

〈論 文〉

단열 전단 밴드의 유한요소 해석

유요한* · 전기영** · 정동택*

(1992년 4월 4일 접수)

Finite Element Analysis of Adiabatic Shear Band

Y.H. Yoo, G.Y. Jeon and D.T. Chung

Key Words : Initiation and Growth of Adiabatic Shear Band (단열 전단 밴드의 형성 및 성장), Explicit Time Integration Finite Element Method(엑스플리시트 시간적분 유한요소법), Thermal Softening(열적연화), Impact Velocity(충격속도)

Abstract

A stepped specimen which is subjected to step loading is modeled to study the initiation and growth of adiabatic shear band using explicit time integration finite element code. The material model for specimen includes effects of thermal softening, strain hardening and strain rate hardening. Various mesh sizes are tested to check whether they are small enough to model highly localized discontinuous phenomena reasonably well. It is shown that the number of adiabatic shear band depends on impact velocity and it is also shown that the initiation and growth of adiabatic shear band inversely depends on prescribed velocity at the top of specimen.

1. 서 론

단열 전단 밴드(adiabatic shear band)는 Zener와 Hollomon⁽¹⁾에 의하여 실험적으로 발견된 이후 수치해석과 실험적기법을 통하여 여러 연구자에 의하여 광범위하게 연구되어 왔다.^(2,3,4) 특히 고속 성형(high speed forming), 절삭(machining), 종말탄도학(terminal ballistic impact) 등의 분야와 관련되어 심도있는 연구가 수행되었다.

단열 전단 밴드가 형성되는 주요 기구(mechanism)를 간단히 정리해 보면 다음과 같다. 재료가 저속 변형(low strain rate deformation)을 할 때는 소성 변형에 의한 열이 인접재료로 충분히 발산될 수 있으므로 변형 부위의 재료가 등온(isothermal)상태에 가깝게 되고 변형이 진행될수록 계속

가공경화(strain hardening)되어 파단에 이를 때까지 유동응력(flow stress)이 계속 증가한다. 반면에 재료가 고속 변형(high strain rate deformation)을 할 때는 소성 변형에 의한 열이 인접 재료로 발산될 충분한 시간적 여유가 없으므로 단열(adiabatic)상태에 가깝게 되고 이 열에너지는 재료의 국부적인 온도 상승을 초래하며, 이 온도 상승은 재료의 유동응력을 저하시키는 방향으로 작용하므로 결과적으로 재료는 열적 연화(thermal softening)를 경험하게 된다. 이때 열적 연화 효과가 가공 경화 효과보다 우세하게 되면 변형이 진행됨에 따라 유동응력이 계속 감소하게 된다. 결과적으로 고속 변형 하에서 변형률(strain)이 작은 영역에서는 가공 경화 효과가 우세하게 되고 변형률이 큰 영역에서는 가공 연화(strain softening) 효과가 커져 볼록한(convex) 응력-변형률 곡선이 얻어진다. 충격 하중이 가해질때 만약 조그만 일부 영역이 가공 연화되기 시작하고 나머지 대부분은 가공 경화 영역에

* 정희원, 국방과학연구소

** 국방과학연구소

머물러 있다면 추가로 가해지는 하중의 대부분은 변형이 힘든 가공 경화 영역보다 좀더 변형이 쉬운 가공 연화 영역에 집중될 것이며 이때 소성 가공에 의하여 발생된 열의 대부분은 외부로 발산되지 못하고 그 부분의 유동 응력을 낮추는데 기여하게 되어 결과적으로 좁은 영역에 큰 변형이 집중되는 국소화(localization)현상을 초래하게 된다. 이와같은 국소화 현상은 소성변형과 열에 의한 불안정(instability)현상의 일종이므로 단열 전단 밴드라 불리기도 한다.

최근에 수치 해석을 통하여 단열 전단 밴드의 형성을 규명하려는 시도가 있었다.^(6~9) 그러나 비교적 간단한 해석 모델을 통하여 기본적 특성을 파악하는 데는 도움이 되었으나 해석을 수행하기 위해서는 초기 온도섭동(initial temperature perturbation) 등의 인위적 결함(artificial defect)을 도입⁽⁹⁾하거나 단열 전단 밴드의 전파를 가능케 하기 위하여 특수한 수치적 기법을 사용⁽⁶⁾해야 하는 등의 단점이 있었다.

본 논문에서는 단열 전단 밴드의 특성 규명을 위하여 특별히 고안된 계단 형상 시편(steped specimen)의 수치해석을 통하여 단열 전단 밴드의 형성과 성장(initiation and growth of adiabatic shear band)에 관한 체계적 해석을 시도해 보았다. 금번 논문에서는 우선 격자 크기(mesh size)와 충격 속도(impact velocity)가 단열 전단 밴드의 형성과 성장에 미치는 영향과 제반 특성을 규명할 계획이며 차후 재료의 기하학적 형상 등이 단열 전단 밴드의 형성과 성장에 미치는 영향에 대해서도 단계적 연구를 시도할 계획이다. 해석을 위하여 가공 경화효과, 변형률 속도 경화효과(strain rate hardening effect), 열적연화효과 등을 고려할 수 있는 구성 방정식(constitutive equation)을 갖춘 엑스플리시트 시간적분 유한요소 코드(explicit time integration finite element code)를 사용하였으며 기존의 연구 결과와는 달리 어떠한 인위적 결함도 해석에 사용하지 않았다.

2. 수치해석의 기본 이론

2.1 엑스플리시트 시간 적분 유한 요소법^(10,11)

물체의 운동방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{u}_i \quad (1)$$

트랙션(traction) 경계 조건

$$\sigma_{ij} n_j = t_i(t) \text{ on } S_t \quad (2)$$

운동학적 경계 조건

$$u_i(t) = x_i(t) \text{ on } S_u \quad (3)$$

접촉 불연속조건

$$\left(\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^- \right) n_j = 0 \text{ on } S_c \quad (4)$$

여기서 σ_{ij} 는 Cauchy 응력, ρ 는 밀도, f_i 는 체적력 밀도 \dot{u}_i 는 가속도, n_j 는 각 경계면에서의 바깥쪽 수직 단위벡터(unit outward normal vector)이다. 또한 S_u 는 변위, 속도, 가속도 등의 운동학적 경계 조건이 주어진 부분이고, S_t 는 트랙션 경계 조건이 주어진 부분이며, S_c 는 두 물체간의 접촉면을 표시하는데, 상첨자(superscript) +와 -는 각각 접촉면의 다른 면을 나타낸다.

