

대형단조에서의 미세기공 압착해석을 위한 유한요소법의 Global/Local 기법

박치용 (한국전력연구원 신형원전개발센터)

양동열 (한국과학기술원 기계공학과)

ABSTRACT

In the large steel ingots, void defects exhibiting microvoid shapes are inevitably formed in the V-segregation zone of the ingots during solidification. In the hot open-die forging process, material properties are improved by eliminating internal porosity. The void size is practically very small as compared with the huge large ingot. Thus, for deformation analysis of a large ingot, a massive number of elements are needed in order to describe a void surface and to uniform mesh structure. In the present work the Global/Local scheme has been introduced in order to reduce the computational time and to easily generate the mesh system as a void module of local mesh for obtaining the accurate solution around a void. The procedure of the global-local method consists of two steps. In the first step global analysis is carried out which seeks a reasonably good solution with a course mesh system without describing a void. Then, a local analysis is performed locally with a fine mesh system under the size-criterion of a local region. The computational time has been greatly reduced. Through the work it has been shown that large ingot forging incorporating small voids can be effectively analyzed by using the proposed Global/Local scheme.

1. 서론

발전설비 및 플랜트 산업 등에서 제품의 고경도화가 요구됨에 따라 일체화된 대형제품들이 필요하게 된다. 일체화된 대형의 제품들은 대형강괴로부터 열간 자유단조로써 이루어진다. 대형 강괴의 열간 자유단조를 행하여 내부 기공을 압착시키고 결함이 없는 제품을 만들기 위해서는 적절한 공정의 설계가 이루어져야 한다. 따라서 본 연구는 대형 열간단조의 주요 목적인 기공을 압착시키고 결함이 없는 제품을 얻고자하며, 유한요소법을 사용한 효율적인 계산기법을 마련하고자 하는데 연구의 목적이 있다.

그에 따른 본 연구의 범위는 대형강괴의 기공 폐쇄(crushing)를 기공의 닫힘(closing)과 결합(bonding)의 과정까지 유한요소해석(FEA)으로 평가하기 위해서는 실제기공의 크기에 근접하는 기공의 묘사가 필요하다. 따라서 기공주위에 조밀한 격자구조가 요구됨에 따라 많은 전체격자가 필요하고 그에 따라 불필요한 계산시간이 소요된다. 이를 해결하기 위한 방법으로 기공 주위의 조밀한 요소 시스템과 나머지 전체 부분의 해석을 서로 비연계시켜 해석하는 Global/Local기법을 이용하였다. Global/Local기법이 대변형의 소성문제에서 적용가능성을 검토하고 기공압착해석의 경우에 효율적 적용을 위한 방법을 제시하였다.

2. 변형 및 열전달 해석

열간 단조공정을 해석하기 위해서는 하중의 내력

(loading history)과 시간의 변화율을 동시에 고려한 점소성이론에 바탕을 둔 열-점소성 해석방법을 사용하였다. 영역 Ω 와 경계 Γ 로 이루어진 가공체는 경계 Γ_f 에서 표면응력 f_i 및 Γ_v 에서 속도경계조건 \bar{v}_i 가 주어진 경계치 문제로 정의된다. 소성가공문제에서의 경계치문제의 해는 속도경계 Γ_v 상에서 주어진 속도경계조건을 만족하는 모든 속도장과 압력장중에서 경계 Γ_v 상에서 영(零)인 임의의 함수 ψ_i 와 임의의 함수 ζ 에 대하여 다음식을 만족시킴으로써 얻어진다.

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij} \psi_{ij} d\Omega - \int_{\Omega} v_{i,i} \zeta d\Omega - \sum_i \int_{\Gamma_f} f_i \psi_i d\Gamma = 0 \quad (1)$$

여기서 $\psi_{ij} = \frac{1}{2}(\psi_{i,j} + \psi_{j,i})$ 이다.

위의 변분식은 전체영역을 요소분할화한 후에 보간함수를 이용하여 유한요소 근사화 시킨후 항등식의 조건과 벌칙상수의 도입하면 비선형 연립방정식이 얻어지는데 이는 개선된 뉴턴-랩슨(updated Newton-Raphson)방법을 이용하여 계산하였다[1].

