

## 내열금속 분말의 국방소재 응용

김영무 · 김은표 · 이 성 · 노준웅  
국방과학연구소 제4기술연구본부 국방소재기술부

### Application of Refractory Metal Powders to Military Material Fields

Youngmoo Kim, Eun-Pyo Kim, Seong Lee and Joon-Woong Noh  
Agency for Defense Development Daejeon, 305-152, Republic of Korea

#### 1. 서 론

내열 금속(refractory metal)은 일반적으로 체심 입방 구조를 가진 텅스텐, 몰리브덴, 니오븀 및 탄탈륨 소재를 말하며, 조밀 육방 격자 구조의 레늄 및 바나듐도 포함한다. 이러한 내열 금속은 표 1에서 보듯이 다른 금속에 비해 용점과 밀도가 높고, 고온 기계적 물성이 우수하다는 특징이 있다. 내열 금속관련 연구는 1900년대부터 시작되었으며 우주항공부분의 열차폐재, 유도 무기 및 제트 엔진의 부품 등 주로 국방 및 우주항공 분야를 중심으로 수행되고 있다. 개발 초창기에는 화학 및 전자관련 부품 소재에 적용되었

으나 매우 미미한 수준이었으며, 1900년대 중반까지는 내열 금속 소재의 고온 산화성으로 인해 전구의 필라멘트 및 발열체 등 제한적 환경에 적용되었다. 그러나 각종 금속 원소와의 합금화 및 내산화 코팅 공정을 통해 내열 금속 재료의 고온 내산화성을 향상시킴으로서 현재 고온 구조재로서 각광을 받고 있다<sup>1-4)</sup>. 이러한 내열 금속 소재는 용점이 매우 높기 때문에 기존 금속의 벌크화 공정인 용융 및 주조를 통해 제작하기는 매우 어렵다. 따라서 대부분의 내열 금속은 분말 야금 공정 기술을 통해 제작되고 있으며 이러한 공정은 경제적이며 원하는 형상, 조성 및 물성을 제품을 직접 설계하여 제조할 수 있다는 장

Table 1. Characteristics of refractory metals

Materials	W	Re	Ta	Mo	Nb
Properties					
Melting Point (°C)	3410	3180	2996	2617	2468
Density (g/cc)	19.30	21.00	16.60	10.20	8.60
C.T.E. (ppm/°C)	4.50	6.20	6.30	4.80	7.30
Thermal Conductivity (W/cm-°C)	1.70	0.40	0.52	1.40	0.54
Specific Heat (J/g-°C)	0.13	0.14	0.14	0.25	0.26
Electrical Resistivity (Ωhm-cm)	5.30	18.50	13.10	5.40	14.40
Tensile Strength					
@ 20°C (GPa)	0.7-3.5	0.7-2.0	0.2-0.5	0.7-1.4	0.4-0.7
@ 500°C (GPa)	0.5-1.4	-	0.2-0.3	0.2-0.5	0.3-0.5
@ 1000°C (GPa)	0.3-0.5	0.4-0.7	0.1	0.1-0.2	0.04-0.1
Young's Modulus					
@ 20°C (GPa)	410	450	185	330	130
@ 500°C (GPa)	390	415	180	320	125
@ 1000°C (GPa)	365	360	170	280	110
Crystal Structure	BCC	HCP	BCC	BCC	BCC

점이 있다.

현재 내열 금속 관련 제조 기술은 미국이 선도하고 있는 추세이다. 이 기술은 향후 항공우주 산업에서의 우위를 확보하기 위한 전략과 맞물려 있는 상태이며, 대표적으로 미 항공우주국(NASA)과 미 국방부(DoD)가 공동으로 주관하여 추진 중인 Integrated High-Payoff Rocket Propulsion Technology(이하 IHRPT) 프로그램을 들 수 있다. 본 프로그램은 2010년까지 현재 로켓 추력 성능을 두 배로 향상시키는 연구로서 정부 연구 기관과 산업체가 협력하여 수행하는 범국가적 프로젝트이다<sup>5)</sup>. 이와 같은 사업 목표를 달성하기 위하여 가벼우면서도 내열 및 내삭마성이 우수한 소재 개발이 필수적이라는 점을 인식, 미 공군 연구소(AFRL)등이 참여하는 IHRPT Materials Working Group(IMWG)을 조직하여 천문학적인 예산을 이에 투입하고 있는 실정이다. 또한 정부 기관과 각 군수산업체(Boeing, Lockheed Martin, Aerojet, Ultramet 등)를 중심으로 National Space and Missile Materials 라는 컨퍼런스를 매년 개최하고 있으며, 내열 소재에 대한 활발한 토론이 이루어지고 있다. 유럽에서는 Plansee를 비롯한 여러 회사에서 내열 금속 관련하여 세계적인 기술을 보유, 각종 전자 및 군수 관련 제품을 전 세계 시장에 판매하고 있다. 최근 중국도 내열 금속 관련 기술의 중요성을 인식하여 China Rhenium과 같은 대형 제조 회사가 등장, 각종 내열 금속 원료 소재를 독점하고 이에 관련된 기술을 혁신적으로 발전시키고 있는 추세이다. 그러나 이에 비해 국내에서는 내열금속 소재 관련 연구가 매우 미진한 실정이다. 대부분의 소재는 해외 제조회사로부터 높은 가격으로 공급받고 있는 실정이다. 그러나 군수품과 관련 현재 대부분의 내열 금속 소재가 수입 규제 품목으로 지정되어 있고, 갈수록 전 세계적으로 확산되어 가고 있는 추세이므로 이에 관련된 기술을 국내 독자적으로 확보가 시급한 실정이다.

