

비국소형 구성식을 이용한 보이드 재료의 변형 국소화 거동의 해석(I)

김영석* · 최홍석** · 임성언***
(1999년 9월 8일 접수)

Analysis of Deformation Localization of Void Material using Nlocal Constitutive Relation (I)

Y.S. Kim, H.S. Choi and S.E. Lim

Abstract

Most studies of failure analysis in ductile metals have been based on the classical plasticity theory using the local constitutive relations. These frequently yields a physically unrealistic solution, in which a numerical prediction of the onset of a deformation localization shows an inherent mesh-size sensitivity. A one way to remedy the spurious mesh sensitivity resulted in the unreasonable results is to incorporate the non-local plasticity into the simulation model, which introduce an internal (material) length-scale parameter into the classical constitutive relations. In this paper, a non-local version of the modified Gurson constitutive relation has been introduced into the finite element formulation of the simulation for plane strain compression of the visco elastic-plastic void material. By introducing the non-local constitutive relations we could successfully removed the inherent mesh-size sensitivity for the prediction of the deformation localization. The effects of non-local constitutive relation are discussed in terms of the load-stroke curve and the strain distributions across the shear band.

Key Words : Void Material, Non-local Constitutive Relation, FEM, Mesh Sensitivity

1. 서론

재료의 변형 국소화 거동의 유한요소해석에 있어서 많은 경우에 해석결과가 사용한 요소(크기 및 형상)에 강하게 의존하고 있어서 변형 국소화의 해석에 있어서는

요소선택 - 요소를 매우 작게하거나 요소형상의 대각선 방향이 전단미방향과 일치하도록 하는 등 충분한 주의를 기울이지 않으면 안된다.⁽¹⁾ 그러나 재료의 변형양식은 원래 재료의 특성 및 변형조건에 의존하는 재료고유의 것이기 때문에 이와같이 변형 국소화의 해석에 있어서 요소 의존성이 존재하는 것은 바람직하지 않다.

* 경북대학교 기계공학부
** 삼성전관
*** 경북대학교 대학원

이에 대해 Bazant⁽²⁾은 변형연화를 제어하는 파라메타를 가중함수를 이용한 평균화에 의해 비국소형식으로 일반화하여 해석결과의 요소 의존성을 성공적으로 제거하였다. 한편 Aifantis⁽³⁾은 변형 국소화 과정과 같이 변형구배가 큰 변형거동에 대해서 유동응력에 변형을 구배 의존성을 도입한 비국소형식의 구성식(nonlocal constitutive equation)을 제안하여 문제의 부적질성의 개선이 가능하다는 것을 보임과 동시에 해석적으로 국소화가 발생한 영역의 변형거동을 검토하였다. 또한 Tomita⁽⁴⁾는 열점소성 재료의 변형국소화 해석에 있어서 상당 점소성 변형률의 제2차 구배를 유동응력에 도입하여 변형률 구배가 큰 곳에서 재료의 구성식을 비국소형으로 하는 것에 의해 평면변형블록의 전단 및 인장변형하에서 변형국소화 거동해석에 있어서 유한 요소 의존성을 줄일 수 있음을 보였다. 그러나 이들 연구는 대부분 완전한 재료(perfect material)에 관한 것으로 전과과과정이 있는 연성재료나 공극을 포함한 소결재료의 모델에 자주 이용되고 있는 보이드 재료(void material)에 대해서 구성식의 비국소형이 변형국소화 거동에 미치는 영향에 대해서는 아직 명확히되어 있지 않다.

본 연구에서는 보이드를 함유한 재료의 변형국소화에 의한 파괴거동을 유한요소해석하는데 있어서 해석결과가 요소의 요소크기에 의존하지 않도록 하는 비국소형의 구성식을 도입하고, 열탄소성 재료의 변형을 해석할 수 있는 대변형 유한요소법을 정식화하였다. 또한 평면변형하에서 압축변형을 받는 보이드 재료의 변형국소화 과정을 해석하여 변형해석 결과가 유한요소 크기에 의존하지 않음을 확인하였다.

2. 기초이론

2.1 Gurson형 보이드 재료의 구성식

Gurson은 연성과파괴를 받기 전의 재료를 보이드를 갖는 재료로 근사하여 강소성 극한해석에 의해 근사적인 항복함수를 제안하였다.⁽⁵⁾ Gurson형의 구성식의 기초는 다음과 같다.

