

콘크리트 변형률국소화 모형 및 해석

Modeling and Analysis of Strain Localization in Concrete

송하원*

Song, Ha-Won

김인순**

Kim, In-Soon

나웅진***

Na, Ung-Jin

Abstract

In this paper, a unified micromechanics-based model which can be applied to both tensile and compressive member of concrete is suggested and applied to the analysis of the strain-localization in concrete. From the comparison of the analysis results obtained from different size of concrete members with experimental data, it is shown that the model in this paper can be applied to the analysis of the strain localization in concrete.

For the finite element analysis of the strain-localization in concrete, the localized zone in concrete under strain localization is modeled as a plastic model which can consider nonlinear strain softening and the non-localized zone is modeled as a nonlinear elastic-damage model. Using developed finite element analysis program, strain localization behaviors under compressive force for the different sizes of concrete having different sizes of the localized zone are simulated.

1. 서 론

변형률국소화 현상은 콘크리트의 연화거동에 수반되어 변형이 국부적으로 집중되는 현상이다. 변형률 국소화가 일어나는 콘크리트에서 국소화영역의 변형률 연화거동과 비국소화영역의 손상제하거동을 재현할 수 있는 모형의 개발과 이를 근거로 하는 유한요소해석 프로그램의 개발은 콘크리트의 변형률 국소화해석에 매우 중요하다.

본논문에서는 인장과 압축에 대하여 변형률국소화가 일어나는 콘크리트 부재를 변형률연화가 일어나는 국소화영역과 탄성제하가 발생하는 비국소화영역으로 구분하여 모델링하는 통일된 모형을 제안

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수

** 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

*** 정회원, 연세대학교 토목공학과 석사

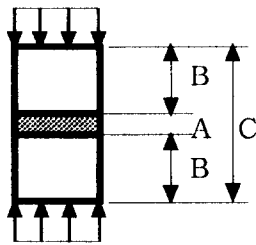
하였다. 또한 제안된 모형에서 미시역학적 평균화기법을 이용해 평균등가탄성계수 및 수정된 평균등가탄성계수를 도출하였으며 이를 이용하여 콘크리트의 변형률국소화 거동을 재현하였다. 다양한 길이의 시편에 대한 해석결과와 기존의 실험결과를 비교분석한 결과 본 논문에서의 방법들이 크기효과를 포함한 콘크리트의 변형률국소화 거동 해석에 타당하게 적용될 수 있음을 보였다.

또한 본 논문에서는 국소화영역에서 발생하는 변형률 연화현상과 비국소화영역에서 발생하는 손상제하거동을 재현할 수 있는 유한요소모델에 의한 유한요소해석을 통해 콘크리트 압축부재에 발생하는 변형률 국소화현상을 재현하였다.

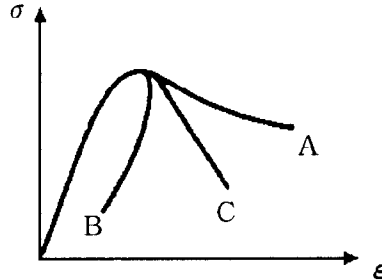
콘크리트 부재의 크기에 따른 변형률국소화 거동을 알아보기 위해 동일한 크기의 국소화영역을 갖고 있으며 크기가 다른 부재와 국소화영역의 크기가 다른 부재에 대하여 본 모형을 사용한 유한요소해석을 실시하였다.

2. 콘크리트의 변형률 국소화 거동

일축압축실험에서 변형률국소화 현상을 이상화하면 그림 1(a)와 같이 생각할 수 있다. 시편의 다른 위치에서 변위를 측정해서 각각의 길이로부터 변형률을 산정할 수 있다. 파괴가 A부분에서 일어난다고 가정하면 응력-변형률 곡선은 그림 1(b)와 같다. 파괴이전 영역에서는 세 곡선이 동일하나 파괴 이후의 영역에서는 매우 다르다. A부분과 C부분은 변형률 연화 영역인 반면 B부분은 제하 상태이다.



