상태의 중간상태, 즉 0에서 1.0 사이의 값을 갖는다고 할 수 있다. 경간 길이가 짧고 균열이 많이 발생하여 부착이 손실된 상태라면  $\alpha$ 값은 1.0에 가까울 것이다. 반면에 주로 휨에 의해 거동이 지배되는 긴 경간의 보에서  $\alpha$ 값은 0에 가까울 것이다.

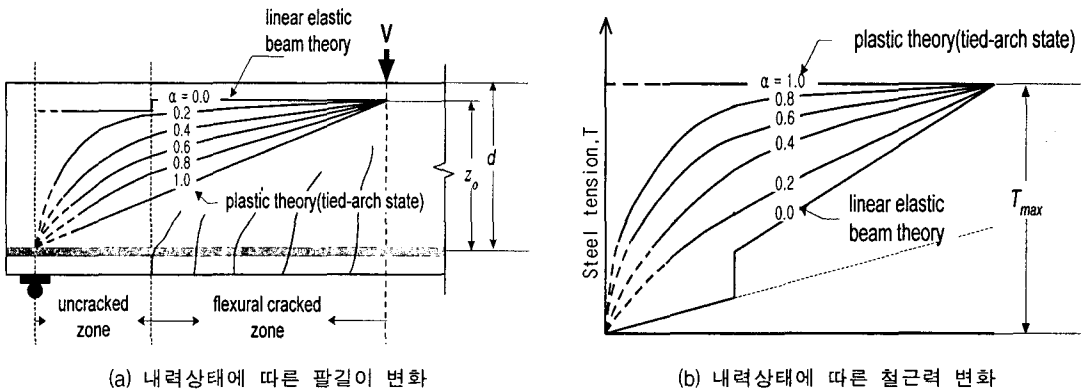


그림 2. 아치모델 (Kim et.al 2000)

식(8)에 의하여 제시된 내력상태계수는 집중하중상태에서 발생하는 아치작용의 크기를 산정할 수 있는 계산방법이다. 하지만, 사용중인 콘크리트 구조물은 사하중에 의한 등분포하중형태를 받고 있는 구조물이며, 하중형태에 따라서 부재의 내력상태 및 전단거동상의 차이가 나타나고 특히 사하중이 유발하는 주인장철근의 응력 부담이 매우 큰 콘크리트 구조물인 경우에는 등분포하중상태의 올바른 내력상태계수의 필요성이 중요한 문제가 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 등분포하중을  $n$ 개의 등가 집중하중으로 분리하여 표현하였으며 각각의 집중하중에서의 내력상태계수에 의해 산정된 주인장철근력을 중첩하여 등분포하중을 받는 보에서의 주인장철근력을 구하였다. 이를 이용하여 등분포하중에서의 내력상태계수를 추정하고 하중형태 변화에 따른 내력상태의 변화를 계산할 수 있는 상관식을 제안하고자 한다.

## 2. 등분포하중을 받는 보에서의 내력상태계수

등분포하중을 받는 보의  $n$ 개의 등가하중( $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n = \frac{qL}{2n}$ )을 받는 보로 분리할 수 있으며 이때 등가하중은 각각 전단경간  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ 에 위치한 집중하중을 받는 단순보와 같다. 즉 전단경간  $a_1$ 의 크기가 유효깊이  $d$ 이면 전단경간 대 유효깊이 비가 1인 단순보가 된다.

