

텅스텐 중합금 복합관통자 제조

송흥섭 · 김은표 · 박경진* · 류주하*

국방과학연구소 소재개발부

*(주) 풍산 안강공장 300 제조부

Manufacturing of Tungsten Heavy Alloy Composites for Kinetic Energy Penetrator

Heung Sub Song, Eun Pyo Kim, Kyung Jin Park* and Joo Ha You*

Technical Research Center, Agency for Defense Development, Yuseong POBox 35-5, Daejeon, Korea

*Angang Plant, Poongsan Co., 2222-2 Sandae-Ri Ankang-Oup Kyung-Ju, Kyung-Buk, Korea

(Received 22 July 2004 ; Accepted form 3 September 2004)

Abstract A new concept of tungsten heavy alloy composite was suggested and manufactured in this study for the kinetic energy penetrator. The composite heavy alloy was composed of two parts, the center was molybdenum added heavy alloy compositions which were designed to promote the self-sharpening effect and outside was conventional heavy alloy in order to sustain the severe stress condition in the muzzle during the firing. The center part showed an intergranular and brittle mode at tungsten/tungsten interfaces by which self-sharpening effect could be activated. On the other hand, that of outside showed conventional ductile fracture mode under high strain rate condition. From the sub-scale penetration test, the depth of penetration in heavy alloy composites showed greater values than those of conventional tungsten heavy alloys. It is suggested that the heavy alloy composite could be considered as one of the future penetrator materials.

Key words : tungsten heavy alloy, composite material, kinetic energy penetrator, self sharpening effect

1. 서 론

운동에너지탄은 목표물에 도달하여 관통자가 가진 에너지를 순간적으로 목표물에 집중하여 관통시킴으로써 상대의 전투 능력을 상실시키는 것을 목표로 한다. 운동에너지탄의 핵심부품인 관통자재료로 열화우라늄(depleted uranium)과 함께 텅스텐중합금(tungsten heavy alloy)이 전통적으로 가장 널리 사용되어 오고 있다.

텅스텐중합금 재료는 텅스텐을 위주로 소량의 니켈과 철 등으로 구성되며 액상소결 방법에 의해 제조되며 높은 밀도와 함께 우수한 강도와 연성 등의 특성을 가지고 있으며 기계가공성과 단조 및 스웨이징 등 2차 성형성 또한 양호하다¹⁾. 한편, 열화우라늄

은 핵연료로 사용되고 남은 부산물에 약간의 타이타늄이나 몰리브데늄 등을 첨가하여 주조, 열처리 및 열간가공 등을 거쳐 제조된다^{2,3)}. 이 재료는 부식에 취약하고, 발화성이 있으며, 무엇보다도 저 준위이기 는 하나 방사능물질을 포함하는 등 환경오염의 문제를 안고 있다. 그러나 이러한 단점에도 불구하고 열화우라늄 관통자의 경우 텅스텐 중합금 관통자에 비하여 self-sharpening effect(이하 자기마모효과)가 우수하여 6~10% 더 높은 관통력을 나타내는 것으로 알려져 있다⁴⁾. 이와 같은 이유 때문에 열화우라늄 관통자 수준의 관통성능을 발휘할 수 있는 텅스텐 중합금 관통자를 개발하기 위하여 많은 연구가 수행되고 있다.

이러한 일련의 연구결과로서 재소결 또는 분위기

교환 방법을 통하여 망간을 첨가하는 방법^{5,6)}, 기계적 합금화와 이단계 급속소결 또는 산화물 첨가를 통한 고상입자 미세화 방법⁷⁾, 텅스텐중합금 관통자에 일정한 깊이로 탄소를 표면에만 침탄시키는 방법⁸⁾, 그리고 텅스텐중합금에 응력을 가한 다음 재소결하여 텅스텐 입자를 변형시키는 방법이 개발되었다⁹⁾. 이런 방법들로 개발된 재료는 기존 재료 관통자에 비하여 관통성능은 향상되었지만 재조공정이 까다롭기 때문에 양산공정에 적용하기에 어려움이 있다. 특히 텅스텐 입자 변형 관통자는 자기마모효과가 좋아서 관통성능이 확실하게 우수하기 때문에 차기세대 관통자로 주목받고 있다¹⁰⁾. 그러나 개발된 관통자는 기존 재료에 비하여 고상입자가 크게 성장하고 찌그러진 불규칙한 모양으로 강도, 연성 및 인성 등의 재료물성이 저하되는 단점을 안고 있다.