국방소재 분야에서 내열 금속 소재가 차지하는 비중은 매우 크다. 특히 대장갑 탄두 소재, 각종 내열 부품 소재 등 각종 무기체계의 성능을 좌우하는 핵심 요소를 담당하고 있다. 이에 국방과학연구소에서는 1980년대부터 시작된 대전차 운동에너지탄의 관통자 소재 연구를 비롯, 성형작약탄두의 라이너 소재, 유도무기체계의 구성 부품인 노즐과 제트 베인 등의 연구를 지속적으로 수행하고 있다. 본 논문에서는 위

와 관련된 기술 현황 및 제조 공정에 대해 간략히 다루고자 하였다.

## 2. 대장갑 소재

대장갑 무기체계(Anti-tank weapon system)는 제 2차 세계대전 당시 개발되었으며, 크게 운동에너지탄(kinetic energy ammunition)과 화학에너지탄(chemical energy ammunition)으로 분류된다. 운동에너지탄의 경우 주로 적 전차 파괴용으로, 화학에너지탄은 대인, 대물, 대장갑 등 다목적으로 응용되고 있다. 그러나 1970년대부터 반응장갑(reactive armor), 능동방호 기술과 같은 첨단 방호 기술이 개발됨에 따라 현재 이를 무력화 시키기 위해 대장갑 시스템의 위력 증대를 위한 연구가 지속되고 있다.

우선 운동에너지탄은 그림 1과 같이 관통자가 목표물에 도달하여 순간적으로 운동에너지를 한 곳에 집중, 목표물을 관통시켜서 상대의 전투능력을 상실시키는 역할을 한다. 이러한 운동에너지탄의 주요 관통자소재로는 열화우라늄 및 텅스텐 중합금이 사용되고 있으며 최근 벌크 비정질 합금을 적용시키기 위한 연구가 수행 중에 있다. 화학에너지탄은 비행체 자신이 직접 화약을 가지고 비행하여 목표물에 도달하면, 탄 내부의 금속라이너가 화약의 폭발에 의해 제트로 변형되어 목표물을 관통하게 되는 원리이다(그림 2). 성형작약탄 라이너 소재로는 구리가 사용되고 있으며, 텅스텐-구리, 몰리브덴, 텅스텐과 같은 고밀도 소재에 대한 연구가 수행중에 있다. 또한 성형작약탄과 유사한 원리로 작동하는 지능탄(smart ammunition)의 경우, 그림 3과 같이 상대적으로 방호성능이 취약한 전차의 상부를 공격하는 역할을 한다. 지능자탄 관통자인 폭발성형관통자(EFP)의 경우

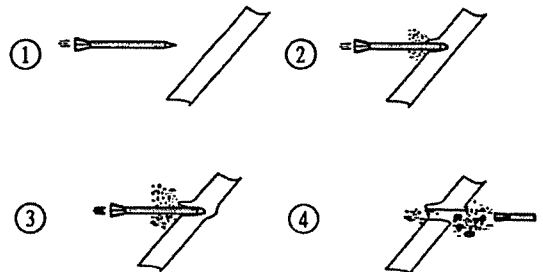


Fig. 1. Penetration mechanism of kinetic energy projectile.

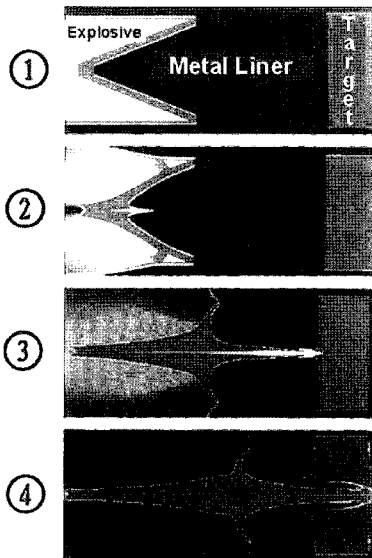


Fig. 2. Penetration mechanism of shaped charge liner.

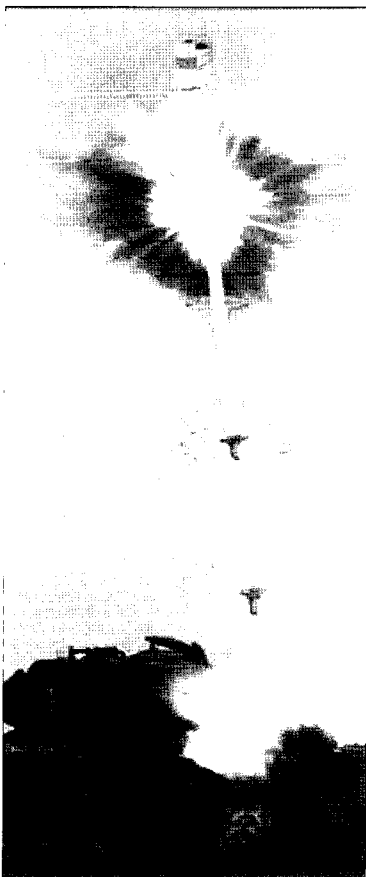


Fig. 3. Penetration mechanism of explosive formed projectile.

탄탈륨과 같은 고밀도, 고연성소재가 사용되고 있다. 본 절에서는 대장갑탄체계에 적용되는 소재와 관련된 국내외 기술현황을 소개하고 향후 개발 동향에 대해 기술하고자 한다.

