철근콘크리트보의 휨-전단균열에 대한 파괴역학적 해석

Fracture Analysis of Flexural-Shear Failure in RC Beams

임철원* 김대중** 김 우***

Lim, Cheol Won Kim, Dae Joong Kim, Woo

ABSTRACT

This paper is intended to investigate the behavior of flexural-shear cracking in reinforced concrete beams without web reinforcement with FEM incorporated into a linear elastic fracture mechanics approach(LEFM). Each crack was propagated progressively by a finite length, then the quantitative responses were examined.

The results show that the horizontal crack was initiated by the bond-induced shear stress due to horizontal shearing action of the T-C force couple after the formation of the critical flexural crack. Also, the horizontal crack is considered to be a major factor of shear failure in slender reinforced concrete beams without web reinforcement.

1. 서 론

철근콘크리트보의 전단거동을 규명하기 위해 수많은 연구논문이 보고되었으나, 철근콘크리트보의 전단파괴거동은 아직 확실히 규명되지 않았다. 이것은 파괴에 관련된 인자들이 복잡하여 정량화하는 것이 곤란하기 때문이다. 이와 같이 전단균열의 근본성질을 분명히 이해하지 못하기 때문에 철근콘크리트보의 전단강도에 대한 대부분의 설계식은 실험자료에 근거를 두고 있다.

본 연구에서는 복부보강이 없는 철근콘크리트보에 대한 전단균열의 근본성질을 명확히 이해한다면, 더 합리적인 설계를 할 수 있으리라 여겨, 복부보강이 없는 철근콘크리트보에서 휨-전단균열의 진전에 따른 콘크리트 응력재분배를 조사하여 휨-전단파괴기구를 파악하기 위해 선형파괴역학(*LEFM*)을 도입한 *FEM*해석을 수행하였다.

* 전남대학교 토목공학과 석사과정

** 정회원, 건설기술호남교육원 전임교수

*** 정회원, 전남대학교 토목공학과 교수

2. 해 석

본 연구에서는 참고문헌 1에서 실제 실험된 보 중, 휨-전단파괴가 발생한 보(*3NDB*)를 해석대상으로 선정하였다. 이 보의 균열형상과 단면치수를 그림 1에 나타내었다. 휨-전단균열은 전단지간내의 최외측휨균열 바로 뒤의 철근위에서 발생하여, 한쪽 균열끝은 하중재하점으로 진행하고, 다른 한쪽 균열끝은 철근을 따라 지점으로 순간적으로 진행하여 파괴되며, 철근을 따라 지점으로 진전하는 균열을 수평균열이라 하였다.

휨-전단균열과 수평균열을 유한요소로 모델링하여 균열을 한 단계씩 진전시키면서 균열단면의 철근인장력과 콘크리트의 응력상태, 그리고 균열정점에서의 *stress intensity factors*를 조사하여 휨-전단균열에 의한 전단파괴 거동을 규명하고자 하였다.

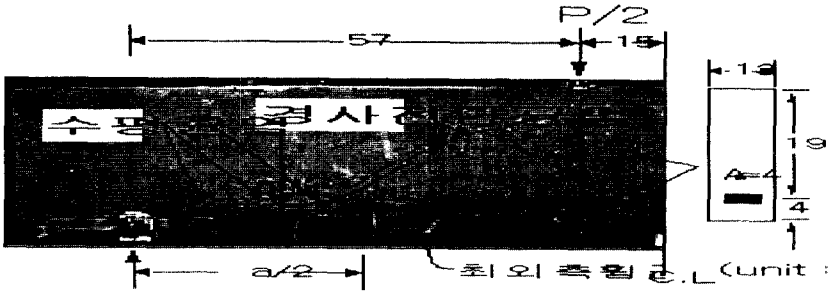


그림 1 해석대상 보의 형상과 균열양상

3. 해석모델링

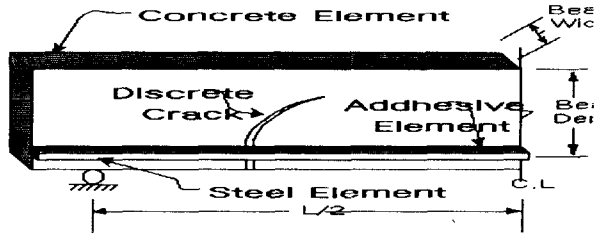
본 연구에서 휨-전단균열과 수평균열은 *FEM*을 이용하여 이산균열(*discrete crack*)로 모사하였고, 철근콘크리트보의 거동을 2차원 평면응력상태로 가정하였으며, 콘크리트와 철근을 선형탄성재료로 간주하여 *LEFM*해석을 수행하였다.