금형과 가공체의 온도해석이 필요하다. 열역학 제 1법칙과, 소성변형으로 발생하는 에너지의 5~15%가 전위 밀도를 증가시키고 나머지가 열로 발생된다는 실험결과를 이용한 열 평형방정식과 가공체의 자유표면에서의 대류, 복사열전달 및 금형과의 접촉면에서의 전도 및 마찰열발생을 경계조건으로 갖는 경계치문제으로써 변형중의 온도해석을 실시하였다[2].

3. Global / Local 기법

3.1 방법의 필요성 및 대변형에서의 적용 타당성

미세기공을 포함하는 대형의 문제를 FEM으로 해석하는데 있어서는 기공의 유한요소 묘사와 전체 시스템의 묘사를 위해서 격자를 균일하게 하기에는 계산의 비효율성이 따르고, 두가지의 격자 구조를 적절히 택하여 하나의 전체 시스템에서 계산할때는 너무 큰 격자의 편차가 나타나게 된다. 따라서 전체시스템의 변형을 위한 격자시스템과 기공의 유한 요소 격자시스템을 분리, 구성하여 해석하고자 하는 것이 Global-Local 방법의 도입 목적이다[Fig.1].

변형체의 해석은 Global한 해석으로 수행하고 그 결과를 이용하여 Local한 영역에서 기공의 해석을 수행한다. 이러한 방법으로는 Local영역과 Local영역에 상당하는 Global영역부분에서의 체적의 불일치로 인하여 정확한 해석이 이루어지지 못한다. 그리고 이 방법이 일반적인 대변형의 문제에서는 큰 오차를 나타낸다. 따라서 대변형의 소성문제에서 사용하기 위해서는 다음과 같은 전제조건이 필요하다.

첫째로 기공이 있는 변형체를 변형시키는데 소요되는 에너지와 결함이 없는 변형체를 변형시키는데 소요되는 에너지의 차이가 거의 없을 정도로 결함의 크기가 작으며, 둘째로 결함의 존재로 인해 전체 시스템의 변형상이나 전체시스템의 내부변형에 미치는 영향이, 결함의 주위를 제외하고서는, 거의 없어야 한다. 이는 일정 변형량 범위 내에서만 한정되어야 한다는 말이다.

그런데 본 연구에서 해석하고자 하는 대형강괴의 기공해석에서는 기공의 크기는 소재크기와 비교해 볼때 직경의 비로써 최대 0.2%의 범위에 존재한다고 보고되어져 있으며[3] 또한 초기 강괴의 기공 압착 및 업셋팅 작업의 단조비 증가를 위한 코킹 공정에서 층 반경의 감소율, 즉 단조량이 약 30~40%를 넘지 않는 것이 일반적인 공정상의 특징이다.[3] 따라서 대형단조의 기공압착해석에 Global/Local 방법을 도입하기에는 적절한 전제 조건을 가지고 있다고 할 수 있다.

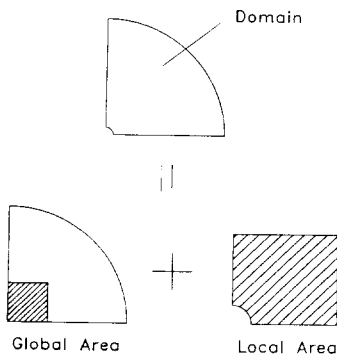


Fig.1 Schematic diagram of the Global/Local scheme

3.2. 대변형에서의 적용조건

기공에 의한 국부영향계수 및 Local영역의 결정에 대하여 먼저 정의하고자 한다. 기술의 편의상 기공이 없는 경우의 변형체를 S시스템(Solid System), 기공이 있는 경우를 V시스템(Void System)이라 칭하고 상첨자 s,v는 각각의 시스템을 나타낸다. 기공으로부터 r_i 만큼 떨어진 위치에서의 단위층 $\delta\Gamma_i$ 에서의 내부변형에너지는 다음과 같이 정의된다.

$$U_i^S = \int R_i^S u_i^S \delta\Gamma_i - \int R_{i-1}^S u_{i-1}^S \delta\Gamma_{i-1} \dots\dots (2)$$

여기서 R_i^S 는 $\delta\Gamma_i$ 에서의 내부반력이고 u_i^S 는 변위이다. 비슷한 방식으로 V시스템에서도 U_i^V 를 정의한다.

