

혼합균열모델을 적용한 콘크리트 파괴의 유한요소해석

Finite Element Analysis on Concrete Fracture using Homogenized Crack Model

송 하 원* 방 춘 석**
Song, Ha-Won Bang, Choon-Seok

ABSTRACT

Since quasi-brittle material like concrete shows strain localization behavior accompanied by strain softening, a numerical drawback such as mesh sensitivity is appeared in the finite element analysis. In this study, a homogenized crack model which overcomes the drawback and considers rate discontinuity in the constitutive equation is proposed for modeling of cracking in concrete and its propagation in strain softening regime. Then, a series of finite element analysis of the concrete under various loading conditions has been performed. From comparison of analysis results with experimental data, it is shown that failure behavior due to localized cracking of concrete under both compressive loading condition and tensile loading condition is well predicted by the homogenized crack model.

1. 서 론

콘크리트는 미소균열을 내포하고 있기 때문에 이런 미세균열로 인하여 인장하중이 작용하면 점점 거시적 균열로 국소화되어 콘크리트 구조물의 전반적인 파괴거동이 비선형성을 보이게 된다. 특히 콘크리트는 최대 하중 이후에 하중저항능력이 감소하는 연화거동을 보이며 변형이 국소화되는 특성을 갖고 있다. 변형을 연화 현상의 수치해석적 도입은 지배방정식의 타원성 손실(loss of ellipticity)을 야기하고 경계치 문제는 ill-posed 된다. 이에 따른 수치적 요소예민성은 분산균열모델의 수치적인 단점으로 이와 같은 근본적인 단점을 극복하기 위하여 많은 모델이 제안되었다. 변형을 국소화 문제에 있어서 Ortiz는 콘크리트의 파괴를 불연속의 현상으로 가정한 불연속 모델을 제안하였으며⁽¹⁾, 내부 불연속면을 도입한 매입균열법을 유한요소해석을 통하여 콘크리트의 파괴진행을 해석한 경우도 하나의 방법으로 제안되었다⁽²⁾.

한편 콘크리트와 같은 준취성 재료의 압축파괴 거동은 변형을 연화현상에 추가적으로 구속에 따른 구속효과가 나타나 인장파괴 거동 보다 더욱 복잡한 거동을 보여준다. 특히 이축 및 삼축 구속압을 받는 경우에 더욱 복잡한 거동을 나타내고 일축압축 파괴거동과 상이한 특성을 보여준다⁽³⁾. 일반적으로 일축 및 다축 압축 하에서 압축파괴거동은 경사진 전단면 균열파괴로 특성지을 수 있다고 발표하고 있다.

이에 본 연구에서는 변형을 연화거동에 따른 국소화 현상을 보이는 콘크리트의 파괴 거동을 분석하기 위하여 속도불연속성을 고려한 혼합균열모델(homogenized crack model)의 정식화를 통한 3차원 유한요소 해석 프로그램을 개발하였다. 혼합균열모델의 적용으로 연화거동에 따른 국소화 문제에 대한 수치해석에서 발생하는 요소예민성을 성공적으로 제거할 수 있음을 보여주었으며, 압축 및 인장을 받는 콘크리트에 대한 수치해석으로 다양한 하중하의 콘크리트의 파괴거동을 잘 재현할 수 있음을 보였다.

* 정희원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

** 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원

2. 콘크리트의 파괴특성

2.1 변형을 연화현상

콘크리트와 같은 준취성 재료는 최대응력 이후에 변형을 연화거동을 보이며, 그림 1과 같이 변형을 제어실험을 통하여 얻은 전형적인 일축압축 응력-변형을 곡선을 보면 최대응력의 정점에서 감소하는 곡선을 얻게 된다. 이 영역에서는 변형률의 분포가 연속적이지 못하고 이와 같이 콘크리트의 파괴특성을 올바르게 분석하기