해석에 사용된 프로그램은 *FRANC2D*[3]이며, 이 프로그램은 주어진 *FEM*요소망에서 자동적으로 이산균열을 생성하는 기능을 갖고 있는 것이 특징이다. 균열정점에서 응력특이(*stress singularity*)현상을 나타낼 수 있도록 사분점에 절점을 갖는 삼각형 요소를 사용하고 있으며, 균열진행여부를 판별하기 위해 *LEFM*의 *stress intensity factor*기준을 적용하고 있다.

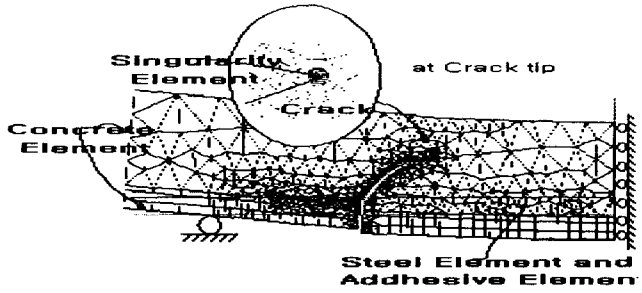
평면응력해석을 하므로, 균열은 mode I과 mode II의 혼합모드 하에서 진전되므로, 본 연구에서는 *stress intensity factors*를 이용하여 균열이 진전하기 위한 하중을 $(\sigma_\theta)_{max}$ 파괴기준을 사용하여 구하였다. $(\sigma_\theta)_{max}$ 파괴기준은 균열정점의 응력이 한계값에 도달할 때, 주인장력을 받는 방향의 직각방향으로 균열이 진전되는 시작기준이 되며, 식은 다음과 같다.

$$\cos\frac{\theta}{2}\left\{\frac{K_I}{\sqrt{\pi}}\cos^2\frac{\theta}{2}-\frac{3K_{II}}{2\sqrt{\pi}}\sin\theta\right\}=K_{IC} \qquad (1)$$

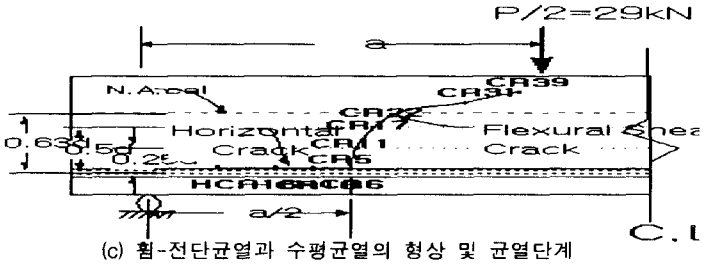
철근콘크리트 합성부재를 그림 2(a)처럼 콘크리트층과 철근층을 유한요소로 분할한 후 부착요소를 이용하여 철근콘크리트 합성부재를 모델링 하였으며, 해석에 사용된 재료상수는 표 1에 정리하였고, 휨-전단균열과 수평균열의 기하형상과 몇몇 균열단계를 그림 2(c)에 나타내었다. 여기서, 기호*CR17*은 휨-전단균열이 균열진전방향을 따라 *17 cm* 진전된 균열단계를 의미하고, *HCR10*은 수평균열이 철근



(a) 철근콘크리트 합성부재 모델링 개요도



(b) 휨-전단균열과 수평균열의 요소망도



(c) 휨-전단균열과 수평균열의 형상 및 균열단계

그림 2 휨-전단균열의 유한요소모델

표 1 해석에 사용된 재료상수

	콘크리트요소	철근요소	부착요소
탄성계수	$E_c = 29GPa$	$E_s = 200GPa$	$G = 14GPa = 0.48E_c$
프와송비	$\nu = 0.18$	$\nu = 0.25$	-
파괴인성 (*material toughness*)	$K_{IC} = 1.0MPa\sqrt{m}$	-	-

을 따라 지점으로 *10 cm*진전되었음을 나타내며, 이런 수치는 뒤의 그래프에서 균열이 진전된 길이 (*propagated crack length*)에 해당하는 값이다.

