

초미립 복합분말로 제조된 W-Cu 재료의 전기접점 특성

김태형 · 이재성
한양대학교 금속재료공학과

Electrical Contact Property of W-Cu Materials Manufactured from Nanocomposite Powder

Tae-Hyeong Kim and Jai-Sung Lee
Department of Metallurgy and Materials Science, Hanyang University,
Ansan 425-791, Korea
(Received August 10, 1994)

ABSTRACT Electrical contact property of the W-20wt%Cu contact materials manufactured by liquid phase sintering of nanocomposite W-Cu powders was investigated and discussed in terms of microstructural development during performance test. Nanocomposite powders were prepared by hydrogen reduction of ball milled W-Cu oxide mixture. They underwent complete densification and microstructural homogenization during liquid phase sintering. As a consequence, the W-Cu contacts produced from nanocomposite powders showed superior contact property of lower arc erosion and stable contact resistance. This might be mostly due to the fact that the arc erosion by evaporation of Cu liquid droplets and surface cracking remarkably became weakened. It is concluded that the improvement of anti-arc erosion of the composite specimen is basically attributed to microstructural homogeneity.

1. 서 론

초고압 전기접점이나 방전가공용 전극으로 사용되는 W-10~40wt%Cu 재료의 접점특성은 W 입도, 입도분포 및 contiguity와 Cu 조성분포 등과 같은 재료의 미세구조에 크게 영향을 받고 있다¹⁻⁵⁾(이차 조성은 %로 약기). W-Cu 합금은 일반적으로 텅스텐 분말골격체에 Cu 액상을 침투시켜 짧은 공정에서 고밀도화를 이루는 용침기술에 의해 제조되고 있다. 그러나 Cu 조성이 20% 미만으로 낮거나 W 분말이 1~2 μ m 이하로 작을 경우에는 Cu 액상의 용침특성이 저하되어 이 방법이 제한되고 있다.⁶⁾ 접점특성면에서 미세한 W 분말로 제조되는 W-Cu 합금은 조대한 W 분말합금에 비해 내아크 특성이 우수한 것으로 보고되고 있다.²⁾ 그러나 미세한 W 분말합금의 경우 개폐작동 시 균열형성에 의한 접점표면의 손상이 커지는데, 이러한 현상은 W 입도가 작을수록 아크열에 의해 국부적인 소결이 일어나기 때문이다.³⁾

일반적으로 미세분말의 소결시 발생하는 국부치밀화는 미세한 출발분말들의 agglomerate 형성과 이에 따른 입도분포의 불균일성에 기인한다. 이러한 초기 출발분말의 불균일성은 다른 한편으로 W 골격체의 기공구조를 불균일하게 하여 결과적으로 Cu 용침 불량을 초래한다.⁷⁾ 용침불량에 관한 한 일반적으로 인식되고 있는 주요인은 고상표면에서 액상금속의 습윤성 저하이다. 따라서 W-Cu 용침계의 경우 습윤성을 향상시킬 목적으로 Ni과 같은 W 용해금속이 소량 첨가되고 있으나 이 경우 Cu-Ni 전율고용체 형성으로 인한 전기전도도의 급격한 저하는 제 3원소의 사용을 크게 제한한다.^{5,8)}

이상의 문제점을 해결하기 위한 방안으로 본 연구에서는 최근 본 연구진에 의해 개발된 초미립 W-Cu 복합분말을 이용한 새로운 W-Cu 접점재료의 설계방안을 제시하였다. 이 방안은 W-Cu 복합분말을 제 3원소 첨가없이 액상소결하여 미세한 W 입자(1 μ m 이하)가 균일하게 분포하며 동시에 완전치밀

화된 W-Cu 합금을 제조하는 것이다. 70 nm 미만의 W, Cu 분말들이 균일하게 혼합되어 있는 복합분말은 10%Cu의 낮은 조성 및 1100°C의 낮은 소결온도에서도 완전치밀화와 균일한 미세구조를 유지하는 탁월한 소결특성을 나타내고 있다.^{9,10} 본 연구에서는 W-20%Cu 복합분말을 사용하여 접점시편을 제작하고 이들에 대한 접점특성(개폐작동에 따른 접촉저항변화 및 아크소모량)을 조사하였으며, 그 결과를 미세구조 관찰결과를 토대로 논의하였다. 비교를 위해 상용되는 W, Cu 분말로 용침법에 의해 제조된 W-Cu 시편의 접점특성도 조사하였다.