운동 방정식의 위크 폼(weak form)을 취한 후 부분 적분과 Gauss의 발산 정리를 적용하면 가상일의 원리에 대한 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\sum_e \left(\int_{S_e} \sigma_{ij} n_j \delta u_i dI - \int_{A_e} \sigma_{ij} \delta u_{i,j} dA + \int_{A_e} \rho b_i \delta u_i dA - \int_{A_e} \rho \dot{u}_i \delta u_{i,t} dA \right) = 0 \quad (5)$$

여기서 δu 는 운동학적인 구속 조건들(kinematic constraints)을 만족시키며 적분은 현재 형상에 대하여 수행된다. 또한 하첨자(subscript) e는 요소(element)를 의미한다.

운동방정식을 시간에 대해 적분하기 위해 수정된 중앙 차분(modified central difference)방식이 사용된다. 즉 속도는 전방 차분(forward difference)으로 적분되고 변위는 후방 차분(backward difference)으로 적분된다. 안정조건(stability condition)으로는 Flanagan과 Belytschko⁽¹²⁾가 제안한 방식을 사용하였다.

대변형 탄소성 수식화는 von Mises 항복 조건과 등방 경화(isotropic hardening)에 기초를 두고 수식화되었으며, 모든 물성방정식 모델은 변형 구배의 극분해(polar decomposition)에 의해 정해지는 회전을 사용하여 정의되는 비회전 형상(unrotated configuration)에 기초를 두고 있으므로, 구성방정식 모델 내에서는 모든 응력, 변형률, 내부 상태 변수 등이 대변형에 수반되는 유한회전(finite rotation)의 영향을 받지 않는다.⁽¹³⁾

공간이산화(spatial discretization)에는 4절점 균

일 변형률요소 (four node uniform strain element) 를 사용하였고, 계산효율 향상을 위하여 4절적분 방식 대신 1점 적분 방식을 사용하였다. 그리고 이때 발생할 가능성이 있는 아워 글래스 모드 (hourglass mode) 를 방지하기 위하여 Flanagan과 Belytschko⁽¹⁴⁾가 제안한 아워글래스 모드 방지 기법을 사용하였으며, 구체적으로 가상강성 (artificial stiffness) 과 가상점성 (artificial viscosity) 을 모두 사용하였는데 아워 글래스 모드는 실제 변형 모드에 대하여 수직하므로 이를 방지하기 위하여 사용된 일은 전체 변형 에너지에 영향을 주지 않는다.

2.2 구성 방정식

고속 변형시 재료의 거동에 영향을 미치는 인자는 크게 세가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째, 재료의 변형에 따른 가공경화효과, 둘째, 변형률 속도 경화효과, 셋째, 열적연화효과 등이다. 이러한 세가지 영향인자의 효과를 모두 포함하는 몇가지 구성 방정식이 제안되었으나 Zerilli-Armstrong의 모델⁽¹⁵⁾과 Johnson-Cook의 모델⁽¹⁶⁾이 현재 가장 널리 사용되고 있다. 재료의 미세 구조를 고려한 Zerilli-Armstrong 모델이 더욱 큰 물리적 의미가 있다고 생각되나 실험 결과를 기초로 데이터를 정리하여 경험식으로 만든 Johnson-Cook 모델이 적용의 용이성 때문에 더욱 많이 사용된다. 본 논문에서는 Johnson-Cook 모델과 유사한 다음과 같은 형태의 구성 방정식을 사용하였다.

$$\tau = \sigma_0 \left[1 + \frac{\gamma}{\gamma_0} \right]^n \left[\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right]^m \left[e^{-\lambda(T-T_0)} \right] \quad (6)$$

여기서 항복응력 σ_0 , 기준 변형률 γ_0 , 가공경화 지수 n , 기준 변형률 속도 $\dot{\gamma}_0$, 변형률 속도 경화지수 m 등은 등온 상태에서의 재료 시험 결과로부터 얻어지며 열적연화 지수 λ 는 재료의 용융 온도 T_{melt} 와 초기 온도 T_0 로부터 다음과 같이 표시된다.

$$\lambda = [0.5 T_{melt} - T_0]^{-1} \quad (7)$$

한편 열전도 (heat conduction) 를 무시하고 단열과정으로 가정할 때 재료내 온도의 변화 \dot{T} 는 다음과 같이 표시된다.

$$\dot{T} = \chi \xi \tau \dot{\gamma} \quad (8)$$

여기서 χ 는 소성 변형에 의한 에너지가 열로 변환되는 정도이고, ξ 는 소성 변형 에너지변화와 온도

변화를 연결해 주는 물질 상수값으로 $\xi = \rho C$ 로 표시된다. 이때 C 는 재료의 비열 (specific heat) 이다.

3. 수치해석 모델 및 결과

3.1 수치 해석 모델

단열 전단 밴드의 특성 규명을 위하여 특별히 고안된 계단 형상 시편의 고속 변형 과정을 엑스플리시트 시간적분 유한 요소법으로 해석하였다. 시편 형상은 Fig. 1에서 사선으로 표시된 부분이고, 단

