
콘크리트 변형률 국소화의 통일된 모형

A Unified Model of Strain Localization in Concrete



송하원*

Song, Ha-Won



김인순 **

Kim, In-Soon

ABSTRACT

Strain localization of concrete is a phenomenon such that the deformation of concrete is localized in finite region along with softening behavior. In this paper, a unified micromechanics-based model which can be applied to both tensile and compressive member of concrete is suggested for the analysis of the strain localization of concrete. Effective elastic moduli and modified effective elastic moduli of concrete under strain localization are obtained by applying the micromechanical averaging techniques to the model. From the comparison of the analysis results obtained from different sizes of the localized zones and the concrete members with experimental data, it is shown that the models in this paper can be applied to the analysis of the strain localization of concrete.

Keywords : concrete, strain localization, a unified model, size effect, effective elastic moduli, modified effective elastic moduli

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수

** 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 12월 30일까지 학회로 보내주
시면 1998년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

변형률국소화 현상은 콘크리트의 연화거동에 수반되어 변형이 국부적으로 집중되는 현상이다. 압축실험으로 부터 얻어지는 보통콘크리트의 거동은 최대응력의 약 30%까지는 선형 탄성거동을 나타내며, 탄성거동 이후 최대응력까지 비선형의 경화가 일어나고 최대응력 이후에는 변형률이 증가하는 동안 응력이 감소하는 변형률 연화현상을 나타낸다. 일반적으로 최대응력까지는 일축압축하중상태이거나 일축인장하중상태일 때 모두 시편 전체에 걸쳐 균등한 변형률분포가 발생한다. 그러나 최대응력 이후 일축압축하중상태의 콘크리트 부재의 경우 연화거동에 수반되어 변형률이 일정한 크기의 영역으로 국소화된다. 이때 국소화영역에서는 응력의 감소에도 불구하고 변형률이 증가하며, 그 외의 영역에서는 변형률이 감소하는 거동이 나타난다. 또한 최대응력 이후 일축인장하중상태의 콘크리트 부재에서는 인장하중 방향으로 수직인 방향으로 미세균열이 발생하고 일축압축상태의 경우에 비해 매우 작은 크기의 국소화 영역을 가지며 종곡에는 국소화된 불연속면이 발생하여 파괴에 이른다.

본 논문에서는 콘크리트 인장 부재와 콘크리트 압축 부재에 대하여 변형률국소화 거동을 통일되게 모델링하는 모형을 제안하고, 제안된 모형에 미시역학적 평균화 기법을 사용하여 평균등가탄성계수와 수정된 평균등가탄성계수를 구하였으며, 일축압축하중과 일축인장하중에서의 콘크리트의 변형률국소화현상을 재현하였다. 또한 변형률국소화현상이 관찰된 기존의 일축압축실험과 일축인장실험으로부터 얻은 결과와 본 연구의 해석결과를 비교분석함으로써 본 연구에서 제안한 모형의 적용가능성을 검증하였다.

2. 콘크리트의 변형률국소화 거동

Fig. 1은 강도가 다른 여러 콘크리트의 일축압축 실험으로부터 얻어진 응력-변형률 곡선을 보여준다.¹⁾ 그림에서 보듯이 콘크리트에서는 최대응력 이후에 변형률이 증가하는 동안 강도가 감소하는 변형률 연화현상이 발생한다. 일축압축실험에서 변형률 연화현상이 일어나는 콘크리트 원주형 시편의 일정 표면

에서의 변형률은 시편의 변위를 측정하여 얻은 총변형률과 다르게 측정되었으며, 변형이 계속하여 진행되는 동안에 시편의 일부분에서는 변형률의 감소(제하)가 측정되었다.²⁾ 국소변형률과 총변형률간의 불일치는 최대하중이후에서 콘크리트 시편에 변형이 불균등하게 일어난다는 것을 증명해 준다.

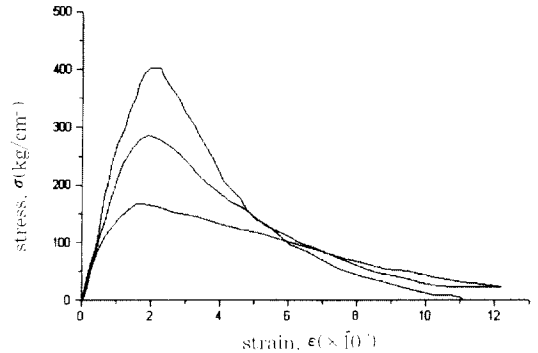
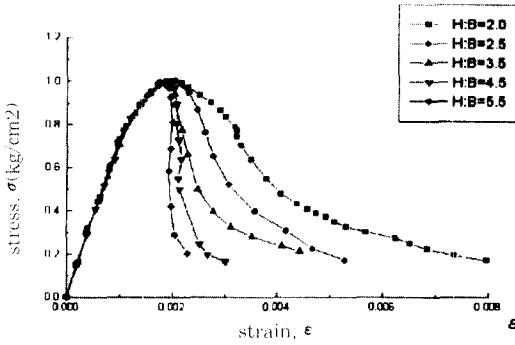
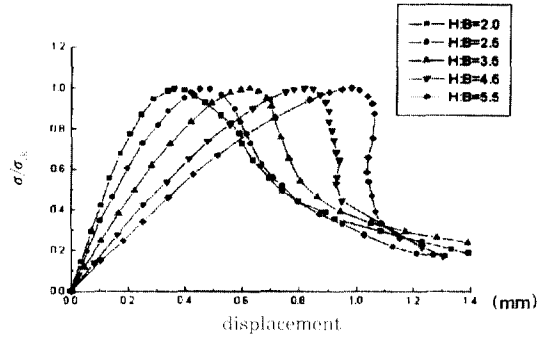