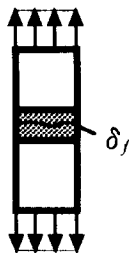
(a) Strain localization in uniaxial compression



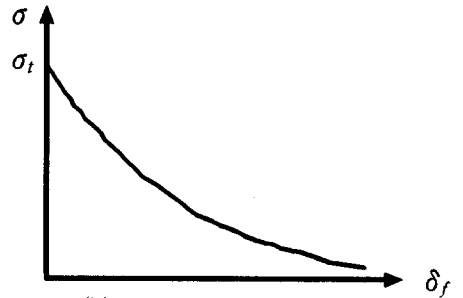
(b) Stress-strain curves for A, B, and C

그림 1 일축압축 하중하의 변형률국소화

인장실험에서도 변형률국소화는 시편의 파괴에서 명백하게 확인할 수 있다. 시편의 다른 위치에서 변위를 측정해서 각각의 길이로부터 변형률을 산정하여 응력-변형률 곡선을 구하면 압축에서와 같이



(a) Localized deformation in uniaxial tension



(b) tension-softening curve

그림 2 일축인장 하중하의 변형률국소화 현상

그림 1(b)처럼 이상화할 수 있다. 그러나 인장의 경우 국소화된 변형률이 점점 국부적으로 집중되어 종국에는 국부적으로 발생한 미소균열들이 하나로 합쳐진 큰 균열이 발생해서 시편의 총변위는 이 균열에 의해 지배를 받게 된다.(그림 2(a)) 이 때 인장응력 σ 와 균열개구변위 δ 와의 관계곡선(그림 2(b))을 인장연화곡선이라 한다.

3. 변형률국소화 현상의 통일 모형

본 연구에서는 최대응력 이후에서부터 변형률국소화 현상이 발생하는 것으로 고려하여 일축압축하중과 일축인장하중을 받고있는 콘크리트 부재에 대해 일정한 국소화영역을 갖는 것으로 변형률국소화 현상을 통일되게 모형화하였다. 즉, 여기서 전 시편을 국소화영역과 비국소화영역으로 나누었으며, 국소화영역에서는 변형률의 집중에 의한 소성변형의 증가가 발생하고, 나머지 부분인 비국소화영역에서는 탄성제하거동이 발생하는 것으로 이상화하여 모형화를 실시하였다.

(1) 일축압축상태의 국소화거동의 정식화

그림 3에 전체길이 L 에 대하여 변형률국소화영역의 크기가 ΩL 인 일축압축하중을 받는 콘크리트 시편을 도시하였다. 이 때 연화에 의한 국소화영역 계수 Ω 는 $0 \leq \Omega \leq 1$ 의 범위를 가지게 된다. 영역 ΩL 에서는 응력집중에 의한 소성이 발생하며 그 외의 영역 $(1 - \Omega)L$ 에서는 탄성제하가 발생하는 것으로 이상화하여 모든 지배방정식을 최대치에 대한 증분형식으로 표시하여 정식화하였다.

평균화기법으로 얻어진 전 부재에 대한 평균등가탄성계수 E^* 는 다음과 같다.

$$E^* = \frac{E_p}{\Omega + (1 - \Omega) \frac{E_p}{E_u}} \quad (1)$$

여기서 E_p 는 국소화영역의 탄성계수이며, E_u 는 비국소화영역의 탄성제하계수이다.