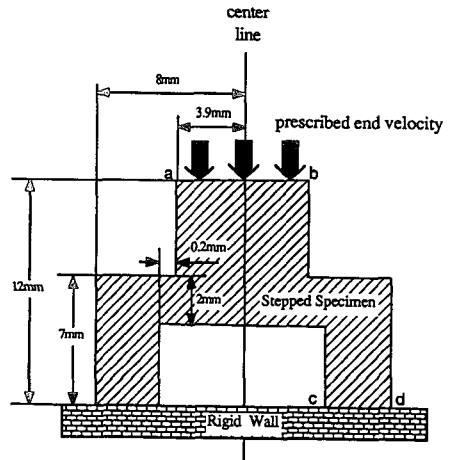


Fig. 1 Adiabatic shear band: Schematic diagram of stepped specimen test setup

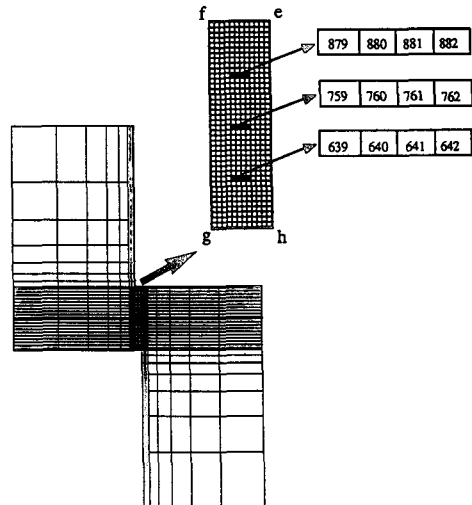


Fig. 2 Adiabatic shear band: Undeformed mesh of computation number 3

열 전단 밴드가 쉽게 발생할 수 있도록 두 계단 사이에 0.2 mm 정도의 간격을 두었으며 단열 전단 밴드의 성장을 충분히 관찰할 수 있도록 두 계단의 연결 폭을 2 mm로 잡았다. 계단 형상 시편의 전체 크기는 나중에 홉킨슨 봉 시험(hopkinson bar test) 장치를 이용한 실험적 검증이 가능하도록 최대 직경이 20 mm 이내가 되도록 설계하였다. 해석에 사용된 경계 조건을 살펴보면 시편 윗면 \overline{ab} 은 일정한 속도로 해석이 끝날때 까지 계속 내려오고, 시편 아랫면 \overline{cd} 는 고정된 강체 벽에 놓여 있다고 가정하였다.

컴퓨터의 메모리와 계산 시간을 절감하기 위하여 변형이 집중되는 부분에 가는 격자를 집중 배치하였다. Fig. 2는 계산을 위한 격자 구조의 대표적인 예(computation number 3)이다. 축대칭 문제이므로 대칭축의 오른쪽 부분만 계산에 사용하였으며 계산 결과의 분석을 쉽게하기 위하여 가는 격자가 집중 배치된 점 e, f, g, h로 이루어지는 사각형 부분을 영역 A라고 정의하기로 한다. 단열 전단 밴드의 발생 및 성장이 격자 크기에 영향을 받는지의

여부를 알아보기 위하여 격자 크기를 각각 다르게 변화시켜 계산을 수행하였으며 충격속도의 영향을 규명하기 위하여 시편 윗면 \overline{ab} 의 이동 속도를 변화시켜 보았다. 이때 시편 윗면 \overline{ab} 의 이동거리가 같아지도록 계산 종료 시간은 각각 다르게 잡았다. 이상의 두가지 변수의 조합에 따라 네가지 계산을 수행하였으며 이를 Table 1에 정리하였다.

계산에 사용된 재료 모델은 단열 전단 밴드가 잘 묘사될 수 있도록 가공경화효과, 변형률 속도 경화효과, 열적연화효과 등을 모두 고려할 수 있는 구성 방정식을 채택하였으며 재료 특성이 AISI 4340 강과 같아지도록 기존 데이터⁽¹⁶⁾를 주어진 구성방정식에 맞춤 처리(fitting)하여 사용하였다. 구체적인 재료 상수값들은 Table 2에 정리하였다.

3.2 수치해석 결과

격자 크기가 단열 전단 밴드의 발생 및 성장에 어떠한 영향을 주며 실제적으로 발생 가능한 물리적 현상을 재현하기 위한 최소의 격자 크기는 어느 정도인가를 알아보기 위하여 해석 모델의 다른 모

Table 1 Conditions of computation

Computation number	Prescribed end velocity ($\mu\text{m}/\mu\text{sec}$)	Termination time (μsec)	Minimum mesh size (μm)
1	100.0	20.0	200.0
2	100.0	20.0	100.0
3	100.0	20.0	50.0
4	10.0	200.0	50.0

Table 2 Material model

Material model	Material coefficients
Elastic-viscoplastic temperature dependent material model	yield stress $\sigma_0=0.2$ GPa reference strain $\gamma_0=0.001$ reference strain rate $\dot{\gamma}_0=1/\text{sec}$ strain hardening exponent $n=0.1007$ strain rate hardening exponent $m=167.0$ temperature softening exponent $\lambda=0.0013/^\circ\text{C}$ initial temperature $T_0=0^\circ\text{C}$ conversion factor $\chi=0.85$ conversion constant $\xi=2.7455 \times 10^{10}$ Kg $^\circ\text{C}/\text{J}$ Young's modulus $E=200$ GPa Poisson's ratio $\nu=0.30$ density $\rho=7.8$ g/cm 3

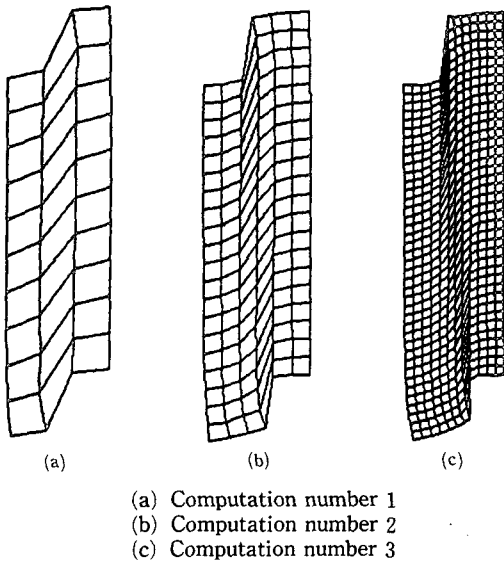


Fig. 3 Adiabatic shear band : Deformed shapes of the region A after $10\mu\text{sec}$ with three different mesh size.