미세기공이 전체변형에 영향을 미치지 않고 일정범위에서만 영향을 미친다고 할때 그때의 범위를 r_c 라고 하자 [Fig.2] 임의의 거리점 r_i 에서 $R_i^V = R_i^S$ 이고 $u_i^V = u_i^S$ 이면 $U_i^V = U_i^S$ 는 충분조건이지만 필요조건을 만족하지는 않는다. 그런데, $r_i > r_c$ 영역에서는 기공이 변형에 영향을 미치지 않는다는 가정이 있기 때문에 필요충분조건이 성립한다.

$$u_i^V = u_i^S \text{ and } R_i^V = R_i^S \iff U_i^V = U_i^S \dots\dots (3)$$

즉 $r_i < r_c$ 의 범위내에서 변형의 평형이 성립한다고 가정하는 것이다. 따라서 r_c 가 제한된 변형량의 범위내에서 최소가 되기 위해서는 다음의 조건이 만족되어야 한다.

$$\frac{\|\Delta U_i^S - \Delta U_i^V\|}{\|\Delta U_i^S\|} \leq \epsilon \dots\dots\dots (4)$$

단면표피층 $\delta\Gamma_i$ 를 일정량의 길이를 가지는 층(layer)으로 확장하여도 식(4)는 성립되어야 한다. 위 식이 만족되는 최소의 영향거리 r_c 를 이용하여 국부영향계수(Local Influence Factor) ϕ 를 최소영향거리와 특성길이의 비(min. influential distance) / (characteristic length)로 정의 한다.

$$\phi = \frac{R_c}{R} \left(= \frac{L_c}{L} \right) \dots\dots\dots (5)$$

또한 Global/Local 해석에서 Local영역의 결정은 최소한 ϕR 이상의 영역을 취해야 한다.

본 연구에서는 기공의 지름을 14mm로 선택하였는데 이는 변형체 지름과의 비 $r_v/R = 0.5\%$ 으로써 대형강괴에서 보고된 실제 미소기공 크기의 약 4배에 해당한다. $r_v/R = 0.5\%$ 및 $r_v/R = 2.0\%$ 의 경우에 내부기공에 의한 변형율의 차이를 초기소재에 나타내 보았다. 즉 $\|\epsilon_i^S - \epsilon_i^V\| / \|\epsilon_i^S\|$ 의 값을 초기소재 격자형상에서의 값으로 나타낸 것이다.[Fig.3] $r_v/R = 0.5\%$ 인 경우에는 기공 근처에서만 차이가 남을 알 수 있었다. $r_v/R = 2.0\%$ 의 경우는 상당한 영역까지 오차를 나타내 보이고 있다.

이때 식(4)를 만족시키는 국부영향계수를 결정하기 위하여 Fig.4(a)의 격자로서 수치적 접근을 한 결과 Fig.4(b)

와 같은 결과를 얻었다. 국부영향계수 $\varphi = 0.156$ 의 값을 나타내고 있으며, 이때 사용된 $\varepsilon = 1.0 \times 10^{-6}$ 이다. 이러한 방식으로 r_v/R 가 각각 0.5, 1.0, 2.0 그리고 3.57%인 경우에서의 국부영향계수 φ 는 0.156, 0.182, 0.232, 0.412의 값을 얻을 수 있었다[Fig.4(b)]. 이는 기공의 크기가 커지면 Local영역이 확대됨으로 인해서 Global/Local영역분할 해석법의 적용 가능성이 감소될 수 있다는 것을 의미한다. 이상과 같은 φ 의 결정에 의해 φR 보다 크게 Local영역이 결정되고 난 후에는 Global영역의 격자 일부에서 선택하여 Local영역의 격자를 구성한다.

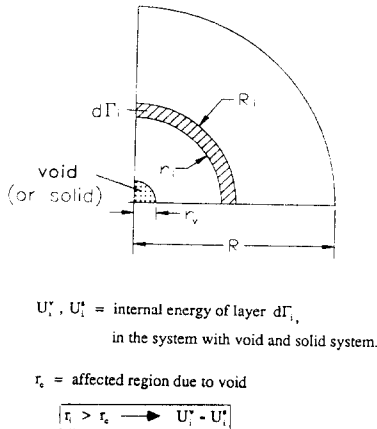


Fig.2 Geometric representation of a domain with a void or a solid domain

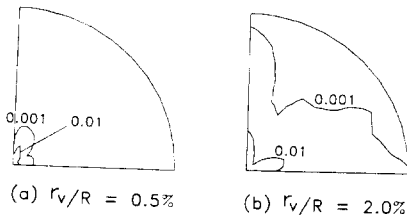


Fig.3 Distribution of relative effective strain norm

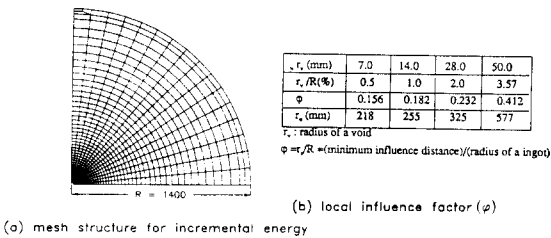


Fig.4 Mesh structure for obtaining the internal energy of each layer and local influence factor