Fig. 1 Uniaxial compressive stress-strain curves for concrete¹⁾

시편 양단의 변위차를 측정하는 보통의 방법에 의해 측정된 하중-변위 데이터로부터 산정하여 구한 응력과 변형률 곡선에서 보여주는 변형률 연화는 엄밀한 재료 특성이 아니며 시편의 구조적 특성이라고 할 수 있다. 동일한 콘크리트로 제조하고 공시체의 직경에 대한 길이비(H/D)를 2.0에서 5.5까지 변화시킨 시편의 일축압축실험으로부터 얻은 응력과 변형률관계는 실험결과는 Fig. 2(a)와 같다.³⁾ 그림에서 축방향 응력은 압축강도(σ_c)에 대한 무차원항으로 표시되어 있다. 최대응력 이전에서의 응력-변형률 곡선들은 시편의 길이에 상관없이 모두 동일하나 최대응력 이후에서는 시편 길이가 감소함에 따라 연성이 증가하는 것을 보여준다. 즉 응력-변형률 곡선의 기울기의 절대값이 시편 길이에 따라 감소하는 크기효과가 나타난다. 반면 같은 실험 결과를 응력-변형률의 향이 아닌 응력-변위의 향으로 도시하면 Fig. 2(b)와 같으며 시편의 길이가 짧을수록 큰 연성이 나타나지만, 최종변위는 시편의 길이에 관계없이 거의 같아지는 것을 알 수 있다. 모든 시편의 최종변위가 동일하다는 것은 일축압축실험에서 콘크리트시편의 파괴가 시편의 길이에 상관없이 일정한 크기의 영역에 의해



(a) Typical stress-strain behaviors for a range of height to diameter ratios



(b) Typical stress-displacement behaviors for a range of height to diameter ratios

Fig. 2 The results of uniaxial compression test of concrete reported by Jansen and Shah⁴

지배된다는 것을 보여준다.

일축압축시험에서 변형률국소화 현상을 설명하기 위해 전단피 효과를 고려할 수 있다. Fig. 3(a)와 3(b)에서와 같이 길이가 다른 두 시편(H_1, H_2)에서 최대응력 이후 부분에서 변형이 동일한 크기(h)의 전단피에 국소화된다고 가정하면 Fig. 2(b)에서처럼 동일한 최대변형 d 가 얻어지려면 전단피 이외의 영역에서는 길이에 따라 다르게 얻어진 최대하중이전의 변형률 최대하중이후부터 최종변형이 얻어질 때까지 탄성적으로 재하(unloading)하는 거동이 일어나야 함을 알 수 있다. 한편 최대응력 이후 평균변형

률은 시편의 길이로부터 산정되므로 짧은 시편에서는 큰 변형률이 얻어지고, 긴 시편에서는 작은 변형률이 얻어진다($\epsilon_1 > \epsilon_2$). 이것이 응력-변형률 곡선의 연화 영역에서 시편의 길이에 따라 기울기가 다른 원인이다. 그러나 길이가 다른 콘크리트 시편일지라도 동일한 크기의 국소화 영역을 갖는 국소화 영역에서의 변형률은 유일한 값($\epsilon_f = \epsilon'_f$)을 갖는다. 즉 최대하중 이후에 콘크리트 시편에 발생한 변형률 국소화 현상 때문에 변위 측정값으로부터 직접 변환시킨 변형률은 시편길이에 걸친 평균값이며 이 평균값은 시편 크기에 의존하게 된다.

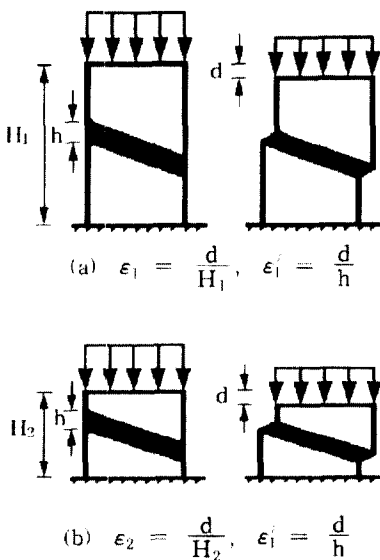
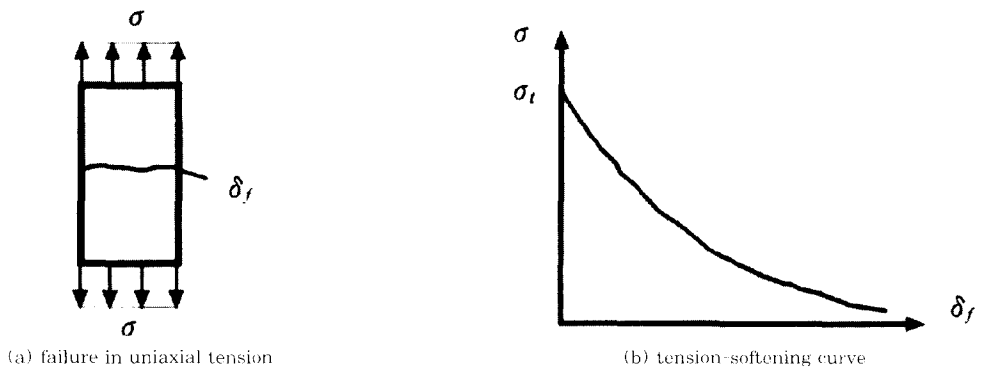
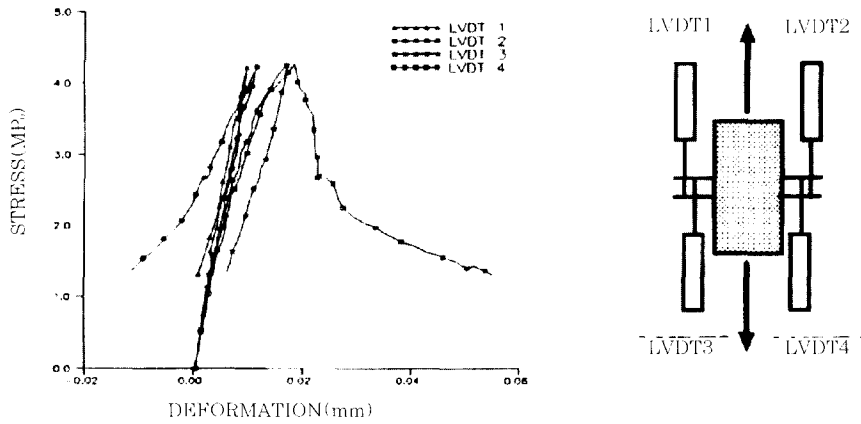
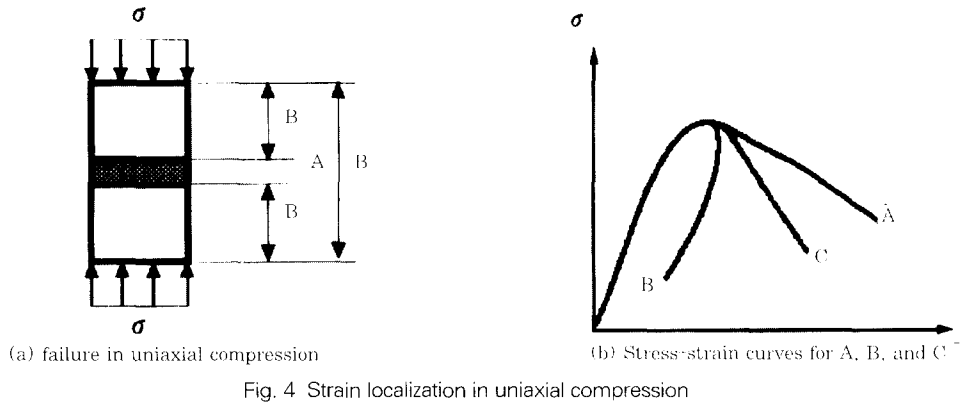