지금 보이드율이 f 인 보이드를 포함한 재료의 거시적인 Cauchy 응력을 σ_{ij} , 보이드 재료와 실질부(비압축성 모재, perfect material 또는 matrix material)의 상당응력을 각각 $\bar{\sigma}$, σ_M 라고 하면 보이드 재료의 항복함수 ϕ 는 근사적으로 다음 식으로 나타내진다.

$$\begin{aligned} & \phi(\sigma_{ij}, \sigma_M, f) \\ &= \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_M}\right)^2 + 2fq_1 \cosh\left(\frac{q_2\sigma_{kk}}{2\sigma_M}\right) \\ & \quad - (1 + q_3f^2) \\ &= 0 \\ & \bar{\sigma}^2 = \frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} \\ &= \frac{3}{2} (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \frac{\sigma_{kk}}{3}) (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \frac{\sigma_{mm}}{3}) \end{aligned} \tag{1}$$

윗식중에서 δ_{ij} 는 크로넬카 델타, q_1, q_2, q_3 는 Tvergaard가 도입한 수경파라메타이다.⁽⁶⁾

실질부의 소성일량과 보이드 재료의 소성일량이 일치한다는 가정과 거시적인 소성변형률 속도의 법선성이 성립한다고 하는 Bishop과 Hill의 이론에 따라 보이드 재료의 소성변형률 속도 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 은 식(1)의 ϕ 를 포텐셜로 하는 유동법칙으로부터 다음과 같이 나타내진다.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{ij}^p &= \frac{1}{H} m_{ij}^G m_{kl}^F \sigma_{kl}^\nabla \\ m_{ij}^G &= \frac{3\sigma'_{ij}}{2\sigma_M} + \alpha \delta_{ij} \\ m_{kl}^F &= \frac{3\sigma'_{kl}}{2\sigma_M} + \beta \delta_{kl} \\ \alpha &= \frac{f}{2} q_1 q_2 \sinh\left(\frac{q_2\sigma_{kk}}{2\sigma_M}\right) \\ \beta &= \alpha + \frac{B\sigma_M}{6} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial f} \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 σ_{ij}^∇ 는 객관성을 갖는 Cauchy응력의 Jaumann속도를 나타낸다. 또한 \bar{H} 는 보이드 재료의 거시적인 경화률이며 윗식의 역관계로 다음과 같은 구성식이 성립한다.

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^\nabla &= D_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl} \\ D_{ijkl} &= D_{ijkl}^e - \mu^* M_{ij}^F M_{kl}^G / H \\ H &= [\bar{H} + m_{rs}^F D_{rskl}^e m_{kl}^G] \\ M_{ij}^G &= D_{ijkl}^e m_{kl}^G \end{aligned} \tag{3}$$

$$M_{kl}^F = m_{rs}^F D_{rskl}^e$$

$$D_{ijkl}^e = (M_{ijkl}^e)^{-1} \\ = 2G \left\{ \frac{1}{2} (\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{jk}\delta_{il}) + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij}\delta_{kl} \right\}$$

$\mu^* = 0$ 일때는 탄성제하

$\mu^* = 1$ 일때는 소성부하

2.2 보이드 재료의 열점탄소성 구성식

본 연구에서는 보이드 재료를 대상으로 변형국소화에 미치는 변형률 속도, 온도, 의 영향과 보이드율에 따른 거시적인 탄성계수의 변화도 함께 고려할 수 있도록 종래의 Gurson의 구성식⁽⁶⁾을 일반화하였다. 또한 고속 변형에 대한 수치 계산에 있어서 시간증분을 크게하는 경우에 발생하는 수치적 불안정을 해소하기 위하여 접선계수법⁽⁷⁾을 이용하였다.