3.3. 방법의 구현

기존의 탄성 및 복합재료의 응력해석을 위한 유한요소법에서의 Global/Local 방법론은 크게 두가지로 분류된다. 첫째 방법은 Global영역의 해석을 실시한 후 그 정보를 이용하여 Local영역을 해석한다. 다음으로 Global영역해석

에서의 Local영역해당부분의 부정확성의 오차를 줄이기 위해서 다시 Global영역의 재해석을 실시하는 방법으로 이 과정을 반복하여 실행하는데 이는 주로 탄성체 해석에서 사용되고 있다.[4,5] 이 방법을 변형체의 소성 문제에 적용하기에는 변형체의 비선형성 거동과 Global/Local영역사이의 내부반력 및 격자에 의한 강성비 변화에 따른 해의 불일치성을 수렴시키는 일이 동시에 이루어져야 하기 때문에 선택에는 제약이 따른다.

두번째로 복합재료의 해석이나 불연속 물질을 포함하는 물체의 해석에 사용되는 방식으로 Global영역의 해석시에 Local영역의 물리적 특성을 고려하여 Global영역을 해석하고 그 정보를 이용하여 Local영역의 자세한 정보를 획득하는 방법이다[6,7]. 이 방법은 Global영역에서 Local영역의 물리적 특성을 얼마나 정확하게 묘사하느냐에 따라서 해의 정확성이 요구되어지는 반면에 해석상의 편의성에서 큰 장점을 지니고 있다.

본 연구에서는 두번째 방식을 기본으로 하였다. 이러한 방식에 대한 흐름도(flow chart)가 Fig.5에 나타나 있다. 기공을 포함하지 않는 조대한 격자 시스템으로 변형해석을 수행하고 그 변형해석의 속도장으로부터 기공을 포함하는 조밀한 격자시스템에서 Local해석을 수행하는 것이다. Local해석에서는 Local영역의 경계에서 속도경계조건 및 각 요소에서의 온도를 위해서 온도경계조건도 부과하여 온도해석도 실시하였다. 그리고 다음 단계의 Global해석을 위해서 Local영역의 변형을 및 변형률속도등을 Global영역의 Local부분으로 외삽(extrapolation)시켜 주었다. 이러한 방식을 사용함으로써 얻을 수 있는 장점은 먼저 계산 시간의 절약을 가져올 수 있으며, 기공주위를 포함하는 격자 모듈(module)을 가짐으로써 임의의 위치에 존재하는 기공에 대해서도 쉽게 격자를 형성시킬 수 있어서 해석의 편의성을 추구할 수 있다. 또한 병렬처리를 행할 수 있는 컴퓨터를 사용할 경우에는 한번의 Global해석을 수행함과 동시에 여러곳에서의 기공 및 결합해석등이 동시에 이루어질 수 있는 장점이 있다. Global해석에서는 기공을 포함하고 있지 않기 때문에 기공체적의 감소 및 기공의 체적감소에 따르는 영향을 고려하고 있지 못하다. 따라서 기공이 폐쇄되어 기공표면이 완전히 접촉되는 과정에서 다음과 같이 본 연구에서 고려하였다.

먼저 Global영역의 해석에서는, Local영역에 해당하는 영역에서의 체적불변조건을 만족시키기 위해 사용하는 벌칙상수(penalty constant) K^* 가 기공에서의 거리의 함수로서 다음식과 같이 수정하여 사용하였다.

$$\tilde{K}^* = \frac{1}{\varphi R} K^* \quad 1 \leq \varphi R \quad (7)$$

여기서 1은 기공중심에서 초기격자에서 요소 중심까지의 거리이며 φ 는 기공의 영향계수이고 R은 기공체의 특성길이이다.