Fig. 3 Strain localization in a shear band



나타나고 있음을 보여준다. 시편의 각기 다른 위치에서 변위를 측정해서 각각의 길이로부터 변형률을 산정하여 응력-변형률 곡선을 구하면 압축에서와 같이 Fig. 4(b)의 C처럼 연화현상이 일어남을 알 수 있

다. 그러나 인장의 경우 압축에서 관찰된 일정한 크기의 국소화 영역의 존재는 관찰하기 어려우나 국부적으로 발생한 미세균열들이 하나로 합쳐져 이루어지는 균열이 발생하여, 시편의 총변위는 Fig. 6(a)에

서처럼 이 균열에 의해 지배를 받게 된다. 이 때 균열 개구면의 전달응력 σ 와 균열개구면변위 δ 와의 관계곡선을 인장연화곡선(Fig. 6(b))이라 한다.

3. 변형률국소화 현상의 모형화

본 연구에서는 압축과 인장에 대해서 변형률국소화 현상을 통일되게 모형화하기 위하여 최대응력에서부터 변형률국소화 현상이 발생하는 것으로 고려하여 일축압축하중과 일축인장하중을 받고있는 전체 길이 L 인 콘크리트 부재에 일정한 크기(ΩL)의 국소화영역을 갖는 것으로 모형화하였다. 즉, 변형률국소화 현상이 일어나는 콘크리트 부재를 국소화영역과 비국소화영역으로 나누었으며, 국소화영역에서는 변형률의 집중에 의해서 소성변형이 증가하고, 나머지 부분인 비국소화영역에서는 탄성재하가동이 발생하는 것으로 이상화하여 모형화를 실시하였다. 국소화현상은 최대응력 이후에서 발생한다고 가정하였다. 즉,

$$L = \Omega L + (1 - \Omega)L \quad (1)$$

평균화기법에 의하여 최대응력 이후의 변형증분 및 변형률증분은 다음과 같이 산정된다.

$$\begin{aligned} \Delta u &= \int_l \Delta \epsilon(x) dx \\ &= \int_{\Omega L} \Delta \epsilon_p dx + \int_{(1-\Omega)L} \Delta \epsilon_u dx \end{aligned} \quad (2)$$

$$\langle \Delta \epsilon \rangle_l = \Omega \Delta \epsilon_p + (1 - \Omega) \Delta \epsilon_u \quad (3)$$

여기서, Δu 는 총변형증분, $\Delta \epsilon(x)$ 는 총변형률증분, $\Delta \epsilon_p$ 는 국소화영역의 변형률증분, Ω 는 비국소화영역의 변형률증분이다. 이 때 연화에 의한 국소화영역 계수 Ω 는 $0 \leq \Omega \leq 1$ 의 범위를 가지게 된다.

따라서, 전 부재에 대한 평균등가탄성계수는 부재의 평균응력증분 $\langle \Delta \sigma \rangle_l$, E^* 와 평균변형률증분 $\langle \Delta \epsilon \rangle_l$ 으로부터 구해진다. 즉,

$$\langle \Delta \sigma \rangle_l = E^* \langle \Delta \epsilon \rangle_l \quad (4)$$

3.1 일축압축상태의 국소화거동의 정식화

Fig. 7에 전체길이가 L 이고, 변형률국소화영역의 크기가 ΩL 인 일축압축하중을 받는 콘크리트 시편을 도시하였다. 영역 ΩL 에서는 응력집중에 의한

소성변형이 발생하며 그 외의 영역 $(1 - \Omega)L$ 에서는 탄성재하가 발생하는 것으로 이상화하여 모든 지배방정식을 최대치에 대한 증분형식으로 표시하여 정식화하였다.