부재의 비국소화영역의 재료응답은 극한 하중이후에는 연화 거동을 따라야만 한다. 탄성제하가 일어난다고 가정한 비국소화 영역의 탄성계수 E_u 는 변형률국소화영역의 국소화와 함께 진행되므로 비

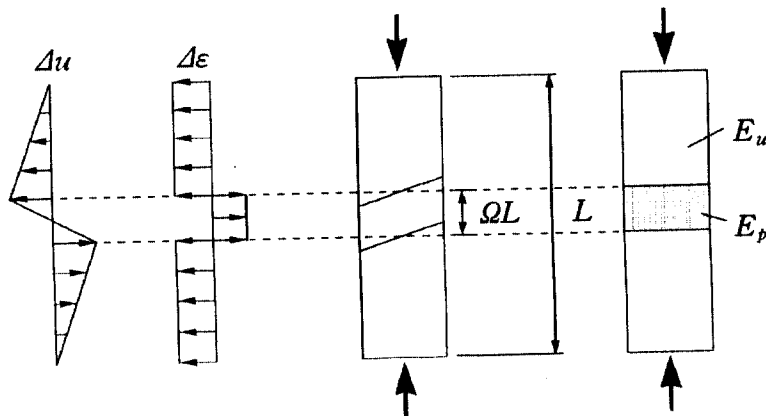


그림 3 일축압축 변형률국소화 모형

국소화영역의 탄성계수를 E_p 로 치환할 수 있으며, 이로부터 얻어지는 수정된 평균등가탄성계수는 다음과 같다.

$$\bar{E} = \frac{E_p}{\Omega + (1-\Omega)\frac{E_p}{E^*}} = \frac{E_p E_u}{\Omega E_u + (1-\Omega)[\Omega E_u + (1-\Omega)E_p]} \quad (2)$$

(2) 일축인장상태의 국소화거동의 정식화

그림 4에서와 같이 인장을 받고있는 콘크리트 부재도 압축부재와 동일하게 국소화 영역 ΩL 이 존재하는 것으로 모형화하였다. 인장 부재의 경우는 압축의 경우와 다르게 국소화영역 안에 최대응력 이후의 변형률집중으로 인한 손상이 균열개구변위 δ_f 로 표시되는 완전한 불연속면이 존재한다. 국소화영역내의 불연속면을 고려하여 평균화기법으로 얻어진 국소화영역 ΩL 내에서 평균변형률증분은 다음과 같다.

$$\langle \Delta \epsilon \rangle_{\Omega} = \Delta \epsilon_u + (\Omega L)^{-1} \Delta \delta_f \quad (3)$$

국소화영역 ΩL 에 대한 평균등가탄성계수 \bar{E}_{Ω} 는 부재의 평균응력증분 $\langle \Delta \sigma \rangle_{\Omega}$ 와 평균 변형률 증분 $\langle \Delta \epsilon \rangle_{\Omega}$ 의 관계식으로 얻어지며 불연속면에서의 균열개구면변위를 고려한 국소화영역에서의 평균등가탄성계수는 다음과 같다.

$$\bar{E}_{\Omega} = \frac{D_f E_u}{D_f + (\Omega L)^{-1} E_u} \quad (4)$$

여기서 D_f 는 인장연화곡선의 기울기이다.

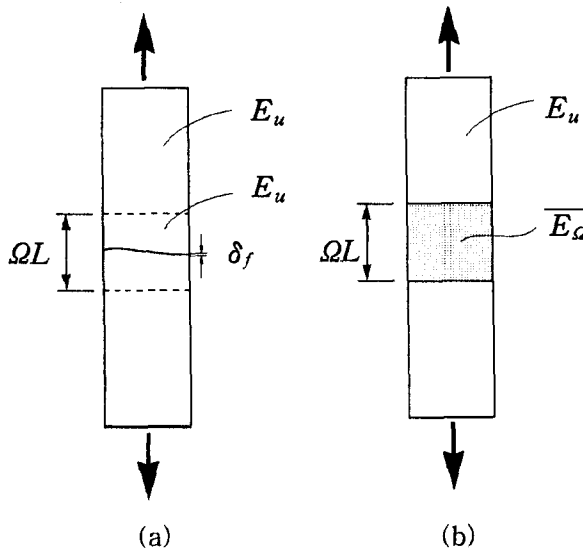


그림 4 일축인장에서 국소화영역을 고려한 평균화기법 적용 모형

윗식으로 구해진 평균등가탄성계수를 갖는 국소화영역과 탄성제하가 일어나는 비국소화영역에 대해 평균화기법을 적용하면 전 부재에 대한 평균등가탄성계수 E^{**} 를 구할 수 있다.