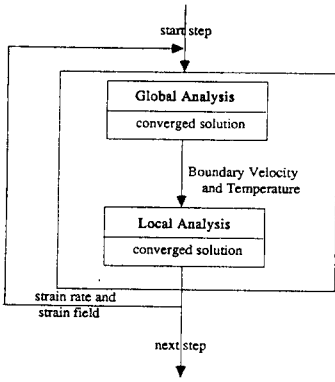


Fig.5 Flow chart of a Global/Local scheme

3.4. 수치적 검증

방법의 적용타당성 검토를 위해 Fig.6(a)과 같은 균일한 격자로 구성된 전체시스템을 구성하여 기존의 방식으로 계산을 수행하였다. 또한 Fig.6(b)와 같은 일반적인 조대한 격자 시스템(coarse mesh system)과 Fig.6(c)과 같은 Global/Local 격자 시스템을 해석하여 내부기공의 변화를 공학적 변형률(engineering strain)으로써 Fig.7에 비교하였다. 이를 선택한 이유는 기공의 형상변화가 해석의 방법 및 격자 시스템에 따라서 민감하게 반응하여 변화하기 때문이다. 기공이 타원형상으로 변화될 때의 장축을 a, 단축을 b로 하여 각각의 변형율을 표시 하였는데, 상당히 잘 일치하고 있다.

또한 세가지 경우에 있어서의 계산효율 및 총계산시간을 Table.1에 나타내었다. 절점의 수 및 밴드폭(band width)에 따라서 계산시간의 차이가 나타나기 때문에 절대 계산시간을 비교하기에는 공정성이 결여된다. 따라서 계산효율을 비교하였을 때 Global/Local 방법이 계산시간적 측면에서의 효율성이 나타난다.

소성가공의 2차원 해석에서는 전체 계산시간 중에서 요소의 매트릭스 구성이 약 50%, 선형방정식을 푸는데 약 30~40%의 시간이 소요된다고 보고 있다. 그러나, 이는 한 반복계산(iteration)내에서의 비교이다. 접촉의 상황에 따라서 반복계산(iteration)의 증가는 전체 계산 시간에 영향을 미치는 지배적 요소이다. 이로부터 위와 같은 계산효율의 결과를 고찰해 보면 기준해는 다이와의 접촉처리에서 많은 시간을 소모하고 있기 때문에 계산적 효율이 낮아지고 있는 것이며 Global/Local 방법은 Local 영역의 해석에서 내부접촉 직전까지는 수렴성이 양호하여 전체 계산시간에 영향을 미치지 못하기 때문에 계산효율의 증대를 가져오며 또한 Global 격자의 균일성도 그 원인중의 하나이다.

세가지 경우의 해석에서 유효변형율의 분포를 기공 주위의 국부적 영역을 중심으로 Fig.8에서 비교하였다. 전체 변형체에서의 변형율 분포는 대체적인 일치를 보이고 있으나 기공주위의 국부적 영역에서는 Global/Local 방법이 기준해(reference solution)에 일치하고 있다. Global/Local 방법에서 Local 영역의 격자를 증가시키면서 균일한 격자를 형성시키면 더 좋은 결과도 얻을 수 있으리라 예측된다.

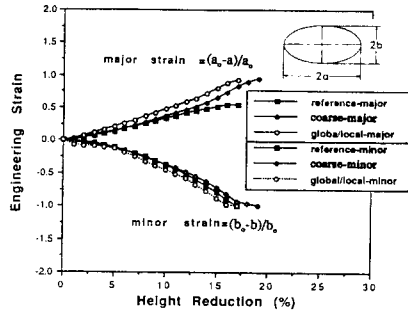


Fig.7 Comparison of major and minor strains between a reference solution, a solution for coarse and a global/local solution

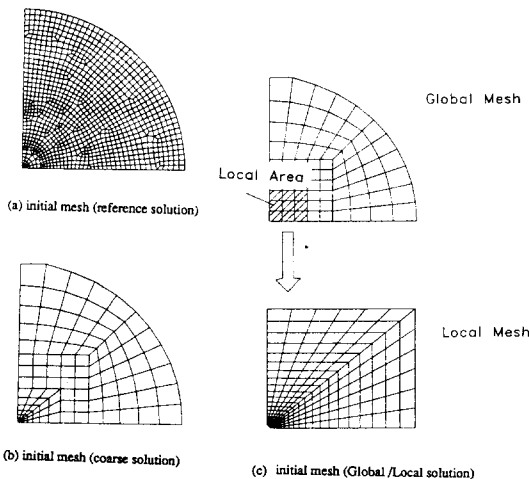


Fig.6 Initial mesh systems (a) reference solution (b)solution for coars mesh (c)Global.Local solution