$\Delta \sigma_p$ 는 국소화영역의 응력증분이고, $\Delta \sigma_u$ 는 비국소화영역의 응력증분이라 할 때, 국소화영역 및 비국소화영역의 응력-변형률 관계식은 다음과 같이 산정된다.

$$\Delta \sigma_p = E_p \Delta \epsilon_p \quad (5)$$

$$\Delta \sigma_u = E_u \Delta \epsilon_u \quad (6)$$

여기서, E_p 는 국소화영역의 탄성계수이며, E_u 는 비국소화영역의 탄성재하계수이다. 즉,

$$E_p = E_p (\Delta \epsilon_p) < 0 \quad (7)$$

$$E_u = E_u (\Delta \epsilon_u) > 0 \quad (8)$$

역학적 평형을 이루기 위해서 부재의 평균응력증분량은 국소화영역의 응력 증분량 및 비국소화영역의 응력 증분량과 동일한 값을 가지므로 (식(3)~(6))으로부터 $\langle \Delta \sigma \rangle_l = \Delta \sigma_p = \Delta \sigma_u$, 평균등가 탄성계수는 다음과 같다.

$$E^* = \frac{E_p}{\Omega + (1 - \Omega) \frac{E_p}{E_u}} \quad (9)$$

식(9)에는 국소화영역의 크기효과를 나타내는 계수 Ω 가 포함되어 있음을 알 수 있으며, 이 때 $k = -E_p / E_u$ 라 정의하면, 평균등가탄성계수는 다음과 같다.

$$E^* = \frac{E_p}{(1 + k)\Omega - k} \quad (10)$$

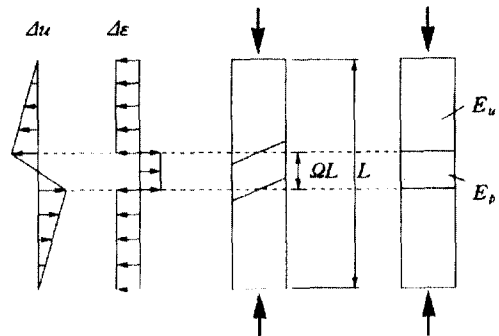


Fig. 7 Localization model in uniaxial compression

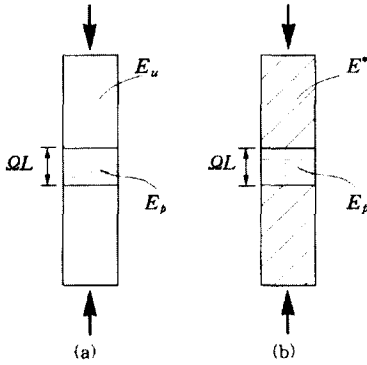


Fig. 8 Compressive model using modified effective elastic modulus

Fig. 8(b)에서와 같이 부재의 비국소화영역의 재료응답은 최대 하중이후에는 연화 거동을 따라야만 한다. 탄성제하가 일어난다고 가정한 비국소화 영역의 탄성계수 E_u 는 비국소화영역의 관성제하가 변형률국소화영역의 국소화와 함께 진행되므로 self consistent 개념⁷⁾을 이용하여 비국소화영역의 탄성계수를 E^* 로 치환할 수 있으며, 따라서 식(9)에 의해 수정된 평균등가탄성계수는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \bar{E}^* &= \frac{E_p}{\Omega + (1-\Omega)\frac{E_p}{E^*}} \\ &= \frac{E_p E_u}{\Omega E_u + (1-\Omega)[\Omega E_u + (1-\Omega)E_p]} \end{aligned} \quad (11)$$

3.2 일축인장상태에서의 모형화

Fig. 9에서와 같이 인장을 받고있는 콘크리트 부재도 국소화 영역 ΩL 이 존재하는 일차원 모형을 생각한다. 인장 부재의 경우는 압축의 경우와 다르게 국소화영역 안에 최대응력 이후의 변형률집중으로 인한 손상이 균열개구변위 δ_f 로 표시되는 완전한 불연속면으로 존재한다. 평균화기법에 의하여 최대응력 이후 국소화영역 ΩL 내에서 평균변형률증분은 다음과 같이 쓸 수 있다.⁸⁾

$$\langle \Delta \epsilon \rangle_{\Omega} = \Delta \epsilon_u + (\Omega L)^{-1} \Delta \delta_f \quad (12)$$

국소화영역 ΩL 에 대한 평균등가탄성계수 \bar{E}_{Ω} 는 부재의 평균응력증분 $\langle \Delta \sigma \rangle_{\Omega}$ 과 평균변형률증분 $\langle \Delta \epsilon \rangle_{\Omega}$ 의 관계식으로 얻어진다. 즉,

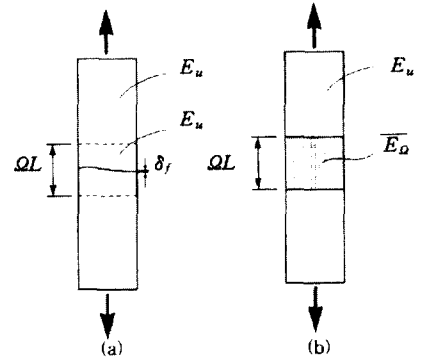


Fig. 9 Application of homogenization technique in localized zone

$$\langle \Delta \sigma \rangle_{\Omega} = \bar{E}_{\Omega} \langle \Delta \epsilon \rangle_{\Omega} \quad (13)$$

여기서 균열개구면변위를 고려한 국소화영역에서의 평균등가탄성계수는 다음과 같이 유도된다.¹⁰⁾

$$\bar{E}_{\Omega} = \frac{D_f E_u}{D_f + (\Omega L)^{-1} E_u} \quad (14)$$

여기서 D_f 는 인장연화곡선의 기울기이다.