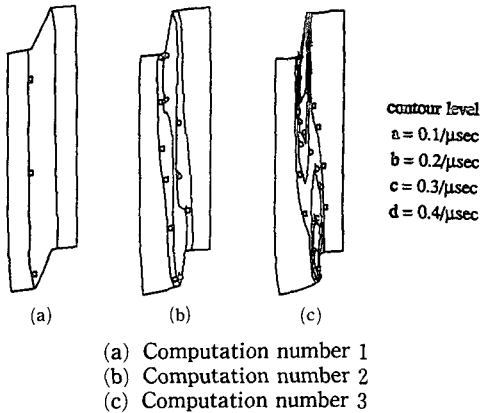


Fig. 4 Adiabatic shear band : Contours of equivalent plastic strain rate of the region A after $10\mu\text{sec}$ with three different mesh size

든 치수는 고정하고 영역 A내의 격자 크기(이하 d로 표시)만을 각각 $200\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$ 까지 변화시켜 계산을 수행하였다. (computation number 1, 2, 3) 계산 결과를 변형 중간 단계($t=10.0\mu\text{sec}$)에서의 영역 A의 변형 형상만을 가지고 비교해 보면 d가 $50\mu\text{m}$ 인 경우에 다소 변형이 집중돼 있는 것을 발견할 수 있으나 계속 국부적으로 성장하여 단열 전단 밴드를 형성할 수 있는지의 여부는 확신하기 어렵다. (Fig. 3) 그러나 등가 변형률

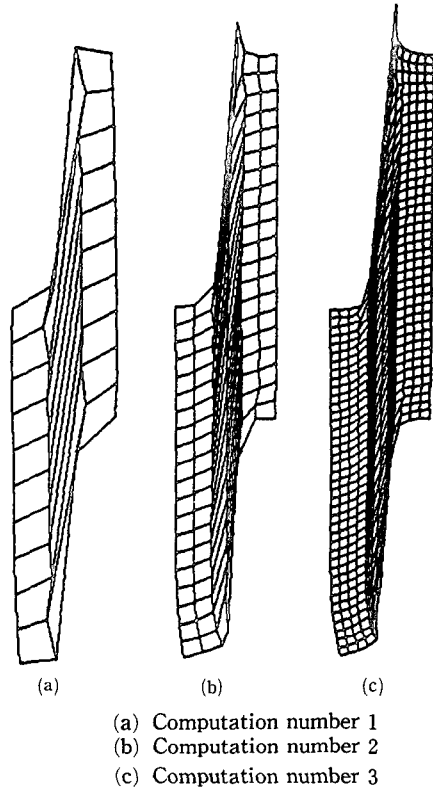


Fig. 5 Adiabatic shear band : Deformed shapes of the region A after $20\mu\text{sec}$ with three different mesh size

속도 (equivalent strain rate)의 변화를 도식한 Fig. 4를 살펴보면 d가 $100\mu\text{m}$ 와 $200\mu\text{m}$ 인 경우, 변형 속도도 그다지 빠르지 않고 집중화될 조짐을 보이지 않으나 d가 $50\mu\text{m}$ 인 경우, 매우 빠른 속도로 방향이 다른 두개의 국부적으로 변형된 단열 전단 밴드가 성장하는 것을 발견할 수 있다. Fig. 5를 살펴보면 이런 현상을 더욱 확실히 확인할 수 있다. d가 $50\mu\text{m}$ 인 경우, 두개의 단열 전단 밴드가 각각 독립적으로 반대 방향으로 잘 발달돼 있는 것을 알 수 있지만 d가 $100\mu\text{m}$ 와 $200\mu\text{m}$ 인 경우, 격자 크기에서 초래되는 평균 효과 때문에 뚜렷한 단열 전단 밴드 형성이 어렵다는 것을 알 수 있다. 이로부터 본 논문에서 해석 대상으로 삼은 모델의 경우, 의미 있는 단열 전단 밴드를 묘사하기 위해서는 d가 $50\mu\text{m}$ 이하가 되어야 한다는 것을 알 수 있다. 그러나 d가 $50\mu\text{m}$ 인 경우에도 저자들이 본 논문의 수치계산을 위하여 사용한 SUN SPARC 1+로 60시간 이상의 중앙처리 시간(central proc-

ess unit time)이 요구되므로 d 가 $50\ \mu\text{m}$ 미만인 경우의 해석에 대해서는 좀 더 강력한 계산 기능을 갖춘 미니 슈퍼 컴퓨터를 사용하여 현재 계산 및 결과 분석을 수행 중에 있다. 실험적 연구에 의하면^(17,18) 실제 단열 전단 밴드의 폭이 실험조건 및 사용 재료에 따라 다소 차이가 있겠지만 대략 수 μm 내지 수십 μm 정도이므로 d 가 $50\ \mu\text{m}$ 인 경우의 해석 결과가 실제 실험의 경향과 크게 다를 것으로

보이지 않는다.

Fig. 6은 시편 밀면 \overline{cd} 에 가해지는 축 방향 하중(axial load)을 시간에 따라 도시한 것이다. 처음 영이던 축 방향 하중이 약 $2\ \mu\text{sec}$ 이후 부터 증가하기 시작하는 것은 시편 윗면 \overline{ab} 에서 가해진 축 방향 하중이 파동 전파에 의하여 시편 밀면 \overline{cd} 에 도달하는데 약 $2\ \mu\text{sec}$ 정도의 시간이 필요하기 때문이다. Fig. 6 내에 큰 화살표로 표시된 부분에서 하중이 갑자기 감소한 것은 전 영역에 걸친 단열 전단 밴드의 순간적 전파 및 성장에 의한 것으로 추정되며 Needleman의 해석⁽⁸⁾에서도 전단 밴드 발생 및 성장의 증거로 언급된 내용이다.

단열 전단 밴드의 발생 및 성장 과정을 좀 더 자세히 살펴보기 위하여 d 가 $50\ \mu\text{m}$ 인 경우의 계산 결과를 더욱 자세히 검토해 보기로 한다. 해석 결과의 이해를 돕기 위하여 영역 A내에 단열 전단 밴드가 성장하는 두 부분에 요소번호를 붙여 구분을 쉽게 할 수 있도록 하였다. 첫번째 단열 전단 밴드는 위에서 발생하여 요소번호 879, 759, 639의 순서로 아래로 성장하며 두번째 단열 전단 밴드는 아래에서 발생하여 요소번호 642, 762, 882의 순서로 위로 성장된다. (Fig. 2 참조) 먼저 시간에 따른 등가 변형률 속도의 변화를 살펴보면 단열 전단 밴드가 순차적으로 성장하는 과정을 한눈에 알아볼