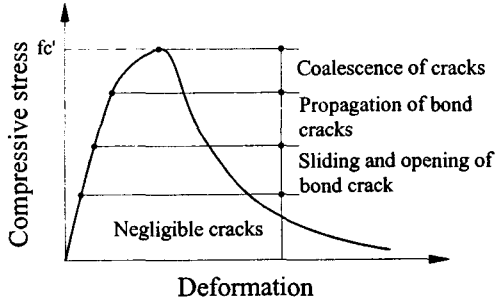
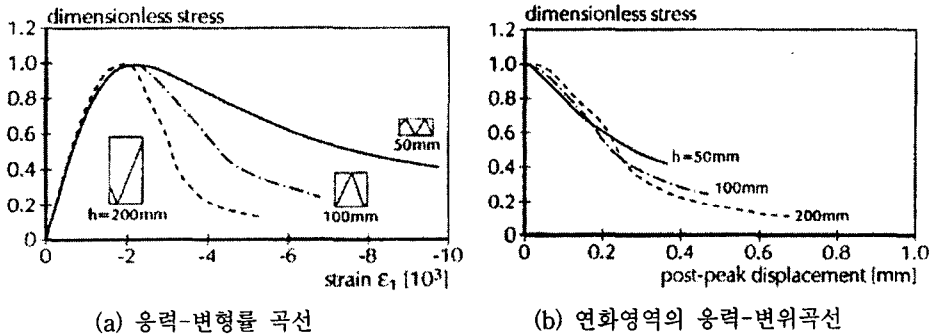


그림 1. 일축압축실험의 응력-변형률 곡선

위하여는 연화영역의 변형률 분포를 정확하게 포착하여야 한다. 일반적으로 응력-변형률 곡선에서 연화곡선은 재료특성이라기 보다는 복잡한 하중상태의 구조물 응답을 나타낸다. 크기가 다른 시편에 압축실험한 결과를 보면 그림 2(a)와 같이 응력-변형률 곡선의 연화영역은 시편의 높이가 증가함에 감소하는 기울기가 상이하게 됨을 알 수 있다. 그러나 변형률 대신에 변위로 응력에 따라 도시하면 응력-변위 곡선은 그림 2(b)와 같이 일치하여 부재의 길이에 관계없이 국소화 영역의 거동에 비례함을 알 수 있다⁽³⁾. 결과적으로 콘크리트 재료의 압축에 대한

수치모델은 국소화변형 현상을 포함한 모형화가 필요하게 되었다.



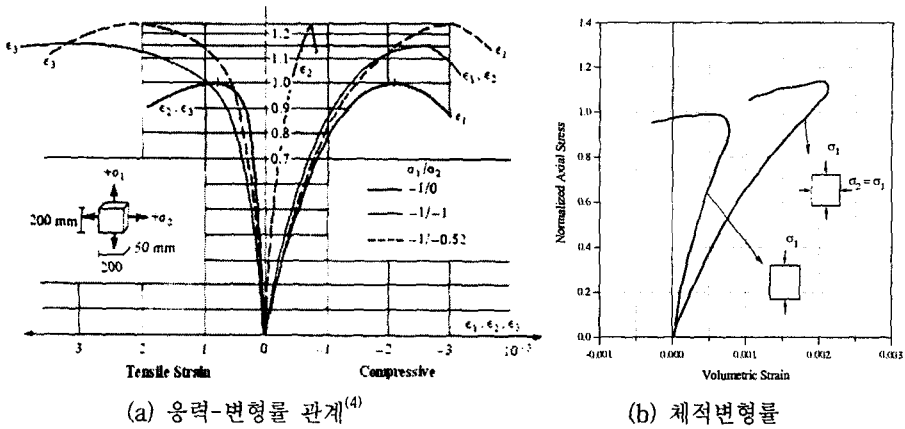
(a) 응력-변형률 곡선

(b) 연화영역의 응력-변위곡선

그림 2. 시편크기에 따른 변형률 및 변위 관계⁽³⁾

2.2 다축 압축파괴거동

구속응력을 받는 콘크리트의 파괴특성은 일축압축거동에 비하여 상이한 거동을 보여준다. 구속압이 있는 경우의 전형적인 응력-변형률 관계는 그림 3(a)와 같이 변화한다⁽⁴⁾. 여기서 보듯이 구속압은 시편의 변형거동에 중요한 영향요소로 작용하고 있음을 알 수 있다. 파괴점에서 축방향 및 측면방향의 변형률은 구속압이 증가할수록 증가하는 것을 알 수 있으며, 또한 구속압을 받고 압축하중을 받는 콘크리트는 파괴하기 전에 어느 정도의 연성을 갖는다는 것을 알 수 있다. 또한 그림 3(b)와 같이 이축 압축 실험에서 응력에 대한 체적 변형률을 도시하면, 초기에 변형률은 극한응력의 약 0.75에서 0.90까지는 감소하고 그 다음에 응력이 증가함에 변형률이 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 시멘트풀 자체는 압축하중에서 팽창하지 않고 파괴될 때까지 계속 압밀되지만 시멘트풀과 골재 사이의 체적팽창 (volume dilatation)을 나타내기 때문이다. 체적이 증가하기 시작할 때의 응력은 모르타르 내에 미소균열의 현저한 증가 때문이며 불안정성 균열전파가 시작할 때이다.



