1700 大韓機械學會論文集 第17卷 第7號, pp. 1700~1709, 1993.

〈論 文〉

계단시편의 간극이 단열전단밴드의 형성에 미치는 영향

유요한* · 전기영** · 정동택*

(1992년 11월 16일 접수)

Effects of Clearance on the Formation of Adiabatic Shear Band in Stepped Specimen

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

Key Words: Explicit Time Integration Finite Element Method(엑스플리시트 시간적분 유한요소법), Initiation and Growth of Adiabatic Shear Band(단열전단밴드의 형성 및 성장), Clearance Effect(간극의 영향), Stress Wave Interaction(응력파의 상호작용), Elastic Unloading(탄성제하)

Abstract

The 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 method. Three different clearance sizes are tested. The material model for the stepped specimen includes effects of strain hardening, strain rate hardening and thermal softening. It is found that the material inside the fully grown adiabatic shear band experiences three phase of deformation, (1) homogeneous deformation phase, (2) initiation/incubation phase, and (3) fast growth phase. The second phase of deformation is initiated after sudden shear stress drop which occurs at the same time regardless of the clearance size. The incubation time prior to fast growth phase increases, as the clearance size of the stepped specimen increases. Whereas, after incubation period, the growth rate of the adiabatic shear band decreases, as the clearance size decreases. It is also found that two adiabatic shear band may develop instead of one for the smaller clearance size.

1. 서 론

단열전단밴트(adiabatic shear band)는 재료의 고속변형시 불균일 변형을 심화시켜 최종적으로 재료의 파단을 촉진시키며 고속관통(high speed penetration), 고속성형(high speed forming)시 주요파괴기구(fracture mechanism)의 하나로 원인 규명을 위한 연구가 활발히 수행되어 왔다. 이들 연구 내용은 크게 실험적 연구와 해석적 연구로 나뉘어지며 현재까지 많은 실험적 연구[1~5]가 수행되어 왔다.

최근 국내에서도 이 분야에 대한 관심이 고조되어 실험적 연구결과[6,7]가 발표되고 있다. 그러나 최근에 발표된 일부 논문[4,5]을 제외하면 대부분 단열전단밴드의 형성이 완료된 후에 실험적 관찰이 가능하기 때문에 단열전단밴드의 발생 및 성장 도중에 이루어지는 사항에 대한 지식은 부족하다고 볼 수 있다. 이러한 이유에서 단열전단밴드의 특성을 규명하기 위한 해석적 또는 수치적 연구의 필요성

*정회원, 국방과학연구소 기술연구본부
**국방과학연구소 기술연구본부

이 증대되어 왔으며 이러한 추세에 맞추어 구미 선진제국에서 많은 연구가들이 단열전단밴드의 형성에 관한 수치적 연구결과[8-12]를 발표하였다. 그러나 대부분의 수치해석결과는 일차원에 국한된 문제이거나 실체에 근접한 이차원 형상이라도 실험적 검증이 곤란한 것이 대부분이며 해석결과도 단열전단밴드의 형성기구를 완전히 이해하기에는 미흡한 형편이다.

본 논문은 단열전단밴드의 발생 및 성장시 수반되는 주요 현상들을 체계적으로 이해하기 위한 일련의 연구중 일부분으로 앞서 발표된 연구결과[13]와 연결되는 내용이다. 본 논문에서는 단열전단밴드의 특성 규명을 위하여 특별히 고안된 계단 형상 시편의 계단 간극 w가 단열전단밴드의 발생 및 성장에 미치는 영향을 규명하기 위하여 계단 간극이 다른 세가지 모델에 대한 수치해석을 수행하였다. 이때 단열전단밴드를 묘사하기 위하여 사용된 격자크기는 앞서 발표된 연구결과에 의하여 타당성이 입증된 내용 (단열전단밴드를 묘사하기 위한 최소 격자크기 50 μm)을 그대로 적용하였다. 해석을 위하여 가공경화효과(strain hardening effect), 변형률속도 경화효과(strain rate hardening effect), 열적연화효과(thermal softening effect) 등을 고려할 수 있는 구성방정식(constitutive equation)을 갖춘 엑스플리시트 시간적분 유한요소코드(explicit time integration finite element code) NET[14,15]를 사용하였으며 기존의 연구결과와는 달리 어떠한 인위적 결함도 해석에 사용하지 않았다.

2. 프로그램의 구조 및 구성방정식

NET는 연속체의 고속동적 과도반응을 해석하기 위한 유한요소 프로그램이다. NET는 여러가지 재료거동을 고려할 수 있도록 프로그램되어 있다. 현재는 탄성, 탄소성, 본 논문의 계산에 사용된 탄성점소성 온도의존 재료모델(elastic viscoplastic temperature dependent material model)을 고려할 수 있으며, 필요에 따라 서브루틴을 개조하여 원하는 재료거동을 입력시킬 수 있다. NET는 Lagrangian 유한요소방식을 사용하며, 운동방정식을 직접적으로 엑스플리시트하게 적분한다. 전통적인 유한요소법에서는 강성행렬방식을 사용하지만 NET에서는 전체 강성행렬을 계산에 사용하지 않고 매 시간 단계마다 요소응력으로부터 각 절점의 집중질량에 대한 운동학적 구속조건을 만족하는 가속도를 구하고 엑스플리시트 시간적분을 통하여 다음시간 단계의 각 절점에서의 속도와 변위를 직접 계산한다. 이 값들로부터 각 요소들의 변형구배와 속도구배를 구하고 이것을 이용하여 주어진 구성방정식으로부터 각 요소에 대한 응력을 구하게 된다. 이상에서 구한 해를 바탕으로 각 절점에 대한 가속도를 구하면 다시 다음시간 단계로 넘어가게 된다.

