

## 텅스텐 중합금의 단열전단밴드 형성 연구

이승우\* · 문갑태\* · 홍성인 \*\*

### A study on the Formation of Adiabatic Shear Band of Tungsten Heavy Alloys

S. W. Lee, G. T. Moon and S. I. Hong

#### Abstract

To study adiabatic shear band formation of tungsten heavy alloys, 5 prismatic specimens are loaded by high velocity impacts and treated as plane strain problems. Their volume percent of tungsten particles in WHA are 81%, 93% and 97% respectively and for the fixed 81% volume percent, small size particle model, large size particle model, undulated particle models are considered and then, the effects of particle's volume ratio, geometry and size to the formation of shear band are discussed.

**Key Words** : Adiabatic Shear Band, Tungsten Heavy Alloy, High Velocity Impact, Volume Ratio, John-Cook Model

#### 1. 서론

텅스텐 중합금(tungsten heavy alloy, WHA)은 일반적으로 Fig.3 과 같이 구형에 가까운 거의 순수한 텅스텐 입자가 철(iron)-니켈(nickel) 및 다른 재료로 구성된 기지금속(matrix) 내에 용해되어 이루어진 복합조직으로 구성되어 있으며, 군사용으로는 장갑관재 파괴용 운동에너지탄의 관통자(penetrator)에 주로 사용된다. 운동에너지탄의 관통능력은 여러 요인이 있으나, 재료관점에서 보면 사용재료의 단열전단밴드 형성이 용이할수록 관통 성능이 향상되는 것으로 알려져 있으며, Fig.1 에서 전형적인 텅스텐 중합금의 변형의 국부화로 인해 형성된 단열전단밴드를 보여주고 있다.

본 연구에서는 텅스텐 중합금의 관통성능 향상의 방안 하나로 단열전단밴드 형성메카니즘을 알아보기 위해

크게 고속 하중하에서 입자의 크기와 형태, 텅스텐 입자의 부피분율(contiguity)에 따라 이들이 단열전단밴드에 미치는 영향을 비교 분석하여, 단열전단밴드의 형성 촉진 방안에 대한 연구를 수행하였다.

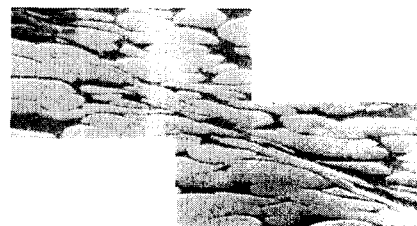


Fig. 1 Adiabatic shearband of highly deformed WHA

\* 국방과학연구소 1체계개발본부 2부

\*\* 충남대학교 기계공학과

## 2. 모델링

판통문제는 일반적으로 3차원 변형문제를 포함하고 있으나, 본 연구에서는 평형 육면체의 두께 방향의 변위를 구속시킴으로써 평면 변형률(plane strain)문제로 단순화시켰으며, DYTRAN 이용하여 근사해를 구하였다. 텅스텐 중합금의 평면 변형률 문제를 해석하기 위해서 Fig. 2 와 같이 1cm x 2cm x 0.01cm 직육면체의 블록(block)의 중심에 원점을 둔 직교좌표계(rectangular Cartesian coordinate)를 사용하였다. 이 시편은 수평 및 수직 중심축에 대하여 초기 및 경계조건에 대칭성 때문에 제1사분면에 대해서만 해석을 수행하였다. W-Ni-Fe입자는 텅스텐 입자 사이에 분포되어 있고 입계면에서의 표면 트랙션(surface traction)과 변위는 연속이라고 가정하였으며, 텅스텐 입자와 기지입자 사이의 경계면에서의 분리는 허용하지 않았다. 이 블록의 모든 경계 표면은 단열되어 있고 블록에 작용하는 힘은 속도의 수직방향 성분만 Fig. 2와 같이 작용하며, 이 속도의 크기는 영(Zero)에서부터 출발하여 5  $\mu$ s 동안 50 m/sec 까지 증가하여 50 m/sec 에 고정되고 따라서 변형률 속도(nominal strain-rate)도 영에서 5  $\mu$ s 동안 5000  $s^{-1}$ 까지 증가되어 5000  $s^{-1}$ 에 고정되었다.

텅스텐 중합금의 파괴분율에 따른 전단밴드의 영향을 알아보기 위해서 각각 텅스텐의 전체에 대한 파괴분율이 81%, 93%, 97% 의 경우에 대하여 해석을 수행하였고, 입자의 크기에 따른 영향은 Fig.6 과 같이 Fig.5의 81%의 파괴분율 모델에 대하여 4배 크기의 입자에 대하여 모델링하였으며, 입자의 기하학적 형상이 반복 열처리를 통한 파동(undulation) 형상으로 변한 Fig.3의 형상에 대하여는 Fig.7 과 같이 표현하여, 전단밴드가 생성되고 발전하는 시점까지의 재료의 변형에 요구되는 압축하중의 시간 이력 및 전단밴드의 수, 그들의 위치, 파괴분율에 및 그들의 분포에 의존하는 변형된 격자의 일반적인 패턴(pattern)을 조사하였다. 재료의 구성식은 Johnson-Cook모델을 사용하였다. 이 때 재료의 성질은 Table 1.과 같이 각각 구성 성질을 같은 두 상(two phase)를 가진 재료의 혼합물로 고려하였으며, 변형과정에서 파손 및 파괴 조건(failure and fracture condition)은 주지 않았다. 각 재료는 등방성(isotropic)이고, 탄-점소성(elastic-viscoplastic) 거동을 하며, 등방경화(isotropic hardening)와 함께 von Mises 항복조건을 따른다고 가정하였으며, 구성 방정식은 Johnson-Cook모델을 사용하였다.