(a) 응력-변형을 관계⁽⁴⁾

(b) 체적변형을

그림 3. 이축응력하의 체적변형을 관계

이와 같이 콘크리트 압축파괴거동을 묘사하기 위하여는 연화거동에 수반된 변형을 국소화 현상을 구명할 수 있어야 할 뿐만 아니라 구속조건에 따른 파괴특성을 구현할 수 있어야 한다.

2.3 인장파괴거동

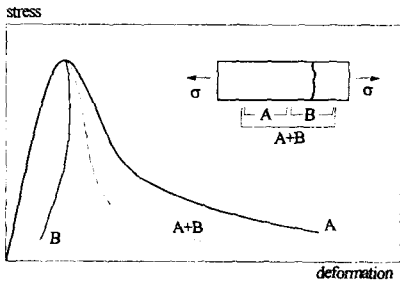


그림 4. 측정위치에 따른 인장연화곡선

일축 인장을 받는 콘크리트의 응력-변형을 곡선은 근본적으로 압축응력-변형을 곡선과 동일한 형상을 갖는다. 압축응력을 받는 콘크리트의 응력-변형을 곡선과 유사하게 외부하중이 극한 하중에 도달하면 좁은 영역으로의 변형 국소화가 발생한다. 그래서 그림 4에서 보는바와 같이 국소화 영역이 위치한 점에서의 측정은 연화곡선을 나타내고 그 외에서의 측정은 제하하는 (unloading) 현상이 나타난다. 실제적으로 인장균열은 직선형태가 아니며 골재 및 공극등의 영향으로 인하여 겹쳐지는 (overlap) 현상을 나타내며 불균등하게 개구하게 된다.

3. 혼합균열모델 및 해석기법

3.1 혼합균열모델의 정식화

연화거동에 수반되는 변형률국소화 현상을 재현할 수 있는 혼합균열모델의 3차원 정식화와 해석기법을 논의하였다. 이는 연속체 모델의 정규화 기법의 일환으로서 속도불연속성을 고려하여 균열의 거동을 주변 콘크리트 내에 결합하여 구성관계를 도출한 기법이다. 먼저 균열의 형상은 그림 5와 같이 요소 내에 발생한다고 가정하였으며, 대표체적요소 내의 콘크리트 및 균열의 응력 및 변형률 속도를 각각 $\dot{\sigma}^i$, $\dot{\epsilon}^i$ 및 $\dot{\sigma}^j$, $\dot{\epsilon}^j$ 로 표시하면 혼합법칙을 식 (1)과 같이 설정할 수 있다.

$$\dot{\sigma} = \mu_i \dot{\sigma}^i + \mu_j \dot{\sigma}^j, \quad \dot{\epsilon} = \mu_i \dot{\epsilon}^i + \mu_j \dot{\epsilon}^j \quad (1)$$

여기서 $\dot{\sigma}$ 및 $\dot{\epsilon}$ 는 내부에 균열을 포함한 콘크리트의 응력 및 변형률 속도이고, μ_i 및 μ_j 는 콘크리트와 균열의 체적비를 나타내며 다음 식 (2)를 만족한다.

$$\mu_i + \mu_j = 1 \quad (2)$$

콘크리트와 균열면 사이의 적합 조건식 및 평형방정식을 다음과 같이 적용할 수 있다.

$$\dot{\sigma}_{yy}^i = \dot{\sigma}_{yy}^j = \dot{\sigma}_{yy}^k, \quad \dot{\tau}_{xy}^i = \dot{\tau}_{xy}^j = \dot{\tau}_{xy}^k, \quad \dot{\tau}_{yz}^i = \dot{\tau}_{yz}^j = \dot{\tau}_{yz}^k \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}_{xx}^i = \dot{\epsilon}_{xx}^j = \dot{\epsilon}_{xx}^k, \quad \dot{\epsilon}_{zz}^i = \dot{\epsilon}_{zz}^j = \dot{\epsilon}_{zz}^k, \quad \dot{V}_{zx}^i = \dot{V}_{zx}^j = \dot{V}_{zx}^k \quad (4)$$

