

열처리 공정을 통한 텅스텐 중합금 관통자의 관통능력 향상에 관한 연구

김명현^{1*}, 노주영², 이영우¹, 안대희¹
¹국방기술품질원 유도탄약센터, ²(주)풍산 기술팀

Study on the Improving Penetration Performance of Tungsten Heavy Alloy Penetrator by Heat Treatment

Myunghyun Kim^{1*}, Jooyoung Noh², Youngwoo Lee¹, Daehee An¹
¹PGM & Ammunition Center, Defense Agency for Technology and Quality
²Technical Team, Poongsan Corporation

요약 송탄통 분리형 날개안정철갑탄은 주로 전차체계에서 물리적인 힘으로 장갑 등과 같은 목표물을 관통 및 파괴하는 탄약으로 주로 열화우라늄 또는 텅스텐 중합금 재료를 사용한 관통자가 사용되고 있으나, 가공 및 환경적 측면 등의 이유로 텅스텐 중합금 관통자가 선호되는 실정이다. 텅스텐 중합금 관통자는 재료의 강도 및 인성에 따라 자기첨예화 효과에 의해 관통능력이 결정되는데, 본 연구에서는 인장강도 및 충격에너지에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 관통능력에 대한 기계적 특성치들에 대한 상관분석 결과, 관통능력에 대하여 인장강도는 상관계수 0.721의 비례관계를, 충격에너지는 상관계수 -0.599의 반비례관계를 나타냈으며, 추가적인 열처리 공정을 통하여 재료의 충격에너지가 감소 시킴으로써 관통능력이 향상되는 사실을 실험적으로 입증하였다. 텅스텐 중합금 관통자의 관통능력을 향상시키기 위해서는 재료의 연신율을 약 9 % 이상으로, 인장강도를 약 123 kg/mm² 이상으로 유지하는 것이 바람직한 것으로 나타났으며, 특히 충격에너지를 약 6.8 kg·m/cm² 이하로 제어하는 것이 관통능력 향상에 있어서 가장 중요한 요소로 생각된다.

Abstract An Armor Piercing Fin Stabilized Discarding Sabot (APFSDS), which penetrates and sabotages the target by physical energy, consists of a general penetrator using Depleted Uranium (DU) or Tungsten Heavy Alloy (THA) but THA is preferable because of manufacturing and environmental issues. On a THA penetrator, the penetration performance is determined mainly by self-sharpening depending on the hardness and toughness of materials. In particular, the tensile strength and impact strength work as key factors. The correlation coefficient for the penetration performance of the tensile strength was 0.721 and the impact strength was -0.599. The improved penetration performance by additional heat treatment was proven experimentally. Therefore, maintaining elongation over 9 % and tensile strength over 123 kg/mm² is desirable, and the impact strength should be less than 6.8 kg·m/cm² for good penetration performance.

Keywords : APFSDS, Ammunition, Penetration, Tungsten Heavy Alloy, Heat Treatment

1. 서론

송탄통 분리형 날개안정철갑탄(Armor Piercing Fin Stabilized Discarding Sabot, APFSDS)은 기갑전력의 주 무장체계로 사용되는 탄약으로, 현존하는 탄약 중 가장 높은 표적 파괴 능력을 가지고 있다. APFSDS는 물리적인 힘으로 목표물을 관통 및 파괴하는 탄약으로 운동 에너지탄으로도 불리는데, 주로 열화우라늄 관통자 또는 텅스텐-니켈-철로 이루어진 중합금 관통자에 의해 관통 효과가 구현된다.

관통능력은 열화우라늄 관통자에 비해 텅스텐 중합금 관통자가 다소 떨어지지만, 인체 및 환경에 무해하고 상대적으로 가공이 쉬운 특성 때문에 텅스텐 중합금 관통자가 선호되는 실정이다[1-2].