2.1. 운동에너지탄 관통자용 소재 개발

대표적인 관통자 소재로는 열화우라늄(depleted uranium, 이하 DU)과 텅스텐 중합금(tungsten heavy alloy, 이하 WHA)이 있다<sup>9)</sup>. 우선 DU 관통자는 주조 및 열간 성형 공정을 통해 제조되며 현재 미국과 러시아에서 사용되고 있다. 또한 밀도가 높고(18.4 g/cc), 목표물과 충돌 시 자연 발화되며 단일 전단 변형이 일어나는 특성이 있어 관통능력이 매우 우수하다는 장점이 있다. 그러나 부식에 취약하고, 발화성이 있으며 방사능 물질에 의한 환경오염 및 인체에 유해하다는 단점으로 인해 우리나라를 비롯 대부분의 국가에서 WHA 관통자를 사용하고 있다. WHA 관통자는 텅스텐 분말을 주원료로 사용하여 통상적인 분말야금 공정 및 냉간 가공 등으로 제작된다. 우리나라를 비롯해 대부분의 서방국가에서 적용하고 있다. 환경 오염 등과 같은 부작용은 없으나, 관통시 발생하는 mushroom현상에 의해 동일한 조건에서 열화우라늄에 비해 관통능력이 떨어진다. 따라서 이와 같은 단점을 극복하기 위하여 1980년대부터 텅스텐 중합금 관통자 소재에 대한 연구가 수행되었으며, 이 결과 열화우라늄과 거의 유사한 관통성능을 가지는 관통자를 개발하게 되었다. 현재 전 세계적으로 기존 관통자의 성능 향상을 위해 텅스텐 중합금 복합 관통자, 벌크 비정질 기지 텅스텐 복합재료 관통자 등 새로운 개념의 탄에 대한 연구가 진행중에 있다. 본 절에서는 두 종류의 관통자의 개요 및 개발 현황 및 기존 개발된 관통자에 대해 다루고자 한다.

2.1.1. 텅스텐 중합금 관통자

기존 텅스텐 중합금의 관통 성능을 증진시키기 위해 정적 물성을 향상시키고 자기 마모 현상(self sharpening)을 쉽게 일어나게 하기 위한 방향으로 수행되었다. 텅스텐 입자 조대화 및 다단 열처리 공법을 통한 입자 변형을 통해 계면을 강화시켜 충격에너지를 향상시키고, 이로 인해 관통자의 텅스텐 함량을 증대시키는 결과를 나타내었다. 또한 WHA에 망간을 첨가하여 자기 마모 현상을 향상시키는 연구를

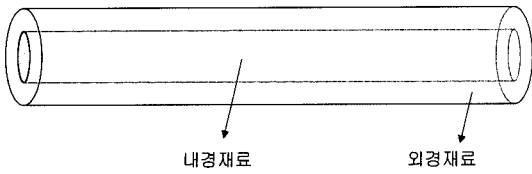


Fig. 4. Schematic diagram of tungsten heavy alloy composite.

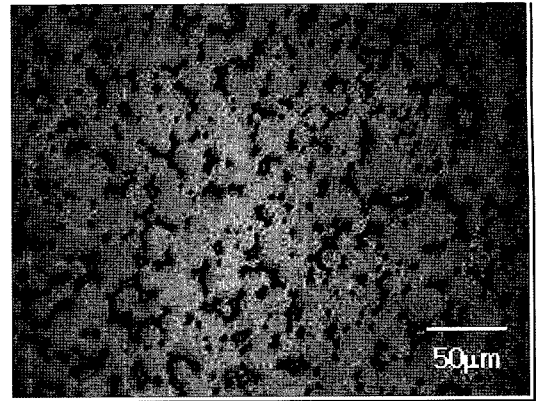
수행하였다. 이와 같이 개발된 WHA 관통자는 현재 전차의 날개 안정 철갑탄에 적용되고 있다.

2.1.2. 텅스텐 중합금 복합 관통자<sup>7)</sup>

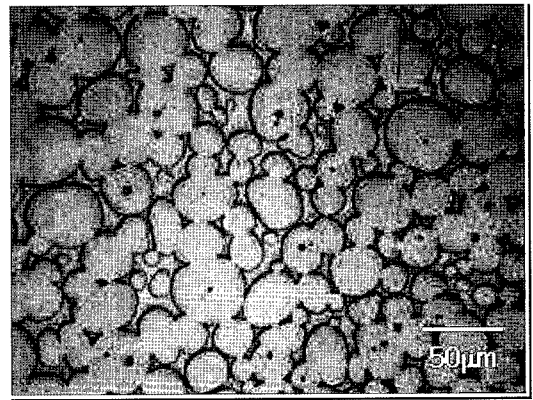
WHA 복합관통자 개념은 그림 1에서 보듯이 관통자 내부의 내/외경부위를 각기 다른 조성으로 제조함으로써, 부위별 서로 다른 효과를 동시에 발휘하도록 하여 궁극적으로 운동에너지 탄의 관통 성능을 향상시키기 위함이다. 즉 내경부위는 기존 텅스텐 중합금 조성에 몰리브덴을 첨가해 취성이 매우 높고 자기마모효과를 구현할 수 있는 재료를, 외경부위는 내경재료가 가지는 결점인 낮은 연성과 인성을 보완할 목적으로 기존의 중합금 조성으로 설계하였으며 그림 4와 같은 미세조직을 보여주고 있다. 관통시험 결과 기존 단일조성의 관통자에 비해 향상되었고, 관통 직경도 상대적으로 작은 것으로 판명되었다. 이는 복합관통자가 고속 충돌 시 내경재료의 취성파괴로 인하여 자기마모효과가 단일조성 텅스텐 중합금 관통자 재료에 비하여 우수하여 나타난 결과로 판단된다.

