

〈論 文〉

4340강의 단열 전단밴드생성에 대한 유한요소해석 및 실험적 고찰

정동택* · 유요한*

(1993년 7월 24일 접수)

Finite Element Analysis and Experiment on the Formation of Adiabatic Shear Band in 4340 Steel

D. T. Chung and Y. H. Yoo

Key Words : Formation of Adiabatic Shear Band(단열 전단밴드의 형성), High Speed Deformation Experiment(고속변형실험), Deformation Control Ring(변형량 조절용 링), Thickness of Adiabatic Shear Band(단열 전단밴드의 두께), Explicit Time Integration Finite Element Method(엑스플리시트 시간적분 유한요소법)

Abstract

A study of adiabatic shear band formation and propagation of 4340 steel was done using the stepped specimen which was subjected to high velocity impact. The high velocity impact was performed on compression Hopkinson bar impact machine. After the controlled impact, the specimen was prepared for visual inspection. Numerical simulation was also performed with same geometrical dimension using explicit time integration finite element code. Experimental results were then compared with the numerical prediction. It was found that the numerical prediction is quite accurate, average thickness of adiabatic shear band is about 10 μm , the macro crack around shoulder is due to folding, and the deformation control ring is effective to freeze the propagation of adiabatic shear band.

1. 서 론

단열 전단밴드(adiabatic shear band)는 재료가 고속으로 변형될 때 열에너지가 주위로 확산되지 못하므로 소성변형이 국부적으로 집중되는 현상이다. 단열 전단밴드는 Zener와 Hollomon⁽¹⁾에 의하여 최초로 발견된 이후 철강계열, 티타늄합금, 구리합금, 알루미늄합금 재료 등 여러 종류의 금속계열 재료에서 발견되고 있으며 고속변형시 구조물의

파괴를 초래하는 주요 원인으로 간주되어 국내에서도 방위산업관련 기관을 중심으로 활발한 연구가 진행되고 있다.^(2~8)

최근 저자들은 단열 전단밴드의 발생 및 성장에 대한 근본적 이해를 위하여 특별히 고안된 계단형상 시편(steped specimen)에 대한 유한요소해석을 통하여 시편의 기하학적 형상과 충격속도(impact velocity)가 단열 전단밴드의 형성에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행한 바 있다.^(9,10) 이러한 연구들의 결과로 충격속도가 클수록 관성효과 때문에 단열 전단밴드의 발생이 지연된다는 사실⁽⁹⁾과 계단간극이 증가할 수록 단열 전단밴드의 성장이 지연

*정회원, 국방과학연구소

되고, 계단 간극의 크기에 따라 완전히 성장된 단열 전단밴드의 개수가 달라질 수 있다는 사실⁽¹⁰⁾ 등을 수치해석을 통하여 밝혀낼 수 있었다. 그러나 공업적으로 실제로 사용되는 재료에서 발생하는 단열 전단밴드의 형태나 특성 등을 수치해석적 방법으로 과연 얼마나 실제에 가깝게 묘사 또는 재현할 수 있는지의 여부에 대해서는 논란의 여지가 있을 수 있다고 생각한다. 그래서 충격을 받는 구조물의 구성재료로 많이 사용되는 고강도 강(high strength steel)에 실제로 큰 충격하중을 가하여 그 재료 내에 발생한 단열 전단밴드의 형태와 특성을 관찰하고 이를 수치해석 결과와 비교 검토하여 앞서 제기된 문제점에 대한 결론을 도출해 내야 한다는 필요성을 느끼게 되었다.

본 연구에서는 대표적 고강도 강인 4340강으로 계단형상 시편을 가공한 후 압축 홉킨슨 봉(split Hopkinson pressure bar) 시험장치⁽¹¹⁾를 이용하여 시편에 고속충격을 가한 후 시편내 단열 전단밴드의 생성여부 및 형태 등을 관찰하고 이에 대한 수치해석을 수행하여 실험결과와 비교검토해 보고자 한다. 그리고 이를 통하여 단열 전단밴드와 관련된 물리적 현상의 효과적 수치해석 수단으로서의 익스플리시트 시간적분 유한요소법(explicit time integration finite element method)^(12,13)의 신뢰성을 검증해 보고자 한다.

2. 실험방법 및 결과

고강도 강의 고속변형시 발생하는 단열 전단밴드의 형태를 관찰하기 위하여 4340강을 계단형상 시편으로 가공하여 필요한 양만큼 고속변형시켰다. 본 실험에 사용된 4340강은 ESR grade(Electro Slag Remelting grade)의 원 재료를 845°C에서 15분 동안 오스테나이징(austenizing) 처리하여 유냉(oil quenching)하고 565°C에서 1시간 동안 템퍼링(tempering)한 후 다시 유냉하여 경도가 37 HRC가 되도록 열처리한 것이다. 이 재료의 열처리후 정적 재료물성(static material property)은 다음과 같다.