윗식으로 구해진 평균등가탄성계수를 갖는 국소화영역과 탄성제하가 일어나는 비국소화영역에 대해 평균화기법을 적용한 식(9)를 사용하면 전 부재에 대한 평균등가탄성계수 E^* 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} E^* &= \frac{D_f}{\frac{D_f}{E_u} + \frac{1}{L}} \\ &= \frac{LD_f E_u}{D_f L + E_u} \end{aligned} \quad (15)$$

따라서, 전 부재에 대한 평균등가탄성계수 E^* 는 부재의 평균응력증분 $\langle \Delta \sigma \rangle_l$ 과 평균변형률증분 $\langle \Delta \epsilon \rangle_l$ 의 관계식으로 표현된다. 즉,

$$\langle \Delta \sigma \rangle_l = E^* \langle \Delta \epsilon \rangle_l \quad (16)$$

식(15)로부터 인장하중하의 평균등가탄성계수는 시편의 크기효과를 나타내는 시편길이 L 이 포함되어 있으나 결국 국소화영역의 크기 ΩL 에 무관함을 알 수 있다. 또한 식(15)는 국소화영역을 고려치 않고 완전국소화 모델로 구한 평균등가탄성계수와 같음을 알 수 있다.¹⁰⁾ 한편 비국소화영역의 탄성계수 E_u 는 비국소화영역의 탄성제하가국소화영역의 균열개구면 변위의 증가로 인한 국소화영역에서의 국소화와 함

계 진행되므로 E^* 로 대체하여 평균등가탄성계수를 구할 수 있다. 따라서 수정된 평균등가탄성계수는 다음 식(17)과 같다.(Fig. 10)

$$\begin{aligned} \bar{E} &= \frac{D_f}{\frac{D_f}{E^*} + \frac{1}{L}} \\ &= \frac{LD_f E_u}{2E_u + LD_f} \end{aligned} \quad (17)$$

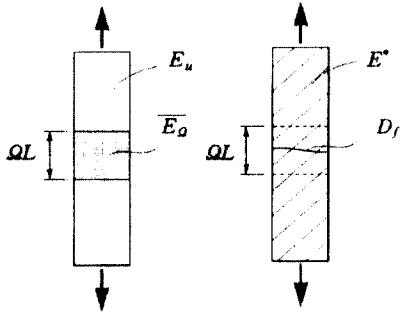


Fig. 10 Tensile model using modified effective elastic modulus

4. 제안식과 실험결과 비교

유도된 평균등가탄성계수들을 검증하고 국소화영역의 크기와 시편의 크기에 의한 크기효과를 규명하기 위하여 일축압축거동에 대해서는 van Mier의 실험결과²⁾와 비교하였고, 일축인장거동에 있어서는 Shah와 Gopalaratnam의 실험결과³⁾와 비교하였다.

4.1 일축압축거동

앞 절에서 유도한 식(9)의 평균등가탄성계수와 식(11)의 수정된 평균등가탄성계수를 이용한 수치해석결과와 van Mier의 실험결과를 비교하였다. 변형률 국소화 거동에 따른 크기효과를 재현할 수 있는지 검증하기 위해 시편의 길이 L 이 50mm, 100mm, 200mm 일 때에 대해서 수치해석을 실시하였다. 일축압축에 적용시킴에 있어서 국소화영역의 거동은 시편의 전 영역에서 소성변형이 발생하는 경우의 실험치를 토대로 만들어진 Saenz의 구성방정식¹⁾을 따른다고 가정하였으며, 비국소화영역에서는 탄성제하를 고려하였다. Saenz의 구성방정식은 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{E_o \varepsilon}{1 + (E_o \frac{\varepsilon_c}{\sigma_{ik}} - 2) (\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}) + (\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c})^2} \quad (18)$$

여기서, L 는 초기탄성계수이며 van Mier의 일축 압축실험결과로부터 48,000MPa를 사용하였다. 탄성제하계수는 초기탄성계수의 90%라고 가정하여 적용시켰으며, 평균압축강도는 약 40MPa이고, 이 때의 변형률은 0.002이다.

국소화영역의 크기는 국소화영역이 골재중간에서 경계면을 이루는 것을 방지하기 위하여 굵은골재최대치수의 정수배로 존재한다고 가정하였다. 이러한 가정은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Omega = \frac{NG_{\max}}{L} \quad (19)$$

여기서 N 은 1 이상의 정수이며, G_{\max} 는 굵은골재최대치수이다. 수치해석은 동일한 크기의 국소화영역을 갖는 크기가 다른 시편의 크기효과를 알아보기 위해 N 값이 각각 1, 2, 3일 때 시편의 길이를 변화시켜 결과를 산출하여 Fig. 11부터 Fig. 13에 도시하였는데, 연화기울기가 가장 완만한 $L = 50\text{mm}$ 인 시편에 대한 것, 가장 급한 것이 $L = 200\text{mm}$ 인 시편에 대한 것이고, 중간 것이 $L = 100\text{mm}$ 인 시편에 대한 것이다. 식(9)의 평균등가탄성계수를 이용한 경우를 method 1, 식(11)의 수정된 평균등가탄성계수를 이용하는 경우를 method 2로 표시하였다. 두가지 경우 모두 시편의 길이가 길어짐에 따라 기울기가 음의 기울기가 커지는 크기효과를 실험결과와 일치되게 재현할 수 있음을 알 수 있다. Method 1을 사용하면 $N = 3$ 인 경우가 실제의 실험결과에 가장 근접함을 알 수 있고, method 2를 적용시키면 $N = 1, N = 2$ 인 경우에 method 1보다 실험결과와 유사한 거동을 나타낸다. 즉, 동일한 시편 길이에 국소화영역의 크기가 작아질수록 수정된 평균등가탄성계수식이 국소화거동을 잘 재현할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 국소화 영역의 크기에 따른 국소화 거동을 해석하기 위해 Fig 14부터 Fig 16에는 시편의 길이를 각각 50mm, 100mm, 200mm로 고정시키고 N 값이 1, 2, 3인 경우를 비교하였다. 시편의 길이가 50mm인 경우는 $N = 3$ 일 때 van Mier의 실험값과 가장 근접하게 거동을 재현하였으며, 시편의 길이가 100mm와 200mm 일 때 post