2.1.3. 벌크 비정질 금속기지 텅스텐 복합재료<sup>8)</sup>

텅스텐 강화 벌크 비정질 금속기지 복합재료 (tungsten reinforced bulk amorphous metal matrix composite, 이하 BAM-W)는 1990년 후반부터 미국과 일본 등 선진국을 중심으로 연구가 시작되었다. 그러나 BAM은 액체 상태에서 10<sup>5</sup> K/s 이상의 속도로 냉각해야 하기 때문에 박판이나 리본 형태만을 제조할 수 있다는 단점이 있었으나 최근에 미국과 일본의 몇몇 연구자들에 의해 10 K/s 정도의 낮은 냉각속도에서 비정질 금속을 만들 수 있는 기술이 개발되어 벌크화가 가능하게 되었다. BAM의 조성은 기존 Zr-Ti-Cu-Ni-Be에서 인체에 유해한 Be 대신 Al을 첨가하였고, 밀도를 향상시키기 위해 Zr 대신 Hf를 적용하는 연구가 수행 중에 있다. 미국에서



(a)



(b)

Fig. 5. The microstructures of tungsten heavy alloy composite (a) core material and (b) housing material.

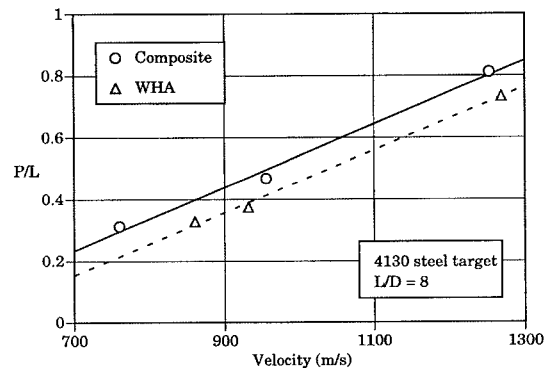


Fig. 6. Penetration capability of bulk amorphous matrix composite and tungsten heavy alloy.

BAM-W과 WHA를 적용해 축소탄 시험을 수행한 결과, 그림 6과 같이 기존 WHA에 비해 우수한 관통력을 보여주었다. 이러한 관통력 향상은 BAM의

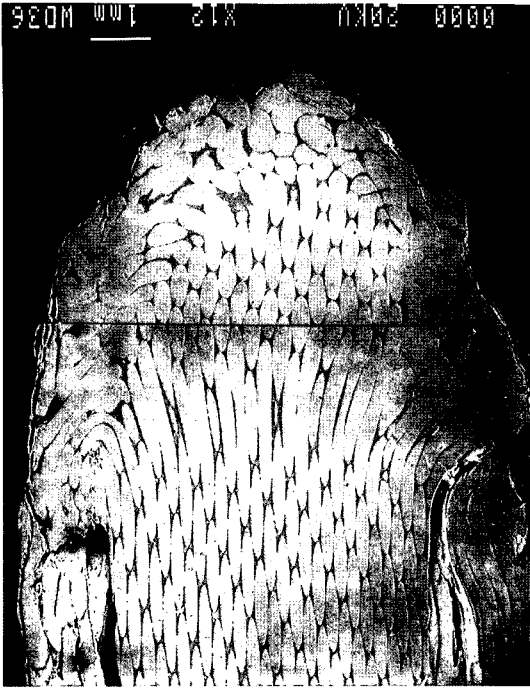


Fig. 7. Microstructures of deformed nose of residual tungsten reinforced bulk amorphous composite sub-scale penetrator.

고유의 특성인 결정립계가 없고 액체와 같은 비정질 구조를 갖고 있기 때문에 강성율, 내마모, 내식성이 매우 우수하고 이로 인해 정적 혹은 동적 변형 상태에서 가공 경화 되지 않고 그림 7과 같이 국부적으로 전단변형이 일어나면서 파괴되는 특징 때문이라 판단된다.

## 2.2. 화학에너지탄 라이너용 소재 개발

현재 군에서 운용하고 있는 대부분의 성형작약탄 라이너는 구리로 되어 있다. 이는 구리가 비교적 밀도가 높고(8.9 g/cc), 연성과 가공성이 우수하기 때문이다. 그러나 기존 구리 라이너의 성능이 한계에 도달하였다고 판단, 새로운 소재 개발이 요구되고 있다. 이에 1990년대부터 텅스텐-구리, 몰리브덴, 텅스텐 등을 라이너에 적용시키는 연구가 활발히 진행되고 있다. 텅스텐-구리 소재는 텅스텐의 높은 밀도(19.3 g/cc)와 구리의 우수한 연성을 동시에 획득할 수 있는 장점이 있으나, 건전한 소재 제작 및 형상 가공성이 어렵다는 단점이 있다. 몰리브덴의 경우, 밀도가 높고 음속이 빨라 제트의 속도가 매우 빠르기 때문에 반응 장갑등을 무력화 시키는데 적합하다. 그러나 고온 산화성 및 형상 가공이 어렵다는 제약이 있다. 텅스텐의 경우 밀도는 매우 높지만 완전 치밀화 된 라이너를 제조하기가 매우 어렵기 때문에, 기존 구리 라이너에 텅스텐을 코팅하여 적용하는 연구가 수행 중에 있다. 본 절에서는 현재 차세대 성형작약탄의 라이너 소재로 연구 중인 텅스텐-구리, 몰리브덴 및 텅스텐 소재, 그리고 폭발성형 관통자 소재인 탄탈륨의 연구 동향에 대해 기술하고자 한다.

