

## 텅스텐 중합금의 부피분율, 입자형상에 따른 단열전단밴드 형성 연구

이승우\*·송홍섭\*\*·문갑태\*

(2002년 4월 26일 접수)

## The Effects of Volume Ratio and Shape on the Formation of Adiabatic Shear Band in WHA

S. W. Lee, H. S. Song and G. T. Moon

### Abstract

The formation of adiabatic shearband in tungsten heavy alloys(WHA) was studied in this investigation. Five prismatic specimens were loaded by high velocity impacts and treated as plane strain problems. To find out the effect of particle's volume ratio, specimens containing 81%, 93% and 97% volume percents of tungsten particles were used. Also the effects of particle's geometry and size on the formation of shearband were studied for 81% volume percent alloys by small size particle model, large size particle model and undulated particle models, and the results were discussed.

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

### 1. 서론

텅스텐 중합금(tungsten heavy alloy, WHA)은 일반적으로 Fig.1 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 장갑판재 파괴용 운동에너지탄의 관통자(penetrator)에 주로 사용된다. 운동에너지

탄의 관통능력은 여러 요인이 있으나, 재료관점에서 보면 사용재료의 단열전단밴드 형성이 용이할수록 관통 성능이 향상되는 것으로 알려져 있으며, Fig.2 에서는 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

\* 국방과학연구소 제1체계개발본부  
\*\* 국방과학연구소 기술연구본부

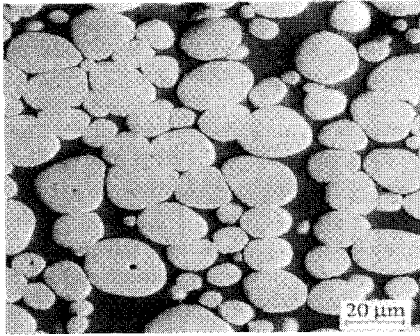


Fig. 1 Tungsten heavy alloy microstructure : tungsten grains (light) in Ni-Fe matrix (dark)

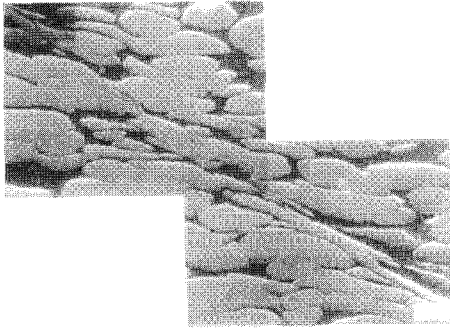


Fig. 2 Adiabatic shearband of highly deformed WHA

부피분율(contiguity)에 따라 이들이 단열전단밴드에 미치는 영향을 비교 분석하여, 단열전단밴드의 형성 촉진 방안에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 모델링

관통문제는 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. 3 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 경계조건의 대칭성 때문에 제1사분면에 대해서만 해석을 수행하였다. W-Ni-Fe입자는 텅스텐 입자사이에서 분포되어 있고 입계면에서의 표면 트랙션(surface traction)과 변위는 연속이라고 가정하였으며, 텅스텐 입자와 기지입자 사이의 경계면에서의 분리는 허

용하지 않았다. 이 블록의 모든 경계 표면은 단열되어 있고 블록에 작용하는 힘은 속도의 수직방향 성분만 Fig. 3과 같이 작용하게 하였다. 일반적으로 소총탄이나 포탄의 비행속도는 500~1000m/sec이며, 이로 인한 충돌시 발생하는 변형률속도는  $10^3 \sim 10^5$ /sec로서 속도의 크기는 이 영역 중에서 Fig. 4와 같이 영(Zero)에서부터 출발하여 5 $\mu$ s 동안 50m/sec까지 증가하여 50m/sec에 고정되고 따라서 변형률 속도(nominal strain-rate)도 영에서 5 $\mu$ s 동안  $5000 \text{ s}^{-1}$ 까지 증가되어  $5000 \text{ s}^{-1}$ 에 고정하였다.