2. 실험방법

2.1. 접점시편 제작

W-20%Cu 복합분말은 순도 99.9%의 W-blue powder와 CuO 분말을 attritor에서 볼밀링하고 고순도 수소분위기(5N, 노점 -76°C, 유속 3l/min)에서 2단계 환원(200°C 1시간/800°C 1시간)하는 최적공정으로 제조되었다.⁹ 환원된 복합분말은 300 MPa의 압력으로 양단압 성형하여 직경 10 mm, 높이 4~5 mm인 원반형 압분체로 제작되었으며, 이때 성형체의 기공도는 40±1%이었다. 소결은 1300°C로 유지된 수평관상로, 수소분위기에서 1시간 행해졌고, 이때 시편의 장출입속도로 결정된 가열 및 냉각속도는 150°C/min이었다. 비교시편으로서 4.5 μm W 분말을 사용하여 W-20%Cu 시편을 용침법으로 준비하였다. 용침은 Cu 액상이 W 분말골격체 상부로부터 침투하는 중력용침법으로 하였으며, 용침온도 1150°C, 수소분위기에서 10분간 행하였다.

2.2. 접점특성 조사

접점시편의 특성조사로서 먼저 통전하에 접촉된 W-Cu 접점의 개폐에 따른 접촉저항의 변화와 최종 아크소모량을 측정하였다. 그림 1은 본 연구에 사용된 접촉저항을 측정하기 위한 접점개폐시험장치와 이에 대한 개략도이다. 접점시편의 형태는 기동접점의 경우 평면의 원반형이었고, 부동접점은 5 cm의 곡률 반경을 갖는 곡면형태이었다. 본 실험에 사용된 통전부하조건은 220 V 30 A의 교류전류이었고, 접촉조건은 압축력 5 kg, 개리력 1.2 kg, 개폐속도는 1.6

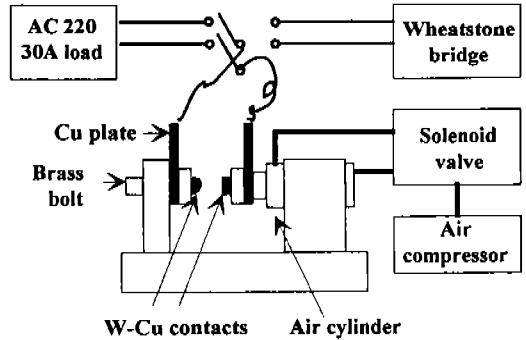


Fig. 1. Schematic diagram of the electrical contact test apparatus.

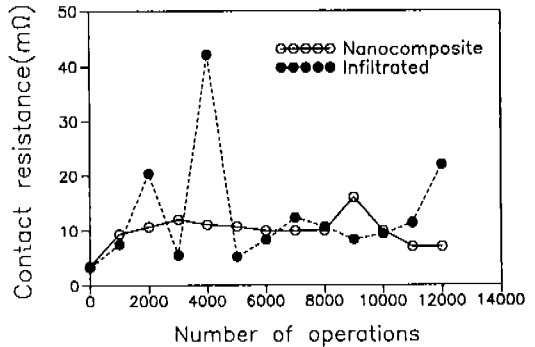


Fig. 2. The variations of contact resistance of W-20%Cu alloys as a function of number of switching operations in a 220 V 30 A circuit.

cm/초이었다. 특히 접점개폐 구동장치에 공압실린더를 사용하여 접촉부위 및 압축력과 개리력이 일정하게 제어되도록 하였다. 이러한 접촉조건에서 1,000회 간격으로 개폐횟수에 따른 접촉저항을 Wheatstone bridge로 측정하였다. 아크소모량은 최종 12,000회 개폐시험 종료 후 접점시편의 무게변화로 결정하였다. 아울러 초기 접점시편의 전기전도율 및 표면경도를 각각 %IACS 측정장치와 로크웰 경도기를 사용하여 측정하였다. 접점시험 시 아크열에 의해 형성되는 표면산화물에 대한 상분석 및 미세구조의 관찰을 위해 X-선 회절분석, SEM-EDAX 분석을 하였으며, 접점표면층의 미세구조와 아크의 영향을 받지 않은 시편내부의 미세구조를 광학현미경과 SEM, 그리고 W 입도 및 기공도의 정량분석을 위해 Image analyser를 이용하여 조사하였다.