### 2.2.1. 성형작약탄용 텅스텐-구리 라이너<sup>9)</sup>

텅스텐-구리 소재는 텅스텐의 높은 밀도와 구리의 우수한 연성을 동시에 접목시켜 기존 구리 라이너에 비해 월등한 관통 성능을 향상시키기 위한 목적이다. 텅스텐 골격체에 액상 구리를 함침시키는 용침법

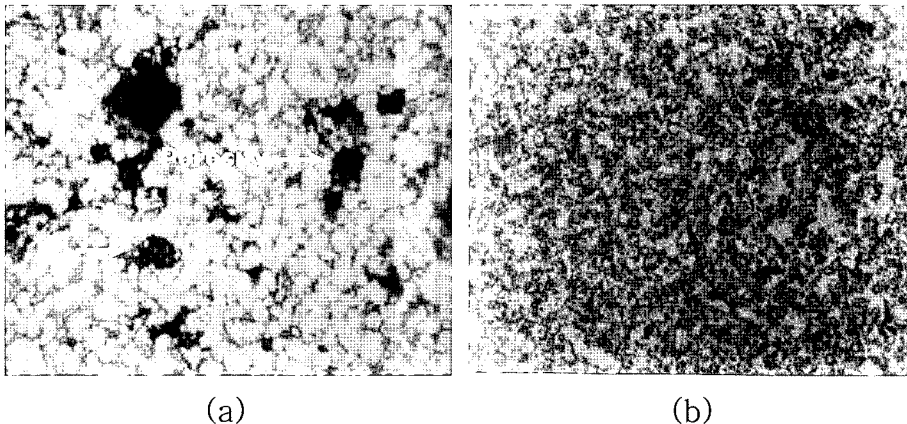


Fig. 8. The microstructures of tungsten-copper composite fabricated by (a) conventional and (b) newly developed processes.

(infiltration), 텅스텐 분말과 구리 분말을 혼합해 제조하는 액상 소결 공정 등 많은 연구가 수행되었으나 라이너에 적용하여 성공한 사례는 보고되지 않았다. 그러나 2000년 구리 분말에 나노크기의 텅스텐이 코팅된 복합분말을 제조하고 액상 소결을 통해 균일한 텅스텐-구리 복합재료를 제조하는데 성공하였다(그림 8)<sup>10)</sup>. 위와 같이 개발된 소재를 열간 단조 공정을 통해 라이너를 제조하였으며, 155 mm 이중목적 고폭탄의 자탄인 K221탄에 적용시켜 관통 시험을 수행한 결과 그림 9와 같이 모든 이격거리에 대해 기존 구리 라이너보다 관통성능이 향상된 결과를 보여주었다.

### 2.2.2. 성형작약탄용 폴리브덴 라이너

폴리브덴은 밀도(10.20 g/cc)가 높고 고온 연성이 우수하며 음속이 매우 빠르기 때문에(5.4 km/s) 라이너 제트 형성 속도가 빠르며 파괴(break-up)없이 제트 비행 속도를 기존 구리 라이너 보다 1.5배 정도 향상시킬 수 있다. 현재 미국의 JAVELIN과 같은 대전차 유도무기의 탠덤 탄두(tandem warhead, 선구

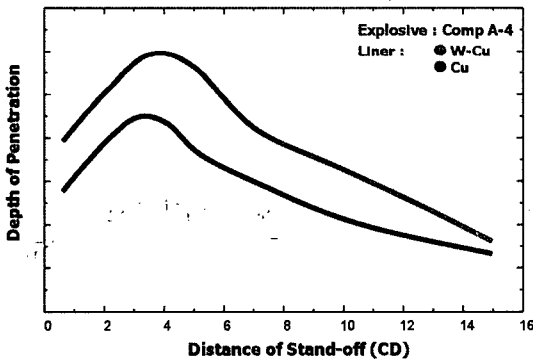


Fig. 9. Penetrability versus distance of stand-off of tungsten-copper and copper shaped charge liner.

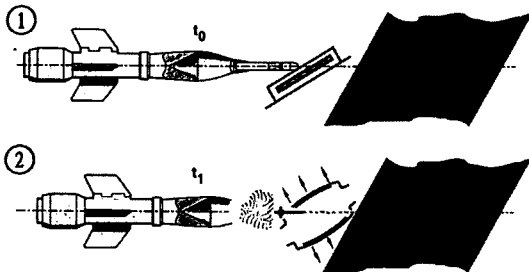


Fig. 10. Mechanism of detonation of reactive armor by precursor warhead liner.

탄두와 주 탄두로 구성되어 있으며 선구 탄두의 목적은 반응 장갑 제거, 주 탄두는 주 장갑 제거임)에서 선구 탄두 라이너에 적용되고 있다(그림 10). 이러한 폴리브덴 라이너 관련 연구는 미국의 ARDEC(Armament Research, Development and Engineering Center)와 영국의 舊 DERA(Defense Research and Evaluation Agency)에 의해 주도적으로 수행되었다. 폴리브덴 라이너의 제조 공정은 분말 야금 공정을 통해 제작된 벌크 시편을 열간 단조 및 압출 공정으로 이루어진다<sup>11,12)</sup>. 그러나 라이너 형상 가공 후 열처리 조건에 의한 미세조직 변화에 따른 관통 성능에 대한 연구가 계속 진행 중에 있다.