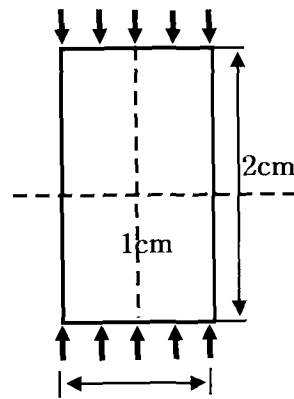


Fig. 3 A schematic sketch of the problem studied

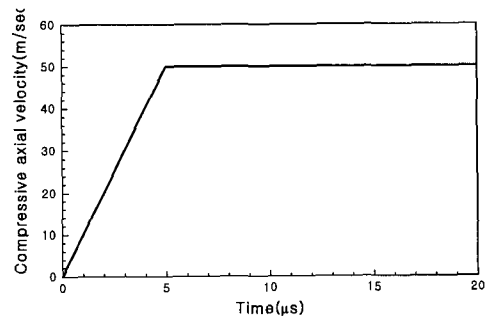


Fig. 4 The time history of the vertical component of velocity prescribed on the top and bottom edges

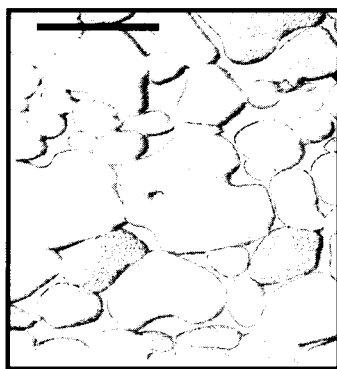
텅스텐 중합금의 부피분율에 따른 전단밴드의 영향을 알아보기 위해서 각각 텅스텐의 전체에 대한 부피분율이 81%, 93%, 96%의 경우에 대하여(Fig. 6,7,8참조) 해석을 수행하였고, 입자의 크기에 따른 영향은 Fig. 9 와 같이 Fig. 6의 81%의 부피분율 모델에 대하여 4배 크기의 입자에 대하여 모델링하였으며, Fig. 5(a)와 같은 기하학적 형상을 가진 입자가 반복 열처리를 통하여 파동(undulati

on) 형상으로 변한 Fig. 5(b)의 형상에 대하여는 Fig. 10과 같이 표현하여 전단밴드가 생성되고 발전하는 시점까지의 재료의 변형에 요구되는 압축하중의 시간 이력 및 전단밴드의 수, 그들의 위치, 부피분율에 및 그들의 분포에 의존하는 변형된 격자의 일반적인 패턴(pattern)을 조사하였으며, 또한 변형률 속도가 제로가 되는 dead zone도 관찰하였다.



(a)

50um



(b)

Fig. 5 Optical micrograph of (a) regular microstructure (93W-4.9Ni-2.1Fe) and (b) undulated microstructure

구성 방정식은 Johnson-Cook모델<sup>(1)</sup>을 사용하였고, 이 모델은 식(1)의 수식으로 표현되며, 여기서  $\sigma_y$ 는 상당 유동응력(equivalent flow stress),  $\epsilon_p$ 은 상당 소성변형률(equivalent plastic strain),  $\dot{\epsilon}^*$ 는 무차원 소성변형률 속도(dimensionless equivalent plastic strain rate),  $T^*$ 는

등가 온도(homologous temperature)이며, 이들의 함수인 열연화를 고려한 아래의 속도의존성 구성 방정식으로서

$$\sigma_y = [A + B\epsilon_p^n](1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*))(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

여기서,  $\dot{\epsilon}^*$ 와  $T^*$ 는 각각 식(2), (3)와 같이 정의된다.

$$\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0 \quad (2)$$

$$T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r) \quad (3)$$

본 논문에 사용된 텅스텐과 W-Ni-Fe에 대한 재료 상수는 Table 1과 같고 이 Table 1에서 주어진 대부분의 재료 변수에 대한 값들은 온도 의존적인 값들이나 전 온도범위에 대한 값들을 구할 수 없으므로 여기서는 상수로 취급하였다. 이 때 재료의 성질은 각각의 구성 성질을 갖는 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 가정하였다.