본 논문에서는 금속계열 재료의 고속변형시 재료의 거동에 영향을 미치는 세가지 주요인자인 가공경화효과, 변형률속도 경화효과, 열적연화효과 등을 가장 효과적으로 반영할 수 있는 Johnson-Cook 모델[16]과 유사한 다음과 같은 형태의 구성방정식을 사용하였다.

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

여기서 항복응력 σ_0, 기준변형률 γ_0, 가공경화지수 n, 기준 변형률속도 $\dot\gamma_0$, 변형률속도 경화지수 m 등은 등온상태에서의 재료시험 결과로부터 얻어지며 열적연화지수 λ는 재료의 용융온도 T_{melt}와 초기온도 T_0로부터 다음과 같이 표시된다.

$$\lambda=[0.5\,T_{\text{melt}}-T_0]^{-1} \tag{2}$$

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

$$\dot T=\chi\xi\tau\dot\gamma \tag{3}$$

여기서 χ는 소성변형에 의한 에너지가 열로 변환되는 정도이고, ξ는 소성변형 에너지변화와 온도변화를 연결해 주는 물질상수 값으로 $\xi=\rho C$로 표시된다. 이때 C는 재료의 비열(specific heat)이다.

3. 수치해석

3.1 수치해석 모델

단열전단밴드의 특성 규명을 위하여 특별히 고안된 계단형상 시편의 고속변형과정을 엑스플리시트 시간적분 유한요소법으로 해석하였다. 시편형상은 Fig. 1과 같으며 계단 간극 w가 단열전단밴드의 발생과 성장에 미치는 영향을 규명하기 위하여 w의 치수를 변화시켜 가면서 세가지 계산을 수행하였다. 이때 시편들의 반경은 8 mm를 유지하였으며

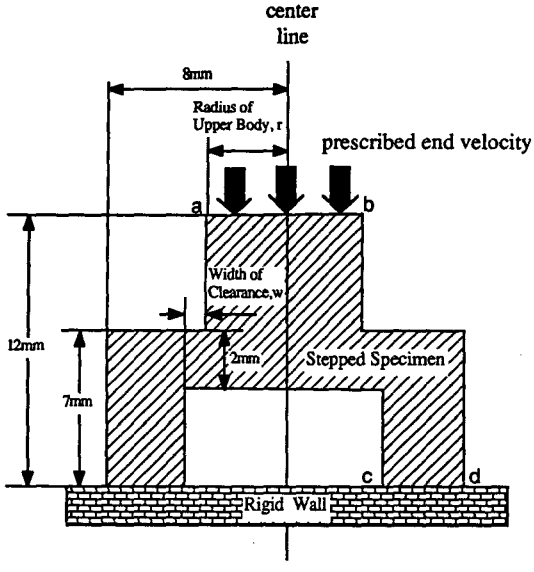


Fig. 1 Schematic diagram of the stepped specimen test setup

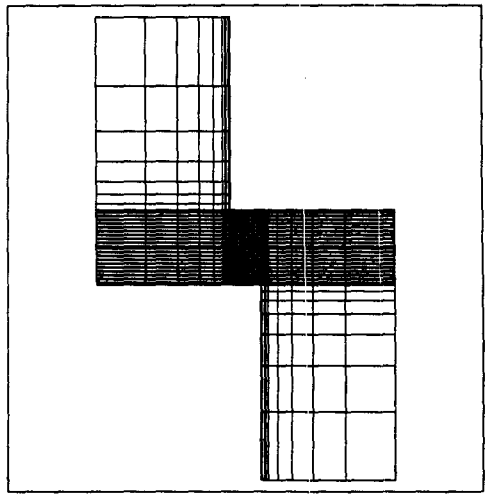


Fig. 2 Undeformed mesh of computation number 3

계단 간극 w의 치수에 따라 윗 계단의 반경 r이 변화하도록 모델링하였으며 높이방향의 나머지 모든 치수는 전부 동일한 값을 취하였다. Table 1은 계산에 사용된 조건을 정리한 것이다. 해석에 사용된 경계조건을 살펴보면 시편 윗면 $\overline{ab}$는 일정한 속도(100 μm/μsec)로 해석이 종료되는 시각(20 μsec)까지 계속 내려오고, 시편 아랫면 $\overline{cd}$는 고정된 강체 벽에 놓여 있다고 가정하였다.

컴퓨터의 메모리와 계산시간을 절감하기 위하여 변형이 집중되는 계단 간극 부분에 단열전단밴드를 묘사할 수 있는 정도로 충분히 작은 사변형 요소(격자 간격거리 50 μm)를 집중 배치하였다.[13] Fig. 2는 계산을 위한 격자구조의 대표적 예(computation number 3)이다. 이 경우 800 μm의 계단 간극 사이에서 단열전단밴드가 충분히 잘 묘사될 수 있도록 50 μm의 폭을 가진 요소를 간극 사이에 16개, 두계단의 연결폭 2 mm 사이에 50개를 집중 배치하였다.

계산에 사용된 재료모델은 금속계열 재료의 단열전단밴드가 잘 묘사될 수 있도록 가공경화효과, 변형률속도 경화효과, 열적연화효과 등을 모두 고려할 수 있는 구성방정식을 채택하였으며 재료 특성이 AISI 4340강과 같아지도록 기존 데이터[16]를 주어진 구성방정식에 맞춤처리(fitting)하여 사용하였다. 구체적인 재료상수 값들은 Table 2에 정리하였다.