Table 1 Material properties and constants of tungsten and W-Ni-Fe for Johnson-Cook model

	Tungsten	W-Ni-Fe
Density( $\rho$ )	19300 $kg/m^3$	9200 $kg/m^3$
Static yield stress(A)	730 MPa	150 MPa
Hardening parameter(B)	562 MPa	546 MPa
Hardening exp.(n)	0.0751	0.208
Strain-rate para.(C)	0.02878	0.0838
Temp. exponent(m)	0.15	0.20
Ref. strain rate( $\dot{\epsilon}_0$ ) (/sec)	$1.355 \times 10^{-7}$	$6.67 \times 10^{-7}$
Specific heat( $C_p$ ) ( $J/kg \cdot ^\circ C$ )	138	382
Melt temp. ( $T_m$ )	3370 $^\circ C$	1435 $^\circ C$
Room temp. ( $T_r$ )	20 $^\circ C$	20 $^\circ C$

텅스텐(W)내에서의 종파(longitudinal or irrotational wave)는 4.06  $mm/\mu sec^{-1}$ 이며 기지상인 W-Fe-Ni에서는 4.69  $mm/\mu sec^{-1}$ 이다. 종파는 전단파(shear or transverse or distortional or equivoluminal wave)보다 빠른 속도로 전파되기 때문에 시간 단계(time step)는 W-Ni-Fe 입자가 순수한 텅스텐 입자보다 항복강도보다 낮아 보다 많이 변형될 것이기 때문에 격자(mesh)중 가장 작은 W-Ni-Fe를 통과하는 종파를 기준으로 설정했다. 초기 격자는 가로 방향으로 50개의 요소(element)와 세로 방향으로 100개, 두께방향으로 1개의 총 5000개의 균일한 육면체 요소로 구성하였다.

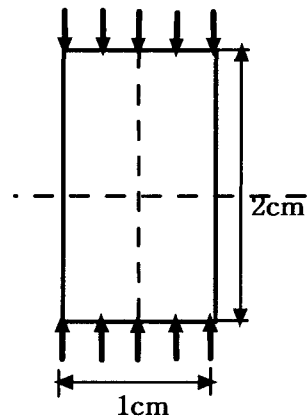


Fig. 2 A schematic sketch of the problem studied

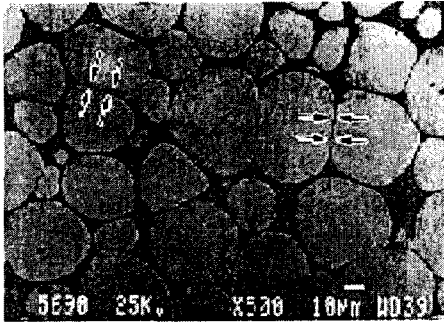


Fig. 3 Optical micrograph of 20 cycles heat-treated and undulated WHA

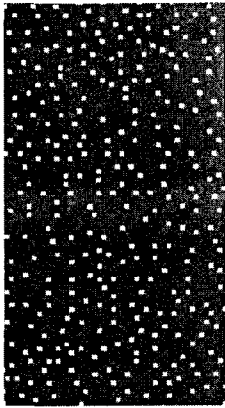


Fig. 4 W volume fraction 93% model

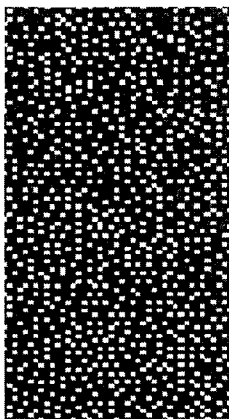


Fig. 5 W volume fraction 81% model

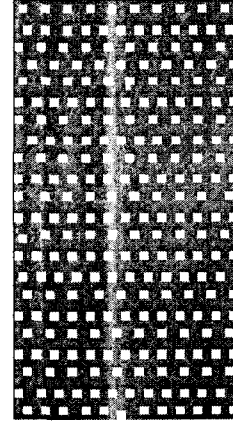


Fig. 6 Large model with W volume fraction 81%

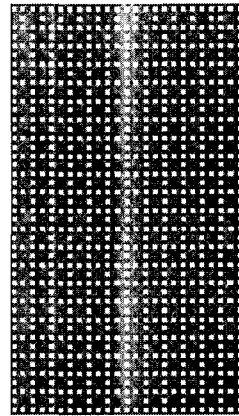


Fig. 7 Undulation model with W volume fraction 81%

### 3. 결과 및 고찰

변형의 시간 단계별 특징은 각 모델이 공통적으로 처음에는 지지상의 약한 요소들이 가장 먼저 소성 변형을 하고 이 지지상의 점들이 많이 분포된 곳이 서로 연결되어 이 선들을 중심으로 전단밴드가 형성되었고, 시간이 지날수록 소성변형량이 많고 열연화가 시작된 전단밴드들에 변형이 더욱 집중되면서 전단밴드와 전단밴드 사이에는 변형이 거의 없는 dead zone이 형성되었다.