항복강도(yield strength) : $\sigma_0 = 1.03$ (Gpa)

인장강도(tensile strength) : $\sigma_t = 1.12$ (Gpa)

영률(Young's modulus) : $E = 210.3$ (Gpa)

파단 변형률(fracture strain) : $\epsilon_f = 0.12$

경화지수(hardening exponent) : $n = 0.005$

이때 응력-변형률 관계식은 다음과 같은 형태를 사용하였다.

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 + \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^n \quad (1)$$

여기서, $\epsilon_0 = \sigma_0 / E$ 를 사용하였다. 구성방정식에 대한 자세한 설명은 본 논문 3.1절을 참조하기 바란다. 실험에 사용된 계단형상 시편은 Fig. 1에 보인 바와 같이 윗면 직경이 7.2 mm이고 초기높이가 11.9 mm인 계단모양을 이루고 있으며 단열 전단밴드의 성장형태를 잘 관찰할 수 있도록 계단연결 높이를 2.0 mm로 충분히 길게 잡았다. 또한 이때 계단사이의 간극은 0.4 mm가 되도록 시편을 기계 가공하였다.

실험준비가 끝난 계단형상 시편을 Fig. 2와 같은 형태의 압축 홉킨슨 봉 시험장치에 설치하여 시험을 수행하였다. 에어건(air gun)에 의하여 발사된 충격봉(striker bar)의 길이 및 속도에 의하여 시편에 가해지는 응력파(stress wave)의 크기 및 길이를 조절할 수 있으며, 충격봉의 속도는 공기 저장소(air chamber) 내의 압력으로 조절 가능하므로 압축 홉킨슨 봉 시험장치를 사용하면 시편에 가해지는 응력파의 형태를 마음대로 조절해서 가할 수 있다. Fig. 2에 나타난 간단한 전기회로를 이용하면 충격봉의 속도를 측정할 수 있으며 본 실험에서는 충격봉의 속도가 50 m/sec가 되도록 압력을

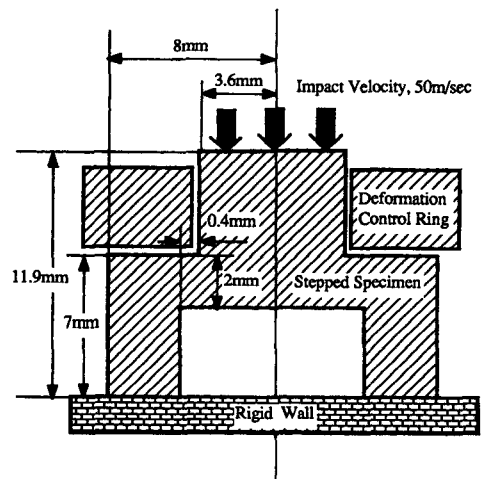


Fig. 1 Details of the stepped specimen for experiment

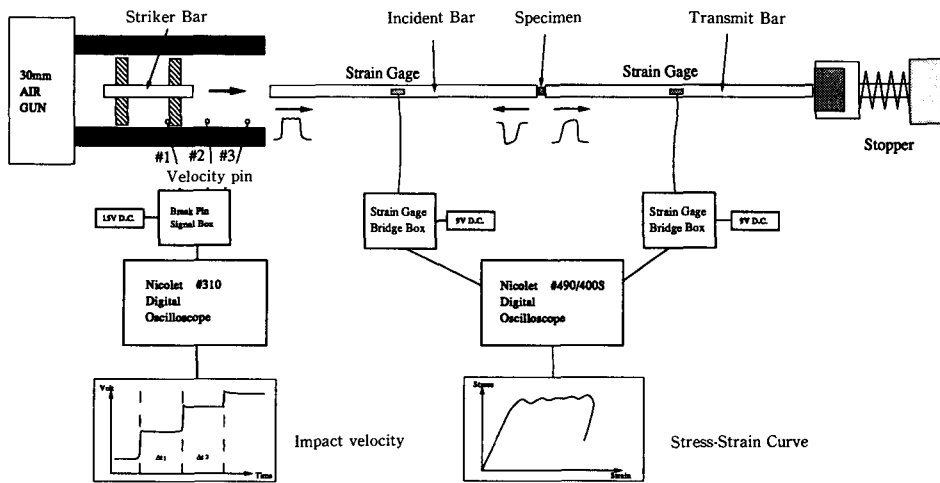


Fig. 2 Schematic diagram of the split Hopkinson pressure bar for experiments

조절하여 실험을 수행하였다. 또한 실험시 시편과 타격봉 사이의 마찰효과를 최소화하기 위하여 양쪽면에 MoS_2 를 도포하였다. 한편 주어진 충격봉의 크기 및 속도만 가지고는 계단형상 시편에 가해지는 전체 변형량을 원하는대로 조절할 수 없으므로 높이가 다른 여러 종류의 변형량 조절용 링(deformation control ring)을 만들어 실험시 시편에 끼워넣어 계단형상 시편의 윗부분이 변형량 조절용

링의 두께 이하로 변형되지 않도록 조치하였다.