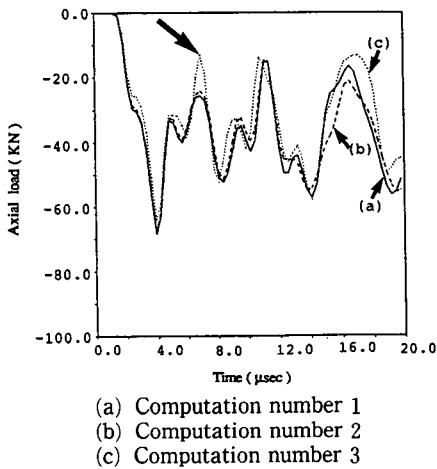


Fig. 6 Adiabatic shear band: Time plots of axial load on the bottom surface of the stepped specimen with three different mesh size

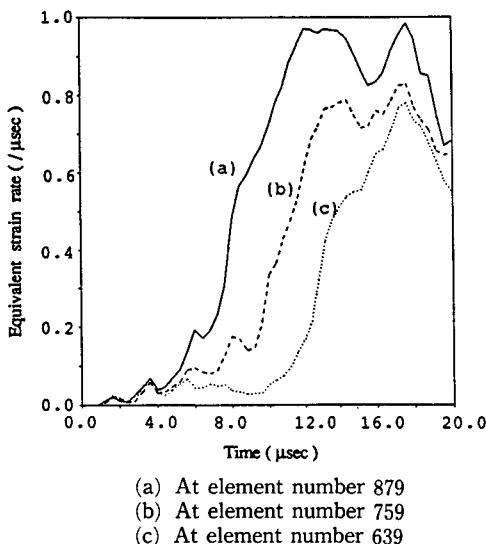


Fig. 7 Adiabatic shear band: Time plots of equivalent plastic strain rate along the first adiabatic shear band of computation number 3

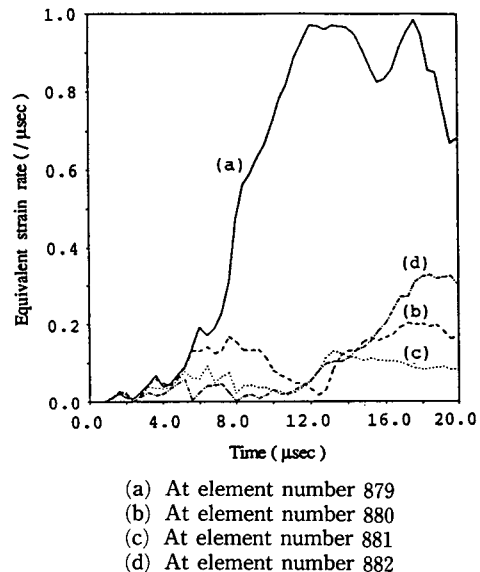


Fig. 8 Adiabatic shear band: Time plots of equivalent plastic strain rate across adiabatic shear bands of computation number 3

수 있다. Fig. 7을 살펴보면 약 $1\mu\text{sec}$ 후에 탄성파(elastic wave)가 도달한 후 요소번호 879는 $7.5\mu\text{sec}$, 요소번호 759는 $9.5\mu\text{sec}$, 요소번호 639는 $12.5\mu\text{sec}$ 이후 부터 변형 속도가 급격히 증가하기 시작하며 약 $17\mu\text{sec}$ 정도에서 모두 최대값을 형성한 후 다시 감소한다. 단열 전단 밴드의 성장 속도

는 요소번호 879와 요소번호 759 사이가 약 $250\mu\text{m}/\mu\text{sec}$, 요소번호 759와 요소번호 639 사이가 약 $170\mu\text{m}/\mu\text{sec}$ 정도이며 단열 전단 밴드가 아래로 성장할수록 시간에 따라 성장 속도가 감소한다는 것을 알 수 있다. Fig. 8을 살펴보면 요소번호 882의 변형 속도가 뒷부분에서 약간 증가하는 영향이

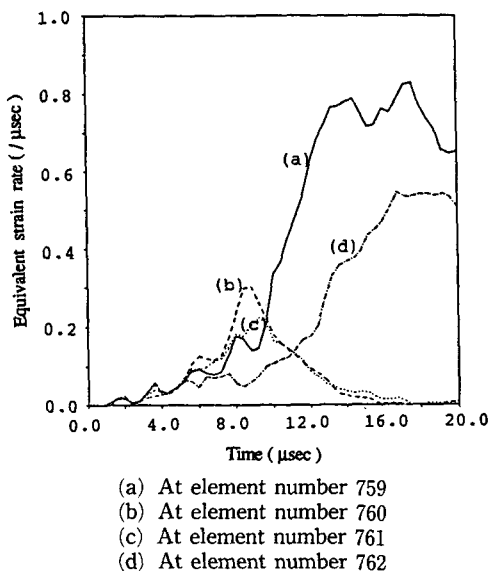


Fig. 9 Adiabatic shear band: Time plots of equivalent plastic strain rate across adiabatic shear bands of computation number 3

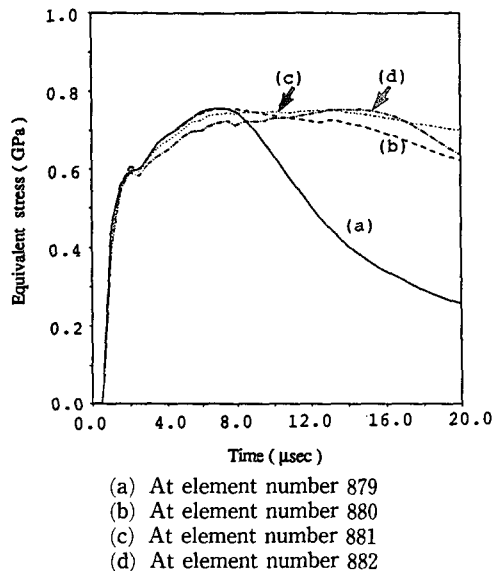


Fig. 11 Adiabatic shear band: Time plots of equivalent stress across adiabatic shear bands of computation number 3

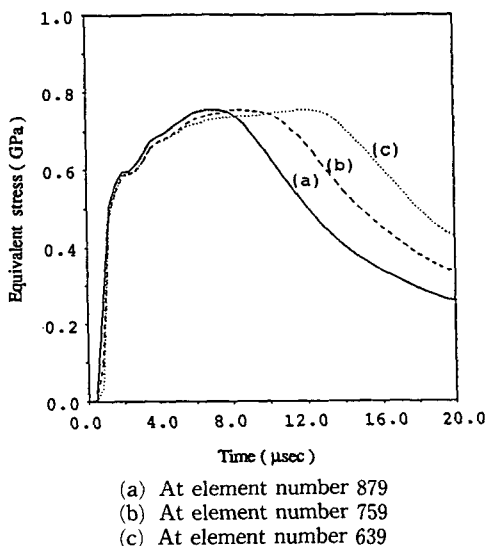


Fig. 10 Adiabatic shear band: Time plots of equivalent stress along the first adiabatic shear band of computation number 3

