

텅스텐 중합금의 단열전단밴드 형성 및 국부화에 대한 연구

황두순* · 홍성인**

A Study of Localization for Adiabatic Shear Band in WHA(Tungsten Heavy Alloy)

Doosoon Hwang* · Sungin Hong**

ABSTRACT

In a plastic metal forming of thermally rate-sensitive material, the localized shear band stems from evolution of a narrow region in which intensive plastic flow occurs. And it give rise to fatal fracture with plastic instability. The objectives of this study are to investigate the localization behavior by using numerical method and predict the failure for WHA(Tungsten Heavy Alloy). In this work, the implicit finite difference scheme is used because of the advantage about convergence and the numerical stability. This study is based on an analysed material with hardening as well as thermally softening behavior which includes isotropic strain hardening and observed the extension of localization within shear band according to material properties.

초 록

열적으로 민감한 재료의 소성 변형에 있어서, 전단력에 의한 전단밴드(shear band)는 많은 공학적인 재료에서 관찰되고 있으며 전단밴드의 형성이 가속화됨에 따라 밴드의 변화량이 많고 폭이 좁은 국부화(localization) 현상이 발생하게 되는데, 이는 가공물에 치명적인 파단을 가져올 수 있는 현상이다. 본 연구에서는 텅스텐 중합금(tungsten heavy alloy, WHA)의 관통 메커니즘을 분석하기 위해 높은 변형률의 조건하에서 관찰될 수 있는 전단밴드(shear band)의 형성과 국부화 현상에 대하여 열적 조건을 고려하여, 고속변형률에서 다결정 금속의 전단밴드 구성에 기초를 둔 메커니즘을 수치적으로 연구하였다.

Key Words: WHA-tungsten heavy alloy(텅스텐 중합금), Adiabatic Shear Band(단열 전단 밴드), Localization(국부화), Implicit Finite Difference Method(임의 유한 차분법), Kinematic Hardening Relation(이동 경화 구성방정식)

† 2007년 7월 20일 접수 ~ 2007년 11월 9일 심사완료

* 학생회원, 충남대 기계공학과 대학원

** 정회원, 충남대 기계공학과, 충남대학교 BK21

메카트로닉스사업단

연락처, E-mail: hsi@cnu.ac.kr

1. 서 론

텅스텐 중합금은 일반적으로 철-니켈 및 다른 재료로 구성되어 있으며, $16\sim 18.5g/cm^3$ 의 높은 밀도, $800\sim 1400$ MPa의 인장강도, $5\sim 30\%$ 의 연신율을 가지고 있다. 그리고, 기계가공성과 2차 성형성이 양호하고 높은 강도를 가지기 때문에 회전자용 로터, 항공기의 평형추, 진동 감쇄장치 및 장갑판재 파괴용 운동에너지탄의 관통자로 널리 응용되고 있다. 이러한 특성으로 인해 텅스텐 합금의 변형 특성에 대한 많은 연구들이 시도되고 있다[1].

본 연구에서는 텅스텐 중합금의 관통 메커니즘을 분석하기 위해 높은 변형률의 조건하에서 많은 공학적인 재료에서 관찰되고 있는 현상인 전단력에 의한 전단밴드 (shear band)의 형성과 진행 과정을 연구하였다. 전단밴드의 형성이 가속화됨에 따라 밴드의 변화량이 많고 폭이 좁은 국부화(localization) 현상이 발생하게 되는데, 이는 가공물에 치명적인 파단을 가져올 수 있는 현상이다. 이러한 단열성(adiabatic) 전단밴드 (shear band)의 형성은 철판의 관통시험에서도 재료가 동적 하중을 받을 때 소성불안정에 의해 소성변형이 국부적으로 집중되어, 하중을 견딜 수 있는 능력이 급격히 저하되어 최종적인 파괴를 불러오는 중요한 원인으로 알려져 있다. 따라서, 국부화 현상의 예측을 통한 소성불안정성(plastic instability)에 대한 연구가 필요하게 되었다.

