

파괴역학에 근거한 철근콘크리트 보의 휨 파괴거동

Flexural Fracture Behavior of Reinforced Concrete Beam Based on Fracture Mechanics Approach

어 석 홍* 최 덕 진** 홍 기 호** 김 희 성***
Seok-Hong Eo Duck-Jin Choi Kee-Ho Hong Hee-Sung Kim

ABSTRACT

An analytical fracture mechanics approach was used to investigate the fracture behavior of reinforced concrete beams. By use of this approach based on fracture mechanics concepts, the crack width and length as well as the strength and cracking stability of reinforced concrete beams were investigated.

The results obtained from the analytical studies were also discussed in terms of the minimum reinforcement ratio and crack width specified in design code provisions. The analytical approach based on fracture mechanics concepts are very useful to predict the fracture behavior of reinforced concrete beams.

1. 서 론

철근콘크리트 구조의 설계에 있어서 콘크리트의 인장강도나 균열거동은 부재의 극한강도에는 그다지 큰 영향을 미치지 않으므로 통상 무시되어왔다. 그러나 부재의 하중-변위관계를 구할 필요가 있는 경우이거나, 삼축응력을 받는 해양 구조물과 같이 복합응력을 받는 부재의 극한강도를 구할 필요가 있는 경우에는 균열거동의 영향이 크기 때문에 콘크리트의 인장응력에 대한 거동을 고려할 필요가 있다.

가상균열모델¹⁾ (FCM, Fictitious Crack Model)은 미세균열을 수반하는 콘크리트의 비선형거동을 묘사하기 위하여 개발된 것으로 그림 1과 같이 가상의 균열면에 대한 변형과 전달응력과의 관계를 균열거동의 구성칙으로 규정함으로써 균열면에서 소산되는 파괴에너지(G_F)의 조건이 해석 중에 자연스럽게 고려되도록 모델링한 것에 그 특징이 있다.

* 정회원, 창원대학교 토목공학과 부교수

** 정회원, 창원대학교 토목공학과 석사과정

*** 정회원, 창원대학교 산업기술연구원 전임연구원

FCM을 이용한 대부분의 연구는 유한요소법과 결합되어 이루어졌으며²⁾⁻⁵⁾, 또한 유한요소법을 사용하지 않으면 실제로 그 응용이 매우 제한되어 있다고 할 수 있다. 본 연구에서는 기존의 FCM의 개념을 그대로 적용하면서 복잡한 수치해석을 수행하지 않고도 철근콘크리트 보의 파괴거동을 묘사할 수 있는 해석적 모델⁶⁾을 사용하여 철근콘크리트 보의 균열폭과 길이, 최소철근비 및 파괴강도를 구하고 다른 연구결과와 비교·검토하여 균열안전성을 평가하고자 한다.