전 변형률 속도 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 를 탄성 변형률 속도 $\dot{\epsilon}_{ij}^e$, 보이드율에 의해 발생하는 거시적인 탄성계수의 변화에 의해 발생하는 변형률 속도 $\dot{\epsilon}_{ij}^f$ 와 점소성 변형률 속도 $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ 의 합으로 다음과 같이 나타낸다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^f + \dot{\epsilon}_{ij}^{vp} \quad (4)$$

여기서 탄성 변형률 속도 $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ 는 열탄성이론에 의한 응력-변형률 관계식⁽⁸⁾

$$\epsilon_{ij}^e = M_{ijkl}^e \sigma_{kl} + \alpha_E \delta_{ij} \dot{T} \quad (5)$$

$$M_{ijkl}^e = \frac{1}{E} \left\{ \frac{1+\nu}{2} (\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{jk}\delta_{il}) - \nu \delta_{ij}\delta_{kl} \right\}$$

의 속도형으로 주어진다. 식(5)를 식(4)에 대입하고 역변환하면 응력속도와 탄성변형률 속도의 다음 관계가 얻어진다.

$$\dot{\sigma}_{ij} = D_{ijkl}^e \dot{\epsilon}_{kl}^e - \beta_{ij} \dot{T} \quad (6)$$

$$\beta_{ij} = \frac{\alpha_E E}{1-2\nu} \delta_{ij} - \frac{1}{E^*} \frac{\partial E}{\partial T} \sigma_{ij}$$

한편 보이드에 의해 발생하는 거시적인 탄성계수의 변화에 의해 발생하는 변형률 속도 $\dot{\epsilon}_{ij}^f$ 는 식(5)의

M_{ijkl}^e 가 보이드율의 함수인 것에 주의하여 식(5)의 속도형을 구하는 것에 의해 얻어진다. 즉

$$\dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^f = M_{ijkl}^e \dot{\sigma}_{kl} + \alpha_E \delta_{ij} \dot{T} \\ + \frac{\partial M_{ijkl}^e}{\partial f} \dot{f} \sigma_{kl} \quad (7)$$

$$\frac{\partial M_{ijkl}^e}{\partial f} = - \frac{1}{(E^*)^2} \frac{dE^*}{df} \left\{ \frac{1+\nu}{2} (\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{jk}\delta_{il}) - \nu \delta_{ij}\delta_{kl} \right\}$$

여기서 α_E, ν 는 선팽창계수 및 포아송비, E^* 는 거시적인 탄성계수로 $E^* = E(f)$ 로

$E^* = E_o \exp(1.72f^2 - 3.4)$ 으로 주어진다. 윗식의 제3항이 탄성계수의 보이드율 의존성에 의해 생긴 변형률 속도이다.

다음에 온도에 의존한 점소성 변형률 속도 $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ 는 실질부의 상당응력 σ_M 을 온도 T 및 변형률속도 $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ 의 함수 $\sigma_M = \sigma_M(\bar{\epsilon}^{vp}, T, \dot{\epsilon}^{vp})$ 로 할 때 다음의 유능 법칙에 의해 구해진다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \eta \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ij}} = \eta \dot{p}_{ij} \quad (8)$$

따라서 탄성계수가 보이드율에 의존하는 변형률 속도, 온도의존성 보이드재료의 구성식은 식(4),(7)을 식(6)에 대입하는 것에 의해 다음과 같이 나타내진다.

$$\dot{\sigma}_{ij} = D_{ijkl}^e (\dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\epsilon}_{kl}^f) - \eta \dot{P}_{ij} - \beta_{ij} \dot{T} \\ = D_{ijkl}^e (\dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\epsilon}_{kl}^f - \dot{\epsilon}_{kl}^{vp}) - \beta_{ij} \dot{T} \quad (9)$$

$$P_{ij} = D_{ijkl}^e \dot{p}_{kl}$$

한편 고속변형 과정의 해석에 있어서 계산의 안정성을 확보하기 위하여 시간 간격 Δt 에 대한 상당 점소성 변형률 증분 $\Delta \bar{\epsilon}^{vp}$ 를 접선계수법을 이용하여 평가하였다. 지금 시간 $t, t + \Delta t$ 에 있어서 상당변형률 속도를 각각

$\bar{\epsilon}_t^{vp}, \bar{\epsilon}_{t+\Delta t}^{vp}$ 로 하면 시간간격 Δt 의 변형률증분 $\Delta \bar{\epsilon}$ 은 다음과 같이 선형보간된다.

$$\Delta \bar{\epsilon} = \Delta t [(1-\theta) \bar{\epsilon}_t^{vp} + \theta \bar{\epsilon}_{t+\Delta t}^{vp}] \quad (10)$$

파라메타 θ 는 $0 \leq \theta \leq 1$ 이다.