실험결과, 변형량 조절용 링의 높이가 4 mm 이하가 되면 단열 전단밴드가 너무 과도하게 성장되어 계단의 연결부위가 파단되므로 성장된 단열 전단밴드를 관찰할 수 없었다. 반면에 변형량 조절용 링의 높이가 4.5 mm 이상이 되면 계단형상 시편에 가해지는 전체 변형량이 너무 작아 단열 전단밴드의 발달이 미약하므로 실험목적과 부합되지 않았



(a) 50X



(b) 100X

Fig. 3 Optical micrograph of a adiabatic shear band formed in 4340 steel

다. 몇 번의 예비실험을 거쳐 단열 전단밴드의 실험적 관찰에 적합한 크기의 변형량 조절용 링을 선정하였으며, 본 시험의 경우 높이 4.35 mm짜리 변형량 조절용 링이 가장 적합한 것으로 결정되었다.

높이 4.35 mm짜리 변형량 조절용 링을 시편에 끼우고 실험을 실시한 결과, 계단형상 시편의 전체 높이는 11.9 mm에서 11.6 mm로 변화되었으며 외형상 변형의 흔적을 거의 찾아 볼 수 없었다. 고속충격 후 단열 전단밴드의 생성여부 및 형태를 관찰하기 위하여 변형된 계단형상 시편을 절단하고 마운팅, 표면 연마를 거쳐 에칭(etching)을 한 후 광학현미경으로 살펴보았다. 광학현미경으로 관찰한 결과는 Fig. 3(a)와 (b)에 나타내었다. Fig. 3(a)를 살펴보면 변형이 집중되는 계단형상 시편 위 코너(corner)부분에서 성장하기 시작한 단열 전단밴드를 뚜렷히 확인할 수 있으며 아래 코너 부분에서는 단열 전단밴드가 관찰되지 않는다. 단열 전단밴드의 성장방향은 대칭 축에 평행한 방향이 아니고 위, 아래의 양쪽 코너부위를 연결하는 방향이다. Fig. 3(b)의 계단 코너에서 나타나는 크랙(crack)은 표면의 열처리 조직을 확인한 결과 열처리나 기계가공시 발생된 크랙이 아니라 급격한 단열 전단밴드 성장에 따른 접측면 접힘(folding)현상임을 확인할 수 있었다. 단열 전단밴드의 특성과 관련하

여 주요 관심사의 하나인 단열 전단밴드의 두께를 알아보기 위하여 단열 전단밴드 발생부위를 고배율로 촬영하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4를 측정된 결과 단열 전단밴드의 평균두께는 10 μ m 내외로 관찰되었다.

3. 유한요소해석

3.1 프로그램의 구조 및 구성방정식

엑스플리시트 시간적분 유한요소법은 운동방정식을 직접적으로 엑스플리시트하게 시간적분한다. 임플리시트 시간적분 유한요소법(implicit time integration finite element method)에서는 구조물 전체의 강성행렬(global stiffness matrix)을 구한 후 반복계산을 통하여 주어진 시간단계에서의 해를 구하지만 엑스플리시트 시간적분 유한요소법에는 전체 강성행렬을 계산하지 않고 매시간 단계마다 요소 응력으로부터 각 절점의 절점력(nodal force)을 계산한 후 각 절점의 집중질량(lumped mass)에 대한 운동학적 구속조건(kinematic constraint)을 만족하는 가속도를 구하고 엑스플리시트 시간적분을 통하여 다음 시간 단계의 각 절점에서의 속도와 변위를 직접 계산한다. 이 값들로부터 각 요소들의 변형구배(deformation gradient)와 속도구배(velocity gradient)를 구하고 이것을 이용하여 주어진 구성방정식으로부터 각 요소에 대한 응력을 구하게 된다. 이상에서 구한 해를 바탕으로 각 절점에 대한 가속도를 구하면 다시 엑스플리시트 시간적분을 통하여 다음 시간 단계의 각 절점에서의 속도와 변위를 계산할 수 있게 된다.

본 논문에서는 금속계열 재료의 고속변형시 재료의 거동에 영향을 미치는 세가지 주요 인자인 변형을 경화효과(strain hardening effect), 변형률속도 경화효과(strain rate hardening effect), 열적 연화효과(thermal softening effect) 등을 가장 효과적으로 반영할 수 있는 Johnson-Cook 모델⁽¹⁴⁾과 유사한 다음과 같은 형태의 구성방정식⁽¹⁵⁾을 사용하였다.

$$\sigma = \sigma_0 \left[1 + \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right]^n \left[\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right]^m \left[e^{-\lambda(\tau - \tau_0)} \right] \quad (2)$$

여기서, 정적 항복응력(static yield stress) σ_0 , 기준 변형률(reference strain) ϵ_0 , 가공경화지수 n , 기준 변형률속도(reference strain rate) $\dot{\epsilon}_0$, 변형



Fig. 4 Optical micrograph of a adiabatic shear band formed in 4340 steel (1000X)