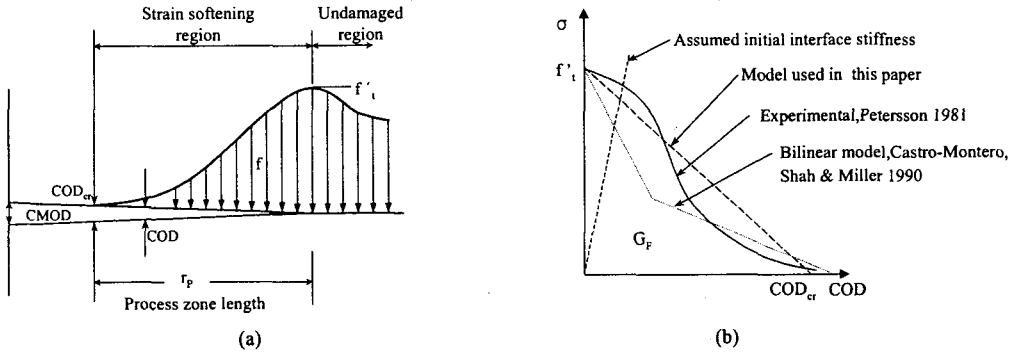


그림 1. 가상 균열면에 대한 변형과 전달응력과의 관계

2. 이론적 고찰

2.1 휨 균열모델

그림 2는 균열이 발생하여 진전한 단철근 콘크리트 보의 이상화된 해석 모델링을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 균열이 발생한 면에도 일정한 저항력, 즉, 균열 단항력이 작용하고 있다. 그림의 CASE I 및 CASE II는 해석적 모델링의 유도과정에서 구분하여 다루고자 하는 것으로, CASE I은 균열의 개구부가 여전히 균열 단항력을 가지고 있는 경우 ($CMOD < COD_{cr}$)이며, CASE II는 균열개구변위($CMOD$)가 한계균열변위(COD_{cr})를 넘어 균열 개구부에서부터 점점 균열 단항력이 사라져가는 경우를 나타낸다.

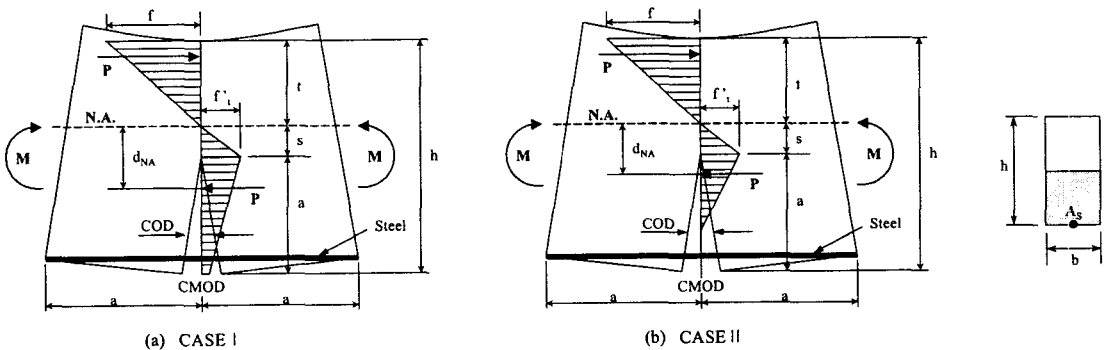


그림 2. 이상화한 해석 모델

2.2 매개변수의 일반화 및 저항모멘트의 유도

저항모멘트 m 을 균열 길이 a 의 함수로써 나타내고, 무차원화된 그래프로 도시하기 위하여 그림 1과 그림 2에 나타낸 모든 변수를 다음과 같이 일반화하였다. 그림 3은 그에 따른 저항모멘트를 산정하기 위한 알고리즘이다.

여기서 $CMOD$ 는 균열개구변위, COD_{cr} 은 한계균열변위, f'_c 과 f'_t 은 각각 콘크리트의 압축강도와 인장강도, f_y 는 철근의 항복강도, b 는 보의 폭, A_c 와 A_s 는 각각 콘크리트와 철근의 면적, E_c, E_s 는 콘크리트와 철근의 탄성계수를 나타낸다. 그외의 무차원 함수는 다음과 같다.

균열길이, $A = \frac{a}{h}$

중립축에서 균열단까지의 거리, $S = \frac{s}{h}$

중립축에서 압축축 연단까지의 거리, $T = \frac{t}{h}$

보상단의 압축축 연단응력, $F = \frac{f_y}{f'_t}$

철근의 항복강도, $\gamma = \frac{f_y}{f'_t}$

작용 모멘트, $M = \frac{m}{f'_t b h^2}$

균열개구변위, $C = \frac{CMOD}{COD_{cr}}$

해석상의 가정사항과 그림 3의 알고리즘을 이용하여 CASE I 과 CASE II의 내부저항모멘트를 구하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