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 <sup>3</sup>	9200 kg/m <sup>3</sup>
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)	1.355×10 <sup>-7</sup>	6.67×10 <sup>-7</sup>
Specific heat( $C_p$ ) ( J/kg · °C )	138	382
Melt temp. ( $T_m$ )	3370°C	1435°C
Room temp.( $T_r$ )	20°C	20°C

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

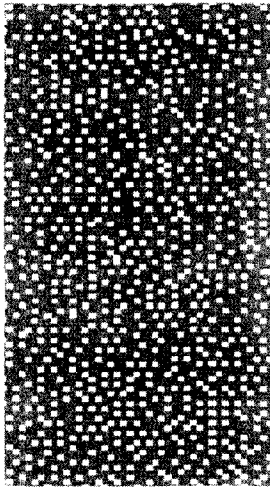


Fig. 6 W volume fraction 81% model

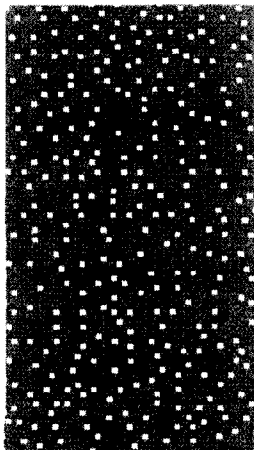


Fig. 7 W volume fraction 93% model

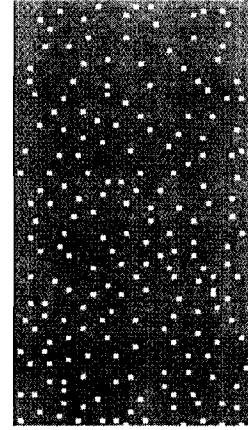


Fig. 8 W volume fraction 96% model tungsten grains (dark) in Ni-Fe matrix(light)

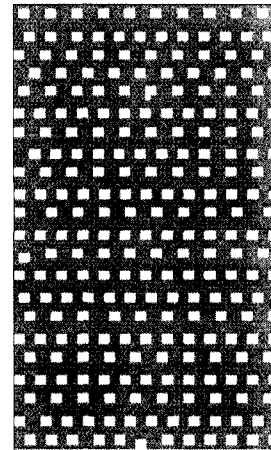


Fig. 9 Large model with W volume fraction 81%

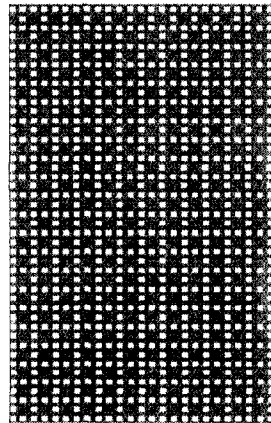


Fig. 10 Undulation model with W volume fraction 81%

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 11에서 Fig. 15까지는 96%, 93%, 81%, 81% 큰입자, 81% 파동입자 모델들의 각각의 격자 변형들 중 전단밴드 발생이 뚜렷하게 보이는 시간단계 3000에서 격자 변형을 서로 비교하기 위하여 나타내었다. 임의 분포된 부피 분율에 영향은 Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13에서 볼 수 있는데 81% 모델에서는 -45°방향 근처의 두개의 큰 전단 밴드가 보여지며 보다 작은 전단밴드가 왼-위쪽에 하나 존재해 있다. 45°방향 근처의 전단밴드는 -45°방향 근처의 전단 밴드 사이에 존재하고 있으며 아래쪽의 dead zone이 다른 모델들 보다 크다. 이는 약한 기지상들의 요소들이 상대적으로 많이 분포되어 있어서 전단밴드의 발생이 위쪽에서 쉽게 발생하여 이 발생된 영역에 더욱 발전해 비립으로 인해 하부에 발생할 여유를 주지 않았기 때문에 생겼을 것으로 판단된다. 이와 같은 이유로 인하여 93%, 96% 모델로 갈수록 전단밴드의 발생이 아래쪽으로 내려오며, 전단밴드의 수도 많아짐을 알 수 있다. 또 격자의 찌그러짐도 강한 텅스텐입자의 의 부피 분율이 커질수록 날카롭게 변함을 알 수 있다. Fig. 9 와 Fig. 10 에서는 똑같은 부피분율 81%에 대해서 입자의 형상을 전자는 Fig. 6의 입자와 비교하여 4배의 크기를 갖게 하고 후자는 사각형이 아닌 파동형상을 표현하였는데 이들은 81%의 부피분율을 맞추기 위해서 임의 분포가 아닌 규칙적인 분포를 가졌다. 이들의 특징은 Fig. 6의 임의 분포 작은 입자 81% 모델보다 전단밴드의 수가 적고 큰 전단밴드만 발생하였는데 Fig. 14에서는 -45°방향 근처에서는 두 개, 45°방향근처에서는 한 개, Fig. 15에서는 각 방향근처에서 각 한 개가 발생하였다. 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. Fig. 15의 파동입자 모형에서 전단밴드의 수가 가장 적었는데, 반복열처리를 통하여 충격치가 향상되었다는 것은 파동형상으로의 변화로 인해 파괴 경로가 길고 단열밴드 발생이 어렵다는 것을 의미하고 이 결과는 본 논문의 결과와 잘 일치한다. 또한 Bose<sup>TM</sup> 등은 조대한 텅스텐 입자의 경우 전단 변형밴드가 계속 진행되지 못하여 미세한 텅스텐 입자가 단열전단밴드의 전파에 유리함을 보고하였으며, 통상적으로 텅스텐 중합금은 정적인 기계적 성질이 달라도 고속변형에서는 거의 같은 거동을 보이지만, 단지 텅스텐 입자가 작을수록 단열전단 변형 폭은 작아지며, 결합부에 응력이 집중되어서 단열전단 변형이 잘 일어난다고