률속도 경화지수 m 등은 상온상태에서의 재료 시험결과로부터 얻어지며 열적 연화지수(thermal softening exponent) λ 는 재료의 용융온도(melting temperature) T_{melt} 와 초기온도(initial temperature) T_0 로부터 다음과 같이 표시된다.

$$\lambda = \left(\frac{T_{melt}}{2} - T_0 \right)^{-1} \quad (3)$$

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

$$\dot{T} = \chi \xi \sigma \dot{\epsilon} \quad (4)$$

여기서, χ 는 소성변형에 의한 에너지가 열로 변환되는 정도이고, ξ 는 소성변형 에너지변화와 온도변화를 연결해 주는 물질 상수값으로 $\xi = \rho C$ 로 표시된다. 이때 C 는 재료의 비열(specific heat)이다.

수치해석에 사용된 재료 특성이 실험에서 쓰였던 4340강과 같아지도록 재료상수값들을 결정하여 해

석에 사용하였다. 구체적인 재료 상수값들은 Table 1에 나타내었다. 단, 변형률속도 경화지수 m 값에 대한 실험치는 아직 확보되어 있지 못하므로 추정치를 사용하였음을 밝혀둔다.

3.2 해석모델

실험결과와 비교검토를 위하여 엑스플리시트 시간적분 유한요소법을 이용하여 4340강의 단열 전단 밴드생성과정을 해석하였다. 축대칭 문제이므로 대칭축의 오른쪽 부분만 계산에 사용하였으며 해석에 사용된 격자구조는 Fig. 5와 같다. 0.4 mm의 계단 간극사이에서 단열 전단밴드가 잘 묘사될 수 있도록 50 μ m의 폭을 가진 요소를 간극사이에 8개, 계단의 연결높이 2 mm 사이에 40개를 집중 배치하였다. 실험에서 관찰된 단열 전단밴드의 실제 두께를 고려할 때 해석에 사용되는 격자크기를 10 μ m이하로 낮추는 것이 실제 물리적 현상의 재현에 도움이 되겠지만 현재 사용가능한 컴퓨터의 능력을 고려하여 이 문제는 차후 과제로 남겨두기로 한다. 해석에 사용된 경계조건을 살펴보면 시편 윗면 ab는 일정한 속도(실제 실험시 얻어진 충돌속도 50 m/sec)로 해석이 끝날 때까지 계속 내려오고, 시편 아랫면 cd는 고정된 강체 벽위에 놓여 있도록 모델링하였다. 이때 대칭축 ae에서는 반경방향의 변형은 허용되지 않고 축방향의 변형만 가능하며 나머지 경계면은 자유면(free surface)이므로 구속조건이 없이 자유롭게 변형될 수 있다. 수치해석은

Table 1 Material coefficients for computation

Material model	Material coefficients
Elastic-viscoplastic temperature dependent material model	Yield stress $\sigma_0=1.03(\text{GPa})$
	Reference strain $\epsilon_0=0.0049$
	Reference strain rate $\dot{\epsilon}_0=1(\text{sec})$
	Strain hardening exponent $n=0.005$
	Strain rate hardening exponent $m=167.0$
	Thermal softening exponent $\lambda=0.0013(/^\circ\text{C})$
	Initial temperature $T_0=0(^\circ\text{C})$
	Conversion factor $\chi=0.85$
	Young's modulus $E=210.3(\text{GPa})$
	Poisson's ratio $\nu=0.29$
	Density $\rho=7.8(\text{g}/\text{cm}^3)$

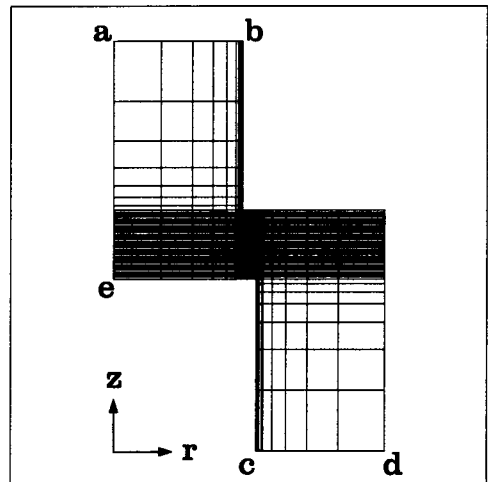


Fig. 5 Undeformed mesh for computation

50 m/sec의 충돌속도로 6 μsec 동안 수행하여 전체 변형량이 실험에서 얻어진 0.3 mm와 같아지도록 하였다.