① CASE I : $CMOD \leq COD_{cr}$ 인 경우(그림2.a)

$$M = \frac{1}{6} [2FT^2 + 2S^2 + A^2(3-2C) + 3AS(2-C) + 6aF(S+A)^2 / T]$$

② CASE II : $CMOD \geq COD_{cr}$ 인 경우 (그림2.b)

$$M = \frac{1}{6C^2} [2FT^2C^2 + 2S^2C^2 + 3ASC + A^2 + 6aFC^2(S+A)^2 / T]$$

또한 압축축 연단의 콘크리트가 압축파괴에 달할 때의 균열길이 A_{crush} 는 각각의 경우에서 구하여진 F 를 δ 와 같다고 놓음으로서 A 에 대하여 풀 수 있다. 일단 A_{crush} 가 구해지면 설계곡선을 사용해 파괴시의 모멘트, 균열폭 등을 구할 수 있다.

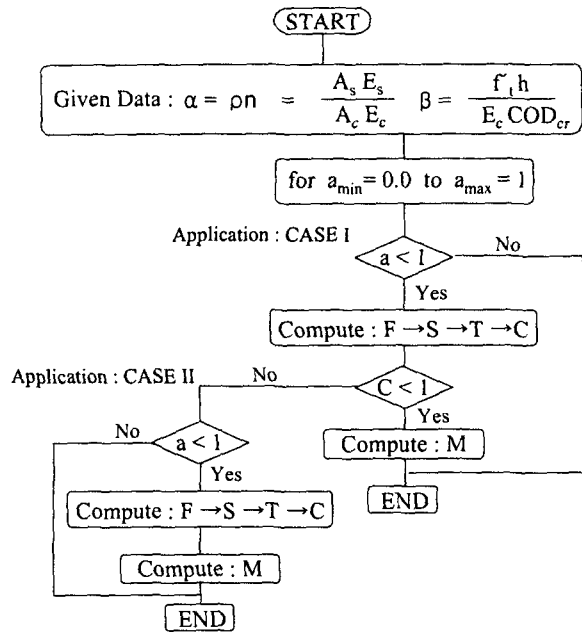


그림 3. 내부저항모멘트를 산정하기 위한 알고리즘

: 콘크리트 압축강도, $\delta = \frac{f'_c}{f'_t}$

: 철근의 배근 특성, $\rho = \frac{A_s}{A_c}$; $n = \frac{E_s}{E_c}$; $a = \rho n$

: 콘크리트의 재료 및 단면특성, $\beta = \frac{f'_t h}{E_c COD_{cr}}$

3. 결과의 분석 및 검토

3.1 부재의 크기와 최소 철근비

휨균열모델을 그림 3과 같은 알고리즘을 통하여 분석한 결과 α 를 증가시키거나 β 를 감소시킴으로써 불안정한 균열의 성장을 억제할 수 있다. 또한 균열길이 A 가 증가함에 따라 저항모멘트 M 이 증가하는 최소철근비 α_{min} 을 구할 수 있으며, 그림 4에 그 결과를 도시하였다. 한편 그림 5는 다른 여러 연구자들이 제안한 최소철근비를 도시하고 있으며⁷⁾, 서로 반대되는 결과를 보여주고 있는 점이 특이하다. 실제 콘크리트의 압축영역이 선형분포가 아닌 비선형분포를 가진다는 것과 또한 보의 크기가 증가함에 따라 그 공칭강도가 감소하는 크기효과^{8),9)}에 따른다면 최소철근비 또한 줄어들어야 할 것이다.