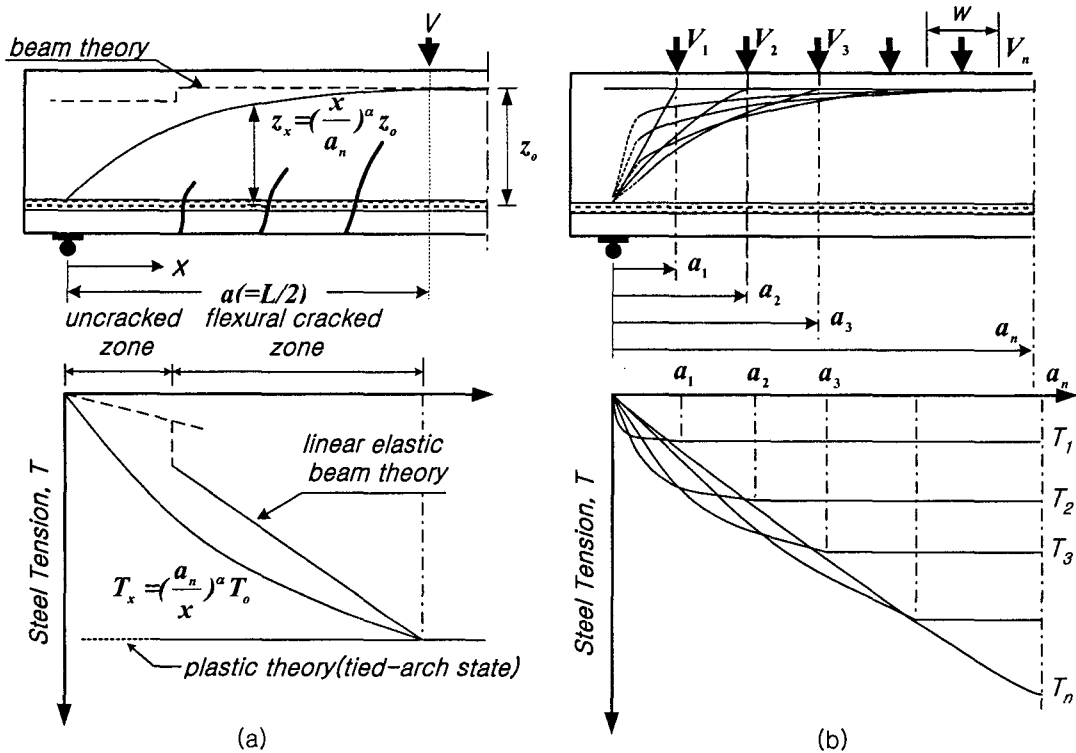


그림 3 압축력 궤적과 주인장철근력 (a) 집중하중 (b) 등분포하중

등가하중을 받는 각각의 단순보의 내력상태( $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ )는 전단경간 대 유효깊이 비를 식(8)에 대입하여 구할 수 있으며 압축합력의 궤적은 그림 3과 같이 지수형식으로 변화한다. 만약  $a_1$ 이 유효깊이  $d$ 에 있다면 내력상태는 1이 되어 압축합력 궤적은 하중점에서 지점으로 직선으로 변화하며 전단경간이 길어질수록 선형탄성상태로 된다. 보에서 아치현상에 의한 주인장철근력의 변화는 모멘트  $M_x$ 를 식(6)으로 나누어 구할 수 있으며 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_x = T_0 \left(\frac{a_n}{x}\right)^\alpha \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (9)$$

여기서  $T_0$ 는 보이론에 의해 계산된 값이다.

등가하중을 받는 보에서의 아치현상에 의한 주인장철근력( $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$ )은 식(9)와 같이 산정할 수 있으며 그림 3과 같이 내력상태계수변화에 따라 선형 탄성보이론과 소성이론(타이드-아치 상태)의 사이의 형태로 변화한다. 만약, 전단경간  $a_1$ 이 지점으로부터 유효깊이  $d$ 에 위치하고 있다면 해당 내

력상태계수  $\alpha_1$ 는 1되어 전 경간에서 일정한 값을 가지는 타이드-아치 거동을 하며  $\alpha_n$ 이 클수록 해당 내력상태계수  $\alpha_n$ 는 0에 가까운 탄성상태가 되어 주인장철근력은 하중점까지 일직선으로 변화는 선형형식이 된다. 등분포하중하에서의 주인장철근력  $T_{uniform}$ 은 다음과 같이  $n$ 개의 등가하중을 받는 보에서 주인장철근력들을 중첩하여 구하였다.

$$T_{uniform} = (T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_n)_{point} \quad (10)$$

식(10)에 의해 구한 등분포하중을 받는 보의 주인장철근력은 전단경간중양 측, 지점으로부터  $l/4$  이하에서 계산된 주인장철근력보다 커지는 아치현상이 발생하였다. 이와 같이 구한 등분포에서의 주인장철근력  $T_{uniform}$ 를 이용하여 전 구간의 내부모멘트 팔길이를 계산한 후 식(6)에서의 내력상태계수 값인  $\alpha$ 를 회귀분석을 통하여 결정하였다.