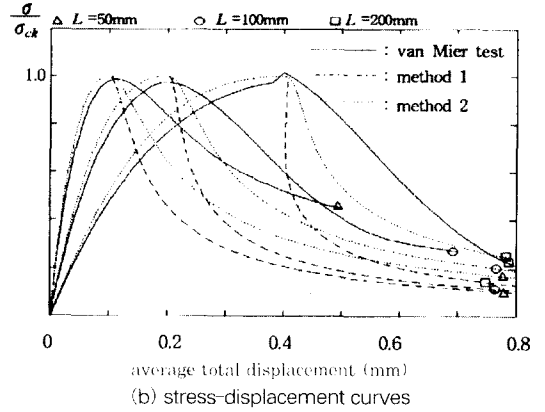
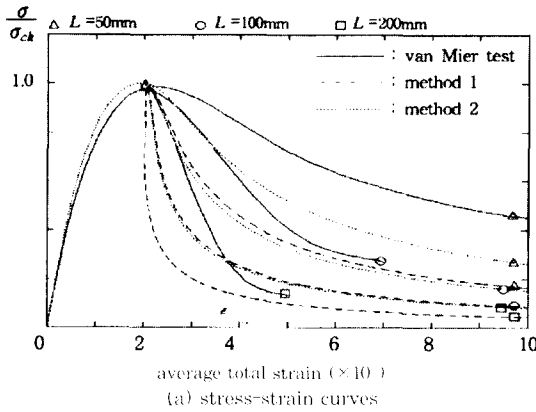


Fig. 11 Simulation results of uniaxial compression for $N = 1$

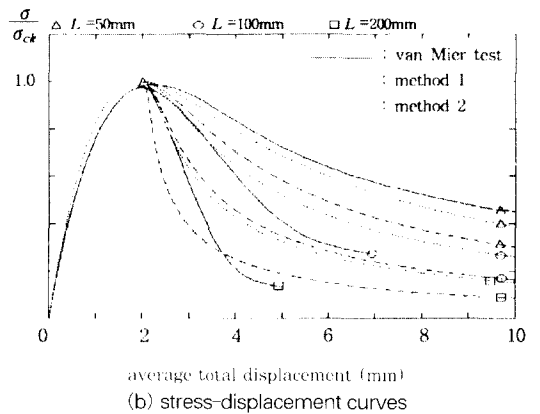
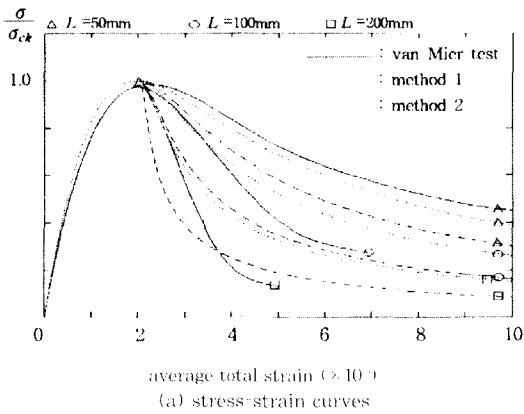


Fig. 12 Simulation results of uniaxial compression for $N = 2$

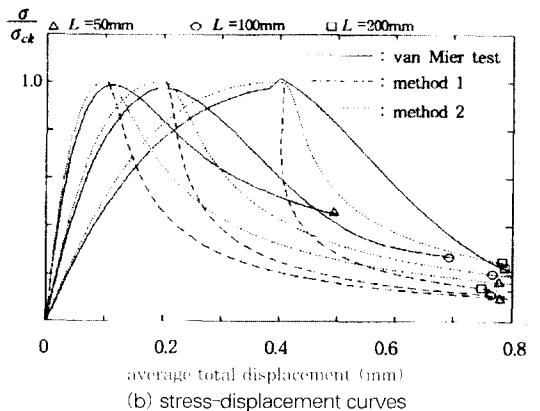
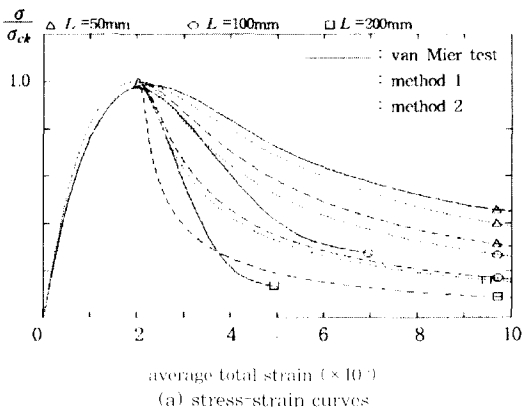


Fig. 13 Simulation results of uniaxial compression for $N = 3$

peak의 초기에는, $N = 2$ 이면서 method 2에 의한 해석이 종국에는 method 1에 의한 해석이 실험결

과를 잘 예측함을 알 수 있다.