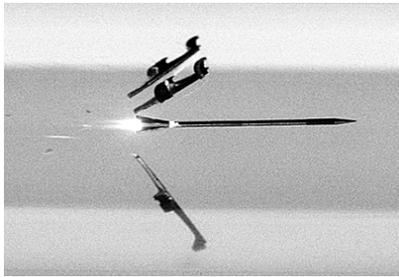


Fig. 1. Armor Piercing Fin Stabilized Discarding Sabot

열화우라늄 관통자는 목표물과 충돌 시 자기첨예화(Self-Sharpening) 효과로 충돌 단면적이 거의 일정하게 유지되는데, 자기첨예화(Self-Sharpening) 효과가 높을수록 관통력이 높은 것으로 알려져 있다. 반면 텅스텐 관통자는 일반적으로 재료가 목표물과 충돌 시 앞부분이 버섯 모양으로 뭉개지는 Mushrooming 현상이 Fig 2와 같이 발생하게 되는데, Mushrooming 현상에 따라 접촉면적 및 관통저항이 증가하게 되고 에너지 집중도가 감소하여 관통능력이 저하된다.

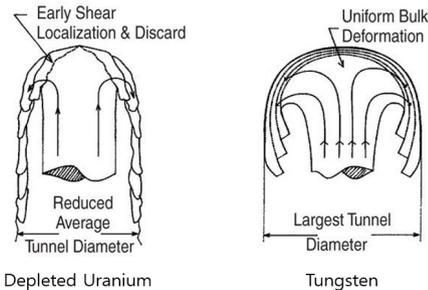


Fig. 2. Comparison of Structure between DU and W Penetrator on Impact

자기첨예화 효과는 충돌 과정에서 발생하는 부분적인 온도 상승과 소성 불안정으로 인해 발생하는 단열성 전단밴드(Adiabatic Shear Band)의 형성으로 설명된다 [3]. 열화우라늄과 같이 열 전도도가 낮은 재료는 충돌면에 열이 집중되어 단열성 전단밴드가 형성되어 관통 지름이 유지되는 국부적 변형이 계속해서 일어나게 되는데, 열전도도가 낮은 경우 열이 밖이 전달되지 않고 충돌면에 집중되기 때문에 단열성 전단밴드 형성이 용이하다. 반대로 텅스텐과 같이 열전도도가 높은 재료로 이루어진 관통자는 목표물과 충돌할 경우 충돌부위 전체적으로 소성변형이 일어나 버섯처럼 펼쳐져 충돌 지름이 급격히 증가하는 Mushrooming 현상이 일어나게 되는데, 이에 따라 관통 지름이 커지게 되어 관통능력이 급격히 저하되게 된다. 따라서, 텅스텐 중합금 관통자의 관통능력 향상에 있어서 가장 중요한 요소는 자기첨예화 효과의 발생 여부라고 할 수 있는데, 이러한 현상을 해결하기 위해 최근 많은 연구가 진행되었다. 텅스텐 중합금을 구성하는 주요 재료인 텅스텐, 니켈, 철 외에 망간 등과 같은 제3의 원소를 첨가하여 관통자의 밀도를 높이는 방법과[4], 열간 정수압 압출(Hot-hydrostatic Extrusion) 기술을 적용한 제조 공법으로 재료의 고속변형 특성을 개선하여 물성을 향상시키는 방법[5] 등이 연구되었으며, 다단열처리 기술 및 미세조직 제어 기술 등 많은 신기술이 적용된 텅스텐 중합금 관통자 제조공법 등이 개발되었다. 위와 같은 많은 연구들을 통해 최근에 들어서는 텅스텐 중합금 관통자에서도 자기첨예화 효과가 구현됨에 따라 Mushrooming 현상이 억제되어 열화우라늄에 필적할만한 관통능력 발휘가 가능하게 되었다[6].

텅스텐 중합금 관통자는 밀도와 강도 등 주요 물성 특성을 부여하는 텅스텐과, 연성 및 인성을 증가시켜 성형성 부여를 위한 바인더 역할을 하는 니켈과 철로 구성된다. 구조적으로는 둥근 형태의 텅스텐 입자가 니켈 및 철로 구성된 기지상(Matrix Phase)에 둘러싸이게 된다. 텅스텐은 녹는점이 3,422 ℃로 매우 높기 때문에 일반적인 제조 공법으로는 가공이 쉽지 않으므로 분말소결공정을 통한 텅스텐 중합금을 제조 후 기계적 가공을 통하여 관

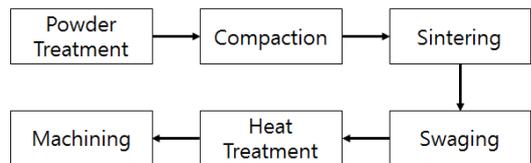


Fig. 3. Manufacturing Process

통자를 제조하게 된다.