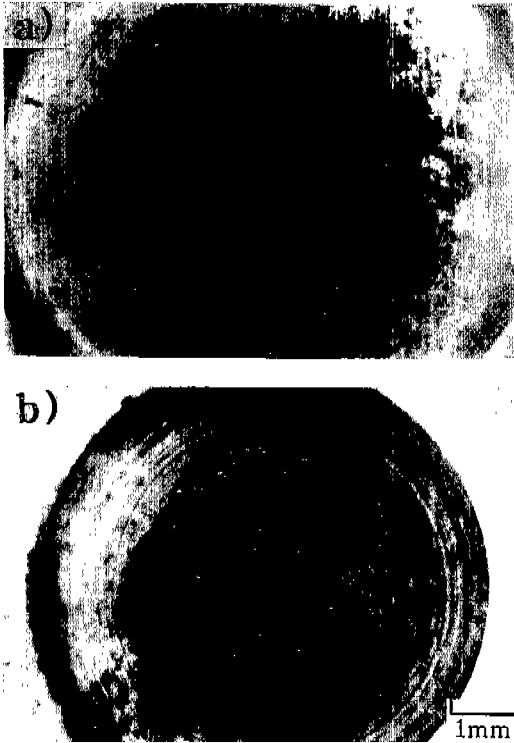


Fig. 3. Contact surfaces of (a) infiltrated- and (b) nanocomposite W-20%Cu alloys after 12000 operations.

3. 실험결과

그림 2는 복합분말로 제조된 W-Cu 접점시편과 용침시편의 개폐횟수에 따른 접촉저항의 변화를 보여주고 있다. 용침시편의 경우 평균 접촉저항은 12.9 mΩ, 표준편차 9.9로 높은 저항과 불규칙한 변화를 나타내고 있으나 복합분말시편은 개폐횟수와 상관없이 평균 9.8 mΩ, 표준편차 2.9로 비교적 낮고 균일한 접촉저항을 유지하고 있다. 그림 3은 최종 12,000회의 개폐시험 후 두 시편의 접점표면을 보여주고 있다. 사진에서 검게 보이는 부분은 개폐작동시 아크열에 의해 손상된 부분으로서, X선 회절분석 결과(그림 4) 이들은 WO₃와 CuO가 혼재된 산화물임을 알 수 있다. 그림 4의 동일 곡률 반경의 부동 접점표면에서 나타난 손상부위의 직경은 복합분말시편이 4.5 mm로서 용침시편의 5 mm에 비해 작게 나타났다. 그림 5는 개폐시험 후 아크소모량을 측정한 결과로, 용침시편이 29±9 mg으로 복합분말시

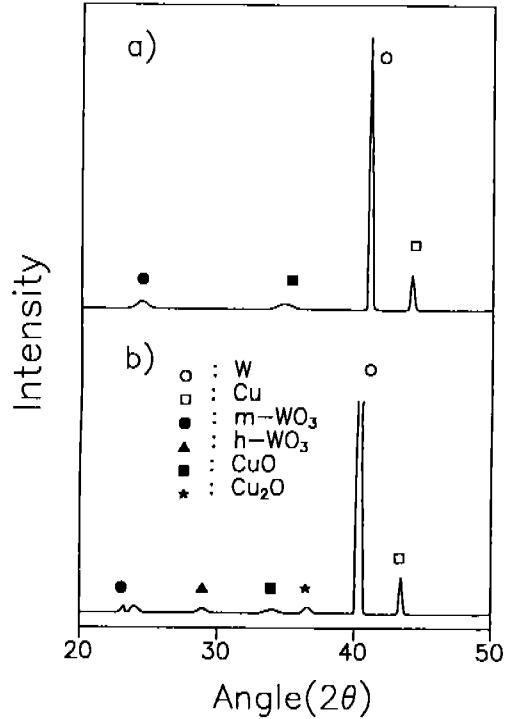


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of the contact surfaces of W-20%Cu alloys after 12000 operations (m; monoclinic, h; hexagonal).