따라서 본 연구에서는 관통성능이 우수하면서도 동시에 양산공정에 적용 가능한 새로운 개념의 복합관통자 재료를 제안하였다. 이 복합관통자 재료는 동일한 관통자재료 내에 내경부위와 외경부위를 각기 다른 조성으로 구성하여 제조함으로써 서로 다른 효과를 동시에 발휘하도록 설계한 것이다. 즉 내경부위는 자기마모효과를 구현할 수 있는 재료를 그리고 외경부위는 내경재료가 가지는 결점인 낮은 연성과 인성을 보완할 목적으로 기존의 텅스텐중합금 조성으로 설계한 것이 특징이다.

본 연구에서는 이와 같은 개념의 새로운 복합관통자 제조를 위한 일련의 공정과 재료물성 및 미세조직 관찰 등의 분석을 실시하였다. 복합관통자와 기존 관통자를 만들어서 고속변형시험을 수행함으로써 새로운 관통자 재료로서의 가능성을 조사하고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 제안한 복합관통자의 개념은 그림 1

과 같다. 즉 조성이 각기 다른 내경과 외경의 두 부분이 한 개의 관통자에 동시에 구현되도록 설계하였다. 본 연구에 사용된 원료분말의 조성은 표 1과 같다. 기존 관통자 조성은 통상적으로 사용하는 텅스텐이 무게비로 93%, 니켈이 4.9% 그리고 철 분말이 2.1%가 되도록 칭량하여 혼합, 냉간등압성형, 액상소결, 열처리, 냉가가공을 거치는 통상적인 공정으로 제조하였다. 한편 관통자 크기는 직경이 18 mm, 길이가 63 mm로 길이대 직경비(L/D)가 3.5였다.

2.1. 복합관통자 제조

먼저 내경재료만을 고상 소결한 다음, 외경조성의 분말을 충전하여 소결하는 방법으로 제조하였다. 내경재료는 일반적인 텅스텐중합금 제조 공정으로 만들었다. 표 1의 내경재료 조성인 92.78W-1.14Ni-1.45Fe-4.63Mo으로 원료분말을 혼합기에 넣고 8시간 동안 혼합한 다음, 200 MPa의 압력으로 냉간등압성형 하였다. 소결은 1425°C, 수소 분위기에서 2시간 실시하였다.

복합관통자는 두 종류를 채택하였다. 복합 관통자의 내경재료가 직경대비 70%와 60%가 되도록 A형(내경직경 12.6 mm)과 B형(내경직경 10.8 mm)의 두 종류를 준비하였다. 즉 A형은 내경재료 반경이 6.3 mm, 이를 둘러싼 외경재료 두께를 2.7 mm로 하였다. 1차 소결완료된 내경재료에 외경재료 혼합분말을 충전한 뒤 성형하였다. 내경재료를 냉간등압성형용의 고무 백에 장입하는데 치구를 만들어서 중심부

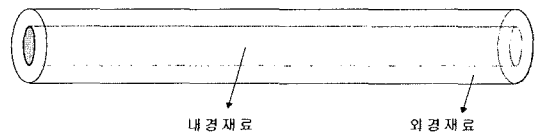


Fig. 1. Schematic diagram of tungsten heavy alloy composite.

Table 1. The composition of tungsten heavy alloy composite in this experiment.

	Sample	Composition(wt. %)				Theoretical Density (g/cm ³)
		W	Ni	Fe	Mo	
Reference Penetrator	Reference	93.0	4.9	1.4	-	17.74
Composite Penetrator	Core Material	92.78	1.14	1.45	4.63	17.94
	Housing Material	90.0	7.0	3.0	-	17.15

위에 위치하도록 하였다. 미리 혼합된 외경재료의 분말을 충전하여 냉간등압성형을 실시하였다. 충전시 외경재료의 분말이 잘 충전되고 내경재료가 시료전체의 중심에 위치할 수 있도록 하는 것이 본 연구에서 개발한 중요한 방법이다.