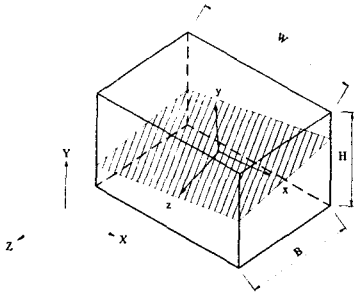


그림 5. 대표체적요소 및 균열형상

균열의 두께를 유한요소 크기에 비하여 무시할 정도이므로 다음과 같이 균열의 수직 및 전단방향에 속도불연속성을 도입할 수 있으며, 균열에 대한 구성방정식을 다음 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{g}} = \{ \dot{g}_y, \dot{g}_x, \dot{g}_z \}^T \quad (5)$$

$$[\delta] \dot{\boldsymbol{\sigma}}^j = [K] \dot{\mathbf{g}} \quad (6)$$

여기서, $[\delta]$ 는 전체성분을 균열면에서의 성분으로 관계시키는 행렬이고 $[K]$ 는 균열면의 특성을 나타내는 강성행렬로써 다음과 같다.

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

한편 콘크리트의 구성방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}}^i = [D] \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^i \quad (8)$$

앞에서 가정한 균열의 두께를 고려하면, 즉 $t \ll H$ 를 고려하면 식 (1b)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\delta] \dot{\boldsymbol{\epsilon}} \approx [\delta] \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^i + \mu \dot{\mathbf{g}} \quad (9)$$

여기서 μ 는 그림 5에서와 같이 대표체적요소와 균열의 평균화비를 나타내며 $\dot{\mathbf{g}} := 1/H \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^j$ 이다. 식 (1), (3) 및 (4)를 이용하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다⁽⁵⁾.

$$[\delta] \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^i = [A] \dot{\boldsymbol{\epsilon}} + [B] \dot{\mathbf{g}} \quad (10)$$

여기서 행렬 $[A]$ 및 $[B]$ 는 관계식을 연관시키는 행렬로써 다음과 같다.

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{-D_{21}}{C_1} & \frac{K_{11}}{\mu C_1} & \frac{-D_{23}}{C_1} & \frac{-D_{24}}{C_1} & \frac{-D_{25}}{C_1} & \frac{-D_{26}}{C_1} \\ \frac{-D_{41}}{C_2} & \frac{-D_{42}}{C_2} & \frac{-D_{43}}{C_2} & \frac{K_{22}}{\mu C_2} & \frac{-D_{45}}{C_2} & \frac{-D_{46}}{C_2} \\ \frac{-D_{51}}{C_3} & \frac{-D_{52}}{C_3} & \frac{-D_{53}}{C_3} & \frac{-D_{54}}{C_3} & \frac{K_{33}}{\mu C_3} & \frac{-D_{56}}{C_3} \end{bmatrix}, [B] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{K_{12} + \mu D_{24}}{C_1} & \frac{K_{13} + \mu D_{25}}{C_1} \\ \frac{K_{21} + \mu D_{42}}{C_2} & 0 & \frac{K_{23} + \mu D_{43}}{C_2} \\ \frac{K_{31} + \mu D_{52}}{C_3} & \frac{K_{32} + \mu D_{54}}{C_3} & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서 계수 C_1 , C_2 및 C_3 는 다음 식 (12)와 같다.

$$C_1 = D_{22} + \frac{K_{11}}{\mu}, \quad C_2 = D_{44} + \frac{K_{22}}{\mu}, \quad C_3 = D_{55} + \frac{K_{33}}{\mu} \quad (12)$$

식 (9)를 이용하면 식 (10)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\delta] \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^i = [S] \dot{\boldsymbol{\epsilon}} \quad (13)$$

여기서 행렬 $[S]$ 는 전체 변형률에 대한 콘크리트 변형률의 관계를 나타내며 식 (14)와 같다.

$$[S] = \left([I] + \frac{1}{\mu} [B] \right)^{-1} \left([A] + \frac{1}{\mu} [B] [\delta] \right) \quad (14)$$

이는 3x6 행렬관계식이며 전체성분을 표시하기 위하여 다음 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^i = [S_1] \dot{\boldsymbol{\epsilon}} \quad (15)$$

마찬가지로 $[S_1]$ 은 전체변형률 속도와 콘크리트 변형률 속도의 관계를 나타내며 다음과 같다.

$$[S_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

그러므로 균열의 구조관계는 식 (9) 및 식 (15)로부터 다음 식 (17)과 같이 유도될 수 있다.

$$\dot{\mathbf{g}} = [S_2] \dot{\boldsymbol{\epsilon}} \quad (17)$$

여기서 $[S_2]$ 는 전체변형률 속도와 균열면의 속도불연속성과의 관계를 나타내며 다음 식 (18)과 같다.