보고 한바 있는데<sup>(9)</sup>, 이 또한 본 해석의 결과와 일치하고 있다.

Fig. 16에서는 텅스텐 부피분율 96% 모델의 y축 변위가 0.505mm이고 시간이 0.97μsec 일 때 상당 소성 변형률 분포를 나타낸 것인데 입자의 항복강도가 상대적으로 낮은 기지상들이 소성 변형되어 최대  $5.01 \times 10^{-03}$  까지 상당소성변형률을 나타내면서 작은 삼각형 분포되어 있다. 하단부분이 아직 변형되지 않은 것은 종파의 속도가  $4.69 \text{ mm}/\mu\text{sec}^{-1}$  이므로 파가 아직 도달하지 않았으므로 응력을 전혀 받지 않고 있다. 변형의 시간 단계별 특징은 각 모델이 공통적으로 처음에는 Fig. 16에서 보는 바와 기지상의 약한 요소들이 가장 먼저 소성 변형을 하고 이 기지상의 점들이 많이 분포된 곳이 서로 연결되어 이 선들을 중심으로 전단밴드가 형성되었고, 시간이 지날수록 소성변형률이 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 없어지는 경향을 보이고 있으며, 압축량이 많아질수록 전단밴드들의 폭은 넓어지고 가까운 밴드들은 하나로 뭉쳐졌다.

Fig. 17은 Fig. 11의 격자 변형에 대응하는 시간단계의 상당소성 변형률( $\epsilon_p = \sqrt{\frac{2}{3} \epsilon'_x \epsilon'_y}$ ) 분포를 나타내었으며, 격자변형과의 대응관계를 잘 나타내 주고 있다.

시간 단계별로 각 모델별 격자변형을 비교해 보면 부피분율에 따른 영향은 부피분율이 커질수록 전단밴드의 발생이 아래쪽으로 내려오고, 전단밴드의 수도 많아졌으며, 격자의 찌그러짐도 날카롭게 변했다. 이는 부피 분율이 작을수록 약한 기지상들의 요소들이 상대적으로 많이 분포되어 있어서 전단밴드의 발생이 위쪽에서 쉽게 발생하여 이 발생된 영역에 더욱 발전해 비립으로 인해 하부에 발생할 여유를 주지 않았기 때문이다. 입자크기 및 입자형상에 따른 영향은 81% 큰입자 모델 및 파동모형 모두 임의 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 적었으며, 텅스텐 입자가 작을수록 단열전단 변형 폭은 작아지며, 결합부에 응력이 집중되어서 단열전단 변형이 잘 일어났다.

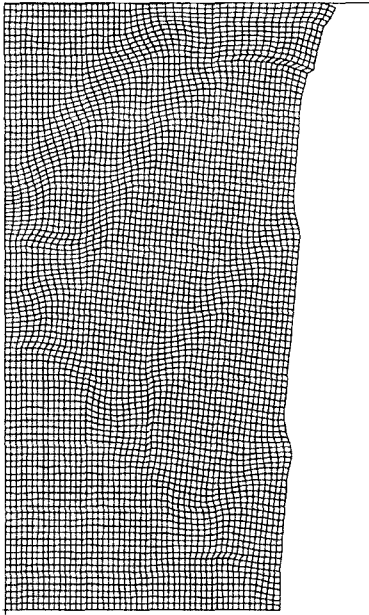


Fig. 11 Deformed meshes for  $w=96\%$ ,  $time=18.32 \mu\text{sec}$ ,  
axial displacement=1.48mm

