

혼합균열모형을 적용한 콘크리트의 손상 및 파괴해석

Damage and Fracture Analysis of Concrete using Homogenized Crack Model

김광수* 송하원** 남진원***
Kim, Kwang-Soo Song, Ha-Won Nam, Jin-Won

ABSTRACT

Damage and fracture of concrete is characterized as the degradation of strength and stiffness. There can be modeled as the so-called homogenized crack model which can overcome the mesh sensitivity. But the plasticity and damage modeling for damage behavior before the fracture of concrete should be combined with the crack model. In this study, a damage function and an unified hardening-softening function are applied to the homogenized crack model to develop a 3-dimensional FEM program for nonlinear damage and fracture analysis of concrete. The comparison of numerical results and experimental data show that the combined modeling in this study can simulate the damage and fracture of concrete without the mesh-sensitivity. It is also shown that the behavior of the so-called Engineering Cementitious Composite(ECC) characterized by strain-hardening and multiple cracks can be well simulated using the modeling.

1. 서론

일반적으로 콘크리트 재료는 파괴거동 시 미소균열의 진행이 파괴진행영역이라 불리는 상대적으로 좁은 영역으로 국소화 되는 특성이 있다. 이로 인해 콘크리트를 균질한 재료로 취급하는 강도에 입각한 기존의 모델들은 콘크리트의 파괴와 관련해서 크기효과와 같은 현상을 예측하지 못하고, 유한요소 해석 시 요소분할과 무관한 객관적인 결과를 산출하지 못한다. 이에 대해 파괴 해석 시 크기효과를 극복하고 동시에 요소 분할과 무관한 객관적인 결과를 산출할 수 있는 3차원 혼합균열모형이 개발되었지만 최대응력 이전의 거동이 선형적으로 나타나고 있어 손상요소로 인한 비선형성을 표현하지 못하고 있다. 이에 본 연구에서는 제안된 혼합균열 모델에 손상함수를 도입하고, 더불어 압축과 인장 거동에 대한 경화-연화함수를 개선시킴으로써 최대응력 이전의 비선형 손상거동 및 최대응력 이후의 파괴거동을 실험값에 근사하게 재현하였다.

2. 혼합균열모델

먼저 균열의 형상을 그림 1과 같이 가정하고, 콘크리트와 균열의 응력 및 변형률 속도를 각각 $\bar{\sigma}^i$, $\bar{\epsilon}^i$ 및 $\bar{\sigma}^j$, $\bar{\epsilon}^j$ 로 표시하면, Hill(1963)에 의한 혼합법칙을 이용하여 대표체적요소의 평균응력 및 평균변형률은 다음 식(1)과 같이 설정할 수 있다.

$$\begin{aligned}\bar{\sigma} &= \mu_i \bar{\sigma}^i + \mu_j \bar{\sigma}^j \\ \bar{\epsilon} &= \mu_i \bar{\epsilon}^i + \mu_j \bar{\epsilon}^j\end{aligned}\tag{1}$$

여기서, $\mu_i + \mu_j = 1$ 이다. 다음으로 균열의 두께는 유한요소의 크기에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 균열의 수직 및 전단 방향에 대해 식(2)와 같은 속도 불연속성을 도입할 수 있고, 이를 이용하여 균열에 대한 구성방정식을 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{\bar{g}} &= \{ \dot{g}_y, \dot{g}_x, \dot{g}_z \}^T \\ [\delta] \dot{\bar{\sigma}}^j &= [K] \dot{\bar{g}}\end{aligned}\tag{2}$$

(3)

위의 식(1), 식(2), 식(3)과 평형방정식 및 적합방정식을 이용하여 콘크리트의 구성방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\dot{\bar{\sigma}} = \mu_i \dot{\bar{\sigma}}^i + \mu_j \dot{\bar{\sigma}}^j \approx \dot{\bar{\sigma}}^i = [D] [S_1] \dot{\bar{\epsilon}} = [D^{eq}] \dot{\bar{\epsilon}}\tag{4}$$

식(4)에서 균열의 폭 t 는 유도과정 중에 제거되었기 때문에, 혼합균열모델은 연속체 모델임에도 불구하고 특정한 정규화 기법 없이 요소에민성 문제를 해결할 수 있다.