3.3 해석결과 및 토의

해석결과 얻어진 최종 변형현상은 Fig. 6과 같다. Fig. 5의 최초 시편형상과 비교하여 보면 전반적으로 관성효과(inertia effect)를 반영하여 충격이 가해진 시편 윗면에서 약간의 버섯모양(mushroom) 형상을 나타내지만 전체적으로 비슷한 형상을 유지하고 계단 연결부위에 변형이 많이 집중된 것을 관찰할 수 있다. 변형이 집중된 계단 연결부위를 자세히 관찰하기 위하여 Fig. 7에 확대 변형도를 나타내었다. 좌표값이 $r=4\text{ mm}$, $z=6\text{ mm}$ 인 계단 연결부위를 중심으로 상하좌우 2 mm까지의 부분을 확대하였다. Fig. 7을 살펴보면 Fig. 3에서 관찰할 수 있는 바와 같이 계단코너에서 전단밴드가 발생되어 성장하고 있는 것을 알 수 있다. 전단밴드가 실험에서와 같이 뚜렷하지 않은 것은 실제 전단밴드 두께보다 두꺼운 요소를 사용함으로써 인하여 발생된 평균 효과때문에 변형이 덜 집중되었기 때문이라고 생각되며 10 μm 이하의 요소로 해석을 수행할 경우 Fig. 3(a)에서와 같은 뚜렷한 전단밴드를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. Fig. 7에서도 Fig. 3(b)와 동일한 지점에서 비슷한 크기의 접촉면 접힘현상이 발생하였다.

Fig. 8은 6.0 μsec 까지 단열 전단밴드의 성장 과정을 보여주고 있다. 변형 전(0.0 μsec)에 완전히

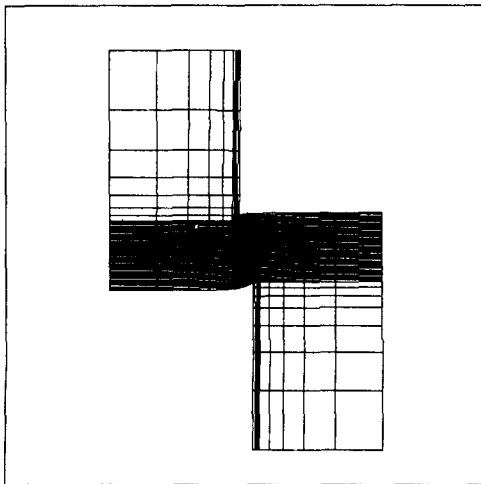


Fig. 6 Final deformed mesh

수평하고 평행한 선들로 이루어져 있던 계단 연결 부위가 변형 초기(2.0 μsec)에는 거의 변화를 보이지 않다가 변형 중기(4.0 μsec)에 이르러서 국부적인 변형을 나타내기 시작한다. 이것은 눈에 띄는 소성변형을 받기까지는 하중이 가해진 후 어느 정도 시간이 필요하다는 것을 의미한다. 그 시간은 영률과 재료 밀도에 의하여 결정되는 소성파의 전파 속도와 파동 근원지(wave source)로부터의 거

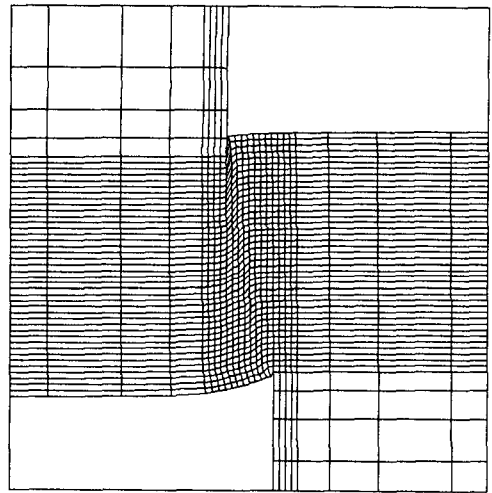


Fig. 7 Magnified final deformed configuration in stepped region

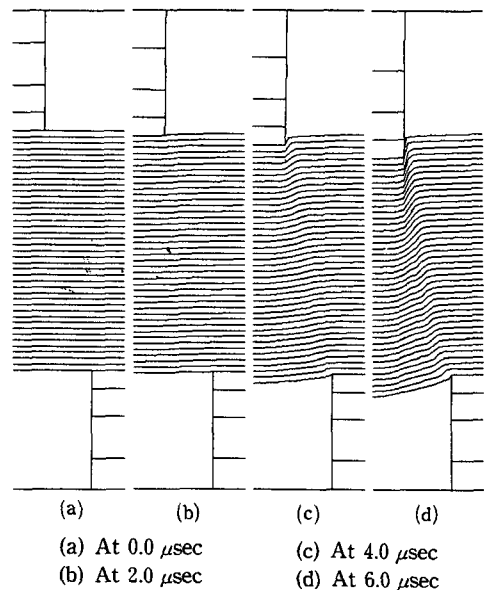


Fig. 8 Deformation sequences in stepped region

리 등에 의하여 결정된다. 변형말기(6.0 μsec)가 되면 완전히 발달되었다고는 볼 수 없지만 비교적 뚜렷한 불연속 밴드를 관찰할 수 있다. 그러나 밴드가 어떤 방향으로 성장해 나가고 있는지의 여부는 이 그림으로 판단하기 어렵다.