3.2 수치해석결과 및 분석

계단 간극 w가 단열전단밴드의 발생 및 성장에 어떠한 영향을 미치는 것인지에 대한 정량적 분석을 위하여 계단 간극을 각각 200 μm, 400 μm, 800 μm로 변화시켜 계산을 수행하였다. (computation number 1, 2, 3) 계산결과를 한 눈에 정리해 볼 수 있도록 변형이 집중되어 단열전단밴드가 형

Table 1 Conditions of computation

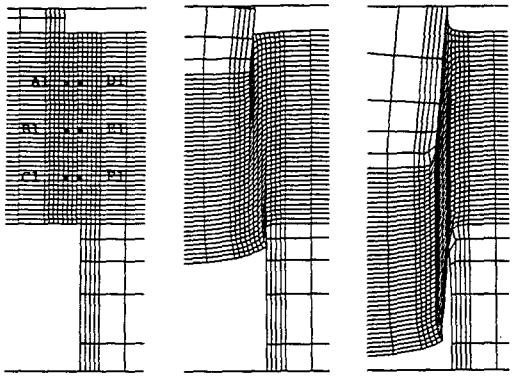
Computation number	Prescribed end velocity (μm/μsec)	Termination time (μsec)	Minimum mesh size (μm)	Width of clearance, w (μm)	Radius of upper body, r(mm)
1	100.0	20.0	50.0	200.0	3.9
2	100.0	20.0	50.0	400.0	3.8
3	100.0	20.0	50.0	800.0	3.6

Table 2 Material model

Material model	Material coefficients
Elastic-viscoplastic Temperature dependent Material model	Yield stress σ_o=0.2 GPa Reference strain γ_0=0.001 Reference strain rate $\dot{\gamma}_0$=1/sec Strain hardening exponent n=0.1007 Strain rate hardening exponent m=167.0 Temperature softening exponent λ=0.0013/℃ Initial temperature T_o=0℃ Conversion factor χ=0.85 Conversion constant ξ=2.7455×10^{10} Kg℃/J Young's modulus E=200 GPa Poisson's ratio ν=0.30 Density ρ=7.8 g/cm^3

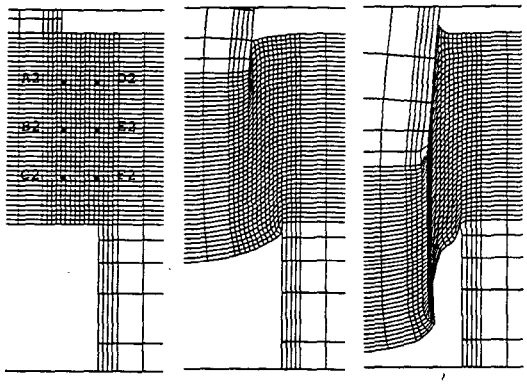
성되는 두계단 연결부위를 확대하여 각각의 변형 형상을 세 시점(time=0 μsec, 10 μsec, 20 μsec)에서 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5에 각각 도시하였다. Fig. 3을 살펴보면 계단 간극 w가 넓은 나머지 경우보다 비교적 빨리 단열전단밴드의 생성이 시작되어 time=10 μsec에서 이미 두개의 단열전단밴드가 보이며 최종적으로는 뚜렷한 두개의 단열전단밴드가 형성되는 것을 알 수 있다. 이에 비하여 Fig. 4(b)의 경우, Fig. 3(b)보다 첫번째 전단밴드의 발달이 느리고 두번째 전단밴드의 조짐은 거의 보이지 않으며, 결국 충격이 가해진 쪽에 가까운 첫번째 전단밴드만이 완전히 성장하고 충격이 가해진 쪽에서 멀리 떨어져 있는 두번째 전단밴드는 거의 성장하지 않는다. 이러한 경향은 Fig. 5의 분석결과에서도 마찬가지이며, 특히 Fig. 4(b)보다 Fig. 5(b)의 첫번째 전단밴드의 발달이 미약한 것으로 보아 계단간극 w가 클수록 단열전단밴드의 발생이 지연되는 경향이 있는 것으로 보여진다. Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5의 분석결과를 종합해 보면 완전히 성장된 단열전단밴드의 개수가 계단간극 w가 200 μm일 때는 두개이지만 w가 400 μm 이상일때는 한개로 줄어들고 계단간극 w가 클수록 단열전단밴드의 발생이 지연된다는 사실을 확인할 수 있다. 한편 단열전단밴드의 발생 및 성장시 일어나는 물리적 현상을 효과적으로 관찰할 수 있도록 단열전단밴드가 발생할 가능성이 있는 두계단 연결 부위내에 여섯곳을 선정하여 해당요소에 번호를 부여하였다. 높이 기준으로 볼때 같은 알파벳 문자로 시작하는 위치는 시편내 동일 지점이다. 즉 A1, A2, A3는 첫번째 단열전단밴드가 발생할 가능성이 있는 구역내 같은 높이에 위치한 요소들이다.