* 정희원, 평화엔지니어링 사원
** 정희원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수
*** 정희원, 연세대학교 콘크리트구조연구실 박사과정

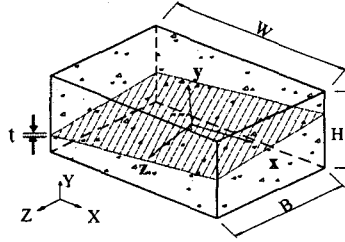


그림 1 대표체적요소 및 균열형상

3. 콘크리트의 탄소성-손상-파괴모델

3.1 탄소성-손상 모델

본 연구에서는 고전적인 흐름법칙에 근거한 탄소성 알고리즘을 사용하여 탄성변형을 증분관계와 흐름법칙을 다음 식과 같이 나타내었다.

$$\dot{\sigma} = D \dot{\epsilon}^e = D(\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}^p) \quad (5)$$

$$\dot{\epsilon}^p = \lambda \frac{\partial Q}{\partial \sigma} = \lambda b \quad (6)$$

또한, 강성저감에 의한 손상을 다음 식(7)과 같이 고려하였고, 식(8)과 같이 손상저감을 지수함수의 형태로 가정한 Lubliner의 손상함수(1989)를 적용하였다.

$$D = (1-d) D_0 \quad (7)$$

$$1-d_N = \exp(-c_N \epsilon^p) \quad (8)$$

3.2 항복 및 파괴기준

본 연구에서는 소성이론을 위한 파괴기준으로 콘크리트에 주로 사용되는 2 매개변수 a , κ 의 Drucker-Prager 항복기준 식을 이용하였다.

$$F = aI_1 + \sqrt{J_2} - \kappa(\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}^p) = 0 \quad (9)$$

여기서 I_1 및 J_2 는 각각 응력의 일차불변량 및 편차응력 s 의 이차불변량을 나타낸다.

3.3 경화-연화함수

식 (9)에서 $\kappa(\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}^p)$ 는 유효응력과 유효소성변형률로 표현되는 경화/연화법칙을 나타내는 매개변수를 의미한다. 콘크리트는 압축과 인장파괴거동이 매우 상이한데 압축거동에서는 초기항복응력(f_{c0}) 이후 경화거동과 연화거동이 나타나는 연성파괴를 나타내는 반면, 인장파괴에서는 초기항복응력(f_{t0})이후 곧바로 연화거동이 나타나는 준취성파괴의 형태를 띤다. 본 연구에서는 다음 식 (10)과 같이 압축 및 인장 파괴시의 경화-연화거동을 하나의 식으로 표현할 수 있는 Lubliner 경화-연화함수(1989)를 적용하였다.

$$\frac{k(\epsilon^p)}{f_{N0}} = [(1+a_N)\exp(-b_N \epsilon^p) - a_N \exp(-2b_N \epsilon^p)] \quad (10)$$

여기서, f_{N0} 은 초기항복응력이고, a_N 과 b_N 은 상수이다. N 은 상태변수로서 t 일 때 일축인장이고 c 일 때 일축압축이다. 상수 a_N 의 변화에 따른 그래프를 그려보면 그림 2와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 a_N 이 1보다 크면 초기항복 이후 경화거동(hardening)이 나타나고(압축파괴), a_N 이 1보다 작을 때는 초기항복 이후 곧바로 연화거동(softening)이 나타난다(인장파괴). 한편 상수 b_N 값은 경화-연화 기울기를 나타내는 값으로 b_N 값이 커질수록 경화-연화 기울기는 급경사를 이루게 된다.