$\bar{\epsilon}$ 은 $\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}, T$ 에 의존하는 것으로부터 $\bar{\epsilon}_{t+\Delta t}$ 를 시간 t 에 대하여 Taylor 급수전개하고

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon}_{t+\Delta t}^{vp} = & \bar{\epsilon}_t^{vp} + \Delta t \left[\frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial \sigma_M} \dot{\sigma}_M \right. \\ & \left. + \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial \epsilon} \dot{\epsilon} + \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial T} \dot{T} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

실질부의 소성일량과 보이드 재료의 소성일량이 일치한다는 가정과

$$(1-f) \sigma_M \dot{\bar{\epsilon}} = \sigma_{ij} \dot{\eta} p_{ij} \quad (12)$$

적합성의 조건

$$\begin{aligned} \dot{\phi} = & \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ij}} \sigma_{ij}^\nabla + \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_M} \dot{\sigma}_M + \frac{\partial \phi}{\partial f} \dot{f} + \frac{\partial \phi}{\partial T} \dot{T} \\ = & 0 \end{aligned} \quad (13)$$

을 고려하여 정리하면 최종적으로 속도 및 온도의 영향을 고려한 점탄소성 보이드 재료에 대한 구성식이 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^\nabla = & D^p_{ijkl} (\dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\epsilon}^f_{kl}) - P'_{ijkl} + \beta'_{ij} \dot{T} \\ D^p_{ijkl} = & D^e_{ijkl} - \frac{\xi}{1+\xi} \frac{P_{ij} Q_{kl}}{H} \\ P'_{ij} = & \frac{\dot{\eta}_t}{1+\xi} P_{ij} \\ \beta'_{ij} = & \left(\frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial \sigma} \right)^{-1} \frac{\xi}{1+\xi} \frac{F}{H} P_{ij} - \beta_{ij} \end{aligned} \quad (14)$$

윗식에서 온도변화를 \dot{T} 를 0으로 하면 Needleman이 제안한 속도의존성 보이드 재료의 구성식⁽⁷⁾가 성립한다.

또한 변형률 속도 민감지수 m 의 값을 매우 작게 취하는 것으로부터 윗식은 변형률 속도에 의존하지 않는 재료의 구성식에 대응한다.

2.3 변형률 구배를 도입한 비국소형 구성식

Aifantis등은 재료의 미시적 구조의 상호작용을 표현하기 위해서 다음과 같이 국소형의 구성식에 변형률 및 변형률 속도의 구배를 도입하는 것에 의해 비국소형 구성식을 일반화하였다.

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} = & \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}) + F(\nabla^2 \bar{\epsilon}^p, \nabla^4 \bar{\epsilon}^p) \\ & , \nabla^2 \dot{\bar{\epsilon}}^p, \nabla^4 \dot{\bar{\epsilon}}^p) \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 ∇^2 은 라플라스 연산자이고 우변의 제 2항이 비국소 효과를 나타내는 항이다. 또한 이 항에서 변형률 및 변형률 속도의 우함수만을 사용한 것은 이 항에 구배의 방향성을 갖지 않게하기 위함이다.

본 연구에서는 Tomita등이 인장 전단때 해석에 사용한 상당 점소성 변형률의 제2차 구배를 유동응력에 도입하여 변형률 구배가 큰 곳에서 재료의 구성식을 비국소형으로 하는 모델⁽⁸⁾을 사용하였다.

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(T, \bar{\epsilon}^{vp}, \dot{\bar{\epsilon}}^{vp}) - C \nabla^2 \bar{\epsilon}^{vp} \quad (16)$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_o(T) \left(1 + \frac{\bar{\epsilon}^{vp}}{\epsilon_Y}\right)^n \left(1 + \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{vp}}{\epsilon_Y}\right)^m \quad (17)$$

여기서 C는 힘의 단위를 갖는 정수이다.

2.4 가상일의 원리와 유한요소 정식화

변형시의 보이드 재료의 체적을 V , 표면적을 S 라고 하고, S 의 일부에 단위면적당 작용하는 표면력의 변화율이 \dot{P}_i , 남은 S_v 상에서 변형속도가 V_i 로 주어진 경우를 생각한다.