텅스텐 중합금 관통자는 크게 6 단계로 제조되는데, 공정을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 분말상 재료를 균일하게 건식 혼합한다. (2) 소결 전 균일한 밀도 분포를 얻기 위하여 충분한 압력으로 냉간등압성형(Cold Isostatic Pressing, CIP)하여 성형체를 제조한다. (3) 수소 분위기 하에서 소결한다. (4) 소결 공정이 끝난 제품을 스웨이징 가공하여 제품의 밀도를 향상시킨다. (5) 강도의 증가를 위하여 질소 분위기 하에서 저온에서 열처리 한다. (6) 관통자의 형상을 얻기 위하여 기계가공 한다.

관통자가 목표물과 충돌할 때 관통능력에 영향을 주는 기계적 성질로는 인장강도, 연신율, 충격에너지, 경도 등이 알려져 있는데, 각각의 성질들은 서로 밀접한 관계를 갖고 있어서 하나가 좋아지면 다른 것이 나빠지는 경향(Trade-off)을 나타낸다. 또한, 기계적 성질에 영향을 주는 인자로는 재료의 조성 비율, 가공 및 열처리 조건 등이 있으며 각각의 인자들은 관통자의 관통능력 구현에 있어서 직·간접적인 영향을 주게 된다. 실제로 텅스텐 중합금 관통자의 경우, 관통자의 주요 물성은 텅스텐에 의해 결정되지만, 텅스텐 함량을 일정 수준 이상으로 올릴 경우 인장강도와 밀도는 증가하는 반면 충격에너지 등이 급격히 감소하게 되어 관통능력이 저하되게 되는 등 악영향을 미치게 된다. 위와 같은 특성 때문에 텅스텐 중합금 관통자를 제조하는데 있어서 제조공법을 제외한 가장 중요한 요소는 재료의 혼합비율이라고 할 수 있는데, 최근에는 약 90 wt.%의 텅스텐에 니켈 및 철을 혼합한 중합금이 주로 사용되고 있다.

APFSDS 탄약에 있어서 목표물의 장갑(Armor)을 파괴하는 관통능력이 가장 중요한 요소라고 할 수 있으며, 관통능력이 품질의 주 척도가 될 수 있다. 관통능력은 재료의 구성 비율 및 온도, 시간 등 제조공정 조건 등에 영향을 받게 되는데, 특히 소결 및 열처리 조건에 따라 큰 변화가 발생하게 된다.

일반적으로 소결 및 열처리 시간이 길어질수록 재료의 강도는 증가하게 되지만, Trade-off 경향에 따라 다른 성질들이 저하되어 결국 관통능력 구현에 악영향을 미치기 때문에, 적절한 시간 및 온도 조건으로 중합금체를 형성하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 텅스텐 중합금 관통자의 관통능력에 대한 기계적 특성치의 상관관계를 분석하였으며, 이중 열처리 공정을 통한 텅스텐 중합금 관통자의 물성 향상 정도를 확인하여 최종적으로 관통능력에 미치는 영향을 알아보았다.

2. 실험

텅스텐-니켈-철 비율이 90-7-3(wt.%)인 혼합재료를 사용하여 약 180 MPa 압력으로 냉간등압성형을 통한 성형체 제조 후 약 1,480 °C 에서 약 20 시간 소결 후 공기 중에서 자연 냉각 하였다. 소결이 끝난 제품을 약 1,150 °C 에서 약 8 시간 열처리 후 수냉한 뒤, 스웨이징 가공처리 하였으며, 소결-열처리-스웨이징 공정을 한 번 더 반복한 이중소결공정으로 제조하였다. 이후 약 420 °C에서 40 분 간 열처리 후 최종 형상으로 기계가공 하였다. 재료는 Table 1과 같이 사용하였으며, 최종 성형 가공된 관통자를 사용하여 균질압연장판(Rolled Homogeneous Armor, RHA)에 대하여 각각의 시편 그룹의 관통능력을 확인하였다.