또한 시간이 경과할수록 큰 전단밴드내의 열연화가 더욱 심화되면서 상대적으로 덜 연화된 작은 전단밴드들은

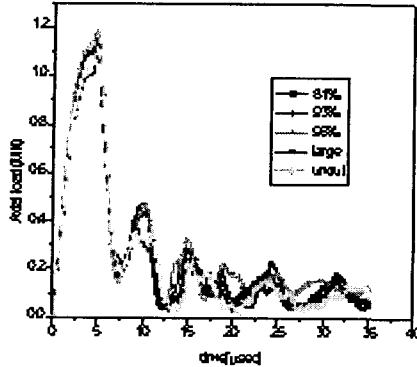


Fig. 8 Compressive load versus average axial strain curves for 5 different models.

없어지는 경향을 보이고 있으며, 압축량이 많아질수록 전단밴드들의 폭은 넓어지고 가까운 밴드들은 하나로 뭉쳐졌다.

시간 단계별로 각 모델별 격자변형을 비교해 보면 부피 분율에 따른 영향은 부피분율이 커질수록 전단밴드의 발생이 아래쪽으로 내려오고, 전단밴드의 수도 많아졌으며, 격자의 찌그러짐도 날카롭게 변했다. 이는 부피분율이 작을수록 약한 기지상들의 요소들이 상대적으로 많이 분포되어 있어서 전단밴드의 발생이 위쪽에서 쉽게 발생하여 이 발생된 영역에 더욱 발전해 버림으로 인해 하부에 발생할 여유를 주지 않았기 때문이다.

입자크기 및 입자형상에 따른 영향은 81% 큰입자 모델 및 파동모델 모두 입의 분포 작은 입자 81% 모델보다 전단밴드의 수가 적고 큰 전단밴드만 발생하였는데 이 이유는 강한 텅스텐입자의 커짐으로 인해서 기지상을 통하여 서로 쉽게 연결되던 전단밴드들이 크고 강한 텅스텐 입자를 통하여 형성되어야 하므로 작은 전단밴드의 발생을 어렵게 하는 것으로 보인다. 또한 파동입자모형에서 전단밴드의 수가 가장 적었었으며, 텅스텐 입자가 작을수록 단열전단 변형 폭은 작아지며, 결합부에 응력이 집중되어서 단열전단 변형이 잘 일어났다.

Fig.8 에서 각 모델에 대한 압축하중의 시간 이력을 나타냈는데 이 그림을 보면 1차 단열전단밴드가 발생하

기 전에는 텅스텐의 부피 분율이 클수록 변형에 대한 저항이 커서 전체 압축에 요구되는 하중이 큼을 알 수 있고 같은 81% 부피 분율에서는 거의 같은 하중을 요구하고 있으나 파동입자 모델, 큰 입자 모델, 작은 81%모델 순으로 작은 압축하중이 요구되고 있음을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 변형의 시간 단계별 특징은 5가지 모델 모두 처음에는 기지상의 약한 요소들이 가장 먼저 소성 변형을 하고 이 기지상의 점들이 많이 분포된 곳이 서로 연결되어 이 선들을 중심으로 전단밴드가 형성되었다.

(2) 모든 전단밴드들은 45° 근방에서 발생하였으나, 모델에 따라 전단밴드의 수나 발생 위치는 달랐다.

(3) 텅스텐 입자가 크질수록 전단밴드의 발생이 어려워졌고, 파동입자모델에서 전단밴드의 발생이 어려웠다.

(4) 전단밴드가 발생하는 위치는 종파의 압축파와 재반사된 종파의 압축파의 위치와 정확히 일치할 때 발생하였으며, 압축파와 재 반사된 압축파가 진행하면서 발생시킨 전단밴드의 아랫쪽은 응력파의 에너지가 전단밴드의 생성에 필요한 비가역적인 소성일로 바뀌어 전단밴드의 발생을 어렵게 하였다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Jonas A. Zukas, 1990. "High Velocity Impact Dynamics", John Wiley & Sons Inc.
- (2) Marc. A. Meyers, 1994, " Dynamic behavior of materials", John Wiley & Sons, Inc.
- (3) H. Kolsky, 1963, " Stress waves in solids", Dover Publications Inc., New York.
- (4) A. Marchand and J. Duffy, 1988, " An experimental study of the formation process of adiabatic shear bands in a structural steel", J. Mech. Phys. solid. Vol. 36, No. 3, pp251~283.