Fig. 6은 변형 중간단계(time=10 μsec)에서 두계단 연결부위내 등가소성 변형률속도(equivalent plastic strain rate)의 분포를 도시한 것이다. w가



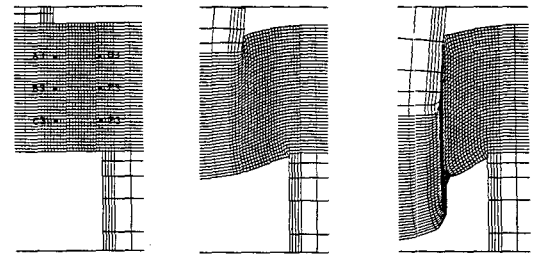
(a) Initial mesh (b) After 10 μsec (c) After 20 μsec

Fig. 3 Deformation sequence of computation number 1



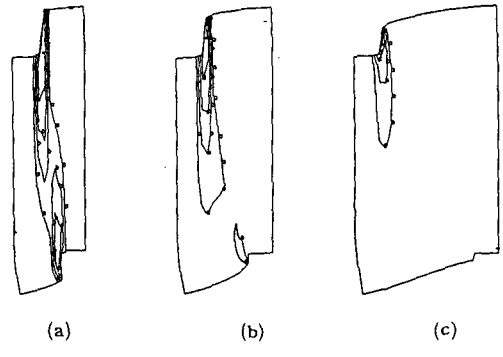
(a) Initial mesh (b) After 10 μsec (c) After 20 μsec

Fig. 4 Deformation sequence of computation number 2



(a) Initial mesh (b) After 10 μsec (c) After 20 μsec

Fig. 5 Deformation sequence of computation number 3



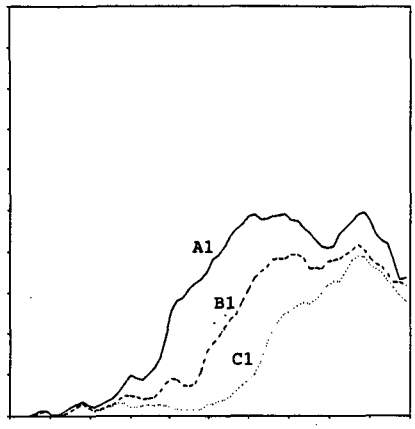
(a) (b) (c)

(a) Computation number 1
(b) Computation number 2
(c) Computation number 3

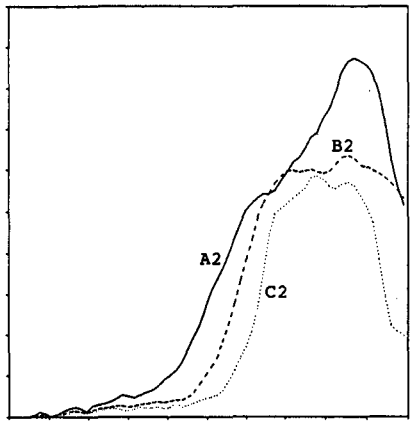
Fig. 6 Contours of equivalent plastic strain rate after 10 μsec(contour level, $a=0.1/\mu$sec, $b=0.2/\mu$sec, $c=0.3/\mu$sec, $d=0.4/\mu$sec)

200 μm일 경우 뚜렷한 두개의 단열전단밴드가 성장하고 있으나 w가 400 μm일 경우는 위에서 아래로 자라는 첫번째 단열전단밴드는 뚜렷하나 아래에서 위로 자라는 두번째 단열전단밴드는 매우 희미한 흔적만을 보이고 있다. 한편 w가 800 μm가 되면 두번째 단열전단밴드는 전혀 관찰되지 않고 첫번째 밴드로 발달상태가 현저하지 않은 것을 알 수 있다. 결국 Fig. 6에서 Fig. 3~Fig. 5의 관찰에서 확인할 수 있었던 사실, 즉 계단 간극 w가 클수록 단열전단밴드의 발생이 지연된다는 사실을 더욱 뚜렷히 확인할 수 있다.

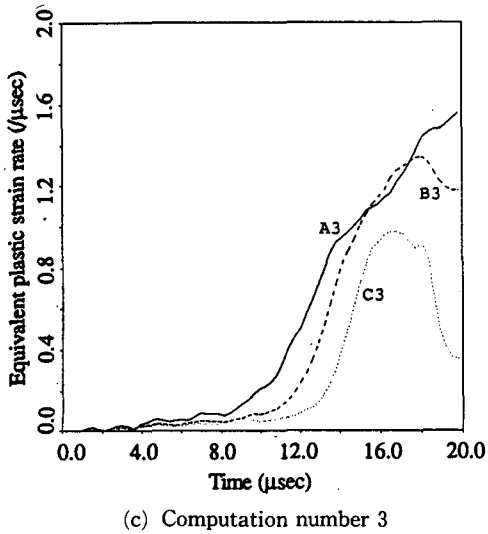
단열전단밴드의 발달과정을 더욱 자세히 살펴보기 위하여 요소군 A, B, C에서의 시간에 따른 등가소성 변형률 속도를 Fig. 7에 도시하였다. 전반적으로 계단간극 w가 작을수록 단열전단밴드의 발생이 촉진되는 것을 알 수 있다. 요소 A1은 약 7 μsec, 요소 A2는 약 9 μsec, 요소 A3는 약 11 μsec 부터 변형속도가 급속히 증가한다. 즉 단열전단밴드가 급속히 성장한다는 것이다. 한편 Fig. 7의 결과로 부터 단열전단밴드의 전파속도를 대략 계산해 보면 요소 A1과 요소 B1사이가 약 250 μm/μsec, 요소 A2와 요소 B2 사이가 약 330 μm/μsec, 요소 A3과 요소 B3사이가 약 360 μm/μsec 정도로 추정된다. w가 증가할수록 단열전단밴드의 전파속도가 증가하는 것은 w가 증가할수록 앞에서 밝힌 바와 같이 단열전단밴드의 발생이 지연되고 이에 따라 더욱 많은 탄성에너지가 시편내에 축적되며 일단 단열전단밴드가 발생되어 성장을 시작하면 이 탄성에너지가 단열전단밴드 내로 일시에 방출되므로 발생되는 현상으로 추측되며 이것이 시편의 형상에 따라 단열전단밴드의 발생 및 성장 특성이 달라지는 주요 원인의 하나로 생각된다. 그러나 w가 400