단열성 전단밴드에 대한 수치해석적 연구는 최근 Shawki[2], Kobayashi와 Fressengeas[3] 등에 의해 양함수 유한차분법과 유한요소법을 사용하여 조사되어진 바 있으나, 수치적 수렴성과 해의 접근속도에 있어 제한성을 가지고 있다. 국내에서는 양함수 시간 적분 유한요소법을 이용한 방법[4]과 저자에 의한 음함수 유한차분법 (implicit finite difference method)을 사용하여 수렴성의 문제와 수치적 안정성의 문제를 극복하는 방법[5]이 시도되고 있다. 또한, 가공물의 치명적 파단에 소성불안정성이 끼치는 영향에

대해 유한요소법을 이용한 연구[6-8]도 수행되고 있다.

본 연구에서는 이러한 전단밴드의 형성과 국부화 현상에 대하여 열적 조건을 고려하여, 고속변형률에서 다결정 금속의 전단밴드 구성에 기초를 둔 메커니즘을 수치적으로 연구하였다. 특히, 관심이 되고 있는 WHA의 전단밴드의 형성과 국부화 진행의 변화를 살펴보기 위해 각 물성치의 영향을 조사하였으며 CRS-1018 Steel와 비교하여 전단밴드의 국부화를 조사하였다.

2. 지배 방정식과 경계조건

다음 Fig. 1과 같이 높이 H 를 갖는 무한 평판에서 두 개의 좌표중 x 방향만을 고려하여, 1차원으로 가정하면 다음의 지배방정식들은 x 와 t 만의 함수로서 표현가능하다. 속도 V 는 일정한 값으로 주었다.

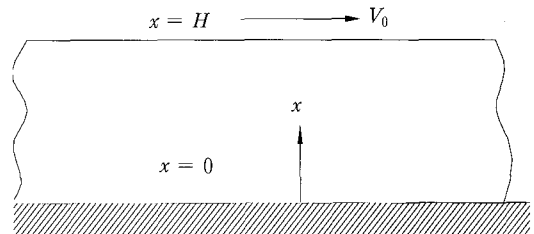


Fig. 1 One-dimensional simple shear motion

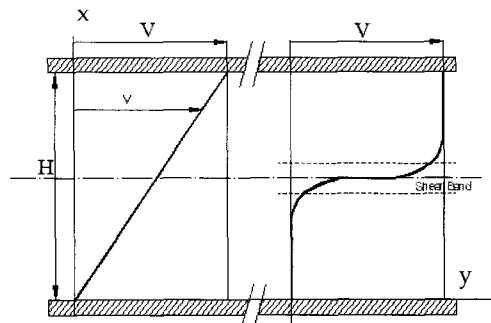


Fig. 2 Kinematic of Shear Band

이 경우 Fig. 2의 좌측과 같이 초기에 전단밴드가 형성되지 않을 때는 높이에 따라 속도크기가 일정하게 증가한다.

그러나, 변형이 진행됨에 따라 전단밴드가 형성되는 경우 Fig. 2의 우측과 같이 협소한 지역에 급속한 속도 변화가 발생하는 것을 예측할 수 있다.

이에 관련된 지배 방정식은 다음과 같다[2].

- 선형모멘트 평형(the balance of linear momentum)

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \tau}{\partial x} \quad (1)$$

여기서, v : velocity, τ : shear stress

- 운동학적 적합조건(kinematic compatibility)

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = \mu \left[\frac{\partial v}{\partial x} - \dot{\epsilon}^p \right] \quad (2)$$

여기서, $\dot{\epsilon}^p$: plastic strain rate

- 에너지 평형(energy balance)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = r_0 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + r_1 \tau \dot{\epsilon}^p \quad (3)$$

여기서, T : temperature

- 재료의 열적 점소성반응

$$\tau = \Phi(\dot{\epsilon}^p, \epsilon, T) \quad (4)$$

Eq. (3)에서 r_0 와 r_1 은 각각 확산계수(diffusion number), 소산계수(dissipation number)를 나타내며, ρ 는 관성계수(inertia number)이다.