4. 해석결과 및 분석

4.1 철근인장력과 단면응력분포

휨-전단균열의 진전에 따른 균열단면의 철근인장력 T의 변화를 그림 3에 고전이론으로 균열단면에

서 구한 철근인장력 T_{cal}과 함께 나타내었다. 휨-전단균열이 진전하여 고전이론으로 구한 균열단면의 중립축 NA_{cal}에 도달하면(*CR22*단계), 철근인장력 T 는 계산된 철근력 T_{cal} 보다 약 1.37배 크게 된다.

그리고, 그림 4의 콘크리트의 휨응력분포에서 볼 수 있듯이 휨-전단균열이 발생함에 따라 중립축의 위치는 철근쪽으로 이동하며, 내부모멘트 팔길이 z 가 단면c-c에서 점점 감소하는 것을 볼 수 있다. 단면c-c의 모멘트 M=Tz를 고려할 때, 팔길이가 줄어들므로 철근력이 증가해야 단면c-c의 힘의 평형이 유지된다. 그림 3에서 철근력 T가 계산값 T_{cal} 보다 큰 이유는 휨-전단균열의 발생에 따른 아취현상에 의해 내부모멘트 팔길이 z가 감소하여 철근력이 증가되기 때문이다.

그림 4(b)에서 휨-전단균열이 발생한 철근콘크리트보의 전단응력분포는 포물선 모양의 전단응력분포를 지닌 탄성균질보의 전단응력분포와는 전혀 다르다. 위와 같이 증가된 철근력 T가 부착에 의해 콘크리트에 전달되어 휨균열이 발생한 곳의 철근 바로 뒤(단면c-c)에서 콘크리트 전단응력은 현저하게 집중된다. 휨-전단균열의 진전에 따른 단면c-c의 전단응력 분포를 그림 5에 몇몇 균열단계에 대해 나타내었다.

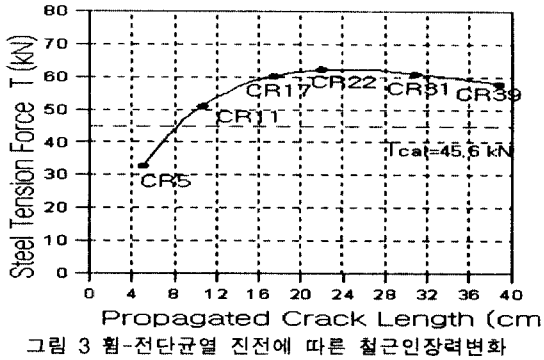
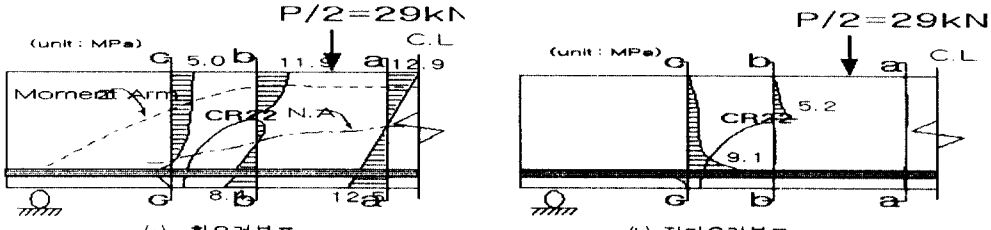