복합관통자와 기준 관통자의 소결은 똑같이 수소분위기, 1475°C에서 2.5시간 실시하였다. 열처리에는 모두 2회 반복열처리로 처리하였는데 질소분위기에서 1150°C, 3시간 유지한 뒤 수냉 처리하였고, 다시 질소분위기에서 1170°C, 5시간 유지한 뒤 수냉 처리하였다. 열처리된 시편은 강도향상을 목적으로 단면적 비로 18% 냉간가공을 실시하여 강도를 향상시켰다. 소결체의 밀도를 측정하였으며 미세조직은 광학현미경과 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였다.

2.2. 관통 시험

상기와 같은 일련의 제조공정을 거친 재료는 고속충돌 시험을 실시하여 복합관통자 재료의 관통성능을 평가하였다. 관통자 재료는 모두 3종류의 시험편이었고 시험에 사용된 포의 구경은 30 mm였다. 시험편으로 기준관통자, 개발 관통자인 A형과 B형이었다. 고속충돌시험의 속도는 1140 m/s를 기준이 되도록 실시하였다. 표적은 장갑판(Rolled Homogeneous Armor; RHA)재를 사용하였으며 크기는 넓이와 폭이 각각 100 mm이고 두께는 150 mm였다. 그리고 충돌속도의 측정은 MVRS(Muzzle velocity Radar System)장비를 이용하여 수행하였으며, 관통력 평가는 장갑판재를 절단하여 직접 그 깊이를 측정하였고 관통 직경 등을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 내경재료의 특성

그림 2는 복합관통자의 내경부위만의 미세조직으로 외경재료와 접합되기 전의 모습을 보여주고 있다. 복합관통자의 내경재료는 기존의 중합금에 몰리브데늄을 4.63% 첨가한 것으로서 텅스텐입자는 약 8~10 μm의 분포를 보여서 기존 텅스텐 중합금 재료의 고상입자 크기인 30~50 μm에 비하여 미세화 된 것을 볼 수 있다¹¹⁾. 내경재료의 소결후 수축율은 길이방향 16.5%, 직경방향 13.2%였으며 소결밀도는 평균 17.86 g/cm³로서 이론밀도의 99.6%의 상대밀도를

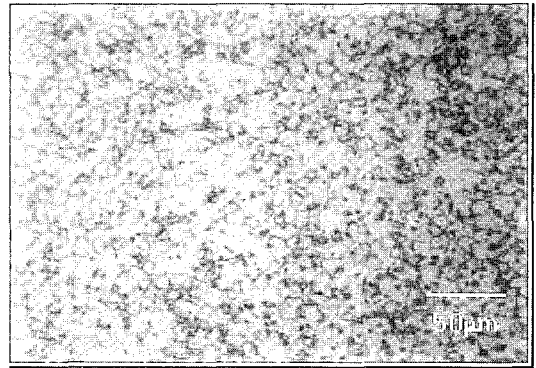


Fig. 2. The microstructure of core material, 92.78W-1.14Ni-1.45Fe-4.63Mo alloy sintered at 1425°C for 2 hours in hydrogen atmosphere.

나타냈다.

한편 이 재료의 소결상태에서의 재료물성을 측정한 결과 경도는 35.7(HRC), 인장강도 876 MPa, 연신율 4.3%였다. 통상적인 텅스텐 중합금 소결체의 밀도가 17.0~17.7 g/cm³, 경도가 30~31, 인장강도가 900~1,000 MPa, 연신율이 20~30%인점을 고려하면 내경재료의 물성은 기존의 중합금재료에 비하여 밀도는 다소 높고, 경도는 아주 높는데 반하여, 강도가 다소 낮고, 연성이 매우 낮다. 이와 같은 이유는 몰리브데늄 첨가, 니켈과 철의 비율이 4.4/5.6으로 기지상이 취약함¹²⁾ 그리고 소결온도가 낮았기 때문이다. 본 재료의 통상적인 소결은 니켈과 철이 액상으로 형성되고 여기에 텅스텐과 몰리브데늄이 용해되어 기지상을 형성한다. 이런 기지상을 통하여 용해 재석출이 활발하게 일어나면서 고상입자는 둥근 모양을 형성하며 성장해 나간다. 본 소결 온도가 액상형성온도보다도 낮기 때문에 니켈과 철이 완전한 액상이 형성되지 못하였고, 불충분한 소결이 되었기 때문에 기계적 성질이 저하되었다.