고려된 경계조건은 열적으로 단열(adiabatic condition)되어 있으며, 경계부분의 속도는 다음과 같이 주어진다.

$$v(0, t) = 0, \quad v(1, t) = 1, \quad 0 \leq t < \infty \quad (5)$$

$$q(0, t) = q(1, t) = 0; \quad q \equiv \frac{\partial T}{\partial x}, \quad 0 \leq t < \infty \quad (6)$$

3. 유한차분 수식화 및 수치계산

주어진 지배방정식의 유한차분 수식화에 있어서, 음함수(implicit) 방법중 Simple Method를 사용하여 근사화하였으며, 다음과 같다.

$$v_j^{n+1} = v_j^n + \frac{k}{2\rho h} (\tau_{j+1}^n - \tau_{j-1}^n) \quad (7)$$

$$\tau_j^{n+1} = \tau_j^n + \frac{\mu k}{2h} (v_{j+1}^{n+1} - v_{j+1}^{n-1}) - (\mu k)\Phi_j^n \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & -zT_{j+1}^{n+1} + 2(1+z)T_j^{n+1} - zT_{j-1}^{n+1} \\ & = zT_{j+1}^n + 2(1-z)T_j^n + zT_{j-1}^n + 2kr_1\tau_j^{n+1}\dot{\epsilon}_j^n \end{aligned} \quad (9)$$

$$\dot{\epsilon}_j^{n+1} = \left[\tau_j^{n+1} \left(\frac{1}{T_j^{n+1}} \right)^{\nu} \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_j^n} \right)^n \right]^{\frac{1}{m}} \quad (10)$$

$$\epsilon_j^{n+1} = \epsilon_j^n + k \dot{\epsilon}_j^{n+1} \quad (11)$$

Eq. (7)에서 Eq. (11)번까지의 식은 Eq. (1)부터 Eq. (4)까지의 지배방정식을 유한차분형태(finite difference formulation)로 바꾼 것이다.

여기서, n 은 시간 간격(time step)을, j 는 격자 간격(mesh points)을 나타내며, $z = (\Delta x)^2 / \Delta t$ 이다.

수치계산에 있어서 온도를 구할 때는 연립방정식을 풀어야 하므로, 가우스 소거법(Gaussian Elimination for Tridaigonal)을 사용하였다.

음함수로 사용하여 결과를 얻는 경우는 수렴성에는 문제가 없으나, 결과의 타당성을 향상시키기 위해 Eq. (12)의 Shawk[2]에 의해 제안된 양함수방법에 있어서의 수렴성에 대한 시간 기준을 통해 보다 안정적인 시간 간격을 설정하였다.

$$\Delta t \leq \min \left\{ \frac{\Delta x^2}{2r_0}, \frac{2\Delta x}{c_s} \right\} \quad (12)$$

여기서, $c_s \equiv \sqrt{\mu / \rho}$ 는 탄성 전단파 속도 (elastic wave speed) 이다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1 수치조건

WHA의 전단밴드 변화 특성을 관찰하기 위해 CRS-1018 Steel를 기본으로하여 비교 조사하였다.

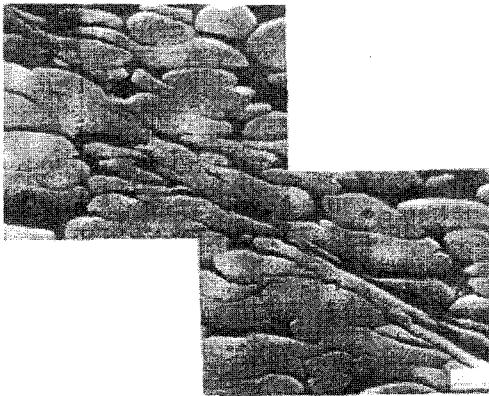


Fig. 3 Adiabatic shearband of highly deformed WHA

Figure 3은 높은 변형 하에서 발생한 WHA의 전단밴드 사진이며, 이에 대한 물성치와 재료 특성 계수값은 다음과 같다.[Table. 1,2]

Table 1. The material properties of WHA and CRS-1018 steel

구분	WHA	Steel
Thermal conductivity	75 W/(m · K)	54 W/(m · K)
Mass density	17140 kg/m ³	7800 kg/m ³
Specific heat	139 J/(kg · K)	500 J/(kg · K)
Flow stress	900 MPa	436 MPa
Elastic Modulus	134 GPa	81 GPa

Table 2. The dimensionless values of WHA and CRS-1018 steel

구분	WHA	Steel
inertia number	0.000119	0.000118
diffusion number	0.0050368	0.3354
dissipation number	1.1333	0.0022154

4.2 전단밴드에서 국부화 진행

Figure 4는 $\Delta t = 0.0183$ 의 시간 간격(time step)을 두고 $t = 0.0915$ 까지 다섯 차례의 시간 흐름에 따른 온도변화를 도식화한 그래프이다. Fig. 4 에서 보는 바와 같이 국부화 현상이 발생함에 따라 전단밴드의 중심부에서 온도에 대한 peak가 급속히 성장하는 것을 알 수 있다. 이것은 단열성 전단밴드에 있어서 중심부에서 열생성(heat generation)이 발생하여, 주위로의 확산이 일어나는 것으로 생각할 수 있다.