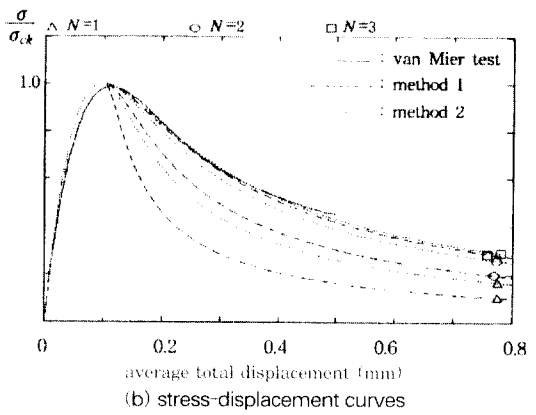
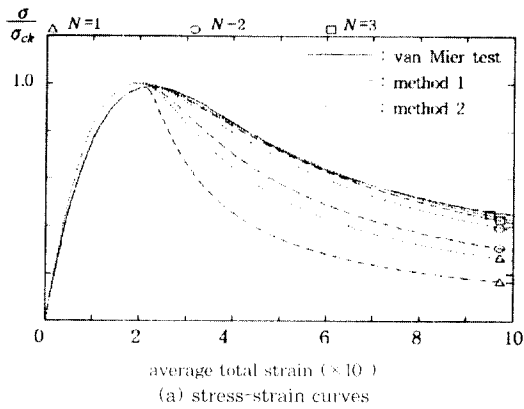


Fig. 14 Simulation results of uniaxial compression for $N = 1$

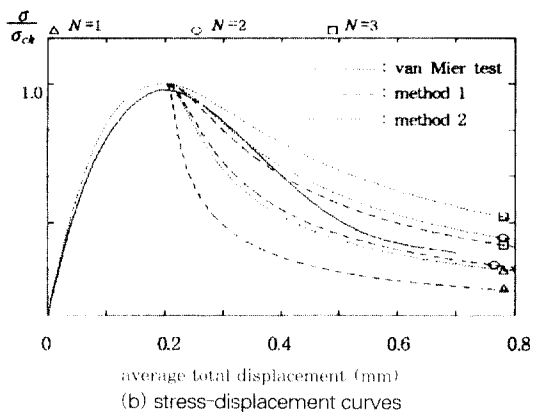
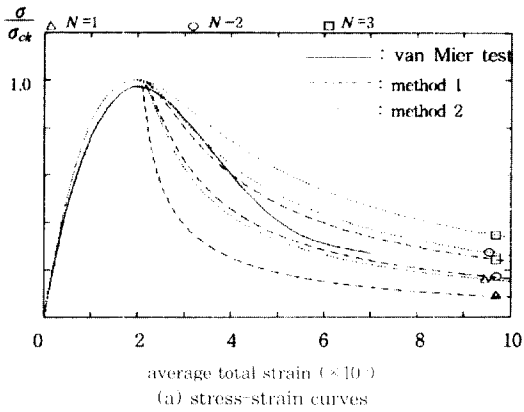


Fig. 15 Simulation results of uniaxial compression for $N = 2$

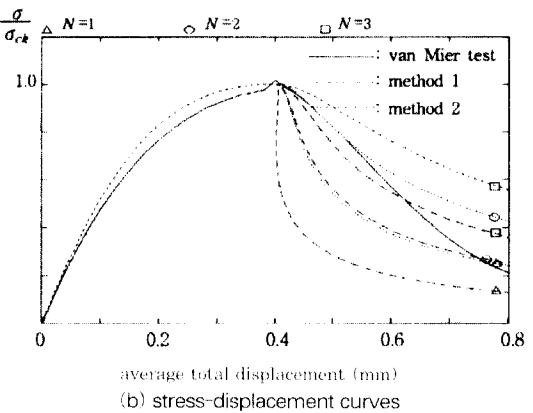
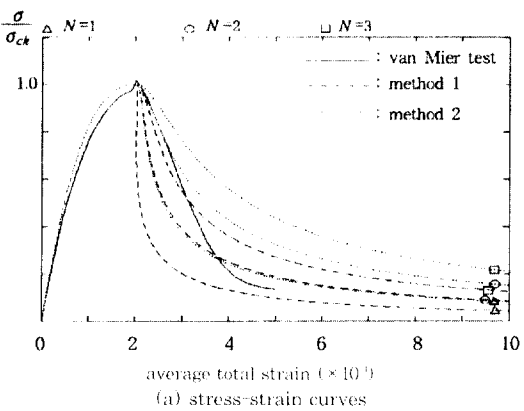


Fig. 16 Simulation results of uniaxial compression for $N = 3$

4.2 일축인장거동

앞 절에서 일축인장의 경우 평균화기법을 적용시

켜 얻은 식(15)와 식(17)을 적용시키고 시편의 길이 L 의 비를 1 : 2 : 4의 비로 변화시켜 수치해석을 실시하였다. 식(15)의 평균등가탄성계수를 사용하는

경우를 method 1, 식(17)의 수정된 평균등가탄성계수를 사용하는 경우를 method 2라고 나타내었다. 일축인장에 대한 수치해석에 있어서 변수들은 Shah와 Gopalaratnam의 직접인장시험결과¹⁸⁾를 적용시켰다. 인장강도에 도달했을 때 변형률을 0.001로 고정하고 극한 이전에서는 탄성거동을 한다고 보고 극한값 이후에서는 Shah와 Gopalaratnam이 제안한 식(20)과 같은 응력-균열면변위관계를 사용하였다.

$$\frac{\sigma}{\sigma_c} = \exp[-K(2.54\delta_f)^{\lambda}] \quad (20)$$

여기서, σ 는 콘크리트 시편의 응력, σ_c 는 콘크리트의 일축압축강도, λ 는 실험에 의한 재료상수(=1.01), K 는 실험에 의한 재료상수(=1.544×10⁻³), δ_f 는 균열면변위이다. 국소화상태의 인장연화곡선의 기울기 D_f 는 $d\sigma/d\delta_f$ 를 사용하였다. 실험결과로부터 탄성계수 D_f 는 33,500MPa, 최대응력 발생시의 변형률은 120×10⁻⁶을 사용하여 수치해석