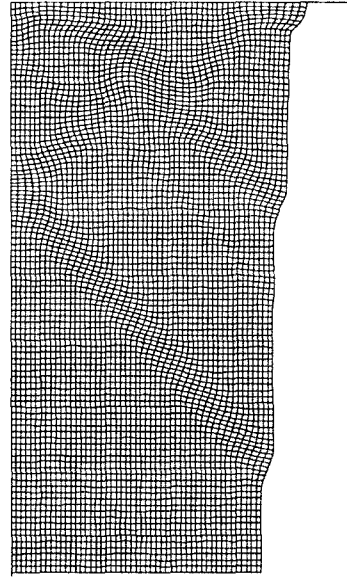


Fig. 13 Deformed meshes for  $w=81\%$ ,  $t=17.82 \mu\text{sec}$ ,  
axial disp=0.129

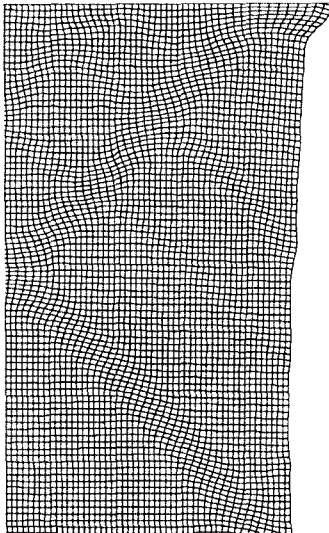


Fig. 12 Deformed meshes for  $W=93\%$ ,  $t=17.94 \mu\text{sec}$ ,  
axial disp.=0.141

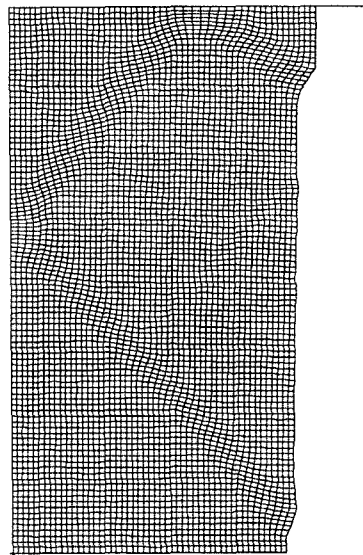


Fig. 14 Deformed meshes for  $w=81\%$  large model,  
 $t=17.20 \mu\text{sec}$ , axial disp.=0.101

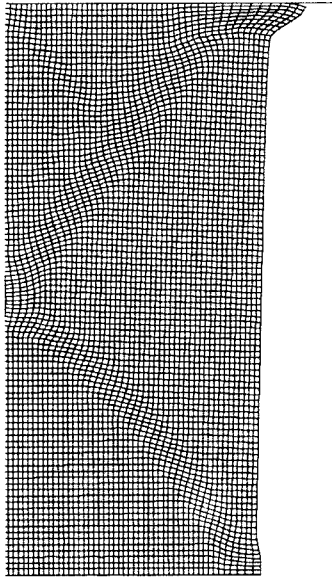


Fig. 15 Deformed meshes for 81% undulated model,  $t=16.48 \mu\text{SEC}$ , axial disp.= 0.146