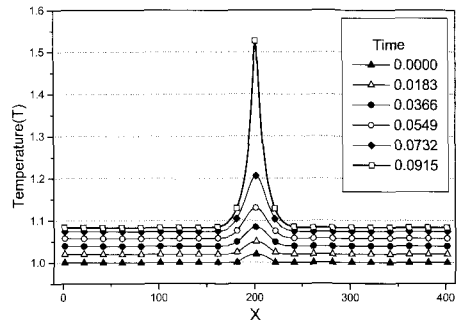


Fig. 4 variation of temperature for spatial distribution

Figure 5에서는 속도 변화율을 나타내고 있는데, 시간의 흐름에 따라 전단밴드에서의 속도 변화비(velocity gradient)가 급속히 커지며, 속도 변화비가 급속히 커진 부분이 보다 작아지는 국부화 현상을 살펴볼 수 있다. 이것은 Figure 6에 나타난 소성변화율의 극단적인 peak의 증가를 가져온다.

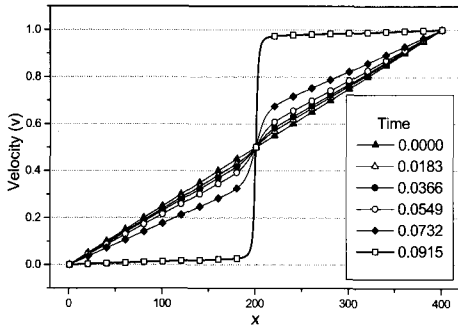


Fig. 5 variation of velocity for spatial distribution

변형(plastic deformation)을 야기 시킨다는 것을 알 수 있다.

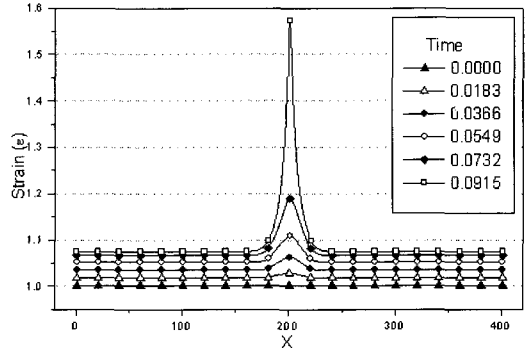


Fig. 7 variation of strain for spatial distribution

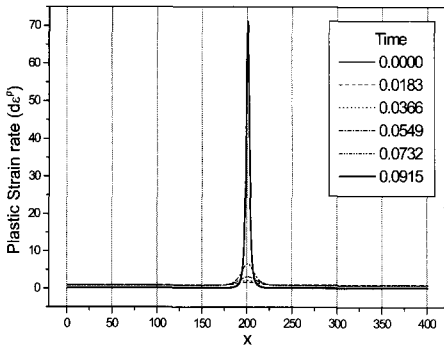


Fig. 6 variation of plastic strain rate for spatial distribution

4.3 재료의 물성치에 따른 변화

Figure 6에서 보는 바와 같이 소성변화율(plastic strain rate)의 peak가 급속히 성장함을 관찰할 수 있으며, peak의 생성부위가 보다 더 축소되는 국부화 현상을 마찬가지로 살펴볼 수 있다. 이러한 소성변화율의 peak의 성장은 Fig. 7에서와 같은 strain의 증가를 가져온다.

위 결과로부터 열적으로 연성재료(ductile material)에 있어서, 단열되어 있는 전단밴드의 경우 주위로의 열전달할 수 있는 시간의 부족과 초기 균질적 재료(homogeneous material)에서 비균질적 변형(inhomogeneous deformation)의 원인으로 인한 것으로 알려진 국부화 현상이 단열성 전단밴드에 있어서 발생하며, 이것은 상대적으로 높은 온도와 협소한 영역에 심한 소성