Table 1. Specifications of Materials

Materials	Particle Size	Manufacturer
W-Powder	2.5 μm (Avg.)	TaeguTec
Fe-Powder	5.0 μm (Avg.)	BASF
Ni-Powder	2.5 μm (Avg.)	BASF

관통자의 형상은 구경 120mm 전차 체계에서 사용중인 대전차날개안정철갑예광탄(Model: K276)과 동일하게 가공하였으며, 미 군사규격 MIL-A-12560H의 Armor Class 3에 해당하는 로크웰 경도 HRC 26.0의 RHA 장갑판재를 사용하였다.

실험에서는 여러 가지 조건으로 제조된 각각의 관통자 7 그룹을 실제 운용조건과 유사한 사격실험을 통하여 관통능력을 확인하였다. 대한민국 국방규격 KDS 1315-3005에 따라 대한민국 K1A1 전차에서 사용되는 구경 120mm 활강포(Model: KM256)를 사용하여 일정 거리만큼 떨어져 있는 일정 두께의 RHA 장갑판재를 50 % 확률로 관통할 수 있는 최저속도를 Langlie 방법을 통하여 계산하였으며, 계산된 값을 사용하여 각 그룹에 대한 유효사거리(Effective Range)를 추정하였다. Langlie 방법의 계산을 위해 그룹 당 최소 4 발 이상의 시료가 사용되었는데, 일정 수준 이상의 편차가 발생하였을 경우 시료 크기를 증가하여 실험의 신뢰도를 확보하였다. 실험에 사용된 장갑판재의 두께 및 실험 거리, Langlie 방법을 통한 유효사거리 추정 과정 등에 관한 정보는 대한민국 국군 전차 체계의 작전요구성능(Required Operational Capability, ROC)과 관련된 부분으로 본 연구 결과에서

공개하지 않는다.

각 그룹에 대하여 경도, 인장강도, 연신율, 충격에너지, 압축항복강도, 압축률 등 기계적 성질이 유효사거리에 미치는 관계를 통계분석 툴을 활용하여 분석, 주요 영향 인자를 식별하였는데, 각각의 인자들은 ASTM E18 (경도), ASTM E8(인장강도, 연신율), ASTM E23(충격에너지), ASTM E9(압축항복강도, 압축률) 규격에 따라 분석하였다. 각 그룹 및 인자별로 3 회 측정된 값의 평균을 사용하였으며, 이중 열처리 공정을 거친 시료에 대하여 기계적 성질을 비교하고 동일한 방법으로 유효사거리 향상 정도를 확인하였다. 실험에서 사용된 시료 중 관통능력이 가장 뒤처지는 그룹에 대하여 465 °C 및 480 °C 두 가지 조건에 대하여 40 분 간 추가적인 열처리 공정을 시행하였는데, 기계적 성질 변화 확인 및 동일한 방법으로 관통능력과 유효사거리 향상 정도를 확인하였다.

본 연구에서 사용된 유효사거리 수치는 군사기밀에 해당하는 사항으로, D 그룹의 유효사거리를 100.0 %로 환산한 임의의 상댓값을 사용하였다.

3. 결과

3.1 상관분석 결과

소결 및 열처리 공정의 온도와 시간 등 여러 가지 공정 조건을 달리하여 제조된 관통자의 기계적 성질, 경도(H, HRC), 인장강도(TS, kg/mm²), 연신율(E, %), 충격에너지(IS, kg·m/cm²), 압축항복강도(CYS, kg/mm²), 압축률(C, %), 상대유효사거리(RER, %) 및 유효사거리 확인한 결과, Table 2와 같은 결과를 볼 수 있었다.