속도형의 탄소성 경계값 문제의 해는 Updated Lagrange Formulation (ULF)을 이용하여 나타낸 다음의 가상일의 원리식을 만족한다.

$$\int_V \dot{\pi}_{ij} \delta v_{i,j}^* dV = \int_{S_f} \dot{P}_i \delta v_i^* dS \quad (18)$$

여기서 π_{ij} 는 Lagrange 응력을 나타낸다. $\dot{\pi}_{ij}$ 와 식 (17)로 표현되는 Cauchy 응력의 Jaumann 속도 σ_{ij}^{\vee} 간의 관계를 이용하면 최종적으로 열점탄소성 재료에 대해서 다음의 속도형 가상일의 원리식이 얻어진다.

$$\int_V ([D^p_{ijkl}(\dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\epsilon}^f_{kl}) - P_{ijkl} + \beta_{ij}\dot{T}]\delta\epsilon^*_{ij} - F_{ijkl}\dot{\epsilon}_{kl}\epsilon^*_{ij} + R_{ijkl}\dot{\epsilon}_{kl}\epsilon^*_{ij} + \delta v_{i,j}\sigma_{mj}v_{i,m})dV = \int_{S_F} \dot{P}_i\delta v_i^*dS \quad (19)$$

이 식에 통상의 유한요소 정식화 과정을 적용시키면 요소 강성방정식이 얻어진다.

3. 해석모델 및 결과고찰

3.1 해석모델

본 연구에서는 보이드 재료에 있어서 구성식의 비국소형이 변형의 국소화 거동에 미치는 영향을 파악하기 위해 앞 장에서 정식화한 비국소형 구성식을 이용하여 평면변형하에서 고속압축되고 있는 소결체 불리의 변형거동을 해석하여 변형국소화의 요소 의존성을 검토하였다.

이 고속압축을 받는 소결체의 변형거동을 조사하기 위해 Fig.1에 나타낸 것과 같이 열점탄소성 평면불력에 단면변위속도 $\dot{u}/L = 2000.0/s$ 를 부여하여 해석하였다. 또한 변형의 대칭성으로부터 제1상한만을 해석하였다. 그림중의 사각형 요소는 각각 4개의 삼각형 요소로 대각분할된 Constant Strain Triangle element (4CST)이다. 한편 소성변형일의 약 95%가 열로 변환되는 것으로 하고 국소단열상태를 가정하였다. 요소의 크기차이에 따른 해석결과와의 비교를 위하여 두 종류 크기의 요소분할을 고려하였다. 또한 불리의 변형 국소화를 촉진시키기위해 다음 식과 같은 초기결함(initial imperfection)을 부여하였다.

$$\sigma_o(x, y) = \{1 - 0.2\exp(-100(x^2 + y^2))\} \times \sigma_o(T) \quad (20)$$

본 연구에서는 식 (16)의 비국소 효과를 나타내는 항의 계수 C의 값은 문헌⁽⁹⁾로부터 인용하여

$C = 2.06 \times 10^6 \sigma_o l^2$ 으로 하였다. 유한요소법에서 각 요소단위의 변형률 $\bar{\epsilon}^{vp}$ 을 이용한 $\nabla^2 \bar{\epsilon}^{vp}$ 의 평가가 요소의 크기에 따라 의존하지 않도록 요소의 초기 폭 l 에 의존한 형식으로 나타낸 것이다. 해석에 이용한 재료 정수 및 해석조건을 표1에 나타내었다.

Table 1 Materials and computational parameter

Elastic modulus(E_o)	200.0 GPa
Yield stress(σ_Y)	400.0 Mpa
Poisson's ratio(ν)	0.333
Initial temperature(T_o)	296 K
Work hardening exponent(n)	0.1
Mass density(ρ)	$7.87 \times 10 \text{ Kg/m}^3$
Strain rate sensitivity exponent(m)	0.01
Thermal expansion coefficient(α)	$11.7 \times 10 \text{ 1/K}$
Initial void volume fraction(f_o)	0.3
Nominal strain rate(\dot{u}/L)	2000 1/s
Rise time(T_1)	10 s

3.2 해석결과 및 고찰

변형의 국소화에 대한 요소크기 의존성의 영향을 명확히 하기 위해서 Fig.1 에 나타낸 $L/W = 1.0$ 의 형상 불룩에 대해서 A(16×16 분할)와 B(24×24 분할)의 두 종류의 요소분할에 대해서 해석을 수행하였다.