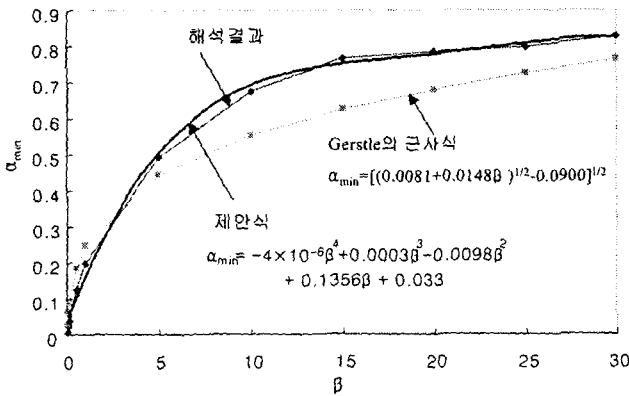


그림 4. 최소철근비 α_{min} 와 β 의 관계

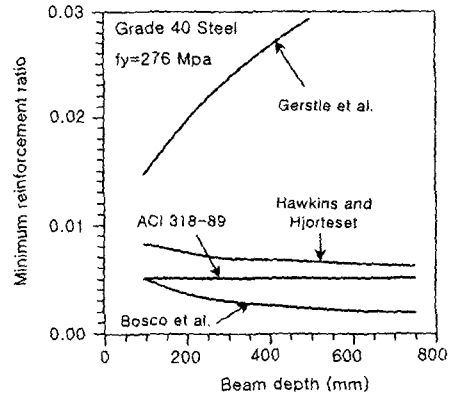


그림 5. 최소철근비에 대한 연구결과 비교⁷⁾

3.2 기존 모멘트 산정식과의 비교

그림 6은 콘크리트의 압축강도 180 kgf/cm²일 때와 280 kgf/cm²일 때의 두 가지 경우에 대하여 ACI에서 제시한 공칭휨강도 계산식과 본 연구에 사용된 휨균열모델을 이용한 공칭휨강도 계산식을 비교한 것으로 본 연구에 의한 결과는 기존의 공칭휨강도의 약 65% 정도로 계산되었다. 따라서 휨균열모델을 실제 설계 및 구조검토에 활용하기 위해서는 더 많은 연구 및 검토가 필요할 것으로 판단된다.

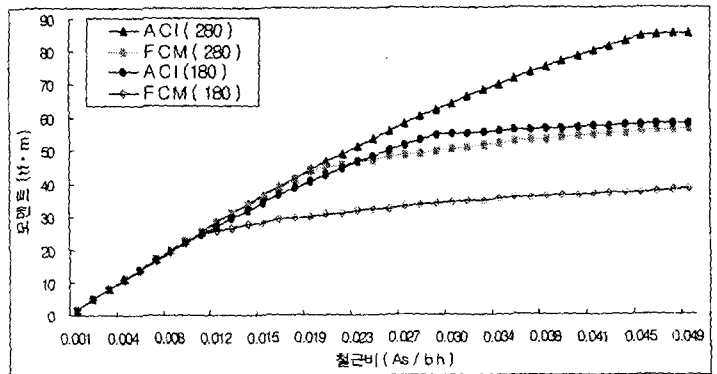


그림 6. 모멘트에 대한 연구결과 비교

3.3 균열폭의 예측

특정 정보가 주어지면 철근비와 탄성계수비의 곱으로 정의되는 α 와 재료 및 부재특성을 나타내는 매개변수 β 가 계산된다. 따라서 어떤 주어진 외력모멘트에 대응하는 균열폭을 균열길이와 내부저항모멘트의 상관도를 이용해 계산할 수 있다. 길이 60cm, 폭 30cm의 직사각형보로 인장철근이 1-D29가 배치되었고, 적용된 모멘트는 10 tf·m일 때의 균열폭을 그림 7의 균열길이와 내부저항모멘트의 상관도를 이용하여 구해보면 다음과 같다.

「재료특성」: $f_c' = 280 \text{ kgf/cm}^2$, $f_t' = 35 \text{ kgf/cm}^2$, $COD_{cr} = 0.007 \text{ cm}$, $E_c = 2.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$,
 $E_s = 2.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$, $f_y = 4,000 \text{ kgf/cm}^2$, 보하단에서부터 철근의 중심거리 $d=4 \text{ cm}$, 철근비 $\rho = 0.0038$

「매개변수」: $n = \frac{E_s}{E_c} = 8$, $\alpha = \rho n = 0.0306$, $\beta = \frac{f_t' h}{E_c COD_{cr}} = 1.2$, $\gamma = \frac{f_y}{f_t'} = 114.29$,
 $\delta = \frac{f_c'}{f_t'} = 8$, $M = \frac{m}{f_t' b h^2} = 0.265$