그림 3은 내경재료의 파단면을 보여주는 미세조직 사진으로서 그림에서와 같이 파단은 전형적인 입계 파괴 양상을 보여주고 있다. 내경재료는 취성이 강한 입계파괴의 양상을 나타내었는데 이는 낮은 연성을 활용하여 텅스텐입자/텅스텐입자의 취성파괴를 활성화시켜 입계파괴를 동시다발적으로 발생하도록 유도하고자한 것이다. 이 재료의 특성은 최근 관통자재료로 제시된 입자변형재료의 파단거동과 유사함을 볼

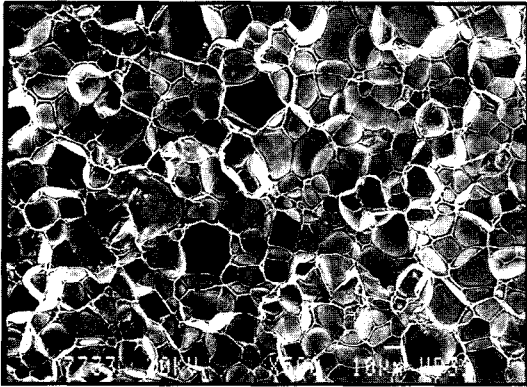


Fig. 3. Scanning electron micrograph showing the fractured surface of core materials.

수 있다⁹⁾.

3.2. 복합 관통자의 재료 특성

3.2.1. 미세조직 특성

그림 4는 소결공정을 거친 복합관통자의 내경과 외경재료의 미세조직을 보여주고 있다. 내 외경 재료 모두 고상입자가 둥근 형상을 나타냈고, 외경재료에서는 텅스텐 입자가 내경재료의 텅스텐 입자에 비해서 더 성장한 것을 볼 수 있다. 내경재료는 내경재료만을 위한 고상 소결과 복합관통자의 제조를 위한 액상 소결 등 두 번의 소결과정을 거치게 된다. 내경재료의 미세조직은 그림 2의 내경재료만을 소결하였을 때 보다 텅스텐의 입자가 성장했음을 알 수 있다. 그것은 1차 내경재료만 소결을 실시한 경우 소결온도가 낮은 상태이었으나 복합관통자의 제조는 충분한

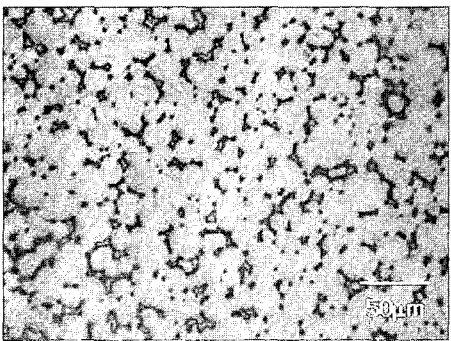
액상소결조건 아래에서 이루어져 그 만큼 입자성장이 일어났기 때문이다.

2차 소결로 인하여 미세조직 변화가 있지만 취약한 성질은 아직 남아있다. 기지상을 정성분석한 결과 내경재료에서는 몰리브데늄이 무게비로 약 10.5% 검출된 반면 외경재료에서는 몰리브데늄이 거의 검출되지 않았다. 몰리브데늄이 기지상의 조성을 크게 변화시켰으며 이러한 영향으로 텅스텐입자 성장이 부위별로 다르게 나타났다고 판단된다¹³⁾.

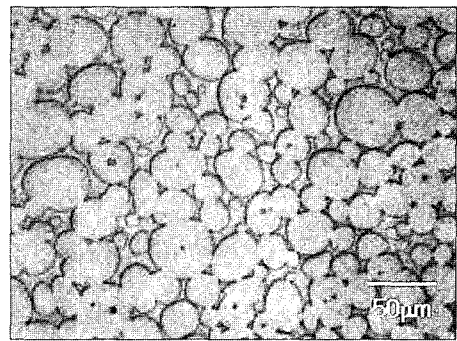
외경재료를 접합한 다음 내경재료의 미세조직에서 고상입자가 둥글게 성장하였기 때문에 동시다발적으로 균열이 생성, 전파되는 양은 다소 감소할 것으로 예상되지만, 몰리브데늄 첨가로 인한 기지상의 취약함이 유지되고, 고상입자내에도 몰리브데늄이 있기 때문에 취약한 성질을 띠고 있다고 예측된다. 냉간 가공 영향 부분에서 다시 언급하겠다.