Comparison of CPU Time

At the height reduction of 20%				
	NN & NE	Half band width	CPU Time(sec) HP730/22M/Flops	T.E.
Reference	NN=1078 NE=1012	112	14,712	0.01266
Coarse	NN=140 NE=117	30	190	0.00969
Global/Local	(NN) ₁ =102 (NE) ₁ =95 (NN) ₂ =271 (NE) ₂ =239	30	264	0.00314

* Not option for optimization
NN = number of node
NE = number of element

$$T.E. = \frac{\text{Time}}{(NN)^2} \quad T.E. = \frac{\text{Time}}{(NN)_G - (NN)_L} \text{ at G/L}$$

Table.1 Comparison of CPU time and computational time efficiency

4. 결 론

미세기공을 포함하는 대형강괴의 해석에서 미세기공의 달힘 및 압착거동을 해석하기 위해서 Global/Local 기법을 이용하였다. Global/Local 기법의 대변형 소성문제에서 적용하기 위해서 전체변형에 영향을 미치지 않는 범위까지의 국부영역의 결정에 대한 조건을 제시하였다. Global/Local 기법을 이용함으로써, 기공주위의 격자를 미세하게 하여 계산시간적 측면에서 또는 격자형성의 측면에서 효율적으로 미세기공을 포함하는 대형강괴의 해석에 Global/Local 기법이 적절히 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. J.H.Yoon and D.Y.Yang, " Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Three-Dimensional Forging by Considering Friction on Continuous Curved Dies with Initial Guess Generation", Int.J.Mech.Sci., Vol.30, pp.887-898, (1988).
2. C.Y.Park, J.R.Cho and D.Y.Yang, "Two-Dimensional Finite Element Analysis of Hot Radial Forging" , Trans. of KSME, Vol.14, No.5, pp. 1166 - 1180,(1990).
3. S. Ono, "Advanced Technology of Open-Die Forging for Large Products with High Quality", J.of JSTP, Vol.33, No.382, (1992)
4. J.D.Whitcomb, "Iterative Global / Local Finite Element Analysis", Computer & Structures, Vol. 40, No. 4, pp. 1027-1031, (1991).
5. K.M.Mao and C.T.Sun, A Refined Global-Local Finite Element Analysis Method, Int. J. Num. Meth. in Engng., Vol. 32, pp. 29-43, (1991).
6. J.D.Whitcomb and K.S.Woo, "Application of Iterative Global/Local Finite Element Analysis, part II : Geometrically Non-Linear Analysis", Communications in Num. Meth. in Engng., Vol.9, pp.757~766, (1993)
7. T.L.Hsiao, " A Global-Local Finite Element for General Composite Structure", Computer & Structures, Vol. 40, No.3, pp.719-730, (1991).

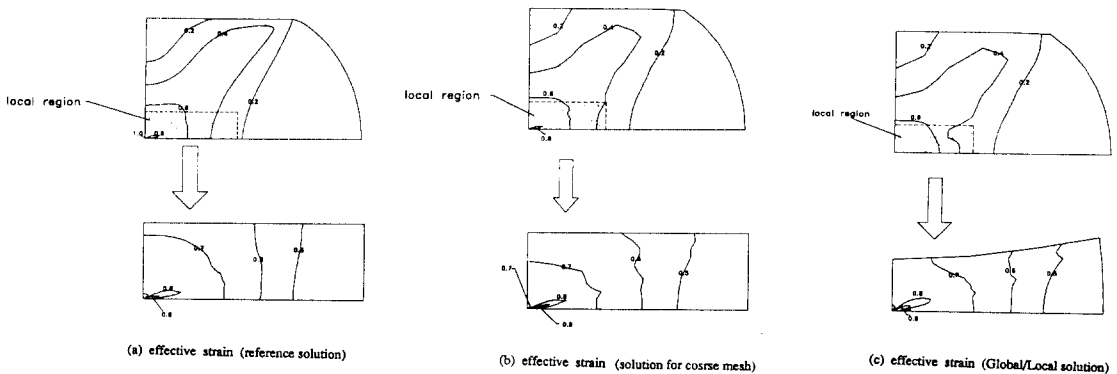


Fig.8 Comparison of strain distribution between (a) a reference solution, (b) a solution for coarse mesh and (c) a global/local solution