$$E^{**} = \frac{D_f}{\frac{D_f}{E_u} + \frac{1}{L}} = \frac{LD_f E_u}{D_f L + E_u} \quad (5)$$

식(5)로부터 인장하중하의 평균등가탄성계수는 시편의 크기효과를 나타내는 시편길이 L 이 포함되어 있으나 국소화영역의 크기 ΩL 에 무관함을 알 수 있다. 또한 식(2.22)는 국소화영역을 고려치 않고 완전국소화 모델로 구한 평균등가탄성계수¹⁾와 같음을 알 수 있다. 한편 비국소화영역의 탄성계수 E_u 는 국소화영역의 균열개구면변위의 증가로 인한 국소화영역의 국소화와 함께 진행되므로 E^{**} 로 대체하면 수정된 평균등가탄성계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{E}^{**} = \frac{D_f}{\frac{D_f}{E^{**}} + \frac{1}{L}} = \frac{LD_f E_u}{2E_u + LD_f} \quad (6)$$

4. 평균등가탄성계수를 사용한 해석

유도된 평균등가탄성계수를 검증하기 위하여 일축압축거동에 대해서는 van Mier의 실험결과²⁾와 비교하였고, 일축인장거동에 있어서는 Shah와 Gopalaratnam의 실험결과³⁾와 비교하였다. 변형을 국소화 거동에 따른 크기효과를 재현할 수 있는지 검증하기 위해 동일한 국소화영역의 크기를 갖으나 시편의 길이 H 가 50mm, 100mm, 200mm일 때에 대해서 수치해석을 실시하였다. 일축압축에 적용 시킴에 있어서 국소화영역의 거동은 시편의 전 영역에서 소성변형이 발생하는 경우의 실험치를 토대로 만들어진 Saenz의 구성방정식⁴⁾을 따른다고 가정하였다. 그림 5는 해석결과와 실험결과의 비교를