$$[S_2] = \frac{1}{\mu} ([\delta] - [S]) \quad (18)$$

마지막으로 균열을 포함한 등가구성방정식은 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= \mu_i \dot{\sigma}^i + \mu_j \dot{\sigma}^j \approx \dot{\sigma}^i \\ &= [D][S_1] \dot{\epsilon} = [D^{eq}] \dot{\epsilon} \end{aligned} \quad (19)$$

3.2 균열의 발생 및 전파

다음에 균열의 발생 및 전파과정은 압축파괴인 경우 분기이론에 의해 다음 식(20)을 만족시킬 때, 즉 어쿠스틱 텐서의 determinant가 제로가 되는 시점에서 균열이 발생한다고 가정하였다.

$$\det (n_i D_{ijkl} n_j) = 0 \quad (20)$$

식 (20)을 만족시키는 방향 벡터 n 및 m 은 국소화의 형상을 결정하게 되며, 2차원 영역에서 4차 다항식으로 표현되고 3차원 영역의 경우는 Lagrange 계수를 이용하여 해를 구할 수 있다⁽⁶⁾. 따라서 식 (20)에 의해 콘크리트의 파괴시점과 방향을 정할 수 있으며, 본 연구에서는 이를 위하여 다음 식 (21)과 같은 구체 좌표의 각을 이용하여 프로그램을 작성하였다.

$$n = (\cos\phi\cos\theta, \cos\phi\sin\theta, \sin\phi), \quad 0 < \theta < 2\pi, \quad 0 < \phi < 1/2\pi \quad (21)$$

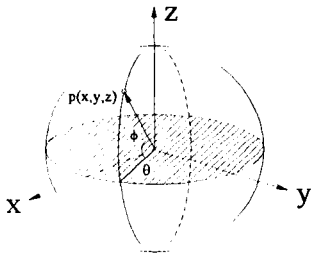


그림 6. 균열면의 방향결정

이를 그림 6에 나타내었으며 최소가 되는 첫 번째 근사값을 얻기 위하여 각각의 증분 각에 대하여 반복적으로 구할 수 있다. 이와 같이 균열의 발생기준은 분기이론을 이용하여 결정하였으며, 연화거동을 위하여 사용한 파괴기준은 그림 7과 같이 콘크리트에 주로 사용되는 2 매개변수 a , κ 의 Drucker-Prager의 항복기준 식 (22)를 이용하였다.

$$F = aI_1 + \sqrt{J_2} - \kappa(\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}_p) = 0 \quad (22)$$

여기서 I_1 및 J_2 는 각각 응력의 일차불변량 및 편차응력의 이차불변량을 나타낸다. 그리고 a 는 상수이고 유효응력 $\bar{\sigma}$ 및 유효소성변형률 $\bar{\epsilon}_p$ 로 표현되는 $\kappa(\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}_p)$ 는 경화/연화법칙을 나타내는 매개변수를 의미한다. 본 연구에서는 등방연화를 고려한 연화법칙을 지수 함수의 역수로 모사할 수 있는⁽⁷⁾ 식 (22)를 적용하였다⁽⁸⁾.

$$\kappa(\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}_p) = \kappa_0 e^{-(\beta \bar{\sigma} \cdot \bar{\epsilon}_p)^{\gamma}} \quad (22)$$

여기서 κ_0 는 초기연화상수이고 β 및 γ 는 재료특성을 나타내는 상수이다. 압축파괴와는 달리 인장파괴의 연화법칙은 다음 식 (23)의 항복함수를 제안하였으며, 주응력이 인장강도를 초과할 경우에 균열이 발생하고 주응력 방향에 수직으로 발생한다고 가정하였다.

$$F = \sigma_1 - f_t (e^{-\lambda (\sigma_1 / f_t)^{\eta}})^{\lambda} \quad (23)$$

여기서 κ , η 및 λ 는 재료의 물성값이며 \dot{g}_y^p 는 균열면에서 누적되는 속도불연속량을 의미한다. 일단 균열발생이 감지되면 식 (19)의 구성관계를 요소계산에 도입하여야 한다. 이 때 균열 강성행렬의 갱신이 필요하게 되며, 여기서는 균열면의 수직강성과 전단강성의 상호작용은 없는 것으로 가정하여 전개법칙에 따라 식 (24)와 같이 갱신된 균열강성값을 이용하여 계산하였다.