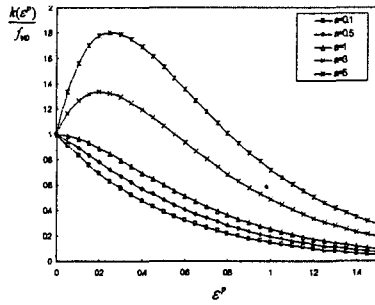


그림 2 a_N 값의 변화에 따른 비교 ($b_N=2$)

4. 콘크리트 손상-파괴거동 해석 및 검증

4.1 실험값 및 해석값 비교

본 연구에서 제안한 모델의 검증을 위해 압축 및 인장파괴에 대한 해석 결과값을 기존 문헌의 실험자료(van Mier et al., 1997 : Gopalratnam & Shah, 1985) 및 기존 혼합균열 모델의 해석값(방춘석, 2003)과 비교하여 다음 그림 3에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 수치해석 결과는 기존의 해석값에 비해 최대응력과 연화영역을 실험값에 더욱 근사하게 구현함을 알 수 있고, 특히 압축파괴 해석 결과는 기존 해석에서 보여주지 못했던 압축파괴시의 경화거동이 최대하중 이전에 나타나고 있다.

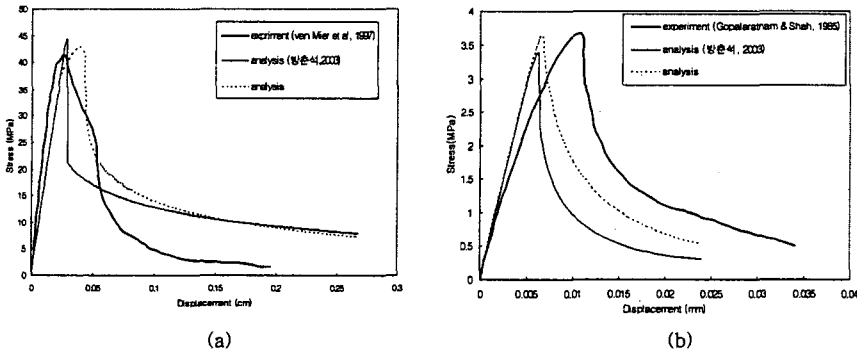


그림 3 실험 및 수치해석에 따른 응력-변위곡선 : (a) 압축, (b) 인장

4.2 요소분할 재관성

본 논문의 해석 모델은 혼합균열모델을 적용하여 일반적으로 분산균열모델에서 나타나는 요소메인성 문제를 극복할 수 있다. 이를 보이기 위해 압축과 인장 시편에 대해 요소분할 크기를 다르게 하여 해석한 결과를 다음 그림 4에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 본 연구의 모델은 혼합균열모델을 적용하여 요소메인성 문제를 극복하고 있음을 알 수 있다.

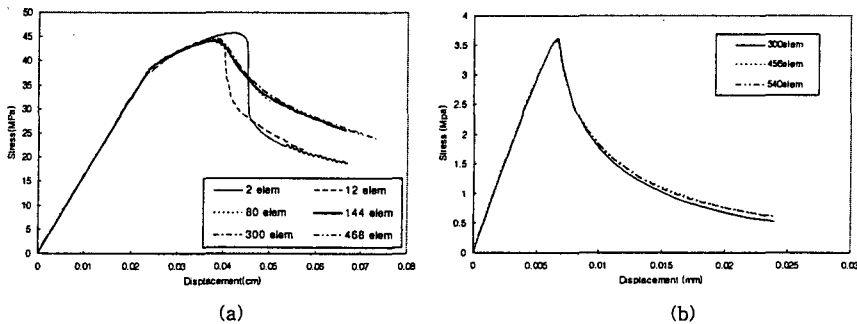


그림 4 요소분할 크기에 따른 응력-변형률 관계 : (a) 압축, (b) 인장

4.3 반복재하 해석

본 연구에서 사용된 모델은 콘크리트의 탄소성 구성 방정식에 손상함수를 도입함으로써 콘크리트의 소성-손상거동을 표현할 수가 있는데, 이를 위해 반복재하 해석을 하여 다음 그림에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 본 모델은 소성변형 뿐만 아니라 강성저하에 의한 손상거동도 실험값에 근사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