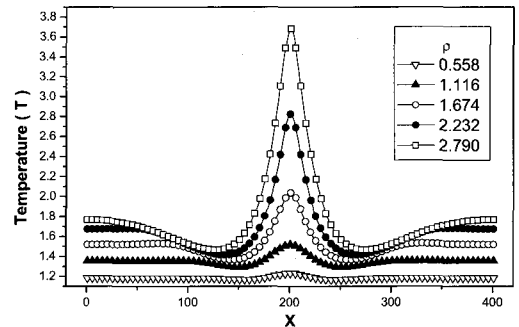


Fig. 8 variation of temperature with large inertia number

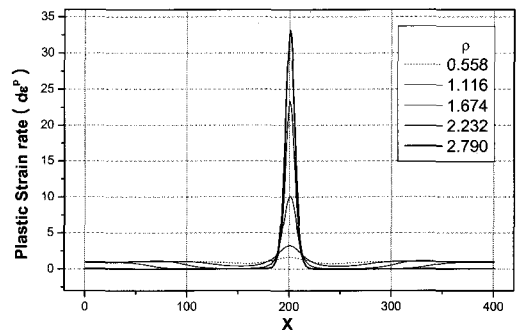


Fig. 9 variation of plastic strain rate with large inertia number

Figure 8과 Fig. 9는 관성계수가 상대적으로 매우 큰 값인 1.0일 때 각각 온도변화와 소성 변형을 증분을 나타낸 그래프이다. 관성계수가 작을 때 온도분포가 중심부 상승과 함께 중심부 주변에서는 일정한 비로 상승하는 것과는 달리 큰 관성계수 값에 대해 중심부 주위에서 온도 상승률이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그리고, 소성 변형을 증분의 변화에서 살펴 볼 수 있듯이 국부화가 일어나는 부분이 상대적으로 확대되는 것을 볼 수 있다. 이것은 관성계수가 클수록 국부화의 진행은 늦어지고, 국부화를 방해하는 인자로 작용한다고 생각할 수 있다.

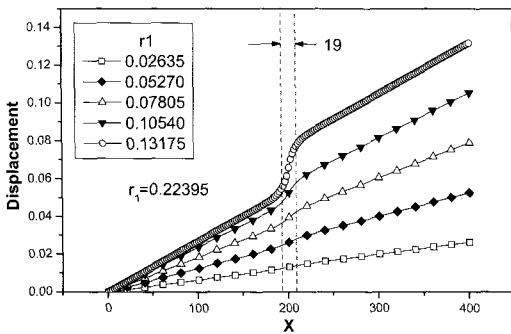


Fig. 10 Displacement profile for dissipation number, 0.22395

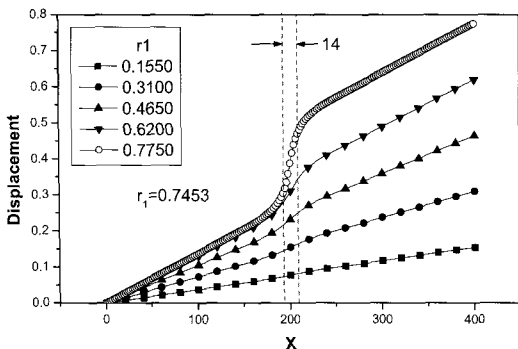


Fig. 11 Displacement profile for dissipation number, 0.7453

Figure 10은 소산계수가 0.22395일 때 높이에 따른 변위의 변화를 보여주고 있다. 초기 일정하게 변화가 일어나던 변위가 변형이 진행함에 따

라 중심부에서 급경사를 이루는 것을 확인할 수 있다. 그리고, 급경사를 이루는 중심부가 축소되는 경향을 확인할 수 있는데, 이는 속도 변화의 형상에 따른 것임을 알 수 있다. 급경사를 이루는 부분을 밴드폭이라고 하며, 국부화 진행의 기준이 된다.

Figure 10과 비교하여, Fig. 11은 소산계수가 0.22395보다 큰 0.7453일 때 밴드폭이 19에서 14로 줄어드는 것을 볼 수 있는데, 이로부터 소산계수가 클수록 밴드폭이 줄어든다고 생각할 수 있다.