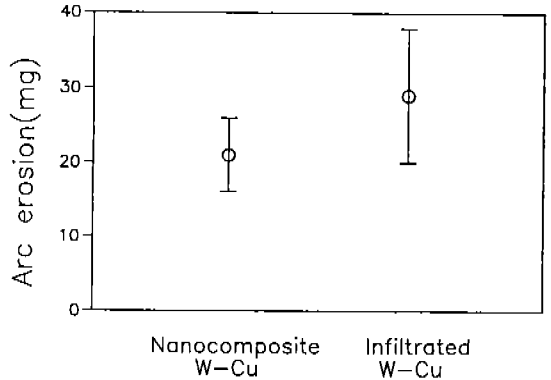


Fig. 5. Arc erosion of W-20%Cu contacts after 12000 operations.

편의 21±5 mg에 비해 40% 높은 값을 나타내어 그림 4의 결과를 뒷받침하고 있다. 그림 6은 두 접점시편의 미세구조를 보여주고 있다. 용침시편(a)은 서로 연결된 W 입자골격 사이로 Cu 기지상이 불균일하고 넓은 분포를 하는 반면, 복합분말시편(b)은 1 μm

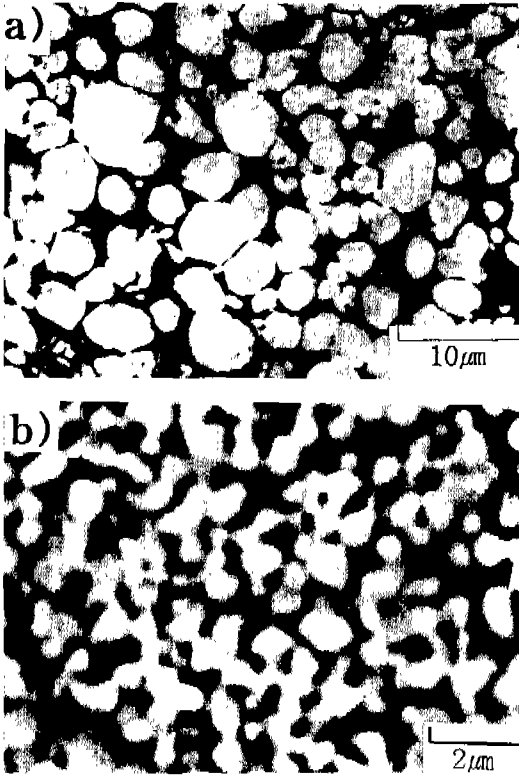


Fig. 6. SEM micrographs of (a) infiltrated- and (b) nanocomposite W-20%Cu alloys.

이하의 W 입자들이 매우 균일한 분포를 하고 있다. 표 1은 두 시편의 미세구조에 대한 정량분석 결과로서, 먼저 잔류기공도는 용침시편이 5%, 복합분말시편이 0.5%이었다. W 입자의 평균단선길이를 측정된 W 평균입도는 복합분말시편이 0.83 µm와 0.43의 표준편차를 가져 우수한 미세구조 특성을 나타내고 있다. 그림 7은 개폐시험이 끝난 후 용침시편 종단면의 미세구조를 보여주고 있다. 용침시편의 표층구조(a)는 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 우선 X선 분석결과 W와 Cu의 산화물로 밝혀진 표층부(A부위)와 그 아래로 시편내부방향으로 균열(B부위)이 존재하고 이러한 균열과 같은 깊이로 조대한 W 입자(C부위)들이 존재한다. 표층 바로 아래부분의 W 입자들은 내부(그림 6(a))의 입자들과는 달리 조대하며, 점접개폐방향과 수직하게 소성변형된 모양을 보여주고 있다. 이에 반해 복합분말시편은 그림 7(b)에서 보는 바와 같이 미세한 W 입자들이 점접의 표층부위나 시편내부에 걸쳐 균일하게 분포하며 산

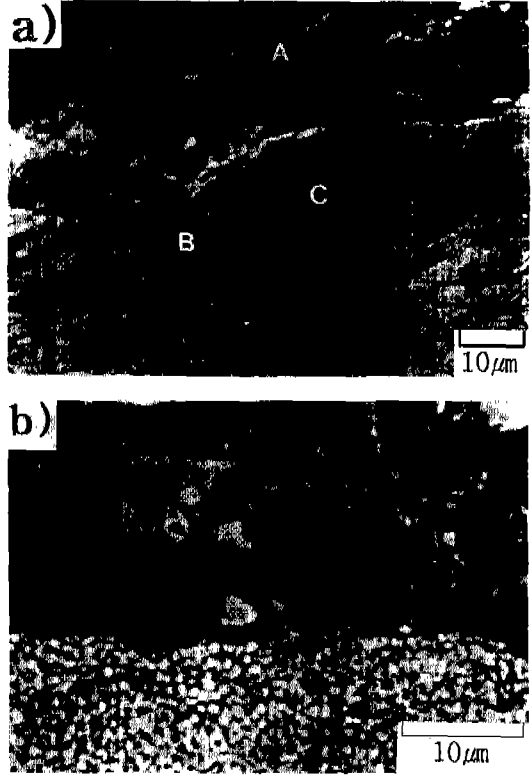


Fig. 7. SEM micrographs of near contact surface zone in (a) infiltrated- and (b) nanocomposite W-20%Cu alloys after 12000 operations.