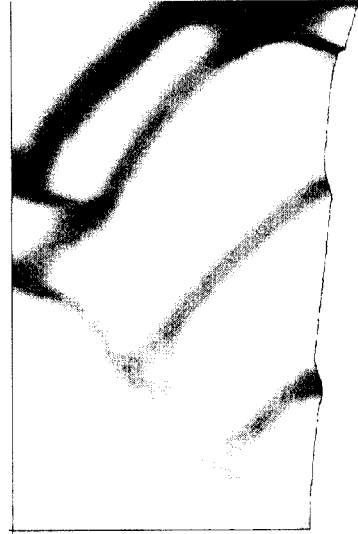


Fig. 17 Contour of effective plastic strain corresponding to Fig. 11

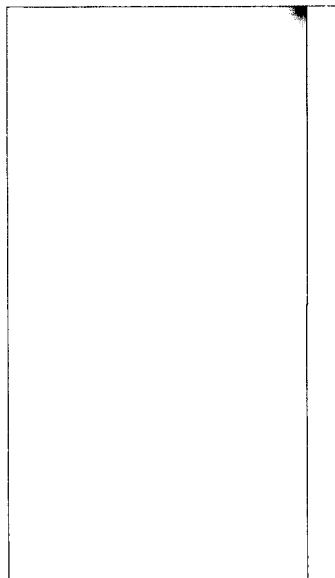


Fig. 16 Contour of effective plastic strain corresponding to Fig. 5-12

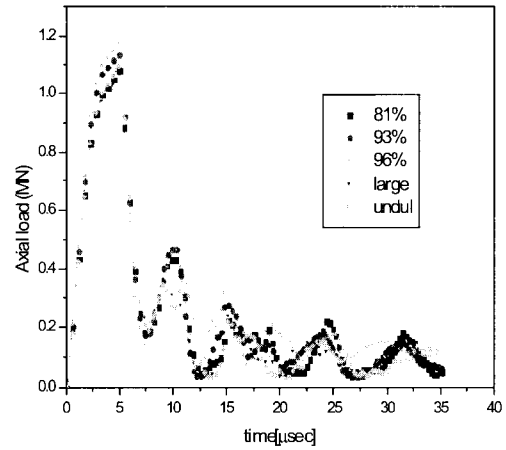


Fig. 18 Time variation of compressive load for five different models.

Fig. 18 에서 각 모델에 대한 압축하중의 시간 이력을 나타냈는데 이 그림을 보면 1차 단열전단밴드가 발생하기 전에는 텅스텐의 부피 분율이 할수복 변형에 대한 저항이 커서 전체 압축에 요구되는 하중이 높을 수 있고 같은 81% 부피 분율에서는 거의 같은 하중을 요구하고 있으나 과도입자 모델, 큰 입자 모델, 작은 81% 모델

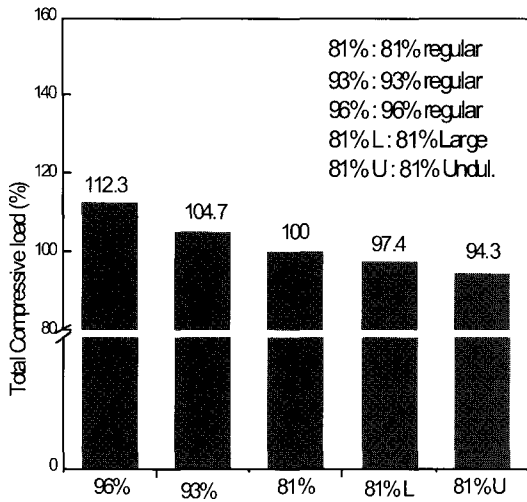


Fig. 19 Total compressive load of five different models

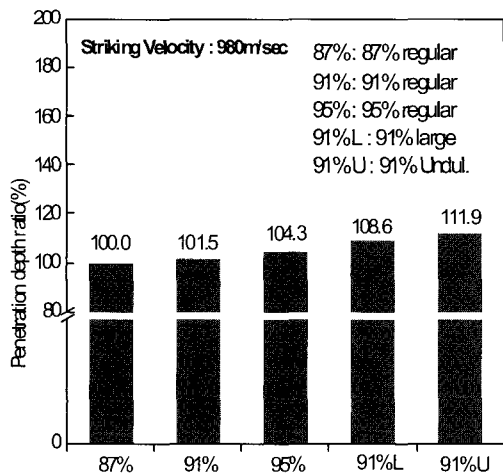


Fig. 20 Experimental volume ratio, particle size and shape's effect to penetration depth ratio

순으로 작은 압축하중이 요구되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 19는 Fig. 18의 하중곡선의 의미를 보다 명확하게 하기 위하여 하중을 35μ/sec 동안 시간에 대하여 적분한 량, 즉 압축에 소요된 총하중을 텡스텐 부피분율 81% 보통입자를 100으로 기준하여 상대 비교한 그림이다.