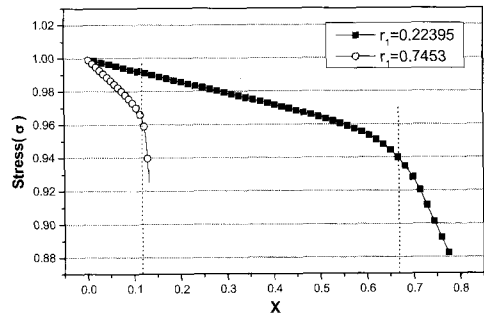


Fig. 12 Evolution of the band and boundary stresses for two different values of the dissipation number

Figure 12는 소산계수가 각각 0.22395와 0.7453일 때 시간에 따른 응력변화를 나타낸 것으로, 소산계수가 클수록 응력 감소가 더욱 빨리 일어남을 알 수 있다. 이는 전단밴드의 형성과 국부화가 보다 적은 시간에 진전됨을 보여주는 것이다. 그것은 보다 큰 소산계수는 전단밴드에서 국부화가 더욱 빨리 발전시키는 원인이 될 수 있는 단위 시간당 열에너지 생성의 원인에 기인한다고 생각할 수 있다.

Figure 13은 두 가지 다른 확산계수에 따른 국부화의 진행에 따른 열유동의 변화를 관찰한 것인데, 확산계수가 0.02일 때 완만한 응력 감소를 나타내는 반면, 0.0022154일 때 급격한 응력 감소를 살펴볼 수 있다. 이것은 열적연화 (thermal softening)에 의해 국부화가 일어나고

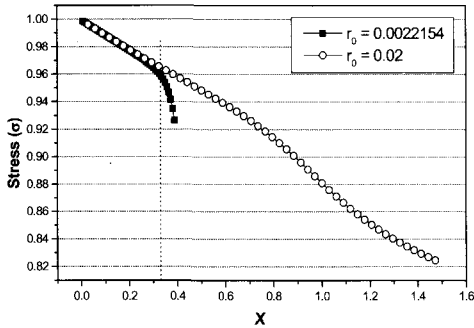


Fig. 13 Evolution of the band and boundary stresses for two different values of the diffusion number

응력의 급격한 감소와 함께 변형률이 급격히 커지는 것으로 생각할 수 있다.

앞에 제시된 물성치에 따른 영향을 고려하여, CRS 1018 steel 과 WHA에 대해 재관찰하면 Fig. 14과 Fig. 15로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

첫째, 관성계수가 상대적으로 더 큰 WHA가 다른 물성치의 영향이 같다면 steel에 비해 국부화의 진행이 늦게 시작함을 예측할 수 있다.

둘째, WHA가 다른 물성치보다 소산계수가 매우 큰 것을 고려하면, 관성계수의 영향보다 소산계수의 영향이 지배적이어서 steel에 비해 국부화의 진행이 빨리 시작된다.

셋째, 밀도, 탄성계수, 열용량 등 재료 특성의 대표값인 관성계수, 확산계수, 소산계수의 비교를 통해 다른 조건과 재료에서 전단밴드의 형성과 국부화의 진행을 예측할 수 있다.

5. 결 론

팅스텐 중합금에 고속변형율의 조건하에서 음함수 유한차분법을 이용하여 1차원 전단거동을 조사한 결과, 시간이 지남에 따라 국부화 현상이 발생하고 전단밴드의 형성이 더욱 가속화

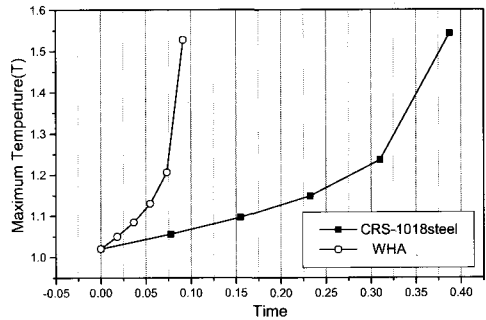


Fig. 14 Variation of Max. Temperature

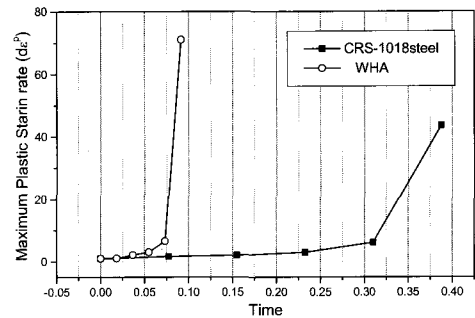


Fig. 15 Variation of Max. Plastic Strain Rate

되어 매우 협소한 지역에 높은 온도와 소성변형률을 수반하는 소성불안정성을 발견할 수 있었으며, 밖으로 열전도되는 시간의 부족으로 인해 국부적으로 강렬한 소성유동을 야기시키는 단열전단밴드의 형성을 밝혀내었다.