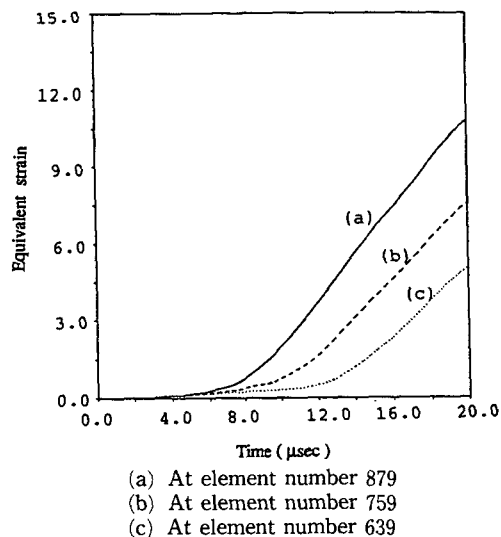
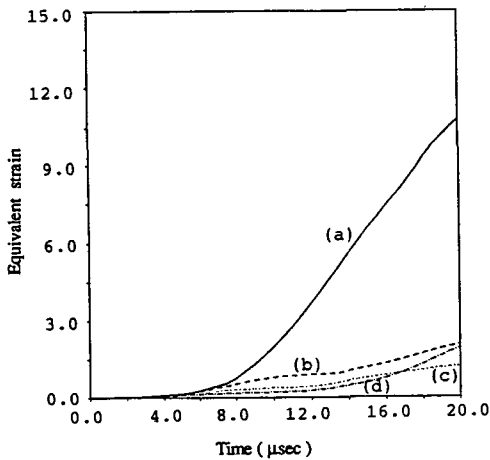


Fig. 12 Adiabatic shear band: Time plots of equivalent plastic strain along the first adiabatic shear band of computation number 3

있으나 요소번호 879를 제외한 나머지 대부분 요소는 변형 속도가 그다지 빠르지 않다. 즉 영역 A의 윗부분에서는 첫번째 단열 전단 밴드 만이 빠른 속도로 성장하고있고 두번째 단열 전단 밴드는 거의 성장하지 않고 있다. 이러한 경향은 Fig. 9에서도 나타나지만 요소번호 762의 변형속도가 요소번호 882의 변형속도에 비해 크게 빨라진 것으로 보아 영역 A의 중간부분에서 첫번째 단열 전단 밴드의 성장 속도는 약간 감소하고 두번째 단열 전단 밴드가 빠르게 성장하고 있다는 사실을 알 수 있다.

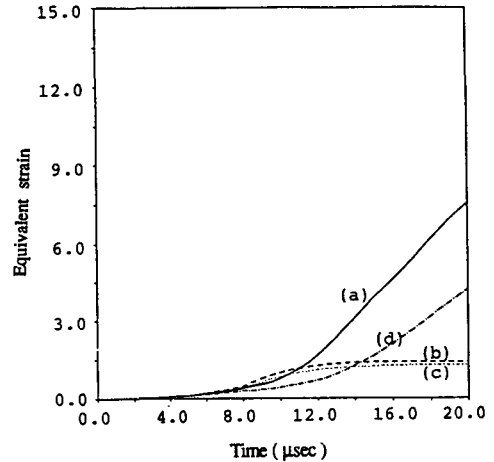
다음은 가공 경화와 가공 연화 특성을 규명하기 위하여 시간에 따른 영역 A 내 각 부분의 등가응력(equivalent stress) 변화를 도시하였다. Fig. 10은 첫번째 단열 전단 밴드 내 등가응력의 변화를 도시한 것이다. 초기에는 가공경화효과에 의하여 등가 응력이 증가하여 최대값에 도달했다가 소성 변형열에 의한 열적연화 현상에 의하여 등가 응력이 감소하는 것을 알 수 있다. 각 요소의 등가응력이 최대값에 도달한 시간은 Fig. 7에서 변형 속도가 급격히 증가하기 시작하는 시점과 거의 일치한다. 즉 열적연화효과에 의한 가공연화 현상이 단열 전단 밴드의 성장에 큰 영향을 준다. Fig. 11을 살펴 보면 10 μsec 이후에는 요소번호 879의 등가 응력에 비하여 나머지 요소의 등가 응력이 훨씬 크므

로 추가로 가해지는 하중의 대부분이 변형이 힘든 인접 요소 보다는 변형이 쉬운 요소번호 879에 집중되리라는 사실을 그림에서 알 수 있다. 영역 A 내의 여러 지점의 시간에 따른 등가 변형률(equivalent strain)의 변화는 Fig. 12, Fig. 13 그리고 Fig. 14에 도시하였다. Fig. 12를 보면 첫번



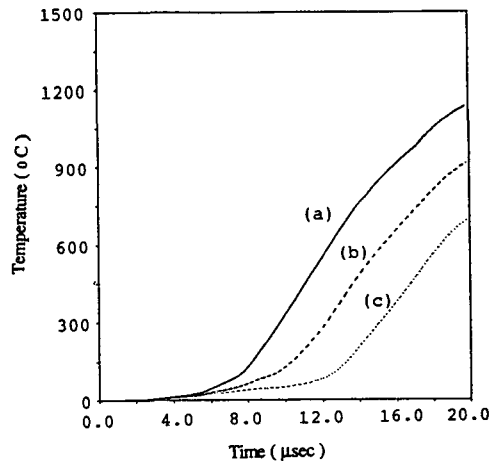
(a) At element number 879
(b) At element number 880
(c) At element number 881
(d) At element number 882

Fig. 13 Adiabatic shear band: Time plots of equivalent plastic strain across adiabatic shear bands of computation number 3



(a) At element number 759
(b) At element number 760
(c) At element number 761
(d) At element number 762

Fig. 14 Adiabatic shear band: Time plots of equivalent plastic strain across adiabatic shear bands of computation number 3