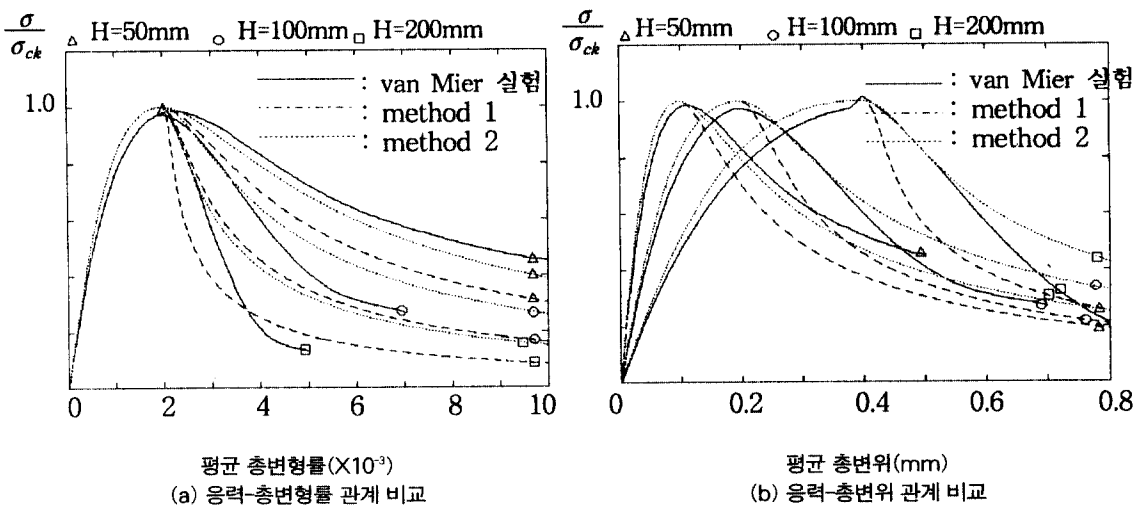


그림 5 일축압축에 대한 해석 결과와 실험값과의 비교

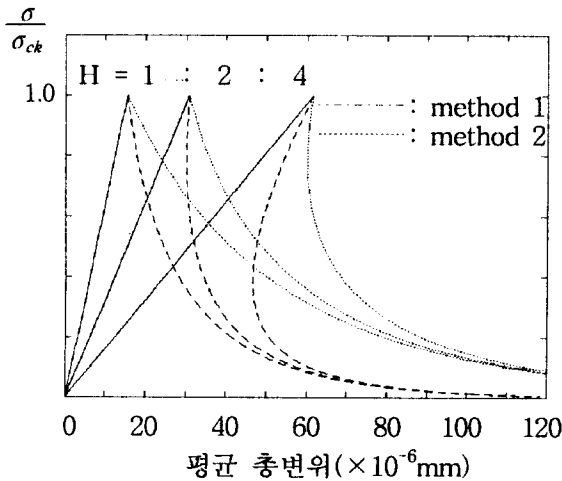


그림 6 일축인장에서 부재길이에 따른 수치해석 결과

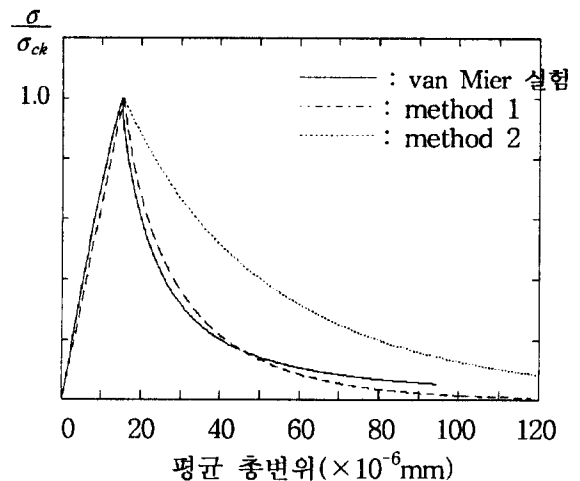


그림 7 일축인장에 대한 수치해석 결과와 실험값의 비교

보여준다. 그림에서 평균등가탄성계수를 이용한 경우를 method 1, 수정된 평균등가탄성계수를 이용하는 경우를 method 2로 표시하였다. 두가지 방법 모두 시편의 길이가 길어짐에 따라 기울기가 음의 기울기가 커지는 크기효과를 재현할 수 있음을 알 수 있다.

일축인장의 경우 평균화기법을 적용시켜 얻은 식(5)(method 1)과 식(6)(method 2)를 적용시키고 시편의 길이 H를 1 : 2 : 4의 비로 변화시켜 해석을 실시하였다. 수치해석결과는 그림 6에 도시되어 있다. 두가지 방법 모두 시편의 길이가 길어짐에 따라 연화기울기가 음으로 증가하는 변형률국소화에 따른 크기효과를 재현할 수 있음을 알 수 있으나 수정된 평균등가탄성계수가 연화의 정도를 과도하게 평가함을 알았다.

5. 변형률 국소화현상의 유한요소해석

변형률 국소화현상에 의해 불균등거동이 발생하는 콘크리트 시편 내에서의 변형률 국소화거동을 유한요소해석하였다. 그림 7에서처럼 시편 중앙의 국소화영역에서는 변형률의 집중에 의한 소성변형의 증가가 발생하고, 나머지 부분인 비국소화영역에서는 손상제하거동이 발생하는 것으로 유한요소 모델링하였다.