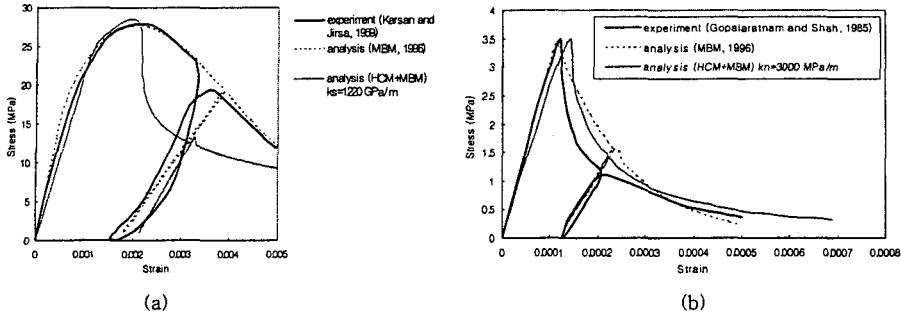


그림 5 반복재하에 의한 소성-손상거동의 구현 : (a) 압축, (b) 인장

4.4 Engineering Cementitious Composites (ECC) 거동해석

본 연구에서 적용한 Lubliner 경화-연화 함수는 인장하중 작용 시에도 경화현상이 나타나는 ECC의 해석이 가능한데 이는 매개변수 a_1 의 값을 1보다 크도록 조정함으로써 가능하다(그림 2). 이를 보이기 위해 해석결과값과 실험결과값을 비교하여 다음 그림에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 a_1 를 1보다 큰 5로 사용하였을 경우 ECC의 실험결과와 근사한 결과값을 얻을 수 있었고, a_1 를 1보다 작은 0.1을 사용하였을 때는 일반적인 콘크리트의 인장연화거동을 나타낼 수 있었다.

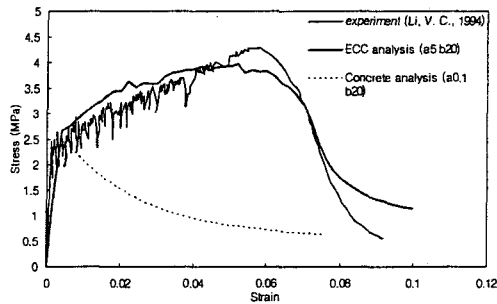


그림 6 a_1 값에 따른 ECC 실험 및 해석결과 값 비교

5. 결론

본 연구에서는 압축과 인장거동을 통합하여 표현할 수 있는 손상함수와 일관된 경화-연화함수를 혼합균열모델에 적용하여 다양한 하중하의 콘크리트의 비선형 손상 및 파괴거동을 요소분할 객관성을 유지하면서 재현하도록 3차원 유한요소 손상 및 파괴해석 통합 프로그램을 개발하였다. 개발된 해석 프로그램을 이용하여 다양한 하중하의 콘크리트 부재에 대한 파괴 해석을 실시한 결과 통합화된 모델링은 요소분할 의존성 없이 콘크리트의 손상 및 파괴거동을 적절하게 재현할 수 있었고 해석 프로그램을 공학적 시멘트계 재료(ECC) 시편의 인장파괴 해석에 적용하여 콘크리트의 초기균열이후에 발생하는 변형률경화 및 복수균열, 그리고 최대 파괴강도 이후의 인장연화현상을 효과적으로 재현할 수 있었다.

참고문헌

1. 방훈석 (2003), 3차원 혼합균열모델에 의한 콘크리트 파괴거동 해석에 관한 연구, 박사학위논문, 연세대학교.
2. Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S. and Onate, E. (1989), "A plastic-damage model for concrete", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 25, pp.299-326.
3. Mealej, M. (1994), "Effect of fiber volume fraction on the off-crack-plane fracture energy in strain hardening engineered cementitious composites", *UMCEE Report No. 94-4*, University of Michigan, Ann Arbor, USA.