그림 3 휨-전단균열 진전에 따른 철근인장력변화



(a) 휨응력분포 (b) 전단응력분포

그림 4 휨-전단균열이 발생한 보의 콘크리트 응력분포

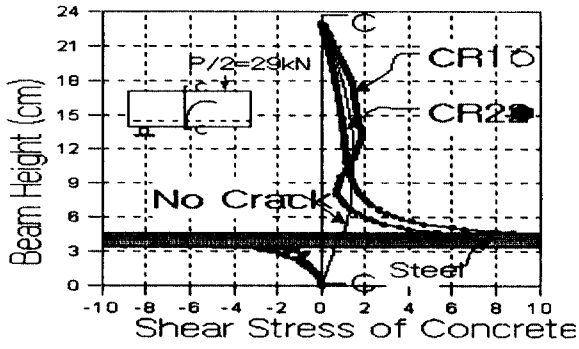
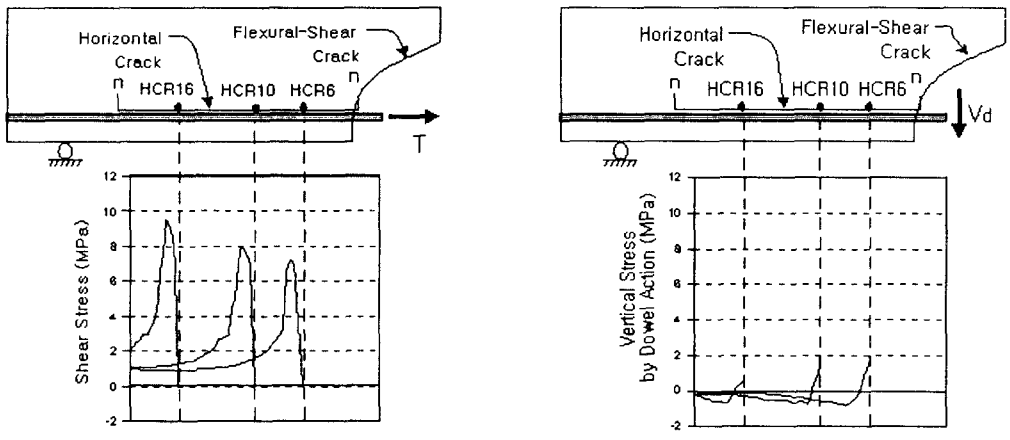


그림 5 휨-전단균열진전에 따른 단면c-c의 콘크리트 전단응력변화

4.2 수평균열 발생과 진전원인

그림 6은 휨-전단균열이 발생한 곳의 철근위로 균열이 발생하여 지점으로 진행할 때, 철근 바로 윗면에 발생하는 콘크리트 수평전단응력과 다우웰력에 의한 콘크리트 응력을 몇몇 수평균열 단계마다 나타낸 것이다. 그림에서 전단응력은 다우웰력에 의한 응력보다 보다 그 크기가 크다. 그림 6(a)에서 철근인장력에 의해 발생한 수평전단응력은 수평균열이 지점으로 진전함에 따라 점점 증가하는 반면, 다우웰력에 의한 응력(그림 6(b))은 수평균열이 진전함에 따라 점점 감소함을 알 수 있다.

이처럼 수평균열이 일단 발생하면, 수평전단응력이 분포되는 철근상면의 면적이 줄어들게 되어 더 큰 전단응력이 발생되며, 이런 과정이 연속적으로 발생되어 수평균열을 불안정하게 만든다. 그리고, 수평균열이 지점으로 진행할수록 전단응력의 영향은 커지고 다우웰력에 의한 응력의 영향은 감소하기 때문에 수평균열의 발생과 진전은 철근인장력으로 발생되는 전단응력에 의해 주로 지배된다고 볼 수 있다.