$$[K^{ep}] = \begin{bmatrix} K_N^{ep} & 0 & 0 \\ 0 & K_s^{ep} & 0 \\ 0 & 0 & K_s^{ep} \end{bmatrix} \quad (24)$$

여기서, K_N^{ep} 는 균열면의 수정수직강성이고 K_{s1}^{ep} , K_{s2}^{ep} 는 수정전단강성을 의미한다. 일단 균열이 요소수준(Gauss point)에서 탐지되는 순간 제안된 혼합균열요소가 대체되고 탄성 예측 및 소성 교정 알고리즘을 3차원 공간에서 항복응력의 위반을 검토하기 위하여 도입하였다. 잔여응력의 계산 및 수렴 검토는 전형적인 유한요소 기법 모델과 동일하다.

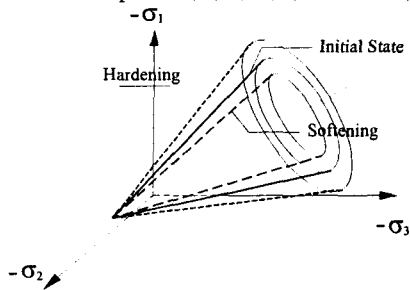


그림 7. Drucker-Prager 파괴기준

균열 방향에 약 27도 기울어져 발생한다는 것을 파악할 수 있으며, 이는 일반적인 콘크리트의 전단파괴 양상에서 볼 수 있는 결과임을 알 수 있었다. 따라서 일축압축을 받는 경우 균열의 방향결정을 정확하게 모사되었음을 알 수 있다.

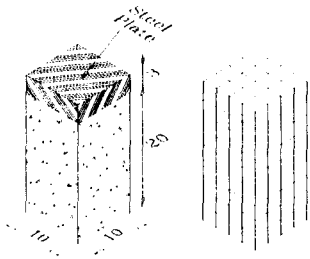
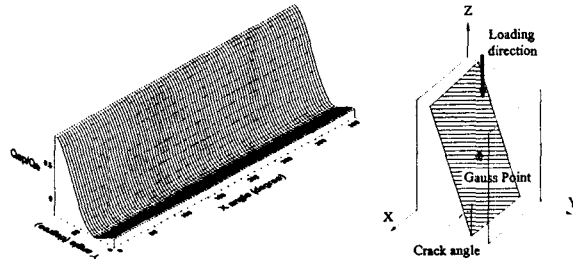


그림 8. 콘크리트 시편 및 요소분할



(a) 증분각에 대한 ||·|| (b) 적분점에서의 균열방향

그림 9. 균열의 방향 결정

수치해석 결과 그림 10과 같이 응력-변형을 곡선을 보면 압축강도를 정확히 모사할뿐 아니라 연화영역 구간의 거동이 실험결과와 비교할 때 제대로 모사 되었음을 알 수 있다. 이 후 매개해석에서는 일반강도(210 kgf/cm²)의 보통 콘크리트 재료를 이용하였다. 또한 균열면의 수직강성 및 전단강성은 각각 260,000kg/cm²/cm 및 93,000kg/cm²/cm을 이용하였다. 그 결과 파괴시점에서의 변위 양상은 그림 11에서 보듯이 변형이 국소화하는 양상을 보여주고 있다. 또한 요소분할을 변화시켜 수행한 결과 그림 12와 같이 연화 영역에서 일정한 곡선을 보임을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 혼합균열모델은 균열면의 강성 및 속도불연속성을 포함하여 변형을 국소화에 의한 특성길이(characteristic length)의 효과를 포함하기 때문에 수치해석에서 발생하는 요소메싱의 문제를 완전히 극복하고 있음을 파악할 수 있다.