(a) Computation number 1

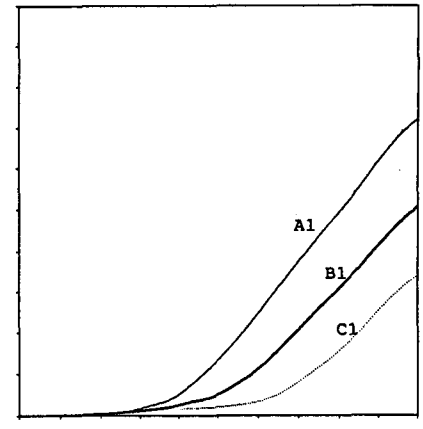


(b) Computation number 2

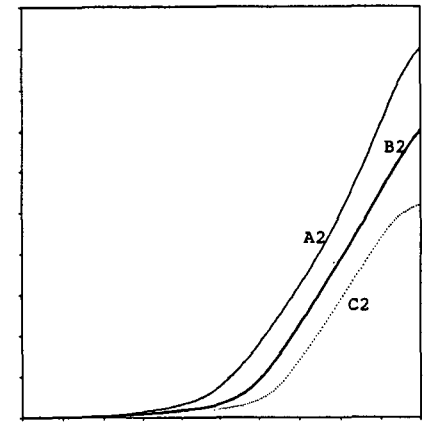


(c) Computation number 3

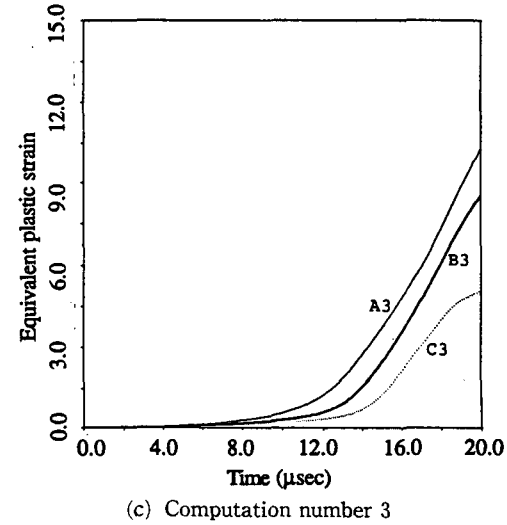
Fig. 7 Time plots of equivalent plastic strain rate



(a) Computation number 1



(b) Computation number 2



(c) Computation number 3

Fig. 8 Time plots of equivalent plastic strain

μm와 800 μm일 때에 비하여 200 μm일 때 단열전단밴드의 전파속도가 특히 낮은 것은 단열전단밴드의 발생이 타 시편보다 일찍 시작되어 축적된 탄성에너지 자체가 작기 때문이기도 하지만 Fig. 3에서 살펴본 바 같이 두 개의 단열전단밴드가 성장되기 위하여 에너지가 분산되는 원인에 의한 상승작용 때문으로 생각된다. 비틂 홉킨슨 봉시험(torsional Hopkinson bar test)을 이용한 Marchand와 Duffy의 실험결과[5]에 의하면 단열전단밴드의 전파속도가 510 μm/μsec이므로 약간의 차이가 있으나 기본적으로 시편형태가 다르므로 직접적 비교가 어렵다고 생각되며 이 부분에 대하여 좀 더 정확한 결론을 내리기 위해서는 더욱 정밀한 실험 및 해석이 필요한 것으로 생각된다.

단열전단밴드내에 가해지는 변형의 정도를 정량적으로 비교하기 위하여 각 부분의 등가소성 변형률(equivalent plastic strain)을 Fig. 8에 도시하였다. 외부에서 시편전체에 일정량 만큼의 같은 변형을 가했을 때 계단간극 w가 좁을수록 단열전단밴드내 위치한 요소가 더욱더 많은 변형을 받는다는 것을 Fig. 8(b)와 (c)의 비교에서 알 수 있으며 Fig. 8(a)의 경우 두개의 단열전단밴드를 성장시키는데 에너지가 분산되어 나머지 경우와 직접 비교는 어려우나 상당히 큰 변형을 받고 있다는 것은 틀림없는 사실이다. w가 400 μm인 경우 요소 A2에서 가장 큰 변형을 받고 있으며 약 1300% 이상의 소성변형을 받고 있다. 그러나 Fig. 8의 도시결과에서는 제외되어 있지만 단열전단밴드의 발생점에 가까운 요소들은 더 큰 소성변형을 받았을 것으로 생각된다.

Fig. 8에서 가장 많은 변형을 받고 있는 것으로 밝혀진 세요소 A1, A2, A3에 대하여 시간에 따른 온도의 분포를 Fig. 9에 도시하였다. 식(3)에서 예상되는 바와 같이 가장 변형량이 큰 요소 A2의 온도가 1450℃로 가장 높다는 것을 알 수 있다. 일반강의 용융온도가 1530℃ 정도인 것을 감안하면 이 지점에서 국부적으로 순간적인 용융이 발생할 가능성도 충분히 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 실제 시험시 해석결과와 같은 큰 소성변형을 받기전에 연성파괴(ductile fracture)가 발생할 가능성도 매우 높으므로 정확한 평가를 위해서는 실험에 의한 검증이 꼭 필요할 것으로 생각된다.