### 2.2.3. 성형작약탄용 텅스텐 라이너

텅스텐 소재는 용융온도가 매우 높고(3400°C), 연성 취성 전이 온도가 상온보다 높기 때문에(200~450°C) 형상 가공이 어렵다는 단점이 있어 라이너로 적용하기에는 많은 제약이 있었다. 그러나 밀도가 높고(19.3 g/cm<sup>3</sup>) 음속이 빠르기(4.6 km/s) 때문에 라이너로서의 적용성에 대한 많은 연구가 수행 중에 있다. 텅스텐 라이너는 화학 기상 증착법(이하 CVD)과 열간 단조 공정을 통해 제조되며, 제조 변수에 따라 제트 특성이 변화됨을 확인할 수 있었다. 그러나 현재 텅스텐 라이너의 관통성능은 매우 취약하며 이를 향상시키기 위해서는 CVD 등 코팅 기술에 대한 추가 연구가 필요한 실정이다.

### 2.2.4. 지능탄용 탄탈륨 라이너<sup>13)</sup>

지능탄의 폭발성형 관통자(Explosive Formed Projectile, 이하 EFP)는 성형작약탄에 비해 제트 형성 및 비행속도가 느려 관통성능은 저하되나, 비행 안정성이 우수해 전차나 장갑차의 상부를 공격하는 목적으로 사용되고 있다. 이러한 EFP 소재로는 그림 11과 같이 개발 초기에는 철과 구리 등이 적용되었으나, 1990년 이후부터 탄탈륨이 사용되고 있다. 탄탈륨은 밀도가 높고(16.65 g/cm<sup>3</sup>) 동적 연신을 매우 우수하다는 장점이 있으나, 다른 소재에 비해 가격이 매우 비싸고 제조 공정이 어렵다는 단점이 있다. 탄탈륨 EFP의 제조 공정은 전자 빔 용해법 혹은 분말 야금 공정을 통해 벌크화 시킨 후 형상 가공으로 이루어졌다. 전자의 경우, 소재 내부의 불순물 제어는 용이하지만, 결정립 조대화에 의해 작은 변형에도 집

합조적이 발달하는 등 미세조적이 불균일하다는 단점이 있다. 반면 후자의 경우, 전자에 비해 제조가 용이하고 재료 손실이 적으며, 미세조직을 제어할 수 있다는 장점이 있으나, 분말 취급 중 혼입되는 불순물(산소 등)에 의해 고속 연신율이 저하되는 단점이 있다. 따라서 EFP의 비행 성능을 향상시키기 위하여 이러한 불순물 혼입을 최소화 하고 재료 내부의 이방성을 최대한 억제 시키는 연구가 진행중에 있다.

### 3. 내열/내삭마용 소재

유도 무기 및 항공기의 경우 고온, 고압 등의 환경에서 운용되기 때문에, 이러한 조건에서 견딜수 있는 소재 개발이 필수적이다. 대표적인 내열 소재로 탄소 복합재료 및 내열 금속 소재가 있으며, 현재 서

로의 장단점을 보완시켜가며 무기체계에 적용되고 있다. 특히 내열 금속의 경우, 초고온 및 고압과 같은 극한 환경에서의 고온 강도 및 내삭마성이 우수하기 때문에, 각종 유도 무기 체계의 구성 부품, 즉 터빈, 밸브, 노즐, 제트 베인 등에 적용되고 있다. 본 절에서는 대표적인 부품인 제트 베인과 모터 노즐에 대해 다루고자 하였다.

#### 3.1. 제트 베인

최근 고성능 전술유도탄 체계는 수직 발사 시스템을 통한 비행 초기 단계에서 급선회 능력을 요구하고 있기 때문에, 이때 고성능 추력방향제어(thrust vector control, TVC) 로켓의 적용이 필요하다. 이때 로켓의 추력방향을 편향시키기 위한 부품이 바로 제트 베인(jet vane)이다(그림 12). 이러한 제트베인은

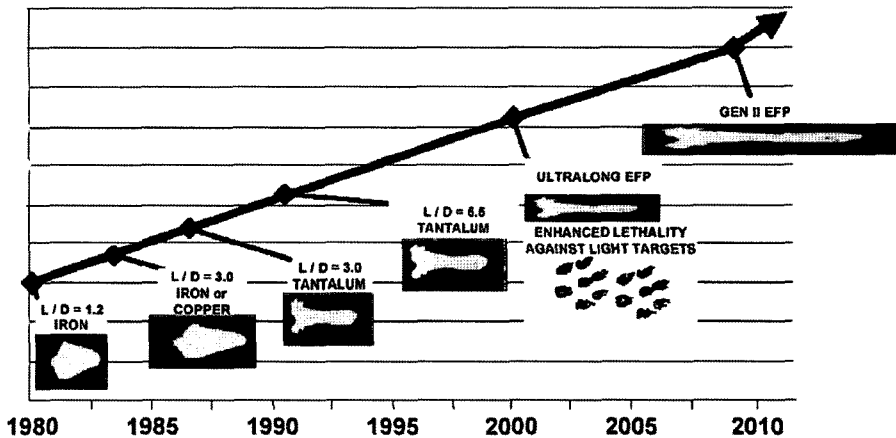
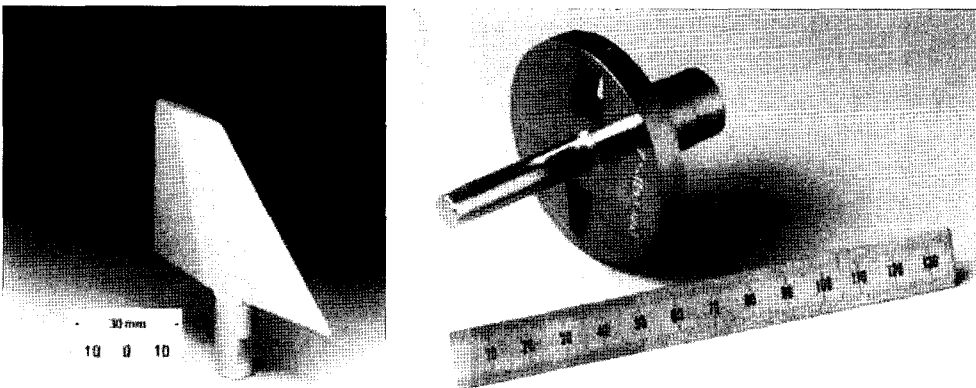