Fig.2a와 b는 각각 보이드를 함유하고 있지 않은 완전 재료와 보이드 재료에 대한 무차원한 하중 σ/σ_Y 과 단면변위 u/L 의 관계를 나타낸다. 그림중의 A0와 B0는 A, B 두 종류의 분할에 대한 미국소형 구성식에 의한 결과를 나타내고, A1와 B1은 A, B 두 종류의 분할에 대한 미국소형 구성식에 의한 결과를 나타낸다. 완전 재료에

대한 Fig.2a에서 요소분할이 많아 요소 크기가 작은 경우에는 국소형 구성식을 사용하면 하중이 최대값에 달한 후 점차 떨어지는 반면 비국소형 구성식을 사용하면 하중저하가 억제되고 있음을 알 수 있다. 한편 요소분할이 적어 요소 크기가 적을 때는 어느 경우에도 하중감소는 보이지 않고, 비국소형 구성식을 사용한 경우도 국소형 구성식을 사용한 경우와 거의 같은 하중값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 전체적으로 요소 크기의 차이에도 불구하고 비국소형 구성식을 사용하는 경우는 하중과 변위곡선이 거의 유사한 양상을 보임을 알 수 있다.

한편 보이드 재료에 대한 Fig.2b에서는 요소 크기 및 구성식의 종류에 상관없이 하중은 최대값에 달한 후 감소하는 경향을 보인다. 이는 보이드 재료의 경우는 변형 증가와 더불어 보이드 발생에 의한 내부손상이 진전하여 하중저하가 불가해지기 때문으로 생각된다. 국소형 구성식의 경우와 비교하면 비국소형 구성식을 사용하는 경

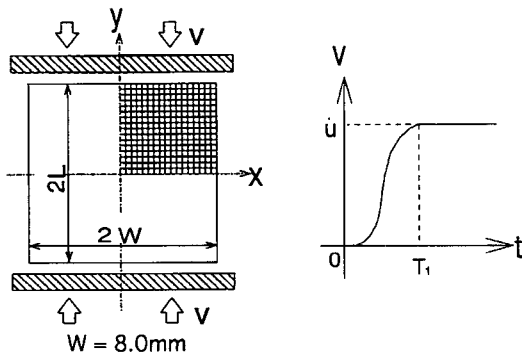


Fig. 1 Computational model

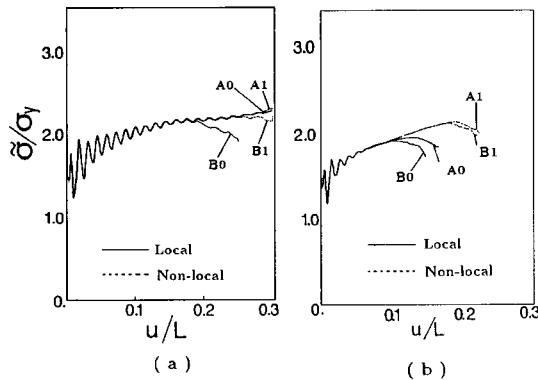
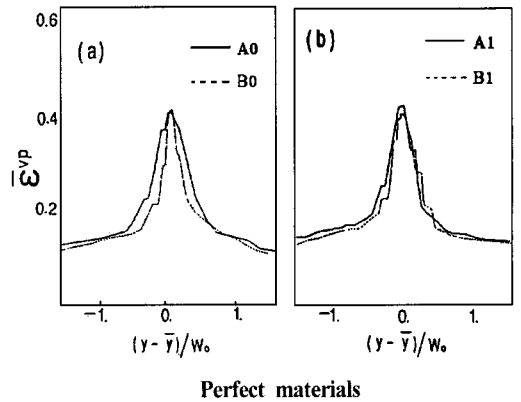