소결체의 밀도는 기준 탄은 17.74 g/cm^3 , B형은 17.21 g/cm^3 그리고 A형은 17.29 g/cm^3 로서 복합재료 탄은 기준 탄에 비해서 밀도가 다소 낮음을 볼 수 있다.

한편 복합관통자의 소결과정에서 외경재료 분말충전이 충분히 이루어지지 않으면 외경재료의 수축율을 내경의 성형체가 감당하지 못하여 성형체의 직경방향으로 균열이 발생하는 경우도 발생하였다. 따라서 이와 같은 현상을 방지하기 위하여 성형체 밀도는 상대밀도가 약 60% 이상이 되도록 유지하였다. 그리고 내경재료와 외경재료는 밀도차이가 존재하기 때문에 조금만 소결온도가 높거나 시간이 길게 되면 내경재료가 중심부에 위치하지 못하고 중력에 의



(a)



(b)

Fig. 4. The microstructures of tungsten heavy alloy composite sintered at 1475°C for 2.5 hours in hydrogen atmosphere. a) core material, 92.78W-1.14Ni-1.45Fe-4.63Mo alloy. b) housing material, 90.0W-7.0Ni-3.0Fe alloy.

해 복합관통자의 아래 부분으로 치우치는 처짐 (sagging) 현상이 발생하므로 소결온도가 과도하지 않도록 적절히 조절하여야 한다.

3.2.2. 냉간가공 영향

냉간가공은 단면 감소율이 18%가 되도록 가공 직경이 21 mm에서 직경이 19 mm가 되도록 조절하였다. 냉간가공 공정에서 내경재료와 외경재료사이에서 균열이 발생하였는데 이 균열은 내경재료의 끝부분 및 내경재료의 아래 부분과 외경이 접촉하는 계면에서 집중적으로 형성되었다. 소결체 미세조직에서 접합부분이 건전하여도 균열이 발생하는 경우가 있었다. 이와 같은 균열의 형성원인은 냉간가공 시 취성이 높은 내경재료가 연성이 높은 외경재료의 연성을 따라가지 못하여 발생하는 것으로 판단된다. 소결, 열처리한 복합재료의 연신율은 내경부위가 8.5%를 보였다. 반면 외경재료는 폭이 작아서 직접 물성을 측정할 수는 없어서 참고문헌을 참조하면 연신율은 약 30%로¹⁴⁾ 큰 차이를 보이고 이로 인하여 균열이 발생하였다고 보여진다. 따라서 본 액상소결에서 계면에 접합이 잘 이루어지도록 유의해야한다.

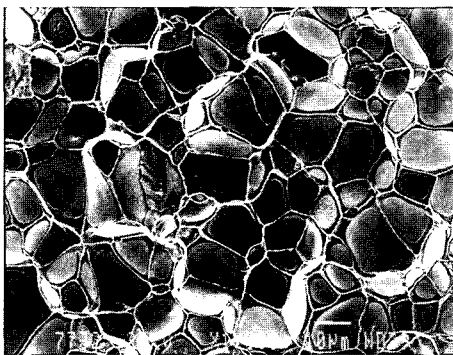
그림 5는 냉간가공한 복합재료 관통자의 내경과 외경부위의 파단면을 주사전자현미경으로 관찰한 것이다. 내경재료는 텅스텐 입계로 균열이 진행되었지만 기지상의 연성파괴 양상을 볼 수 없어 전반적으로 취약한 성질을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 내경부위의 연신율이 약 2%를 보여주고 있는데 기준 관통

자 재료의 연신율이 4.5%인 것에 비하면 취약함을 알 수 있다. 이런 취약함은 고속변형거동에서 자기마모 현상을 촉진시킬 것으로 기대된다. 한편 외경부위의 파단면에서는 텅스텐/텅스텐 계면의 석출물 발달과 기지상의 연성파괴를 볼 수 있어서 전형적인 연성파괴양상을 나타내고 있다. 외경부위는 탄이 포강 내에서 부러지지 않고, 장감판재와 충돌 시에도 형상을 유지하는 역할을 충분히 할 것이다.