Fig. 11. Ballistic performance of explosive formed penetrator materials.



(a)

(b)

Fig. 12. (a)Jet vane and (b)shift system.

로켓 화염에 대한 기계적 편향기 역할을 하기 때문에 3000K이상의 초고온에서 극심한 삭마와 기계적 하중 및 열충격 환경하에 놓이게 되므로, 높은 수준의 내열내삭마특성 및 우수한 열전도도를 가지는 소재가 필요하다. 현재 제트 베인용 소재로는 무겁지만 내삭마성이 우수한 내열 금속 재료와 내삭마성은 내열 금속에 비해 떨어지지만 상대적으로 가벼운 탄소복합재료가 널리 사용되고 있다. 내열 금속 재료의 경우, 텅스텐 및 폴리브덴 기지 합금이 주로 적용되고 있다<sup>14)</sup>. 이들 중, 텅스텐 구리 소재가 비교적 가격도 저렴하고 내삭마성이 매우 우수하다고 알려져 있다. 텅스텐은 고온에서 강도를 유지하고, 구리는 고온에서의 용융 및 휘발되면서 텅스텐-구리 구조체를 냉각시키기킴으로서 내삭마성을 유지시킨다. 텅스텐 구리 소재는 용침법에 의해 제조되고 있으며, 현재 국내에서는 희성금속 및 승립 카본등 국외에서는 영국의 Malloy사, 미국의 CMW Inc., Oremet-Wah Chang 등에서 생산되고 있다. 제조 방법은 텅스텐 분말을 이용하여 2000도 이상의 소결공정을 통해 약 85~90%의 상대밀도를 갖는 골격체를 제조한 후 구리를 용침시키는 공정이다. 이 때, 최대한 열린 기공을 갖는 골격체를 제작하여 구리를 제품 내부까지 균일하게 침투시키면서 텅스텐 결정립계의 강도를 유지시키는 것이 핵심 기술이다.

또한 폴리브덴 합금을 제트 베인에 적용시키기 위한 연구도 수행 중에 있다. 폴리브덴 합금 중 TZM 합금은 1950년대부터 개발된 재료로서 폴리브덴에 타이타늄, 지르코늄 및 탄소를 미소량 첨가하여 고온 물성을 향상시킨 소재이다. 따라서 CIT보다 고온 기계적 물성이 우수하여 현재 제트 베인을 비롯, 많은 내열 구조 부품에 적용되고 있다. 그러나 고온에서의 산화성 및 탄화물 형성으로 인한 기계적 강도 물성 저하라는 단점을 보유하고 있어 이를 극복하는 연구가 현재 진행 중에 있다.

### 3.2. 모터 노즐 부품 소재

고체 추진 모터 연소 시 노즐 부품은 약 3000°C 부근의 화염온도와 압력, 그리고 추진체에 의한 삭마 등 매우 열악한 환경에서 약 수 십초 동안 운용되어야 한다. 따라서 이러한 소재는 연소 시 발생하는 열 충격과 연소 시 생성되는 입자에 의한 기계적 마모 등에 견뎌야 한다. 따라서 미국을 비롯한 선진국에서는 1960년대부터 강화 플라스틱, 다결정 흑연, 실리 콘 탄화물 강화 탄소 복합재료, 탄소/탄소 복합재료, 세라믹 및 내열 금속 재료 등 다양한 내열내삭마 소재에 대한 적용성 연구가 활발히 수행되고 있다<sup>15,16)</sup>. 이 중 텅스텐, 레늄, 폴리브덴과 같은 내열 금속 소재는 용점이 높고 고온 내마모성이 매우 우수하여 노즐 관련 부품 소재로 많이 적용되고 있다. 텅스텐 및 텅스텐-토리아 합금 소재를 비롯, 레늄이 코팅된 폴리브덴 소재, 텅스텐-레늄 합금, 텅스텐-탄탈륨 합금 등 여러 내열 금속 소재에 대해 적용성 검토 결과 표 2와 같이 보고되고 있다. 이들 중 순수 텅스텐의 경우, 용점이 제일 높고, 내마모성이 우수하지만, 삭마 후 열충격에 의한 크랙이 발생하기 때문에, 제 2 원소 첨가 및 레늄 코팅 등 추가 공정이 필요하다. 그러나 앞서 언급한 IHPRT 프로그램에서는 내열 금속이 가지는 한계성, 즉 다른 소재에 비해 무겁고 초고온/고압 환경에서의 내삭마성이 현저히 감소하는 등의 문제를 극복하기 위해 현재 내열금속계열 탄화물(TaC, ZrC 등)을 적용시키는 연구가 현재 진행중에 있다<sup>17)</sup>.