다음은 시간에 따른 가공경화와 가공연화 특성을 알아보기 위하여 요소군 A, B, C의 전단응력의 분포를 Fig. 10에 도시하였다. Fig. 10을 자세히 관찰해 보면 모든 경우에 공통되는 한가지 재미있는 현상을 발견할 수 있다. 그것은 시편 윗면에 하중이 가해지기 시작한 약 1 μsec 후 응력파가 요소군 A, B, C에 차례로 도달하여 전단응력치를 증가시켜 항복에 이른 직후 정도의 차이는 있으나 모두 공통적으로 탄성제하(elastic unloading)을 경험하게 된다는 것이다. 이것은 단열전단밴드의 발생시 증거의 하나로 많이 언급되어 온 사항이지만[10,12] 단열전단밴드의 발생 및 성장의 연관성이 완벽하게 규명되지 않은 부분으로 체계적 연구가 필요한 분야이다. 제하 발생시 요소군 A의 평균온도는 모두 20℃내외로 온도상승만으로 국소적 집중 변형을 일으켜 제하를 발생시키기에는 어렵다고 보여지며 응력파의 상호작용(stress wave interaction) 등 다른 요인이 큰 영향을 미쳤을 것으로 생각된다. 탄성제하와 관계하여 더욱 자세히 살펴보면 몇가지 구체적 특징을 지적할 수 있다. 첫번째, 탄성제하는 일정한 시간 간격을 두고 여러번 발생한다는 것이다. 물론 첫번째 제하시 제하량이 가장 많아 뚜렷하게 보이지만 자세히 살펴보면 그 이후에도 규칙적인 제하의 흔적이 보이며, 특히 Fig. 10(c)의 경우 두번째 탄성제하를 뚜렷히 볼 수 있다. 이러한 사실은 탄성제하가 응력파의 전파시 수반되는 반사, 간섭 등의 상호작용에 의하여 발생 될 수 있다는 점을 강하게 암시하는 사항이지만 구체적인 사항을 현시점에서 단언하기는 어렵다. 두번째, 첫번째 탄

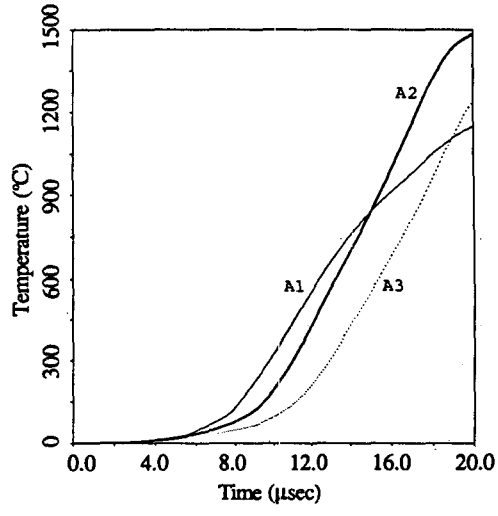
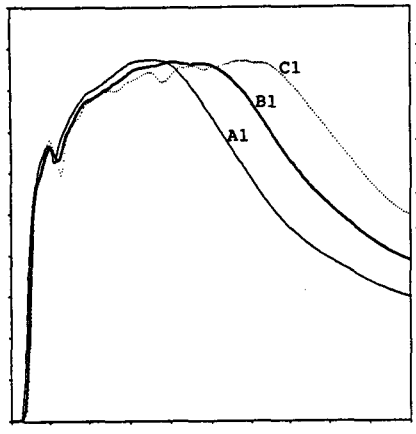
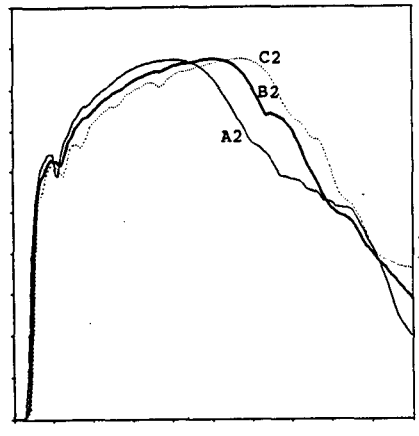