Table 2. Mechanical Properties and Relative Effective Range of Each Samples

Group	H	TS	E	IS	CYS	C	RER
A	41.7	124.9	9.1	6.0	133.9	53.9	111.8
B	41.7	125.7	9.0	6.3	132.2	54.8	121.1
C	41.0	124.9	10.1	6.1	135.8	56.5	116.1
D	41.4	123.8	9.8	6.8	127.5	55.2	100.0
E	41.1	123.0	6.8	6.1	132.9	54.9	93.6
F	41.8	126.6	7.4	6.5	128.4	56.3	85.9
G	41.0	124.8	7.8	8.3	135.5	55.3	77.2

인장강도, 연신율, 충격에너지, 압축률에 주로 영향을 받는 것으로 확인되었으며, 위 결과를 Minitab®19 소프트웨어를 사용하여 상관분석 한 결과, 각 인자에 대하여 Fig 4와 같은 유효사거리에 대한 상관관계를 확인할

수 있었다. 분석은 신뢰도 95%의 Person 상관계수를 사용하였다.

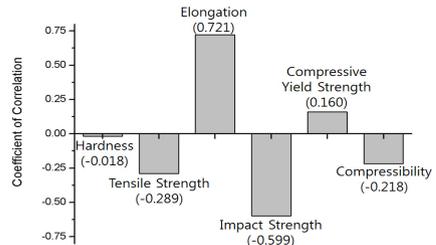


Fig. 4. Coefficient of Correlation on Each Properties

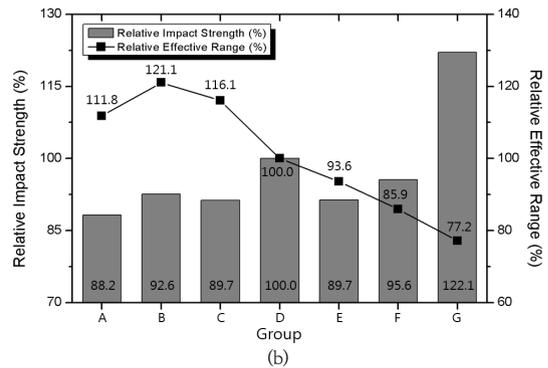
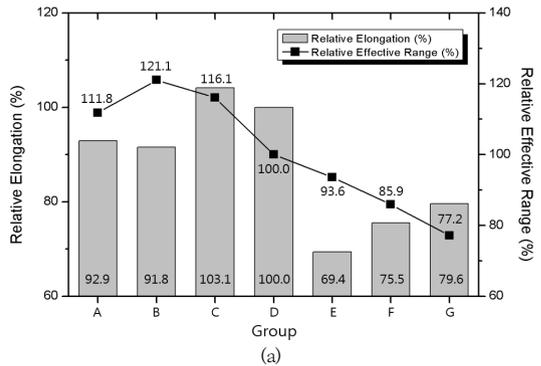


Fig. 5. Relative Effective Range depending on Mechanical Properties

(a) Relative Impact Strength and Relative Effective Range
(b) Relative Elongation and Relative Effective Range

상관계수의 절댓값이 클수록 높은 상관관계를 갖는다고 말할 수 있는데, 위 분석결과에 따라 연신율과 충격에너지에 가장 큰 영향을 받았으며, 그 외의 인자들은 영향성이 상대적으로 떨어지는 편으로 확인되었다. 관통능력은 재료의 인성에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났는데, 일정 수준 이상의 기계적 특성이 확보된 경우, 강도

가 다소 떨어지더라도 재료의 연신율이 높을수록, 충격에너지가 낮을수록 관통능력이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 유효사거리에 가장 큰 영향을 주는 기계적 특성치인 연신율 및 충격에너지에 따른 유효사거리 변화 추이는 아래와 Fig 5와 같다.

일반적으로 장갑판재를 파괴하기 위해 관통자로 사용되는 재료에는 높은 강도 및 인성의 확보가 필요한 것으로 알려져 있는데, 이 경우 관통자 선단부의 가장자리 부분이 쉽게 떨어져 나가는 자기침예화 현상의 발생이 용이하기 때문이다[5]. 위 실험에서는 유사한 수준의 강도를 유지할 경우 재료의 연신율과 충격강도에 가장 큰 영향을 받는 결과를 확인할 수 있었는데, 이는 일정 수준 이상 강도가 확보된 경우 재료의 인성이 관통 메커니즘에 더 중요하게 작용한 것으로 추정할 수 있다.