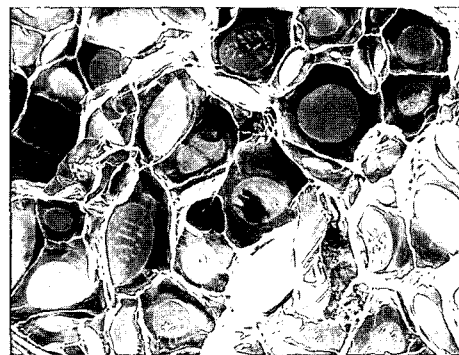
3.2.3. 관통시험 결과

기준 관통자는 장감판재를 51 mm를 관통한 결과를 획득하였다. 그리고 A형과 B형 모두 모두 56 mm의 관통깊이를 나타내어 기준 관통자에 비하여 약 10%의 관통력향상 효과가 있었다. A형과 B형 관통자의 관통력 차이는 거의 없었다. 복합관통자의 관통직경이 기준 관통자에 비해서 다소 작았음이 확인되었다.

그림 6은 텅스텐 중합금에서 고상입자인 텅스텐입자를 기존의 구형 대신에 불규칙한 형상으로 변화시킨 것의 미세조직이다. 입자의 형상을 불규칙하게 변화시키면 화살표에 표시한 것과 같이 특 튀어나온 부분들이 노치효과로 작용하여 그림 7과 같이 취성이 큰 입내파괴형태로 파단양상이 변화된다⁹⁾. 이런 취성 조직을 갖는 시편을 고속 충돌시켜 보면 관통성능이 크게 향상됨을 보고하였다¹⁵⁾. 이와 같은 취성이 있는 텅스텐 중합금은 고속변형 거동에서도 취성이 유지되면서 동시다발적으로 파단이 발생하여 자기마모효



(a)



(b)

Fig. 5. Scanning electron micrographs showing the fractured surface of tungsten heavy alloy composite sintered at 1475°C for 2.5 hours in hydrogen atmosphere. a) core material showed brittle fracture mode. b) housing material showed ductile fracture mode.

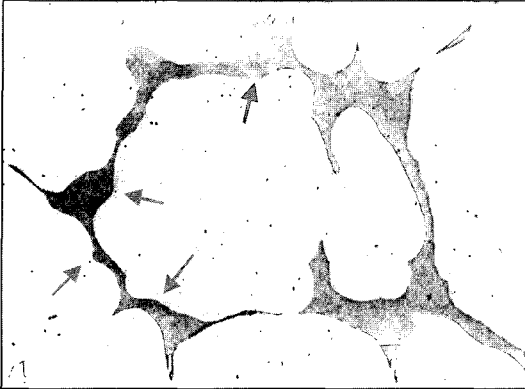


Fig. 6. The microstructure of 93.0W-4.0Ni-2.1Fe heavy alloy resintered after multi cycle heat treatment.

과가 증대되기 때문이라고 설명하고 있다^{15,16}. 복합관통자의 경우 기준 관통자재료에 비하여 그림 5에서 보는 바와 같이 내경재료의 취성파괴가 발생되고 이 현상이 고속충돌 시 자기마모효과를 증대시켜서 관통성능이 우수하게 나타났다고 판단된다. 그러나 본 시험에서의 관통자의 길이/직경비가 보통의 20 이상인 점에 비하여 3.5 정도로 매우 낮고, 밀도 역시 낮은 불리한 조건임에도 불구하고 복합관통자의 관통력이 기존 단일조성의 관통자에 비해 우수한 결과를 보인 것은 복합관통자 재료가 새로운 관통자 재료로서의 가능성이 있음을 시사하고 있다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 복합관통자를 제조하고 비교 관통력 시험을 수행한 결과 아래의 결론을 얻을 수 있었다. 취약한 내경재료를 만들고, 연성이 큰 외경 재료를 접합시키는 새로운 개념의 복합관통자를 만드는 새로운 관통자를 제조하였다. 1차 고상 소결한 내경재료에 외경재료 분말을 충전하고 성형 할 때는 성형체 밀도가 60% 이상이 되어야하고, 냉간가공시에도 계면이 분리 되지 않도록 2차 소결은 1475°C에서 2.5시간 실시하였다. 복합관통자의 내경재료는 연신율이 평균 2.0%를 보이고, 고상입자 입계로 균열이 진행되는 취성파괴 양상을 나타내었으며 외경재료는 전형적인 중합금재료의 연성 파단양상을 나타내었다. 복합관통자의 관통 깊이가 단일조성의 기준