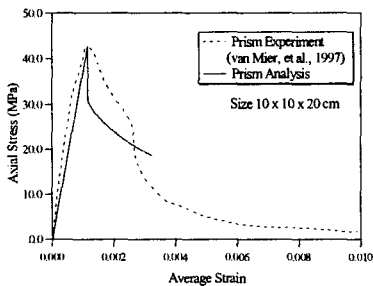


그림 10. 응력-변형을 곡선

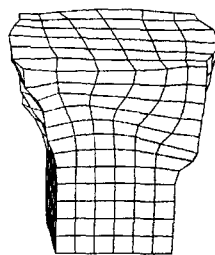


그림 11. 변위 형상

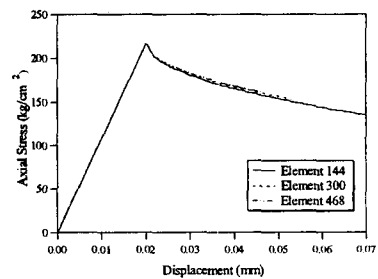


그림 12. 요소분할 변화

4.2 다축압축파괴 수치해석

콘크리트 시편이 받는 구속압의 조건은 그림 13과 같이 x 및 y 의 축방향에 일축압축강도의 비율로 변화시켜서 가하였으며 z 방향으로 증분 하중을 재하하였다. 이에 대한 결과를 정규화한 응력으로 표현할 때 그림 14와 같이 나타낼 수 있다. 각각의 경우에 대하여 이축 주응력 평면에 도시하였으며 Kupfer, et al.의 실험결과⁽⁴⁾도 함께 수록하였다. 실험에서 사용한 시편은 20x20x5cm로 형상이 다른뿐더러 본 연구에서 사용한 연화법칙은 경화현상을 고려하지 않았기 때문에 다소 과소평가 된 것으로 사료된다. 그러나 이축응력 상태의 압축강도가 증가하는 현상을 연화거동을 포함하여 잘 재현할 수 있음을 알 수 있었다.

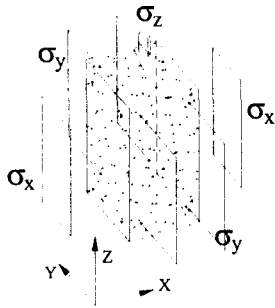


그림 13. 다축 압축응력 모형

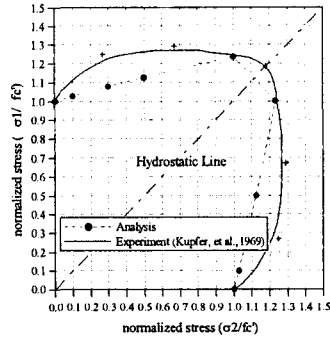


그림 14. 이축 주응력 평면에서의 정규화한 응력선도

또한 이축방향의 구속압을 가하였을 경우 각각의 방향에 대한 변형률의 변화상과 체적변형률을 각각 그림 15 및 그림 16에 도시하였다. 그림에서 보듯이 이축압축을 받는 콘크리트 재료의 실험에서의 결과와 유사한 경향을 얻을 수 있었으며 특히 구속압이 없는 방향에서의 변형률이 구속응력을 가한 방향의 변형률 보다 더욱 커짐을 알 수 있었다. 또한 구속압이 증가하면서 체적의 변화가 감소하다가 극한하중 이후의 체적이 팽창하는 유형을 보여줄 수 있었다.

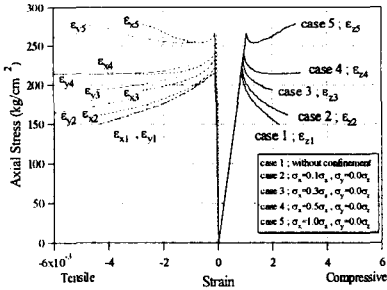


그림 15. 주응력 방향의 응력-변형률 곡선

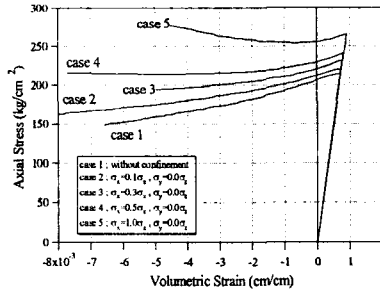


그림 16. 체적변형률

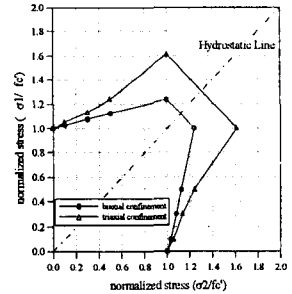


그림 17. 삼축응력하의 정규화 응력

삼축응력을 받는 콘크리트인 경우 삼축응력이 일축압축강도와 모두 동일한 경우는 압축강도의 증가는 발산하는 정수압 상태의 거동을 구현할 수 있었으며, 이에 대한 이축 주응력 평면에서의 응력분포를 그림 17에 나타내었다. 이축응력을 받는 경우에 비하여 압축강도의 증가가 현저함을 알 수 있었다.