단열 전단밴드의 성장과정을 좀 더 정량적으로 관찰하기 위하여 각 시간별 등가 소성변형률(equivalent plastic strain)의 분포를 Fig. 9에 도시하였다. 2.0 μsec 까지는 등가 소성변형률이 영(zero)에 가깝게 유지되다가 3.0 μsec 에 윗 계단 연결부위 코너에서부터 비교적 뚜렷한 소성변형의 집중이 시작된다. 4.0 μsec 에 이르면 위 코너에서 아래 코너를 가로지르는 완전한 소성변형 밴드를 형성하는 것을 관찰할 수 있다. 5.0 μsec 에도 최초로 형성된 소성변형 밴드는 계속 성장을 유지하지만 계단 연결부위 전체로 소성변형이 확산되는 것을 알 수 있다. 6.0 μsec 가 되면 최초로 형성된 위 코너에서 아래 코너를 가로지르는 소성변형 밴드도 잘 발달되어 있지만 위 코너에서 수직으로 자라 내려온

두번째 소성변형 밴드도 볼 수 있다. 그림내에서 ▲로 표시된 부분은 각 시간단계에서 등가소성변형률의 최대값을 나타내며 3.0 μsec 일 때 0.16, 4.0 μsec 일 때 0.40, 5.0 μsec 일 때 0.68, 6.0 μsec 일 때 1.03의 값을 가진다.

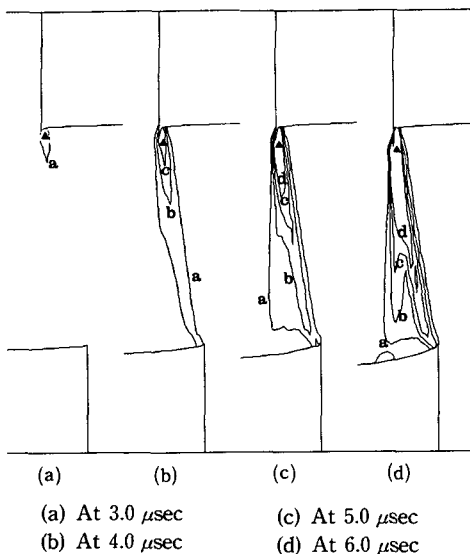


Fig. 9 Contour of equivalent plastic strain in stepped region (contour level, a=0.1, b=0.2, c=0.3, d=0.4)

Fig. 9로부터 두 개의 단열 전단밴드가 성장할 수 있는 가능성을 보았다. 그러나 Fig. 9의 결과만 가지고는 단열 전단밴드가 어떤 방향으로 성장을 계속해 나갈지는 속단하기 어렵다. 그래서 6.0 μsec 까지 수행되었던 해석을 계속 수행하여 단열 전단밴드를 완전히 성장시키고 이로부터 수치해석적으로 단열 전단밴드에 의한 파단면을 유추해 보기로 하였다. Fig. 10에 그 결과를 도시하였다. 8.0 μsec 일 때까지는 두 개의 단열 전단밴드가 함께 성장하는 것처럼 보이지만 10.0 μsec 에 이르면 위 코너에서 아래 코너를 가로지르는 첫번째 단열 전단밴드는 성장을 멈추고 위 코너에서 수직으로 자라 내려오는 두번째 단열 전단밴드가 뚜렷한 불연속 선을 형성하고 있는 것을 볼 수 있다. 즉, 현재 사용된 구성방정식에 따라 연결 전단밴드의 성장에 따른 파단면을 예측할 경우 두번째 단열 전단밴드의 방향을 따라 위 코너에서 수직 아래로 파단면이 형성된다는 것을 의미한다.