3.2 이중 열처리 실험 결과

위 실험에서 사용된 시료 중 관통능력이 가장 떨어지는 G 그룹의 시료에 대하여 추가적인 열처리 공정을 통하여 물성 변화 추이 및 관통능력 향상 정도를 살펴보았다. 각각 465 °C (G465) 및 480 °C (G480) 온도로 40 분 간 추가로 이중 열처리된 시료에 대하여 관통능력에 영향을 주는 주요 인자에 대한 기계적 성질 분석을 하였으며, Fig 6와 같은 결과를 확인할 수 있었다.

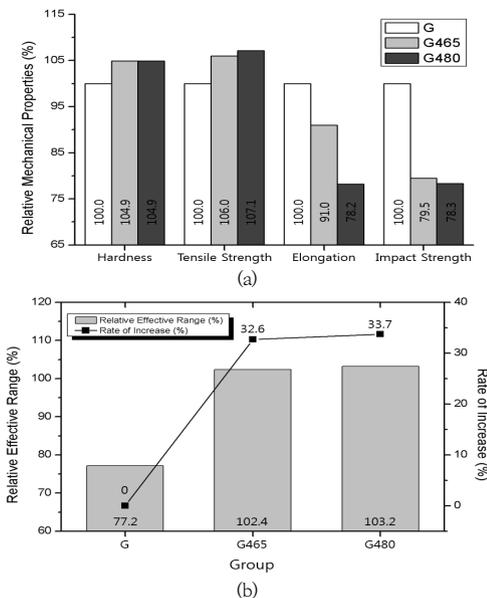


Fig. 6. Effect of Heat Treatment (a) Change in Relative Mechanical Properties through Heat Treatment (b) Change in Relative Effective Range and Rate of Increase through Heat Treatment

이중 열처리 결과, 경도, 인장강도의 향상과 연신율 및 충격에너지의 저하를 확인할 수 있었다. 일반적으로 이중소결 공정으로 제조된 텅스텐 중합금 관통자는 일반적인 파괴 형태 중 벽개파괴 발생이 용이한 구조로 알려져 있는데[7], 이러한 구조는 관통자가 목표물과 충돌할 때 충돌면 가장자리 부분이 균열 형성에 의한 벽개파괴가 발생하여 자기침예화 현상이 잘 일어나기 때문에 관통능력이 증가하게 된다. 실험에서는 전반적인 재료 강도의 증가를 확인할 수 있었는데, 재료의 강도가 증가함에 따라 충돌면의 벽개파괴가 발생하여 자기침예화 현상이 가속화된 것으로 추정된다. 상관분석 결과, 유효사거리는 인장강도(상관계수: -0.289) 및 충격에너지(상관계수: -0.599)와 반비례 관계에 있으며, 연신율(상관계수: 0.721)과 비례관계에 있는 것을 확인할 수 있었는데, 충격에너지의 감소에 가장 큰 영향을 받아 유효사거리가 극적으로 향상되는 현상을 실험적으로 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 송탄통 분리형 날개안정철갑탄(APFSDS)에 사용되는 텅스텐 중합금 관통자의 관통능력에 영향을 미치는 주요 인자를 식별하였으며, 이중 열처리 공정을 통하여 변화하는 물성 및 관통능력의 향상 정도를 확인하였다. 텅스텐 중합금 관통자의 관통능력에 영향을 미치는 주요 인자로는 연신율, 충격에너지, 인장강도 등이 있으나, 주로 연신율과는 비례관계의, 충격에너지와는 반비례관계의 상관관계를 확인할 수 있었다. APFSDS에 있어서 관통능력에 가장 큰 영향을 주는 요소로는 자기침예화 현상의 발생 정도라고 할 수 있는데, 일정 수준 이상 강도 및 인성이 확보된 재료에서는 충격에너지 특성을 약화시킴으로써 충돌면의 벽개파괴 발생에 의한 자기침예화 현상 가속화로 관통능력을 향상시킬 수 있는 것으로 확인되었다. 또한, 관통자에 대하여 이중 열처리 공정을 시행한 결과 경도 및 인장강도가 소폭 상승, 충격에너지가 대폭 감소함에 따라 유효사거리의 극적인 향상을 확인할 수 있었는데, 관통 메커니즘 상 재료의 인성보다 강도가 더 중요하게 작용하는 것으로 생각된다.