먼저 제시된 매개변수의 $\alpha=0.0306$, $\beta=1.2$ 에 대해 그림 7을 참고하여 살펴보면 저항모멘트의 peak를 지나 감소하기 시작하는 점 즉, 균열이 불안정하게 성장하기 시작하는 균열길이 $A_{stab}=0.168$ 이 되며, 또한 변곡점 이전에 즉, CASE I 내에서 A_{stab} 이 균열이 발생함을 알 수 있다. 불안정한 균열의 성장을 억제하기 위한 최소철근비 α_{min} 은 $\alpha=0.0306$ 보다 높은 0.23정도가 요구된다. 다음으로, 제시된 매개변수의 $M = \frac{m}{f_t' b h^2} = 0.265$ 에 의해 발생하는 균열길이 $A=0.674$ 가 결정되고 균열은 이미 변곡점을 지나서 불안정한 상태의 균열성장을 보이고 있다.

균열이 안정한 상태의 성장을 하는지 불안정한 상태의 성장을 하는지를 판단한 후에 보 상단의 응력을 구한다. 여기서 제시

된 예제는 불안정한 상태의 균열성장을 보이고 있으므로, CASE II에 해당하는 $F=2.648$ 이 계산되어진다. 풀이과정에서 구한 $F=2.648$ 과 그림 7에 표시한 $A=0.674$ 을 이용하여 CASE II에 해당하는 균열폭은, $CMOD = C \cdot COD_{cr} = 13.82 \times 0.007 = 0.0967 \text{ cm} = 0.967 \text{ mm}$ 이다.

이 논문에 제시된 균열폭 산정식과 비교를 하기 위해 Gergely-Lutz의 균열폭식을 이용하면, $w = 1.08 \beta_c f_s \sqrt{d_c A} \times 10^{-5} \text{ (mm)} = 0.435 \text{ mm}$ 을 구할 수 있다. 이상과 같이 본 연구에 제시된 균열폭의 값은 현재 시방서에 사용되고있는 Gergely-Lutz의 균열폭식^{10,11)}보다 약 두 배 정도의 차이를 나타내고 있으나 후자의 경우는 실험적인 데이터를 근거로 하여 회귀분석을 통해 얻어진 경험식의 성격이 강하여 전자는 어떤 실험 데이터를 통해 조정하지 않은 이론적인 결과인 점이 다르다.