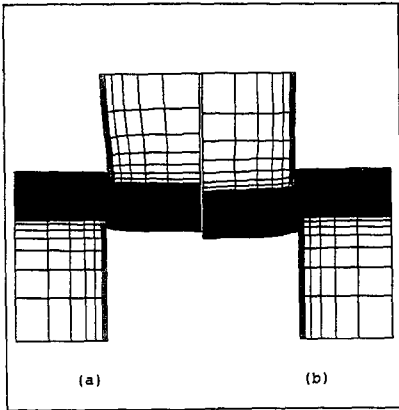
(a) At element number 879
(b) At element number 759
(c) At element number 639

Fig. 15 Adiabatic shear band: Time plots of temperature along the first adiabatic shear band of computation number 3

제 단열 전단 밴드 내의 요소들은 변형이 집중되기 시작한 시각 이후 거의 일정한 기울기로 단조 증가한다. 그러나 요소 번호 879의 기울기가 요소 번호 639의 기울기보다 다소 큰 것으로 보아 단열 전단 밴드의 발생점에 가까울수록 단열 전단 밴드의 변형 속도와 변형량이 크다는 것을 알 수 있다. 단열

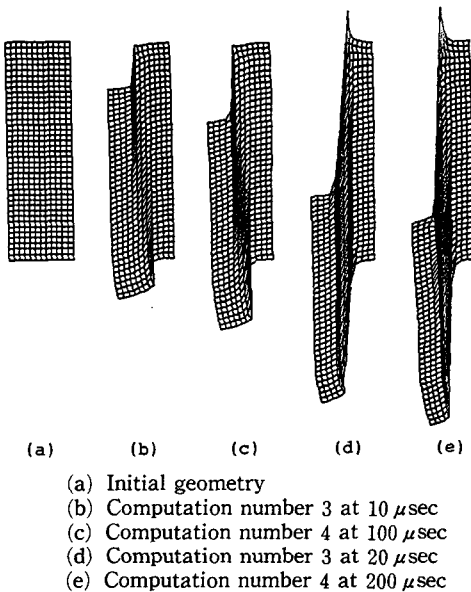
전단 밴드내에 위치한 요소가 인접 요소보다 변형량이 훨씬 크다는 것을 Fig. 13에서 알 수 있고, Fig. 14의 요소번호 762번의 도시 결과로 부터 두 번째 단열 전단 밴드가 발생, 성장해 가고 있다는 사실을 알 수 있다. 첫번째 단열 전단 밴드내 요소들의 시간에 따른 온도의 변화는 Fig. 15에 나타내었다. 기본적인 곡선의 모양이 Fig. 12와 같은 것을 알 수 있는데 이것은 소성 변형 에너지의 85%를 열로 전환시켰으므로 나타나는 현상이다. 요소번호 879번의 경우 최대 1,100°C 정도의 순간적 온도 상승이 발생한다.

마지막으로 충격속도의 영향을 살펴 보면 다음과 같다. 충격속도가 시편 전체의 변형 형상에 미치는 영향을 살펴 보기 위하여 시편 윗면 ab의 축 방향 변위가 1 mm일 때 계산번호 3과 4의 전체 변형 형상을 Fig. 16에 비교해 놓았다. 양자 모두 관성효과 때문에 하중이 가해지는 윗 계단이 아래 계단에 비하여 전반적으로 벌지(bulge)가 심하며 특히, 계산번호 3은 심한 관성효과를 동반하여 하중이 가해지는 윗면에서는 반경 방향으로의 변형이 많은 대신 윗 계단 밑면의 축방향 변위는 계산 번호 4에 비하여 작다. 마찰이 존재하지 않는 상태에서 반경 방향으로의 자유로운 변형은 Fig. 6에 나타난 축



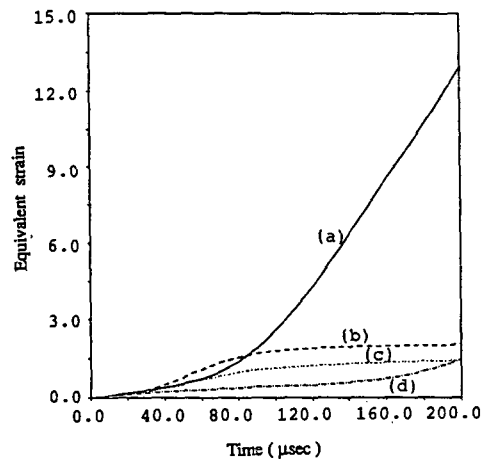
(a) Computation number 3 after 10 μ sec
(b) Computation number 4 after 100 μ sec

Fig. 16 Adiabatic shear band: Deformed shapes of the specimen with different end velocity but with equal overall height reduction



(a) Initial geometry
(b) Computation number 3 at 10 μ sec
(c) Computation number 4 at 100 μ sec
(d) Computation number 3 at 20 μ sec
(e) Computation number 4 at 200 μ sec

Fig. 17 Adiabatic shear band: Deformed shapes of the region A with different end velocity but with equal overall height reduction. All figures have the same reference position.



(a) At element number 759
(b) At element number 760
(c) At element number 761
(d) At element number 762

Fig. 18 Adiabatic shear band: Time plots of equivalent plastic strain across adiabatic shear bands of computation number 4

방향 하중값의 심한 진동의 원인이 된다. Fig. 17은 충격속도에 따른 영역 A의 변형 형상의 차이를 도시한 것이다. 충격속도에 따른 관성 효과를 확실하게 볼 수 있도록 기준점이 같아지게 그림을 도시하였다. Fig. 17의 (b)와 (c)를 비교해 보면 충격속도가 클 때 단열 전단 밴드의 발생이 지연 된다는 것을 알 수 있다. 이것은 부분적으로 변형률 속도 경화 효과 때문이기도 하지만 주로 관성 효과에 기인한 것으로 생각된다. 이 현상은 Needleman⁽⁸⁾의 연구 결과에서도 논의된 사실이 있다. Fig. 17의 (d)와 (e)를 비교해 보면 충격 속도가 클 때는 뚜렷한 두개의 단열 전단 밴드가 발생되는 것을 볼 수 있으나 충격속도가 낮아지면 첫번째 단열 전단 밴드에 비하여 두번째 단열 전단 밴드의 성장이 미미하여 사실상 단열 전단 밴드의 갯수가 하나로 줄어 든다. 이와 같은 사실은 Fig. 18에서도 확인할 수 있다. Fig. 14의 경우와는 달리 요소 번호 762의 소성 변형량이 매우 작은 것으로 미루어 두번째 단열 전단 밴드는 거의 형성되지 않고 있는 것으로 보인다. 이것은 재료의 기하학적 형상이 같은 경우에도 충격속도가 단열 전단 밴드의 발생 및 성장에 큰 영향을 미칠 수 있다는 중요한 증거이며 이를 규명하기 위해서는 단열 전단 밴드를 잘 묘사할 수 있는 적합한 구성방정식을 사용하면서 재료의 기하학적 형상과 충격속도를 고려한 체계적 연구가 필요하다.