화물층의 두께 역시 용침합금에 비해 매우 작음을 알 수 있다. 이 경우, 용침시편의 경우에 나타났던 시편내부방향으로의 균열은 발견되지 않았다. 다만 산화물층과 합금층 사이에 용침시편의 A와 C층 사이에서 발견된 것과 동일한 가로방향의 균열이 존재했다.

4. 고찰

4.1. 접촉저항

일반적으로 두 점접간의 접촉저항(R)은 식 (1)로 표시된다.¹¹⁾

$$R = R_C + R_F \quad (1)$$

여기서 R_C 는 압축저항, R_F 는 피막저항을 나타낸다. 통전하에서 접촉저항의 변화는 개폐작동에 따라 산화물 또는 불순물피막의 형성으로 인한 피막저항(R_F)

Table 1. The results of microstructure analysis of the W-Cu alloys

	Nanocomposite	Infiltrated
Porosity (%)	0.5	5
W particle size (μm) (Standard deviation)	0.83(0.43)	3.53(1.81)

Table 2. Hardness and IACS (%) of the W-Cu alloys

	Nanocomposite	Infiltrated
Hardness (HRB)	97	92
IACS (%)	27	30

의 변화에 의해 주도된다. 그러나 시험전, 접점표면에 불순물피막이 형성되지 않는 조건하에서는 $R_f=0$ 이 되어 접점의 초기접촉저항은 압축저항(R_c)으로 대표된다. 여기서 압축저항은 기계 및 전기적 부하에 의해 동시에 결정되며 다음과 같은 실험식으로 표시된다.¹¹⁾

$$R=R_c=\frac{k}{\sigma}\sqrt{\frac{10H}{F}} \quad (2)$$

여기서, k ; 상수, σ ; 전기전도도, H ; 경도, F ; 접촉력이다. 위 식으로부터 각 시편의 접촉조건이 동일하다면, 초기접촉저항은 접점의 경도 및 전기전도도에 의존한다. 두 접점시편의 경도와 전기전도도 측정결과(표 2)를 식 (2)에 대입하여 초기접촉저항을 비교하면 용침시편이 복합분말 시편에 비해 20% 정도의 낮은 값을 갖게 됨을 알 수 있다. 그러나 낮은 초기저항에도 불구하고 개폐작동에 따라 불규칙적이고 높은 저항의 변화를 보이는 용침시편에 대한 결과(그림 2)는 접점표면에서 불순물피막의 불규칙하고 반복적인 형성, 소멸과정에 따른 피막저항(R_f)의 변화가 접점의 접촉저항을 지배하기 때문이다. 결과적으로 복합분말시편의 경우 저항의 변화폭이 작은 것은 접점표면의 기계적, 화학적 마모가 균일하게 일어나고 있음을 의미한다.

4.2. 접점소모

접점소모는 개폐작동 시 발생하는 아크열에 의하여 Cu 기지상이 증발 또는 액적으로 유실되거나, W

및 Cu 의 산화물형성에 의해 접점표면이 균열 또는 취성과괴되어 소모되는 현상이다.¹²⁻¹⁴⁾ 두 시편의 접촉저항에 대한 그림 2의 결과가 산화물피막형성 및 파괴에 기인된 것이라는 전 절의 해석은 최종 시험 종료 후 측정된 접점소모량에서 입증된다. 즉, 복합분말 시편과는 달리 높은 저항의 불규칙한 증가를 보인 용침시편은 낮은 초기저항에도 불구하고 40% 이상의 큰 소모량을 나타내었다. 이러한 차이는 근본적으로 두 접점시편의 미세구조특성에 기인한다. 따라서 접점소모에 대한 미세구조의 영향은 Cu 기지상의 소모 또는 접점표면의 파괴소모의 두 가지 관점으로 논의할 수 있다.