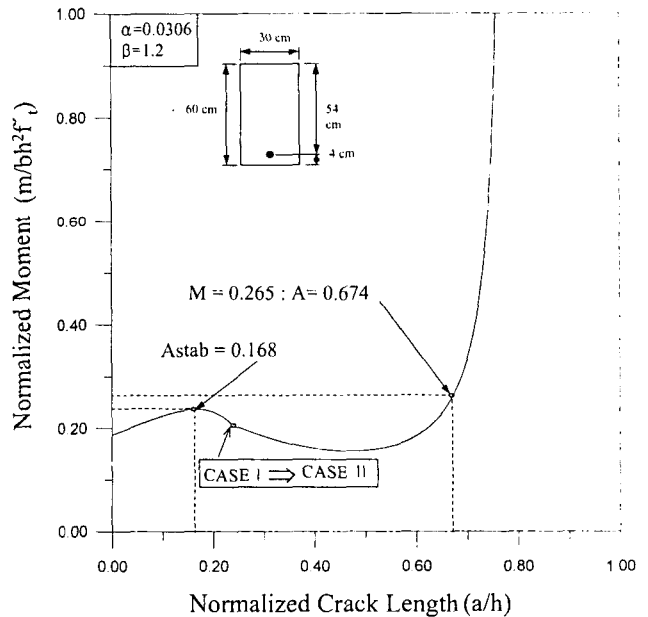


그림 7. 예제단면의 균열성장곡선과 저항모멘트 곡선

4. 결론 및 향후과제

당초 Hillerborg 등이 제안한 가상균열모델(FCM)을 이용하여 단철근 직사각형 보의 균열성장과 파괴거동을 묘사할 수 있는 해석적 모델링을 수행하였으며 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 제안된 해석적 모델링을 사용함으로써 복잡한 유한요소해석을 수행하지 않고도 간단히 철근콘크리트 보의 파괴거동을 묘사할 수 있음을 알 수 있다.
- (2) 다양한 매개변수 연구를 통하여 불안정한 균열의 성장이 시작되는 균열길이와 이를 방지하기 위한 최소철근비(α_{min})를 구할 수 있었으나 실제 다른 연구결과와는 많은 차이점이 있었다. 이는 콘크리트 압축영역에 대한 보다 정확한 파괴기준의 적용을 요구하며 이를 통해 보다 합리적인 저항강도 및 최소철근비의 산정이 이루어질 것으로 판단된다.
- (3) 본 연구에 사용된 휨균열모델을 이용한 공칭휨강도 계산식을 ACI에서 제시한 공칭휨강도 계산식과 비교한 결과는 본 연구의 계산식이 상당히 작은 값을 나타내어 휨균열모델을 실제 설계 및 구조검토에 활용하기 위해서는 더 많은 연구 및 검토가 필요할 것으로 판단된다.
- (4) 본 모델을 이용하여 산정된 균열폭은 시방서에 제안된 산정식을 통해 구한 값보다 상당히 큰 값을 나타내었으나, 이 또한 어떠한 경험적 변수나 회귀분석을 통하지 않고 이론적 모델을 통해 구한 값이라는 데 큰 의미가 있으며 콘크리트의 압축파괴기준에 대한 보완을 통하여 보다 실질적인 값을 산정할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. Hillerborg, A., Modeer, M., and Peterson, P. E., "Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements," *Cement and Concrete Research*, V.6, No 6, 1976, pp. 773-782.
2. Peterson, P. E., "Crack Growth and Development of Fracture Zone in Plain Concrete and Similar Materials," Report TVBM-1006, Lund Institute of Technology, 1981.
3. Gustafsson, P. J., "Fracture Mechanics Studies of Non-Yielding Materials Like Concrete," Report TVBM-1007, Lund Institute of Technology, 1985.
4. Gerstle, W. H., Ingrassia, A. R., And Gergely, P., "Tension Stiffening A Fracture Mechanics Approach," *Bond In Concrete*, P. Bartos, Ed., 1982, pp. 97-106.
5. Gerstle, W. H., and Xie, M., "FEM Modelling of Fictitious Crack Propagation in Concrete," *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, V. 118, No. 2. 1992, pp. 416-434.
6. Gerstle, W. H., Dey, P. P., Prasad, N. N. V., Rahulkumar, P. and Xie, M., "Crack Growth in Flexural Members - A Fracture Mechanics Approach," *ACI Structural Journal*, V. 89, No. 6, Nov.-Dec., 1992, pp. 617-625.
7. Ouyang, C., and Shah, S. P., Swartz, S. E., "Application of Fracture Mechanics to Concrete Structures," *Fracture Mechanics of Concrete*, 1995, pp. 378-384.0
8. 어석홍, 김진근, 김희성, "고강도 콘크리트보의 파괴특성과 크기효과에 관한 수치해석적 연구," *대한토목학회논문집*, 제17권 제I-3호, 1997, 5, pp. 361-371.
9. 어석홍, 김희성, 광규석, "고강도 콘크리트보의 파괴특성과 크기효과에 관한 실험적 연구" *대한토목학회논문집*, 제18권 제I-4호, 1998, 7, pp. 469-481.
10. Lutz, L. A., Gergely, P., "Mechanics of Bond and Slip of Deformed Bars in Concrete," *ACI Journal*, Proceeding V. 64, No. 11, 1967, pp. 412-430.
11. Lutz, L., "Analysis of Stress in Concrete near a Reinforcing Bar Due to Bond and Transverse Cracking," *ACI Journal*, Proceedings V. 67, No. 10, Oct. 1970, pp. 778-787.