6 변형률국소화의 유한요소해석결과

변형률 국소화현상에 의한 크기효과 및 국소화영역의 크기변화에 따른 영향을 검증하기 위해 국소화영역의 크기는 일정하나 시편의 길이가 1 : 2 : 4로 변하는 경우와 동일한 길이의 콘크리트 부재에서 국소화영역의 크기 Ω 가 0.1 : 0.2 : 0.4로 변하는 경우에 대해 유한요소해석을 수행하였다. 그림 8과 그림 9에서 볼 수 있듯이 변형률 국소화현상이 발생하는 부재의 거동에는 부재의 치수에 따른 크기효과가 분명히 발생하고 있음을 알 수 있다.

그림 10은 부재의 크기 L은 일정하고 국소화영역의 범위가 바뀌는 경우의 변형률 국소화거동에 대

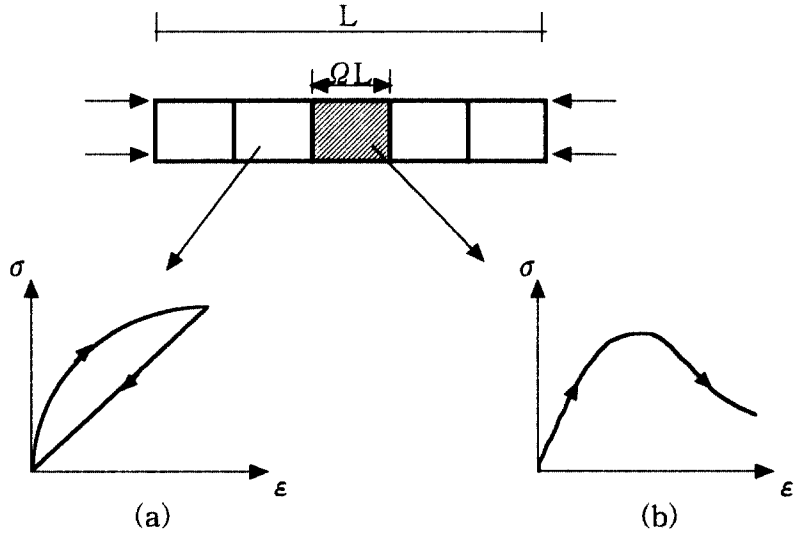


그림 7 변형을 국소화의 유한요소모델링

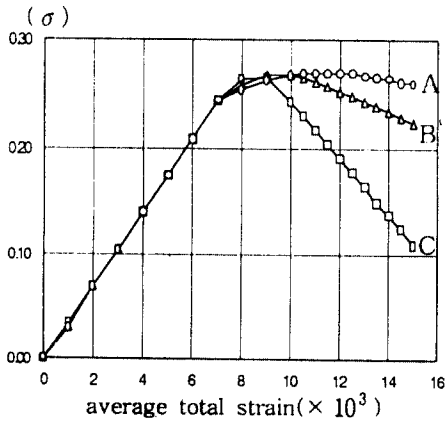


그림 8 유한요소해석에 의한 응력-변형률 그래프

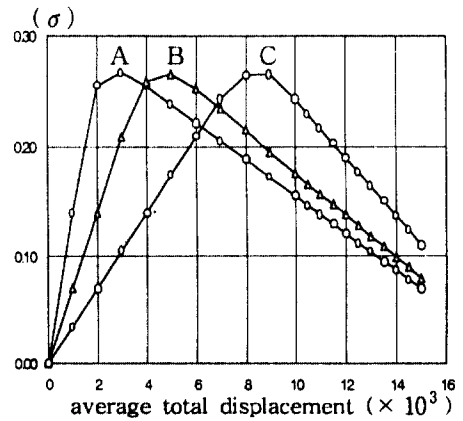


그림 9 유한요소해석에 의한 응력-총변위량 그래프

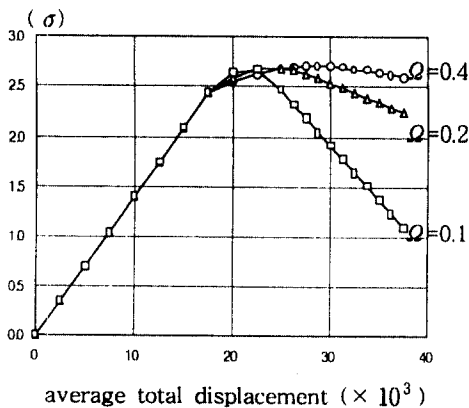


그림 10 국소화영역 크기변화에 따른 응력-총변위량 그래프

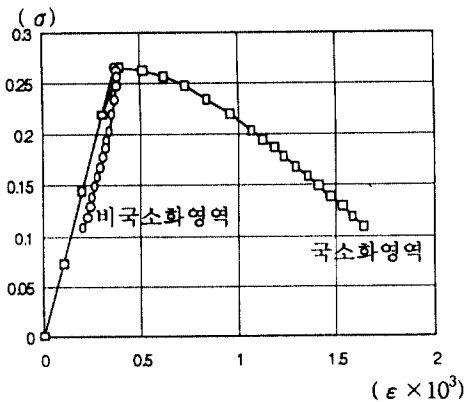


그림 11 국소화 및 비국소화영역의 응력-변형률 그래프

한 수치해석 결과를 도시한 것으로 국소화영역의 크기가 변함에 따라 극한응력이후에 상이한 응력-총 변위량의 관계를 해석해법을 알 수 있다.

개발된 알고리즘에 의한 유한요소해석의 각 하중단계에 대해 국소화영역과 비국소화영역의 요소 응력과 요소 변형률을 그림 11에 도시하였다. 극한응력이후 국소화영역에서는 연화현상이 발생하고, 비국소화영역에서는 손상제하가 일어나는 변형률 국소화현상이 정확하게 모델링되었음을 알 수 있다.

6. 결 론