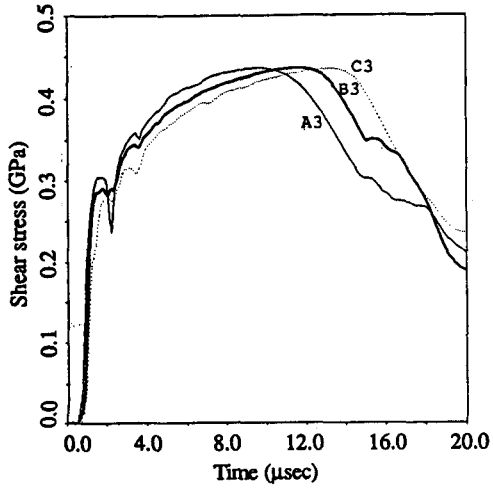
Fig. 9 Time plots of temperature



(a) Computation number 1



(b) Computation number 2



(c) Computation number 3

Fig. 10 Time plots of shear stress

성제하는 요소군 A, B, C의 순서로 진행되지만 두번째 탄성제하는 반대로 C, B, A의 순서로 진행된다. 이 사실도 탄성제하가 응력파의 전파 및 상호작용에 큰 영향을 받는다는 것을 암시하는 부분으로 첫번째 탄성제하를 일으켰던 응력파가 A, B, C의 순서로 재료를 통과하여 계속 진행하다가 시편의 경계면에서 반사되어 C, B, A의 순서로 다시 영향을 준 것으로 보인다. 셋째, 자유면에 가까울수록 제하량이 크다. A, C군의 제하량이 B군 보다 제하량이 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 10에 대한 분석을 토대로 단열전단밴드 내 재료는 밴드의 발생 및 성장시 다음과 같은 세 단계의 과정을 거치게 된다는 것을 알 수 있다. 첫단계는 최초의 응력파가 도달하여 항복직후 제하되기까지의 시기로 시편 전 영역에 걸쳐 비교적 균일한 변형을 받으며 최초의 제하에 의하여 단열전단밴드의 씨앗(seed)이 생성된다. 두번째 단계는 가공경화에 의하여 전단응력치가 최대치에 도달할 때 까지의 시기로 첫번째 탄성제하에 의하여 발생된 단열전단밴드의 씨앗을 조금씩 키워나갈 불균일한 국소변형을 완만하게 성장(slow growth)시키는 시기로 Fig. 10(c)에서와 같이 두번째 제하가 발생할 수도 있는 시기이다. 세번째 단계는 가공연화에 의하여 전단응력치가 감소하는 시기로 불균일한 국소변형이 급격하게 성장(fast growth)하여 단열전단밴드라고 할 수 있는 뚜렷한 불연속선을 만든다. 첫번째 단계를 통과하는데 걸리는 시간은 w에 관계없이 일정하나 두번째 단계를 통과하는데 걸리는 시간은 w에 비례하여 증가한다. 그러나 이때 축적되는 탄성에너지도 함께 증가하므로 일단 급격한 성장이 시작하면 되 w에 비례하여 더욱 빠른 속도로 밴드가 성장한다. 이것은 Fig. 7에서도 확인할 수 있다.

두 개의 단열전단밴드가 발생된 경우, 두 밴드의 발생특성에 차이가 있는가를 규명하기 위하여 computation number 1의 요소 B1과 E1의 시간에 따른 전단응력치를 Fig. 11에 도시하였다. 두번째 단계를 통과하는 데 소요되는 시간은 다르지만 첫번째 제하가 일어날때 까지의 시간은 정확히 같다는 것을 알 수 있다. 즉 두개의 전단밴드가 급격한 성장을 시작하는 시점은 다르지만 전단밴드의 발생은 동시에 이루어졌다는 것을 알 수 있다.

첫번째 제하 발생시 시편 내 두 계단의 연결부위에 어떤 상황이 발생하는지를 알아보기 위하여 com-

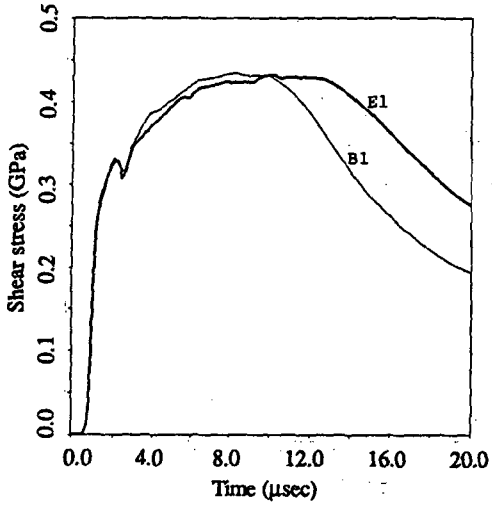


Fig. 11 Time plost of shear stress at element B1 and element E1

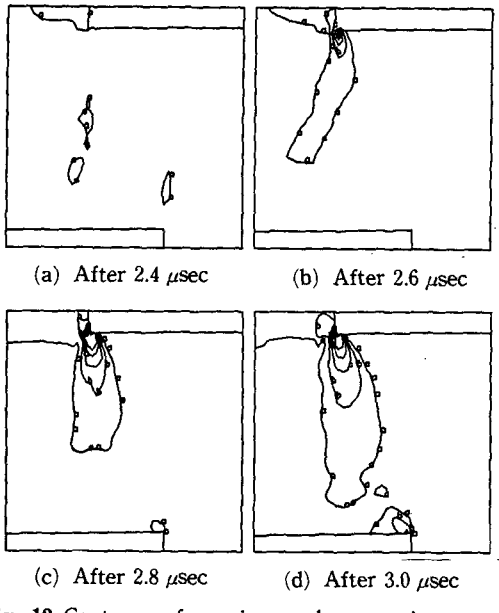


Fig. 12 Contours of maximum shear strain rate of computation number 3(contour level, $a=0.01/\mu$sec, $b=0.02/\mu$sec, $c=0.03/\mu$sec, $d=0.04/\mu$sec, $e=0.05/\mu$sec)

putation number 3의 최대전단 변형률속도(maximum shear strain rate) 분포를 2.4 μsec부터 3.0 μsec까지 0.2 μsec 간격으로 Fig. 12에 도시하였다. 2.4 μsec일 때는 특별한 변형 양상을 보이지 않다가 2.6 μsec일 때 갑자기 최대 전단 변형률속도가

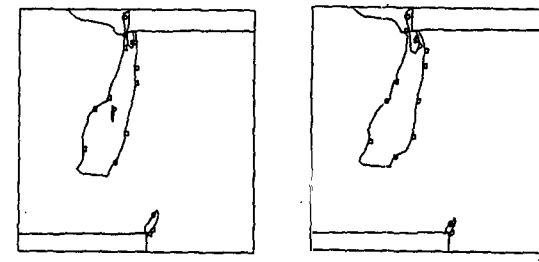


Fig. 13 Contours of maximum shear strain rate after 2.6 μsec(contour level, $a=0.01/\mu$sec, $b=0.02/\mu$sec, $c=0.03/\mu$sec, $d=0.04/\mu$sec, $e=0.05/\mu$sec)