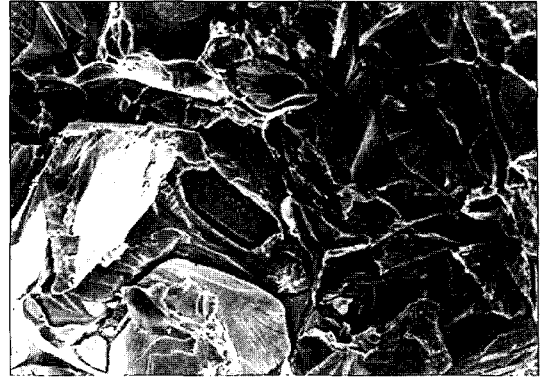


Fig. 7. Scanning electron micrograph showing the fractured surface of 93.0W-4.0Ni-2.1Fe heavy alloy resintered after multi cycle heat treatment.

관통자에 비하여 약 10% 우수하였고, 관통 직경은 기준 관통자에 비하여 다소 작은 것을 확인하였다. 이것은 복합관통자가 고속 충돌시 내경재료의 취성파괴로 인하여 자기마모효과가 단일조성 텅스텐 중합금 관통자 재료에 비하여 우수하여 나타난 결과로 판단된다.

참고문헌

1. E. C. Green, D. J. Jones and W. R. Pitkin : 28th Sympo. on Powder Metallurgy, special report No. 58 (1954) 253.
2. P. K. Johnson : Inter. Defense Review, 5 (1983) 643.
3. T. W. Penrice : Proceedings of Fourth Inter. Tungsten Symp. (1987) 140.
4. L. S. Magness : Proc. the 1st Inter. Conf. on Tungsten and Tungsten Alloys, Ed. A. Bosé and R. J. Dowding (1992) 15.
5. M. H. Hong, J. W. Noh, W. H. Baek, E. P. Kim, H. S. Song and S. Lee : Metall. Trans. B, 28B (1997) 835.
6. E. P. Kim, M. H. Hong, W. H. Baek, and I. H. Moon : Metall. Trans. A, 30A (1999) 627.
7. H. J. Ryu, S. H. Hong and W. H. Baek : J. Mater. Process Tech. 63 (1997) 292.
8. S. W. Jung, S. H. Lee, E. P. Kim, J. W. Noh, W. H. Baek, and S.-J. L. Kang : Metall. Trans. A, 33A (2002) 1213.
9. H. S. Song, W. Noh, W. H. Baek, S.-J. L. Kang and B. S. Chun : Metall. Trans. A, 28A (1997) 485.
10. 백운형, 노준웅, 송홍섭, 홍문희, 이 성, 김은표, 박경진, 이상환 : 대한민국 특허 제 0257463호 (2000. 3.2) “텅스텐 중합금 관통자의 제조방법”

11. B. H. Rabin, A. Bose, and R. M. German: *Int. J. Powder Metall.* **25** (1989) 21.
12. 김은표, 송홍섭, 이 성, 노준웅, 홍분희 : 국방과학연구소 보고서 ATRC-411-92343 (1992).
13. H. D. Park, W. H. Baik, S-J. L. Kang, and D. Y. Yoon : *Metall. Trans. A*, **27A** (1996) 3120.
14. 김은표, 송홍섭, 문인형 : *대학금속학회지*, **36** (1998) 901.
15. D. K. Kim, S. H. Lee and H. S. Song : *Metals and Materials*, **5** (1999) 211.
16. R. G. O'Donnell, and R. L. Woodward : *Metall. Trans. A*, **21A** (1990) 774.