실험에서 얻어진 파단면과 해석결과를 비교해 보기 위하여 실험시 변형량 조절용 링의 높이가 낮아

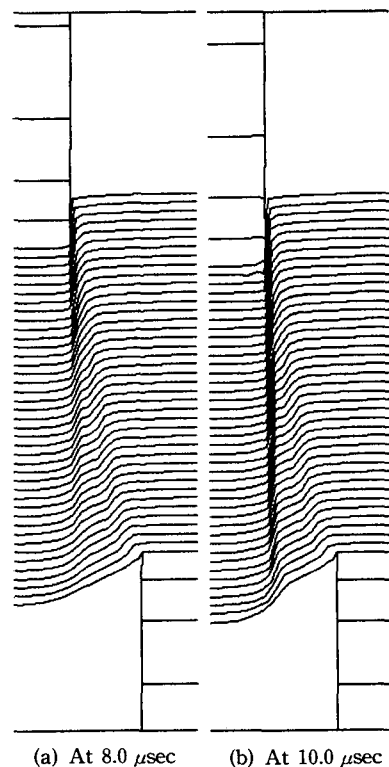


Fig. 10 Deformed configuration in stepped region

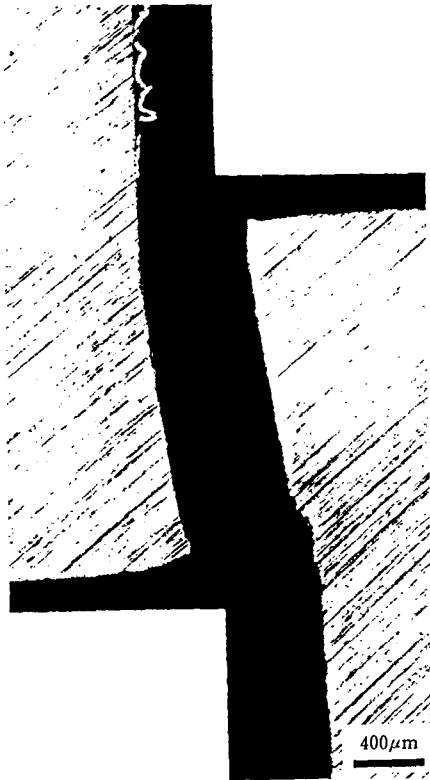


Fig. 11 Optical micrograph of a fractured surface of stepped specimen (50X)

제단의 연결부위가 파단된 시편 중 한개를 골라 절단면을 확대하여 Fig. 11에 나타냈다. Fig. 11에 나타난 파단면을 살펴보면 수치해석적으로 예측된 파단면(Fig. 10(a))과 일치하지 않고 위 코너에서 아래 코너를 가로지르는 첫번째 단열 전단밴드의 성장방향과 일치하는 것을 알 수 있다. 즉, Fig. 11의 파단면은 Fig. 9(b)의 등가 소성변형률 형태와 유사하다. 이것은 실제 파단과정이 두번째 단열 전단밴드가 충분히 성장하기 전에 첫번째 단열 전단밴드를 더욱 더 약화시킬 수 있는 재료내 미세구조의 변화 등에 큰 영향을 받기 때문으로 생각된다. 이상과 같은 사실로부터 변형률 경화효과, 변형률 속도 경화효과, 열적 연화효과만을 고려한 현재의 구성방정식을 사용하여 단열 전단밴드의 성장에 따른 파단면을 예측하기는 어렵고, 수치해석만으로 단열 전단밴드의 성장에 따른 파단면을 예측하기 위해서는 소성변형의 진행에 따라 초래되는 재료내 미세구조의 변화에 따른 재료의 약화(material degradation) 등을 고려할 수 있는 새로운 구성방정식

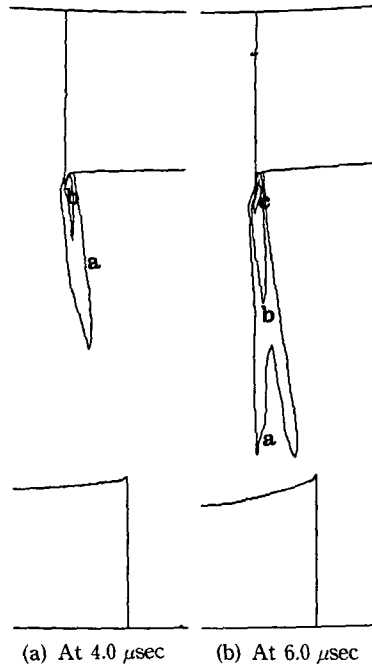


Fig. 12 Contour of equivalent plastic strain rate in stepped region (contour level, $a=0.1/\mu\text{sec}$, $b=0.2/\mu\text{sec}$, $c=0.3/\mu\text{sec}$)

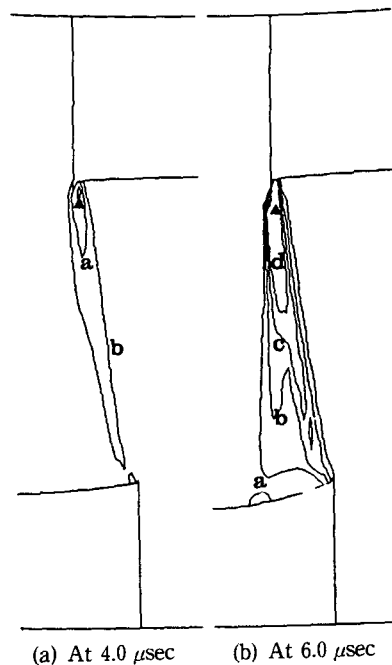


Fig. 13 Contour of temperature in stepped region (contour level, $a=30^\circ\text{C}$, $b=60^\circ\text{C}$, $c=90^\circ\text{C}$, $d=120^\circ\text{C}$)

의 도입이 필요하다.

Fig. 12는 변형시 등가소성 변형률속도(equivalent plastic strain rate)의 분포를 나타낸다. 4.0 μsec 일 때는 주로 첫번째 단열 전단밴드를 따라 성장이 이루어졌으나, 6.0 μsec 일 때는 두 개의 방향을 따라 단열 전단밴드가 성장하고 있는 것을 관찰할 수 있다. 변형이 집중되는 곳에서는 등가소성 변형률속도가 0.1 μsec ~0.3 μsec 정도의 매우 큰 값을 나타내고 있다.