급격히 증가하여 모서리 부분에서 시작하여 축중심을 향하여 아래로 미끄럼선(slip line)과 유사한 형태의 변형모드를 발생시키며 시간이 지남에 따라 차차 방향을 바깥쪽으로 바꾸어 3.0 μsec에 이르러 최종 단열전단밴드의 방향과 같아지고 이후 이 방향을 유지하며 성장을 계속한다. 이러한 변형양상이 모든 경우에 항상 발생하는 현상인지를 알아보기 위하여 2.6 μsec일 때 최대전단 변형률속도 분포를 computation number 1과 computation number 2에 대해서도 Fig. 13에 도시하여 보았다. 계단간극 w가 변해도 Fig. 12에서 관찰된 미끄럼 선과 유사한 변형 모드가 동일한 시각에 항상 나타났다. 이것은 계단간극 w에 관계없이 최초의 제하시 동시에 단열전단밴드의 씨앗이 생긴다는 것을 뜻한다. 그러나 이것은 단열전단밴드의 전조(precursor)일 뿐이고 단열전단밴드가 눈에 보일만큼 급속한 성장을 시작하기 위해서는 최초의 교란(perturbation)을 충분한 크기로 확대, 재생산할 일정한 시간동안의 성숙기간(incubation time)이 필요하며 앞에서 논의된 Fig. 10의 두번째 단계가 이에 해당한다고 볼 수 있다. 그러므로 계단간극이 증가할수록 성숙기간도 증가한다는 결론을 내릴 수 있다.

4. 결 론

엑스플리시트 시간적분 유한요소법을 이용하여 계단형상시편의 계단간극을 변화시켜가며 고속변형과정을 해석한 결과 단열전단밴드의 발생 및 성장과 관련하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 계단간극이 증가할수록 단열전단밴드의 성장이 지연되나 일단 급격한 성장을 시작하면 계단간극이 좁을때 보다 훨씬 빠른 속도로 성장된다.

둘째, 계단간극의 크기에 따라 완전히 성장된 단열전단밴드의 개수가 달라질 수 있다.

셋째, 단열전단밴드 내의 재료는 모두 세 단계로 나누어지는 변형경로를 경험하게 되며, 첫번째 단계의 특징적 현상인 첫번째 제하는 계단간극에 상관없이 동시에 발생된다. 그러나 두번째 단계를 통과하는데 소요되는 시간은 시편 종류에 따라서도 다르고 동일 시편내 재료의 위치에 따라서도 다르다.

넷째, 첫번째 제하 발생후 최대 전단 변형률속도의 급격한 증가가 발생되어 미끄럼선과 유사한 형태의 변형모드가 형성되며 점차 방향을 바깥쪽으로 바꾸어 최종 단열전단밴드의 방향과 같아지고, 이후 이 방향을 유지하며 성장을 계속한다.

다섯째, 첫번째 제하를 발생시키는 주요 원인은 변형열에 의한 온도상승보다는 응력파의 전파 및 상호간섭 등에 의한 시편거동이 더 큰 영향을 주는 것으로 보이나 좀 더 정확한 원인 규명을 위해서는 정밀한 실험과 해석이 병행되어야 가능할 것으로 생각된다.

참고문헌

(1) Rogers, H. C., 1979, "Adiabatic Plastic Deformation," Ann, Rev. Mat. Sci., Vol. 9, pp. 283~311.

(2) Timothy, S. P., 1987, "The Dtructure of Adiabatic Shear Bands in Metals: A Critical Review," Acta Metall., Vol. 35, No. 2, pp. 301~306.

(3) Semiatin, S. L., Jonas, J. J., Shawki, T. C. and Duffy, J., 1987, "Effect of Material Imperfections on Flow Localization in Torsion," Scripta Metall., Vol. 21, p. 669~674.

(4) Hartley, K. A., Duffy, J. and Hawley, R.H., 1987, "Measurement of the Temperature Profile During Shear band Formation in Steels Deforming at High Strain Rates," J. Mech. Phys. Solids, Vol. 35, pp. 283~301.

(5) Marchand, A. and Duffy, J., 1988, "An Experimental Study of the Formation Process of Adiabatic Shear Bands in a Structural Steel," J. Mech. Phys. Solids, Vol. 36, No. 3, pp. 251~283.

(6) 이성학, 김기종, 조경목, 최원봉, 김한식, 1992, "A1-SiCw 복합재료에서의 Adiabatic Shear Band 관찰," 대한금속학회지, Vol. 30, No. 5, pp. 524~531.

(7) 조경목, 김남수, 이성학, 박익민, 1992, "HY-100강에서의 Adiabatic Shear Band(Ⅰ)(생성과정)," 대한금속학회지, Vol. 30, No. 5, pp. 592~599.

(8) 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.

(9) 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.

(10) Needleman, A., 1988, "Material Rate Dependence and Mesh Sensitivity in Localization Problems," Comp. Meth. Appl. Mech. Engng. Vol. 67, pp. 69~85.

(11) Batra, R. C. and Liu, D., 1989, "Adiabatic Shear Banding in Plane Strain Problems," J. Appl. Mech., Vol. 56. 56, pp. 527~534.

(12) Batra, R.C. and Kim, C.H., 1990, "Adiabatic Shear Banding in Elastic-Viscoplastic Nonpolar and Dipolar Materials," Int. J. Plasticity, Vol. 6, pp 127~141.

(13) 유요한, 전기영, 정동택, 1992, "단열전단밴드의 유한요소해석," 대한기계학회논문집, 제16권, 제8호, pp. 1519~1529.

(14) 유요한, 정동택, 1991, "엑스플리시트 시간적분 유한요소법을 이용한 고속성형해석(Ⅰ) : 마찰 및 관성효과," 대한기계학회논문집, 제15권, 제1호, pp. 1~10.

(15) 유요한, 정동택, 1991, "엑스플리시트 시간적분 유한요소법을 이용한 고속성형해석(Ⅱ) : 고속압연해석," 대한기계학회논문집, 제15권, 제5호, pp. 1552~1562.

(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.