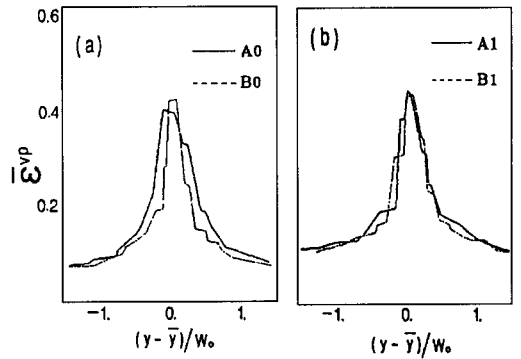
Fig. 2 Average stress $\bar{\sigma} / \sigma_y$ versus end displacement u/L (a) perfect material (b) void material

우가 하중감소가 지연되고 있음을 알 수 있다. 또한 국소형 구성식을 사용한 경우는 요소크기에 따라 최대 하중값에 차이가 나는 반면 비국소형 구성식을 사용하는 경우는 요소크기에 상관없이 최대 하중값 뿐만 아니라 하중과 변위곡선도 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig.3a와 b는 각각 국소형 구성식을 사용한 경우와 비국소형 구성식을 사용한 경우에 두 재료의 최대 상당 변형률값을 거의 같게 하였을 때의 전단파에 수직한 단면상의 상당 변형률 분포를 나타낸다. 어느 재료의 경우나 국소형 구성식을 이용한 경우는 요소의 크기가 직접 국소화영역의 폭에 영향을 미쳐 요소가 작게 되면 변형 국소화도 심해지고 국소화영역의 폭이 좁아짐을 알 수 있다. 한편 비국소형 구성식을 이용한 경우는 국소화 영역의 폭과 변형률의 분포형태가 요소의 크기에 거의 의존하지 않는 것을 알 수 있다.



Perfect materials



Materials with initial volume fraction of vacancies

Fig. 3 Effective strain distribution in predominant localization zone (a) local (b) nonlocal

4. 결 론

본 연구에서는 열점탄소성 보이드 재료를 대상으로 구성식의 비국소성이 변형 국소화거동에 미치는 영향을 검토하기 위해 평면변형하에서 압축을 받는 소결재료 블록의 변형거동을 해석하였다. 본 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

구성식의 비국소성은 보이드 재료의 국소화 진전을 억제하여 변형 국소화에 의한 하중저하를 지연시킨다. 또한 비국소형 구성식을 사용하는 경우는 하중-단면변위 곡선이 메쉬의 크기에 크게 의존하지 않으며, 변형국소화에 의한 전단띠가 발생하는 경우에 전단띠의 폭 및 그 위에서의 상당 변형을 분포가 거의 동일하다는 것을 알 수 있었다. 따라서 보이드 재료에 있어서도 비국소형 구성식을 사용하는 것에 의해 국소화 거동의 치수의존성을 제거할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 1997년도 교육부의 학술연구조성비(기계 97-018-E000)에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 진심으로 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) A.Needleman, 1988, "Material rate dependence and mesh sensitivity in localization problems", Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol. 67, pp. 69~85.

(2) Z.P.Bazant and F.P.Lin, 1989, "Stability against localization of softening into ellipsoids and bands :Parameter study", Int. J. Solids and Structures, Vol. 28, pp. 1483~1498.

(3) E.C.Aifantis, 1987, "The physics of plastic deformation", Int. J. Plasticity, Vol. 3, No. 3, pp. 211~247.

(4) Y.Tomita, 1994, "Flow localization in plane-strain thermo-elasto-viscoplastic blocks under a high rate of deformation", Modelling Siml. Mater. Sci. Eng., Vol. 2, No. 4, pp. 701~714.

(5) A.Gurson, 1997, "Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth : Part 1 -yield criteria and flow rules for porous ductile media", Trans. ASME, J. Eng. Mater. Technol., Vol. 99, No. 1, pp. 2~15.

(6) V.Tvergaard, 1981, "Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions", Int. J. Fract. Mech., Vo. 17, No. 4, pp. 389~407.

(7) D.Pierce, C.F.Shih, and A.Needleman, 1984, "A tangent modulus method for rate dependent solids", Comput. & Strut., Vol. 18, No. 5, pp. 875~884.

(8) 김영석, 1997, "연속체역학", 반도출판사

(9) 최홍석, Y.Tomita, 1995, "Flow localization of void materials", 제44회 응용역학 연합 강연회 논문집, pp. 51~55.