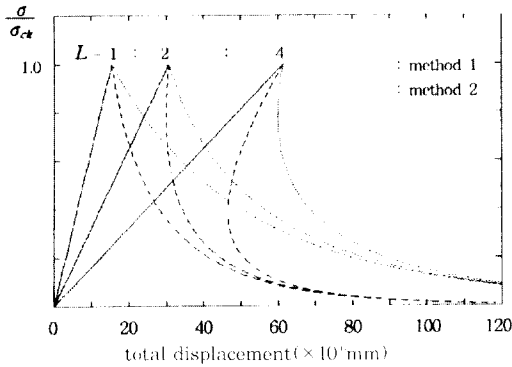


Fig. 17 Simulation results of uniaxial tension

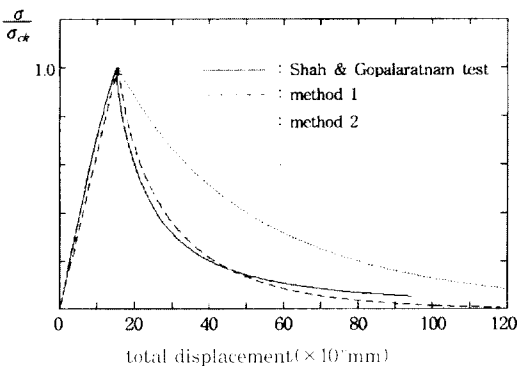


Fig. 18 Analytic prediction of stress-displacement behavior compared with experimental results

을 수행하였다.

수치해석결과는 Fig. 17과 Fig. 18에 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. 결론

콘크리트 변형률 국소화의 통일된 모형의 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 일축압축과 일축인장 하중에 의하여 변형률국소화가 발생하는 콘크리트 부재를 인장거동과 압축거동의 차이에도 불구하고 통일되게 임의의 크기를 갖는 국소화영역과 비국소화영역으로 구분하여 모델링하는 통일된 모형을 제안하였다.

2. 제안된 모형에 미시역학적 평균화기법을 사용하여 변형률국소화 거동해석에 필요한 평균등가탄성계수 및 수정된 평균등가탄성계수를 구하였다.

3. 크기가 다른 콘크리트 부재에 국소화 영역이 크기가 일정한 경우와 국소화영역의 크기가 다른 동일한 크기의 콘크리트 시편에 대하여 수치해석을 실시하여 타 연구자에 의한 실험결과와 비교분석하였으며, 비교결과로부터 본 연구의 모형이 크기효과를 포함하는 변형률국소화 거동을 타당하게 재현할 수 있음을 보였다.

감사의 글

본 연구는 95년도 연세대학교 학술연구비의 지원에 의해 일부가 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Wischers, G., "Application of Effects of Compressive Loads on Concrete", Betontech, Berlin, Nos. 2 and 3, Duesseldorf, 1978.
2. Kotsovos, M. D., "Effect of Testing Techniques on the Post-Ultimate Behaviour of Concrete in Compression", Materials and Structures, RILEM, Vol. 16, No. 91 pp. 3-12, 1985.
3. van Mier, J. G. M., "Fracture of Concrete under

- Complex Stress", Heron, Vol. 31, No. 3, 1986.
4. Jansen, D. C. and Shah, S. P., "Effect of Length on Compressive Strain Softening of Concrete", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol 123, No. 1 pp. 25-34, 1997.
 5. Li, Z. and Shah, S. P., "Localization of Microcracking in Concrete under Uniaxial Tension", ACI Material Journal, Vol. 91, No. 4, pp. 372-381 1994.
 6. 송하원, 서철, "콘크리트의 변형률 국소화에 관한 해석적 연구", 콘크리트학회 논문집, Vol. 8, pp. 129-138, 1996.
 7. Willis, J. R., "Bounds and Self Consistent Estimates for the Overall Properties of Anisotropic Composites", J. Mech. Phy. Solids, Vol. 25, pp. 185-202, 1977
 8. Shah, S. P., and Gopalaratnam, V. S., "Softening Response of Plain Concrete in Direct Tension", ACI Journal, Vol. 82, pp. 310-323, 1985.
 9. Saenz, L. P., "Discussion of Equation for the Stress-Strain Curve by Desai and Krishnan" ACI Journal, Vol. 61, pp. 1229-1235, 1964.

요 약

콘크리트의 변형률국소화는 콘크리트의 연화거동에 수반되어 변형이 국부적으로 집중되는 현상이다. 본 연구의 목적은 인장과 압축하중상태에서 콘크리트 부재에 발생하는 콘크리트 변형률 국소화 거동을 해석적으로 재현할 수 있는 통일된 모형을 제안하는 것이다.

본 논문에서는 인장과 압축에 대하여 변형률국소화가 일어나는 콘크리트 부재를 변형률 연화가 일어나는 국소화영역과 탄성재하가 발생하는 비국소화영역으로 구분하여 모델링하는 통일된 모형을 제안하였다. 또한 제안된 모형에서 미시역학적 평균화기법을 이용해 평균등가탄성계수와 수정된 평균등가탄성계수를 구하여 시편의 크기와 국소화영역의 크기에 따른 해석을 수행하였으며 기존의 실험값과 비교하였다. 연구 결과, 본 연구에서의 변형률국소화 모형이 크기효과를 포함한 콘크리트의 변형률국소화 거동 해석에 타당하게 적용될 수 있음을 보였다.

(접수일자 : 1997. 5. 16)