(a) 수평전단응력분포 (b) 다우웰력에 의한 응력분포

그림 6 수평균열진전에 따른 철근상면(단면n-n)의 콘크리트 응력분포

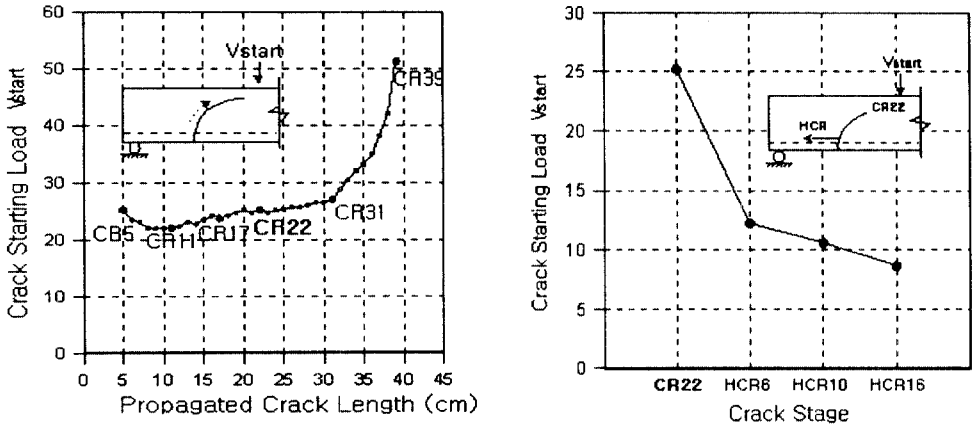
4.3 휨-전단균열 진전에 대한 수평균열의 영향

휨-전단균열에 대한 수평균열의 영향을 살피기 위해, 수평균열이 발생하지 않고 휨-전단균열을 진전시키면서 휨-전단균열이 콘크리트 압축역으로 발전하는데 필요한 하중 V_{start}를 식(1)에 의해 계산하여 분석한 것과 휨-전단균열이 중립축 위치에 도달했을 때(*CR22*), 인위적으로 수평균열을 발생시킨 결과를 그림 7에서 비교하였다. 여기서, 균열이 진전하기 위한 하중 V_{start}는 전단지간의 전단력에 해당하는 값이다.

그림 7(a)에서 수평균열이 발생하지 않고 휨-전단균열만 진전했을 때, 휨-전단균열이 하중재하점에 가까워질수록 균열이 진전하기 위한 하중 V_{start}는 증가하게 된다. 즉, 이 균열은 압축역에서 안정균열(*stable crack*)이 된다는 것이다. 그러나, 실제 보의 전단파괴는 휨-전단균열이 하중의 증가없이 하중재하점으로 발전하여 파괴되는 불안정한 파괴를 보이기 때문에 휨-전단균열을 불안정하게 만드는 기구가 발생되어야 한다.

휨-전단균열에 수평균열이 발생했을 때에 대한 그림 7(b)에서 볼 수 있듯이, 휨-전단균열(*CR22*)이 압축역으로 발전하기 위한 하중 P=*50.3kN*은 수평균열이 발생함에 따라 현저하게 감소되며, 수평균열

이 지점쪽으로 *16 cm*진전했을 때(*HCR16*), 수평균열이 발생하지 않은 때보다(*CR22*) 균열진전하중 V_{start}는 60%감소된다. 이것은 수평균열이 휨-전단균열이 압축역으로 발전하는데 크게 영향을 미치며, 휨-전단균열을 불안정한 균열로 만드는 중요한 요인이라는 것을 알 수 있다고 하겠다.



(a) 휨-전단균열만 진전할 때의 V_{start} (b) 수평균열 발생에 따른 V_{start}

그림4.5 휨-전단균열진전에 대한 수평균열의 영향

5. 결 론

(1) 휨-전단균열이 발전할수록 아취현상이 형성되고, 철근인장력은 고전이론으로 계산한 값보다 현저하게 증가하게 된다.

(2) 증가된 철근력은 부착에 의해 콘크리트에 전달되어 휨균열의 인접 콘크리트에 전단응력집중을 유발시킨다.

(3) 콘크리트의 전단응력 집중으로 인해 수평균열이 발생하게 되며, 수평균열의 진행은 철근력에 의한 수평전단응력에 의해 주로 지배된며, 이 수평균열은 불안정한 균열이 된다.

(4) 주철근 방향으로 발생되는 수평균열은 콘크리트 압축역에 있는 휨-전단균열을 불안정하게 만드는 중요한 요인이라고 할 수 있다.

참고문헌

[1] Kim, W., "Shear-Critical Cracks in Reinforced Concrete Beams Without Web Reinforced : Their Initiation and Propagation", Ph. D. Thesis Dept. of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, N.Y., Aug. 1986.

[2] Kim, W. and White R.N., "Initiation of Shear Cracking in Reinforced Concrete Beams with no Web Reinforcement", ACI Structural Journal, Vol. 88 No. 3, pp. 301-308, May-June 1991.

[3] Daniel Senson and Mark James,"FRANC2D/L:A Crack Propagation Simulator for Plane Layered Structures", Kansas State University · Manhattan, Kansas,