따라서 APFSDS에 사용되는 텅스텐 중합금 관통자의 관통능력을 향상시키기 위해서는 재료의 연신율을 약 9% 이상으로, 인장강도를 약 123 kg/mm² 이상으로 유지하는 것이 바람직하며, 특히 충격에너지를 약 6.8 kg·m/cm² 이하로 제어하는 것이 가장 중요하다고 할 수 있다. 또한, 추가적인 열처리 공정을 통하여 경도 및 인장강도를 향상시키고, 충격에너지를 감소시킬 경우 관통능력에 긍정적 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

References

- [1] Cai, W. D., Li, Y., Dowding, R. J., Mohamed, F. A., & Lavernia, E. J., "A review of tungsten-based alloys as kinetic energy penetrator materials", *Reviews in Particulate Materials*, Vol.3, pp.71-131, 1995.
- [2] Kim, D. K., Lee, S., & Baek, W. H., "Microstructural study of adiabatic shear bands formed by high-speed impact in a tungsten heavy alloy penetrator", *Materials Science and Engineering*, Vol.249, No.1-2, pp.197-205, 1998.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(98\)00565-6](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(98)00565-6)
- [3] Ryu, H. J., Hong, S. H., & Baek, W. H., "Microstructure and mechanical properties of mechanically alloyed and solid-state sintered tungsten heavy alloys", *Materials Science and Engineering*, Vol.291, No.1-2, pp.91-96, 2000.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00968-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00968-0)
- [4] Kim, E. P., etc., "The Effect of Mn on Microstructural Change in 93W-5.6Ni-1.4Fe Heavy Alloy", *Journal of Korean Powder Metallurgy Institute*, Vol.5, No.1, pp.35-41, 1998.
- [5] Xiaoqing, Z., Shukui, L., Jinxu, L., Yingchun, W., & Xing, W., "Self-sharpening behavior during ballistic impact of the tungsten heavy alloy rod penetrators processed by hot-hydrostatic extrusion and hot torsion", *Materials Science and Engineering*, Vol.527, No.18-19, pp.4881-4886, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.04.050>
- [6] German, R. M., "Tungsten heavy alloy rivals depleted Uranium", *Met. Powder, Rep*, Vol.47, No.11, pp.42-46, 1992.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0026-0657\(92\)90894-K](https://doi.org/10.1016/0026-0657(92)90894-K)
- [7] Dong Kuk Kim, Sung Hak Lee, Kyung Jin Park, Heung Sub Song., "Research Paper - Mechanical Behavior : Effects of Microstructure and Fracture Behavior on Penetration Performance of Tungsten Heavy Alloys", *Korean journal of metals and materials*, Vol.35, No.1, pp.45-56, 1997.

김 명 현(Myunghyun Kim)

[정회원]



- 2014년 9월 : 울산과학기술원 기계신소재공학부 (공학석사)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원 유도탄약센터 연구원

<관심분야>

무기체계, 신소재공학, 화학공학

노 주 영(Jooyoung Noh)

[정회원]



- 2013년 8월 : 명지대학교 기계공학과 (공학사)
- 2013년 7월 ~ 현재 : 풍산

<관심분야>

기계공학, 재료공학

이 영 우(Youngwoo Lee)

[정회원]



- 2012년 8월 : 서울시립대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1993년 4월 ~ 현재 : 국방기술품질원 유도탄약센터 선임연구원

<관심분야>

무기체계

안 대 희(Daehee An)

[정회원]



- 2019년 2월 : 창원대학교 산업시스템공학과 (공학사)
- 2018년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 유도탄약센터 연구원

<관심분야>

산업공학, 신뢰성공학