단열전단밴드 해석시 기존 방법의 경우 시간에 따라 수렴 특성과 수치적 안정성에 영향을 받아 고속변형율을 수반한 문제의 경우 제약받았으나, 이를 해결할 수 있는 음함수 유한차분법을 이용한 해석방법을 도입함으로써 해석시 수렴성과 수치적 안정성을 확보할 수 있었다. 또한, 음함수 유한차분법을 이용한 방법은 1차원 거동 해석만으로도 단열전단밴드의 특성을 파악할 수 장점을 가지고 있음을 알 수 있었다.

재료의 특성을 관성계수, 소산계수, 확산계수

로 정리해서 나타내어 이것의 비교를 통해 물성치의 변화에 따른 전단밴드의 국부화가 다르게 일어남을 확인하였고, 다음과 같이 물성치에 따른 변화에 대한 결과를 얻었다.

(1) 큰 관성계수는 국부화의 더딘 진전을 가져온다.

(2) 큰 소산계수는 전단밴드내의 열생성으로 인한 빠른 국부화 진전을 가져온다.

(3) 큰 확산계수는 중심부에서의 온도집중을 방해하여 국부화의 더딘 진전을 가져온다.

(4) CRS 1018 Steel 과 WHA를 비교해 볼 때, 상대적으로 소산계수가 매우 큰 WHA에서 전단밴드의 빠른 국부화 진행을 살펴 볼 수 있었으며, 이것은 상기의 결과가 타당함을 보여주는 것이라고 생각할 수 있다.

그러나, 현재에 적용된 것은 등방성 구성방정식이므로 전단밴드에 대한 국부화를 과대평가하는 경향이 있는 것으로 알려져 있으므로[8-10] 추후의 연구과제로 이동 경화구성방정식을 적용하고 소성스핀(plastic spin)을 고려한 해석이 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 황두순, 노병래, 홍성인, "흡킨슨 압축봉 장치를 이용한 텅스텐 합금의 동적 재료 특성에 관한 연구," 한국정밀공학회논문집, 제22권, 제 8호, 2005, pp.92-99
2. Cherukuri, H. P. and Shawki, T. G., "An Energy Based Localization Theory : 1.Basic Framework, 2.Effects of the Diffusion, Inertia and Dissipation numbers," Int. J. Plasticity, 1995, pp.15-40, pp.41-64
3. Fressengeas, C., "Adiabatic Shear Morphology at Very High Strain Rates," Int. J. Impact Eng Vol.8. No.2, 1989, pp. 141-157
4. 정동택, 유요한, "4340 강의 단열 전단 밴드 생성에 대한 유한요소 해석 및 실험적 고찰," 대한기계학회논문집, 18권 5호, 1994, pp.1134-1143
5. 황두순, 이병섭, 윤수진, 홍성인, "단열전단밴드의 국부화 진행에 대한 수치해석적 연구," 한국소성가공학회 '99년도 춘계학술대회 논문집, 1999, pp.225-228
6. 김완수, 이병섭, 황두순, 홍성인, "업셋 단조의 좌굴 및 소성 불안정 유동에 관한 연구," 한국소성가공학회지, 제 8권 제 4호, 1999, pp.393-398
7. 이병섭, 황두순, 윤수진, 홍성인, "이동 경화를 고려한 좌굴 및 소성 불안정 유동에 관한 연구," 한국소성가공학회 '99년도 춘계학술대회 논문집, 1999, pp.98-101
8. 홍대훈, 황두순, 이병섭, 홍성인, "티타늄 합금재의 튜브 스피닝 공정해석," 한국추진공학회지, 제4권, 제 3호, 2000, pp.55-63
9. Pecherski, R.B., "The plastic spin concept and the theory of finite plastic deformation with induced anisotropy," Arch. Mech., Vol. 40, 1988, pp.807-815
10. Dafalis, Y. F., "Corotational Rates for Kinematic Hardening at Large Plastic Deformation," J. App. Mech., Vol. 50, 1983, pp.561-570
11. Paulun, J. E. and Pecherski, R., "On the Application of the Plastic Spin Concept for the Description of Anisotropic Hardening in Finite Deformation Plasticity," Int. J. Plast., Vol. 3, 1987, pp.303-314