이 그림에서 보는 바와 같이 입자의 크기와 형상을 고정시키고 텡스텐 입자의 분율만 변화시킨 96%, 93%, 81% 보통입자의 경우, 텡스텐 부피분율이 커질수록 큰

압축하중이 요구되는데 이것은 강도와 경도 및 용접이 높은 텡스텐 입자의 함량이 많을수록 단열전단밴드의 생성이 어렵다는 것을 나타내고 있으며, 동일한 81% 텡스텐 부피분율에서는 보통입자, 큰입자, 파동입자의 순으로 단열전단밴드가 쉽게 발생할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 20은 포구속도 980m/sec의 일정속도에서 87% 보통입자를 사용한 탄의 관통깊이를 100%로 기준하였을 때, 95%, 91%의 보통입자와 91% 큰입자, 91% 파동입자를 재료로 사용한 관통자의 관통깊이를 상대 비교한 것이다. 운동에너지탄의 관통성능은 목표물을 어느 정도의 거리에서 얼마만큼의 두께를 관통시키느냐로 결정되며, 관통성능을 좌우하는 주 인자는 비행속도, 비행체의 형상, 사용재료 크게 3가지이다. Fig. 20에서 관통깊이 비의 값이 크다는 것은 단열전단밴드가 잘 일어났다는 것을 의미하며, 동일한 91% 텡스텐 부피분율에서 보통입자, 큰입자, 파동입자 순으로 관통깊이가 깊다는 것은 Fig. 19 그래프에서 총하중이 작다는 것을 의미하여 해석 결과와 실험결과가 잘 일치한다. Fig. 20에서 부피분율이 커질수록 관통깊이가 미소하게 증가하고 있으나 Fig. 19에서는 이와 반대로 총하중도 증가하고 있다. 이것은 본 해석시 비행체의 비행속도에 의한 운동량을 고려치 않아서 발생한 것이며, 결국 비행체의 운동량의 영향이 그자 이만큼 된다는 것을 의미한다. 본 해석에서 부피분율을 실험의 부피분율과 정확히 일치시키지 못한 점, 입자형상의 완벽한 일치문제, 입자 크기의 차이가 관통실험과 해석상의 근소한 차이를 나타낸 것으로 보인다.

#### 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°방향에서 발생하였으나, 모델에 따라 전단밴드의 수나 발생 위치는 달랐다.

(3) 텡스텐 입자가 커질수록 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 아래쪽은 응력파의 에너지가 전단밴드의 생성에 필요한 비가역적인 소성임으로 바뀌어 전단밴드의 발생을 어렵게 하였다.



- (5) 동일한 텅스텐 부피분율에서 보통입자, 큰입자, 과동입자의 순으로 관통깊이가 실험적으로 깊운데, 본 해석에서 단열전단밴드 형성에 요구되는 총하중은 적게 소요되어 실험과 해석이 잘 일치하였으며, 단열전단밴드가 관통성능에 결정적 영향을 주는 것을 알 수 있었다.
- (6) 본 해석기법개발은 향후 재료조직변화를 통한 방호재료개발 및 관통성능향상에 기여할 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

- (1) Johnson, G. R. and Cook, W.H. A 1983, "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures", Proc. of 7th Int. Symp. on Ballistics, pp. 541~547.
- (2) Jonas A. Zukas, 1990. "High Velocity Impact Dynamics", John Wiley & Sons Inc.
- (3) Marc. A. Meyers, 1994, "Dynamic behavior of materials", John Wiley & Sons, Inc.
- (4) H. Kolsky, 1963, "Stress waves in solids", Dover Publications Inc., New York.
- (5) 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, pp. 251~283.
- (6) 송홍섭, 1996, "텅스텐 重合金에서 熱應力이 材料組織 및 物性에 미치는 影響", 충남대학교 박사학위논문.
- (7) S. P. Andrew, R. D. Caligiure and L. E. Eiselstein, 1991, "A review of penetration mechanisms and dynamic properties of tungsten and depleted uranium penetrators", Tungsten and tungsten alloys, published by the Minerals, Metals & Materials Society, pp. 269~276.
- (8) A. Bose, H. Conque and J. Lankford, Jr., 1992, "Tungsten and Tungsten Alloys", edited by A. Bose and R. J. Dowding MPIF, p. 291.
- (9) J. Lankford Jr., A. Bose and H. Conque, 1991, "High Strain Rate Behavior of Refractory Metals and Alloys", edited by R. Asfahani, E. Chen and A. Cro-wson, p. 267.
- (10) Seung-Woo Lee, 2000, " Analysis of Strengthening Mechanisms through Cyclic Heat Treatment of Tungsten Heavy Alloys" Metals and Materials, Vol. 6, NO.3, pp. 241~247.