단열 전단밴드내 온도상승을 살펴보기 위하여 Fig. 13에 온도분포를 도시하였다. 소성변형 에너지의 85%를 열에너지로 변화시켜 주었으므로 온도 분포는 전반적으로 Fig. 9의 등가소성 변형률분포 형상과 유사하다. 그림 내에서 ▲로 표시된 부분은 각 시간단계에서 온도의 최대 값을 나타내며, 4.0 μsec 일 때 96.4°C, 6.0 μsec 일 때 219.4°C의 값을 가진다.

4. 결 론

변형량 조절용 링을 사용한 4340강의 계단시편의 고속 변형실험과 유한요소해석을 수행한 결과 단열 전단밴드의 형성과 관련하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 유한요소해석에서 예측된 단열 전단밴드의 형상과 성장방향 등은 실험결과와 대체로 잘 일치하였으며 엑스플리시트 시간적분 유한요소법은 단열 전단밴드형성과 관련된 물리적 현상을 효과적으로 예측하기 위한 좋은 수단임이 입증되었다.

(2) 본 논문의 연구를 위하여 수행된 실험에서 얻어진 4340강내 단열 전단밴드의 두께는 10 μm 내외이다. 그러나 충격 속도, 시편의 크기, 재료의 가공경화 특성 등의 물성치가 4340강내 형성된 단열 전단밴드의 두께에 미치는 영향을 정확히 규명하기 위해서는 많은 실험적 연구가 필요하다.

(3) 계단 시편내의 단열 전단밴드를 관찰하기 쉽도록 조절하기 위해서는 변형량 조절용 링을 사용하는 것이 효과적이다.

(4) 계단 시편의 코너 부위에 발생된 크랙은 접촉면의 접힘 현상 때문이다.

(5) 수치해석만으로 단열 전단밴드의 성장에 따른 파단면을 예측하기 위해서는 소성변형의 진행에 따라 초래되는 재료내 미세구조의 변화에 재료의 약화 등을 고려할 수 있는 새로운 구성방정식의 도

입이 필요하다.

참고문헌

- (1) Zener, C. and Hollomon, J. H., 1944, "Effect of Atrain Rate Upon Plastic Flow of Steel," *J. Appl. Phys.*, Vol. 15, pp. 22~32.
- (2) Rogers, H. C., 1979, "Adiabatic Plastic Deformation," *Ann. Rev. Mat. Sci.*, Vol. 9, pp. 283~311.
- (3) Timothy, S. P., 1987, "The Structure of Adiabatic Shear Bands in Metals: a Critical Review," *Acta Metall.* Vol. 35, No. 2, pp. 301~306.
- (4) 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.
- (5) Holt, W. H., Mock, Jr. W., Soper, W. g., Coffey, C. S., Ramachandran, V. and Armstrong, R. W., 1992, "Reverse-Ballistic Impact Study of Shear Plug Formation and Displacement in Ti6Al4V," in *Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena in Materials*, Meyers, M. A., Murr, L. E. and Staudhammer, K. P. ed., Marcel Dekker, Inc., pp. 629~636.
- (6) Meunier, Y., Roux, R. and Moureaud, J., 1992, "Survey of Adiabatic Shear Phenomena in Armor Steels with Perforation," *Ibid*, pp. 637~644.
- (7) Beatty, J. H., Meyer, L. W., Meyer, M. A. and Nemat-Nasser, S., 1992, "Formation of Controlled Adiabatic Shear Bands in AISI 4340 High Strength Steel," *Ibid*, pp. 645~656.
- (8) Chou, P. C., Flis, W. J. and Konopatski, K. L., 1992, "Adiabatic Shear-Band Formation in Explosives Due to Impact," *Ibid*, pp. 657~667.
- (9) 유요한, 전기영, 정동택, 1992, "단열 전단밴드의 유한요소해석," *대한기계학회논문집*, 제16권, 제8호, pp. 1519~1529.
- (10) 유요한, 전기영, 정동택, 1992, "계단시편의 간극이 단열 전단밴드의 형성에 미치는 영향," *한국소성가공학회 '92년도 추계학술대회논문집*, pp. 97~106.

- (11) Follansbee, P. S., 1985, "The Hopkinson Bar," *in Metals Handbook Ninth Edition*, Vol. 8, Mechanical Testing, American Society for Metals, pp. 198~203.
- (12) 유요한, 정동택, 1991년, "엑스플리스트 시간 적분 유한요소법을 이용한 고속성형 해석(1)," 대한기계학회논문집, 제15권, 제1호, pp. 1~10.
- (13) 유요한, 정동택, 1991년, "엑스플리스트 시간 적분 유한요소법을 이용한 고속성형 해석(2)," 대한기계학회논문집, 제15권 제5호, pp. 1552~1562.
- (14) 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.
- (15) Nemat-Nasser, S. and Chung, D. -T., 1992, "An Explicit Constitutive Algorithm for Large-Strain, Large-Strain-Rate Elastic-Viscoplasticity," *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, Vol. 95, pp. 205~219.