4.3 인장파괴 수치해석

인장파괴에 대하여 이중 노치를 갖는 보통콘크리트 시편을 적용하여 실험결과⁽¹⁰⁾와 비교하였다. 그림 18은 이중 노치를 갖는 모델시편을 나타내고 있으며, 시편의 형상과 콘크리트의 물성치는 실험에서 사용된 것과 동일하게 적용하였다. 그림 19에서 보듯이 연화영역의 거동은 잘 일치하고 있으나 극한 응력은 실험값 보다 작은 것을 알 수 있다. 이는 두께 방향의 응력 3차원에서 포함되었으며 실제적 노치형상의 모델로 인한 노치 근처에 응력집중이 현저하기 때문인 것으로 생각된다. 마지막으로 요소분할 크기의 변화에 따른 수치해석 결과 그림 20에서의와 같이 요소예민성은 분명히 해결되었음을 알 수 있다.

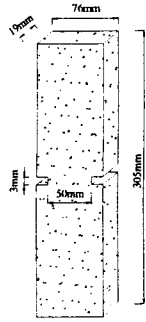


그림 18. 시편형상

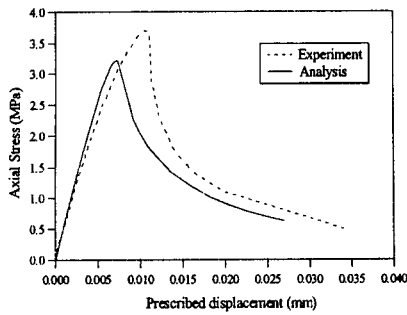


그림 19. 응력-변위 곡선

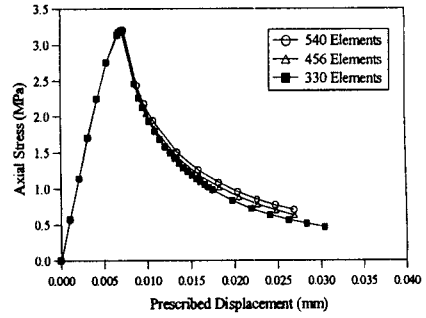


그림 20. 요소분할 크기 변화

5. 결 론

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 연화거동에 수반된 변형을 국소화 현상을 구현할 수 있는 정규화 기법의 일환인 본 연구에서의 혼합균열모델은 연속체 모델에서 발생하는 요소예민성의 문제를 해결할 수 있었으며, 속도불연속을 구성방정식에 포함함으로써 콘크리트의 균열발생과 전파해석에 사용될 수 있음을 보였다.
- 2) 다양한 하중이력을 받는 콘크리트에 대한 파괴거동을 혼합균열모델을 적용한 3차원 유한요소해석을 통하여 분석하였으며, 콘크리트의 압축파괴 및 인장파괴 거동을 잘 재현할 수 있음을 보였다.

참고문헌

1. Ortiz, M., "An analytical study of the localized failure modes of concrete" *Mechanics of Materials*, Vol. 6, 1987, pp.159~174
2. Song, H. W., Shim, B., Woo, S. M. and Koo, J. C., "Progressive fracture analysis of concrete using finite element with embedded displacement discontinuity, *Structural Engineering & Mechanics*, Vol. 11, No. 6, 2001, pp.591~604
3. van Mier, J. G. M., *Strain softening of concrete under multiaxial compression*, Ph.D. thesis, Eindhoven Univ. of Tech., 1984, Netherlands.
4. Kupfer, H., Hilsdorf, H. K. and Rusch, H., "Behavior of concrete under biaxial stresses", *J. of American Concrete Institute*, Vol. 66, No. 8, 1969, pp.656~666
5. 방춘석, 송하원, "변형률국소화에 의한 콘크리트의 압축파괴 해석에 관한 연구", *대한토목학회논문집*, 2003, 인쇄중.
6. Leroy, Y. and Ortiz, M., "Finite element analysis of strain localization in frictional materials", *Int. J. Numer. Anal. Mech Geomech*, Vol. 13, 1989, pp.53~74
7. 송하원, 나웅진 (1997), "손상과 소성을 고려한 콘크리트 변형률 국소화의 유한요소해석", *한국전산구조공학회 논문집*, Vol. 10, No. 3, pp.241-250.
8. 방춘석, 이준석, 송하원 (2002), "연화거동을 갖는 콘크리트의 3차원 탄소성 해석", *대한토목학회논문집*, Vol. 22, pp.1449-1459.
9. van Mier, J. G. M., Shah, S. P. et. al., "Strain-softening of concrete in uniaxial compression", *Materials & Structures, RILEM*, Vol. 30, 1997, pp.195~209
10. Gopalaratnam, V. G. and Shah, S. P., "Softening response of plain concrete in direct tension", *ACI J.*, 1985, pp.310~323