4. 결 론

단열 전단 밴드의 발생 및 성장에 대한 특성 규명을 위하여 계단 형상 시편의 고속 변형을 엑스플리시트 시간적분 유한요소법으로 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 본 논문에서 해석 대상으로 삼은 모델의 경우, 실제적인 단열 전단 밴드를 묘사하기 위해서는 격자 크기가 $50\ \mu\text{m}$ 이하가 되어야 한다. 즉 단열 전단 밴드의 발생 및 성장은 격자 크기에 민감하다. 그러나 만약 격자 크기가 실제 단열 전단 밴드 폭 보다 충분히 작아지도록 취하여 계산한다면 단열 전단 밴드의 발생 및 성장 등 물리적 특성의 재현은 격자 크기에 의존하지 않게 될 것으로 생각된다.

둘째, 단열 전단 밴드가 발생된 직후, 단열 전단 밴드의 전파 및 성장에 의하여 시편 바닥면에 가해

지는 축 방향 하중이 순간적으로 감소한다.

셋째, 단열 전단 밴드 내에 위치한 재료의 등가 응력이 최대값에 도달한 후 감소하기 시작하는 시점과 등가 변형률 속도가 급격히 증가하기 시작하는 시점은 거의 일치한다.

넷째, 단열 전단 밴드의 발생점에 가까울수록 단열 전단 밴드 내의 등가 변형률 속도와 등가 변형률 값이 크다.

다섯째, 충격속도가 클수록 관성효과 때문에 단열 전단 밴드의 발생이 지연된다.

여섯째, 재료의 기하학적 형상이 같은 경우에도 충격속도가 다르면 단열전단 밴드의 발생 및 성장 특성이 달라지며 결국 완전히 성장된 단열 전단 밴드의 개수에도 큰 영향을 미친다.

참고문헌

- (1) Zener, C. and Hollomon, J.H., 1944, "Effect of Strain Rate upon Plastic Flow of Steel," J. Appl. Phys., Vol. 15, pp. 22~32.
- (2) Clifton, R.J., 1972, "Plastic Waves: Theory and Experiment," in Mechanics Today, Pergamon Press, Oxford, pp. 102~167.
- (3) Rogers, H. C., 1979, "Adiabatic Plastic Deformation," Ann. Rev. Mat. Sci., Vol. 9, pp. 283~311.
- (4) Olson, G. B., Mescall, J.F. and Azrin, M., 1981, "Adiabatic Deformation and Strain Localization," Shock Waves and High Strain Rate Phenomena in Metals: Concepts and Applications, Plenum Press, New York, pp. 221~247.
- (5) Ringers, B.E., 1984, "Simulating target plugging Failure Due to Adiabatic Shear," Proceedings of the 1984 International Computers in Engineering Conference and Exhibit, August, 1984, Las Vegas, Published by ASME, Vol. 1, pp. 571~576.
- (6) Mescall, J. 1986, "On the Relative Roles of Strain Hardening and Thermal Softening in Adiabatic Shear Bands," in Metallurgical Applications of Shock Wave and High Strain Rate Phenomena, Marcel Dekker, New York, pp. 689~704.

- (7) Needleman, A., 1988, "Material Rate Dependence and Mesh Sensitivity in Localization Problems," *Comp. Meth. Appl. Engng.* Vol.67, pp. 69~85.
- (8) Needleman, A., 1989, "Dynamic Shear Band Development in Plane Strain," *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, Vol.56, pp. 1~9.
- (9) Batra, R.C. and Liu, D., 1989, "Adiabatic Shear Banding in Plane Strain Problems," *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, Vol.56, pp. 527~534.
- (10) 유요한, 정동택, 1991년, "엑스플리시트 시간 적분 유한요소법을 이용한 고속성형 해석(Ⅰ): 마찰 및 관성효과", *대한기계학회논문집*, 제15권, 제1호, pp. 1~10.
- (11) 유요한, 정동택, 1991년, "엑스플리시트 시간 적분 유한요소법을 이용한 고속성형 해석(Ⅱ): 고속 압연 해석", *대한기계학회논문집*, 제15권, 제5호, pp. 1552~1562.
- (12) Flanagan, D.P. and Belytschko, T., 1984, "Eigenvalues and Stable Time Steps for the Uniform Strain Hexahedron and Quadrilateral," *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, 84-APM-5.
- (13) Dienes, J. K., 1979, "On the Analysis of Rotation and Stress Rate in Deforming Bodies," *Acta Mechanica*, Vol.32, pp. 217~232.
- (14) Flanagan, D.P. and Belytschko, T., 1981, "A Uniform Strain Hexahedron and Quadrilateral with Orthogonal Hourglass Control," *Int. J. Numer. Mech. Eng.*, Vol. 17, pp. 679~706.
- (15) Zerilli, F.J. and Armstrong, R.W., 1987, "Dislocation-mechanics-based Constitutive Relations for Material Dynamics Calculation," *J. Appl. Phys.*, Vol. 61, pp. 1816~1825.
- (16) Johnson, G.R. and Cook, W.H., 1983, "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strain Rates and High Temperatures," *Proc. of 7th Int. Symp. on Ballistics*, pp. 541~547.
- (17) Grebe, H.A., Pak, H.R. and Meyers, M.A., 1985, "Adiabatic Shear Localization in Titanium and Ti-6pct Al-4pct V alloy," *Metall. Trans.*, Vol. 16A, pp. 761~775.
- (18) Timothy, S.P., 1987, "The structure of Adiabatic Shear Bands in Metals: A Critical Review", *Acta Metall.*, Vol.35, No.2, pp. 301~306.