### 3.3. 기타 구성 부품 소재

항공기 엔진의 터빈 블레이드 소재는 현재 니켈계 초내열 합금등이 사용되고 있다. 그러나 기존 내열 합금의 성능을 향상시키기 위해 니켈이 아닌 니오븀 분말을 이용, 다른 내열 금속 분말과 합금화시키는 연구가 수행중에 있다<sup>18)</sup>. 니오븀은 용점이 높고 취성-연성 전이온도가 상온보다 낮기 때문에 가공성

Table 2. Ranking of refractory metals and alloys for use as nozzle inserts

Property	Mo	Mo/Re	W	W/Re	Ta/W
Machinability	Excellent	Good	Good	Good	Excellent
Corrosion resistance	Poor	Poor	Excellent	Excellent	Good
Erosion resistance	Bad	Good	Excellent	Excellent	Bad
Cost	Expensive	Expensive	High	Expensive	Expensive



이 우수하다는 장점이 있다. 그러나 고온에서의 기계적 물성이 급격하게 저하되기 때문에, 몰리브덴과 텅스텐을 합금화시켜 사용하고 있다. 또한 이러한 합금의 연성을 향상시키기 위해 지르코늄 탄화물을 분산시켜 가공성을 향상시키는 연구가 수행되고 있다.

#### 4. 요 약

이상에서 살펴본 바와 같이, 내열재료들은 고밀도를 이용하여 비행하는 물체의 운동에너지를 극대화시킬 수 있기 때문에 군사적으로 각종 무기체계의 성능 향상에 매우 중요하다. 또한 유도 무기 및 항공기의 경우 고온, 고압 등의 환경에서 운용되기 때문에, 이러한 조건에서 견딜 수 있는 소재 개발이 필수적이다. 따라서 무기 선진국에서는 고밀도 재료인 텅스텐, 몰리브덴, 탄탈륨, 텅스텐-구리, 감손우라늄을 활용하기 위한 연구를 활발하게 진행하고 있다. 이중, 텅스텐, 몰리브덴, 텅스텐-구리 라이너에 관한 연구는 괄목할 만한 연구 성과를 거두고 있다. 이러한 연구 성과는 기존 탄의 관통 성능을 크게 증가시켜, 이에 대응하고자 하는 방어 체계 연구자들을 바쁘게 할 것으로 판단된다. 한편 내열 금속의 경우, 초고온 및 고압과 같은 극한 환경에서의 고온 강도 및 내삭마성이 우수하기 때문에, 각종 유도 무기 체계의 구성 부품, 즉 터빈, 밸브, 노즐, 제트 베인 등에 적용되고 있으나 대부분의 내열 재료들은 제조 방법이 까다롭고, 가공성이 나빠며, 고가라는 단점들이 있어 이를 극복하는 연구들이 현재 진행 중에 있다.

#### 참고문헌

1. C. L. Briant: JOM, **50** (2000) 36.

2. P. K. Subramanian, N. G. Mendiratta, and D. M. Demiduk:

JOM, **48** (1996) 33.

3. M. R. Jackson, B. P. Bewlay, and M. R. Corderman: Proceedings of U.S.-Japan Workshop on Very High Temperature Structural Materials, (1999).

4. C. L. Briant: Advanced Materials and Processes, (1998) 29.

5. B. A. Stucke and T. R. Andrei: AMPTIAC Quarterly, **8** (2004) 35.

6. P. L. Bolte: National Defense, (1983) 43.

7. H. S. Song, E. P. Kim, K. J. Park and J. H. Ryu: J. Korean Powder Metall. Inst., **11** (2004) 369 (*Korean*).

8. L. J. Kecskers, S. F. Trevino, and R. H. Woodman: ARL Report, Dynamic Devitrification of Bulk Metallic Glasses (BMGs) and Composites of BMG With Tungsten (2005).

9. C. Voumard, H.-P. Rodunner, W. Santschi, and H. Wisler: Proceedings of the 19th Inter. Symp. on Ballistics, American Defence Preparation Association, (2001) 1479.

10. S. Lee, M.-H. Hong, E.-P. Kim, S. H. Lee and J. W. Noh: J. Korean Powder Metall. Inst., **10** (2003) 422 (*Korean*).

11. E. L. Baker: Molybdenum and Molybdenum Alloys, A. Crowson, E. S. Chen, J. A. Shields and P. R. Subramanian(Ed.), TMS, (1998) 173.

12. K. G. Cowan: Molybdenum and Molybdenum Alloys, A. Crowson, E. S. Chen, J. A. Shields and P. R. Subramanian(Ed.), TMS, (1998) 183.

13. D. Bender and J. Carleone : Tactical Missile Warheads, J. Carleone(Ed.), Progress in Astronautics and Aeronautics, **155** (1993) 367.

14. A. O. Danielson: Proceeding of JANNAF Propulsion Meeting, Sandiego, California, (1987) 1.

15. S. Haugen, AIAA Report, (1998).

16. E. Olcott and J. Batchelor, AIAA Report, (1964).

17. M. C. L. Patterson, M. Fulcher, G. E. Hilmas, W. G. Farenholtz and S. E. Landwehr: Proceeding of 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, (2005) 10.

18. Y. Tan, C. L. Ma, R. Tanaka and J.-M. Yang: Mater. Trans., **47** (2006) 1527.