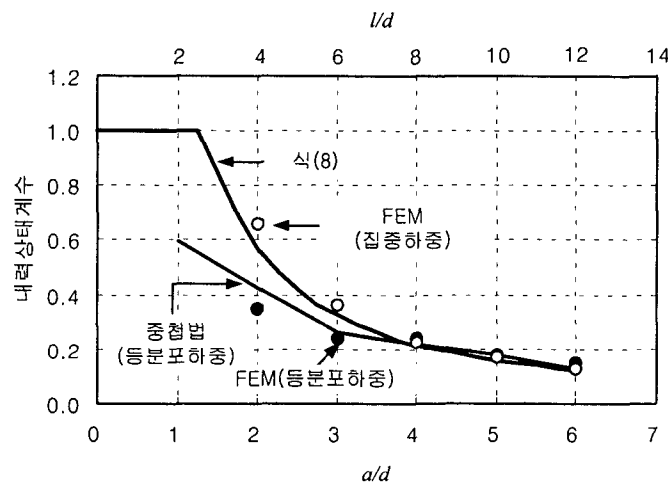


그림 4 중첩법을 이용한 내력상태계수

아치계수의 주변수인 전단경간 대 유효깊이 비는 2~6까지 변화를 주었으며 주인장철근비  $\rho$ 는 1%로 등분포하중을 받는 전단보강이된 보의 내력상태계수의 변화를 중첩법으로 구해 그림 4에 나타냈다. 그림 4에서 와 같이 등분포하중을 받는 보에서 내력상태계수는 전단경간 대 유효깊이 비가 4이하에서 집중하중의 내력상태계수 보다 적게 나왔다. 모델의 신뢰성을 검증하기 위해 유한요소해석을 수행하였으며 이때 제원은 실제 실험을 수행한 보(Kim et al 1998)와 같이 하였다. 집중하중을 받는 보의 내력상태계수는 유한요소 해석한 결과 값과 실험에 의해 제안한 식(8)과 거의 일치하게 나타났다. 같은 제원으로 하중형태만 등분포하중으로 변화시켜서 유한요소해석을 한 결과 중첩법에 의해 구한 값이 짧은 보에서는 중첩법에 의한 값보다 작게 나왔지만 거의 유사함을 알 수 있다. 전반적으로 등분포하중의 내력상태계수가 집중하중보다 적게 나왔는데 이는 첫째, 하중형태 변화에 따른 전단력과 휨모멘트의 조합( $M/d \approx f/v$ )이 집중하중에서 보다 작아지며 둘째, 휨균열이 등분포 하중하에서는 지점 쪽으로 더욱 진전하여 발생하여 콘크리트 압축 함용력계적이 집중하중에서 보다 완만해졌고 셋째, 균열의 진전길이 및 각도 등의 변화가 요인이라 할 수 있겠다.

중첩법에 의한 결과를 살펴보면 집중하중과 등분포하중 각각의 내력상태계수는 서로 상관관계를 가지고 있으며 이를 식으로 표현하였다. 식(9)에 의해 계산된 집중하중을 받는 보의 내력상태계수를 중첩법에 의해 구한 등분포에서의 내력상태 계수로 나누어 이를 이차식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\alpha_{uniform} = (-0.02(\frac{a}{d})^2 + 0.23(\frac{a}{d}) + 0.37) \alpha_{point} \quad (1 \leq \frac{a}{d} \leq 6) \quad (11)$$

이 식을 이용하면 단순히 집중하중을 받는 보의 내력상태계수  $\alpha$ 를 알면 등분포하중의 내력상태계수를 구할 수 있다. 이 때 집중하중의 전단경간 대 유효깊이 비( $a/d$ )와 등분포하중의 경간 대 유효깊이 비( $l/d$ )와는 1/2만큼( $a/d = l/2d$ ) 대응한다. 단, 단면형상, 단면제원 등이 같은 전단보강이 된 보에서 단순히 하중형태의 변화가 있을 경우에 대해 전단경간 대 유효깊이 비  $a/d$ 가 1에서 6 까지 변할 때 등분포하중의 내력상태계수를 산출할 수 있게 제안하였다.

### 3. 결 론

등분포하중을 받고 있는 전단 보강이 된 철근콘크리트 보에서 발생하는 아치현상의 발생정도를 평가하기 위하여 전단경간길이에 따라 유한요소해석 방법과 중첩법으로 접근하였다. 본 연구의 해석결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 아치현상의 발생정도는 하중형태에 따라서 다르게 나타났으며, 집중하중상태가 등분포하중상태보다는 전단경간이 짧은 보의 경우에 크게 나타났다. 또한 등분포하중상태일 때 순수 보작용에 의해 파괴가 지배되는 임계  $l/d$  가 크게 나타났다.
- 2) 등분포하중을 받는 보에서의 아치현상은 집중하중을 받는 보에서의 내력상태계수 값을 이용하여 중첩법으로 설명할 수 있다.
- 3) 하중형태의 변화에 따른 내력상태계수의 차이는 휨과 모멘트의 조합( $M/d \approx f/v$ )의 변화와 휨균열의 진전 길이와 각도의 변화라 할 수 있다.
- 4) 집중하중과 등분포하중의 내력상태 상관관계를 식으로 제안하였다. 이 식은 극히 제한된 조건하에 제안된 것이며 차후 실험에 의한 검증이 필요하겠다.

### 감사의 글

이 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 R01-1999-0132) 지원으로 수행된 결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. Russo, G., Zingone, G., and Puleri, G. (1991) "Flexure-Shear Interaction Model for Longitudinally Reinforced Beams", *ACI Structural Journal*, V.88, No. 1, pp.60-68.
2. Kim, D-J., Kim, W., and White R. N. (1998), "Prediction of Reinforcement Tension Produced by Arch Action in Reinforced Concrete Beams", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 124, No. 6, pp.611-622.
3. Kim, D. J., Kim, W., and White, R. N. (1999), "Arch Action in Reinforced Concrete Beams - A Rational Prediction of Shear Strength", *ACI Structural Journal*, Vol. 96 No.4, pp.586-593.
4. 김우, 김준성, 박대성, "내력상태계수 개념을 도입한 철근콘크리트 보의 전단파괴 가설(I) - 전단강도 일반식 유도를 중심으로", *대한토목학회논문집*, 20권, 5-A호, 2000, pp. 823-830.