콘크리트 변형률국소화 모형 및 해석 연구 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 일축압축과 일축인장 하중에 의하여 변형률국소화가 발생하는 콘크리트 부재를 국소화영역과 비국소화영역으로 구분하여 모델링하는 통일된 모형을 제안하였다. 제안된 모형에 미시역학적 평균화기법을 사용하여 평균등가탄성계수 및 수정된 평균등가탄성계수를 구하였으며 실험결과와 비교하여 검증하였다.
- 2) 변형률 국소화현상이 발생하는 콘크리트 일축 압축부재를 연화거동을 나타낼 수 있는 소성모델 유한요소에 의한 국소화영역과 비선형탄성-손상모델 유한요소에 의한 비국소화영역으로 구분하여 모델링하였고 콘크리트 시편의 크기 및 국소화영역의 크기에 따른 유한 요소해석을 수행하였다.
- 3) 유한요소해석 결과 개발된 알고리즘에 의한 유한요소프로그램은 부재 및 국소화영역의 크기효과를 포함하는 콘크리트의 일축압축하중에 의한 변형률 국소화현상을 재현할 수 있음을 보였다.

참고문헌

1. 송하원, 서철, "콘크리트의 변형률 국소화에 관한 연구", 콘크리트학회 논문집, Vol. 8, 1996, pp. 129-138.
2. van Mier, J. G. M., "Fracture of Concrete under Complex Stress", Heron, Heron Publication, Vol. 31, No. 3, 1986.
3. Shah, S. P. and Gopalaratnam, V. S., "Softening Response of Plain Concrete in Direct Tension", ACI Journal, Vol. 82, 1985, pp. 310-323.
4. Saenz, L. P., "Discussion of Equation for the Stress-Strain Curve by Desai and Krishman", ACI Journal, Vol. 61, 1964, pp. 1229-1235.