4.2.1. Cu 증발효과

아크 발생시 W-Cu 접점의 burn-off에 미치는 W 입도영향과 관련하여 Gessinger 등³⁾은 Cu상의 증발소모를 W 입자간 모세관력에 기초하여 평가하였다. 이들은 W-Cu 접점에서 1) Cu상이 W 골격체 사이에 연속상으로 존재하고, 2) W 골격구조가 개폐작동과정에서 변화하지 않으며, 3) 화학반응에 의한 상변화가 일어나지 않는다는 가정하에, 아크열에 의해 접점표면층에서 용융된 Cu 액상의 증기압(P_1)을 액주곡률반경(ρ)의 함수로 다음과 같이 기술하였다.

$$\ln \frac{P_1}{P_0} \approx \frac{P_0 - P_1}{P_0} = 4\gamma \frac{\delta^3}{kT\rho} \quad (4)$$

여기서 P_0 ; 자유표면에서의 Cu의 증기압, γ ; 액상 Cu의 표면장력, δ^3 ; Cu의 원자부피, k ; Boltzmann 상수, T ; 절대온도, ρ ; 액주곡률반경이다.

식 (4)는 W 입자간 모세관 크기가 작을수록 Cu 상의 증기압이 저하되어 아크열에 의한 Cu의 증발소모가 감소할 수 있음을 의미한다. 위 식에 기초한 계산결과에 따르면, 모세관반경이 $1\mu\text{m}$ 이하일 때 증기압이 급격하게 저하되는 것으로 나타났다.³⁾ 따라서 본 실험에서 사용한 두 접점시편의 W 입자크기만을 고려할 때, Cu 증발량은 복합분말시편에 비해 큰 모세관을 가진 용침시편에서 클 것으로 예상된다. 이점은 두 시편의 미세구조(그림 6)에 대한 분석결과(표 1)로부터 식 (4)를 토대로, 두 접점시편에 대한 Cu 상의 모세관반경을 구함으로써 간단히 비교할 수 있다. 먼저, 두 시편의 미세구조에서 일정한 크기를 갖는 W 입자들이 동일한 contiguity로 결합되어

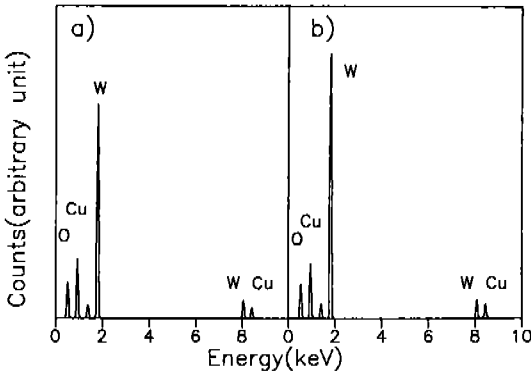


Fig. 8. EDAX analysis of the contact surfaces of (a) infiltrated- and (b) nanocomposite W-20%Cu alloys after 12000 operations.

골격체를 이루고 있다고 가정하면 모세관의 크기는 다음 식으로 계산된다.¹⁵⁾

$$R_c = 2(p/\pi)^{1/2} \cdot (p/p_0)^{1/3} \cdot r \quad (5)$$

여기서 p : 기공도, p_0 : 최대 분말충진 상태에서의 기공도(0.26으로 가정)¹⁵⁾, r : 입자반경을 의미한다. 식 (5)로부터 구한 유효모세관반경(R_c)은, 용침시편 2.6 μm , 복합분말시편이 각각 0.6 μm 으로 계산된다. 따라서 1 μm 보다 작은 모세관을 갖는 복합분말시편은 증기압 강화효과가 커져 전술한 Cu 증발에 의한 아크소모가 용침시편에 비해 낮을 것임을 암시해 준다.

이상의 평가는 아크의 영향이 심한 접점표면의 Cu 조성분석을 통해 간접적으로 확인할 수 있다. 그림 8의 EDAX분석으로부터 복합분말시편은 23.1%Cu로 합금조성에 가까운 반면, 용침시편은 30.5%를 나타내어 표층부의 Cu상이 증발되어 표면에 다량 존재함을 알 수 있다. 그러나 이러한 분석결과가 단순히 모세관현상에 따른 Cu 증발효과만에 의한 것인지는 확실하지 않다. 왜냐하면 Cu증발과 함께, 개폐작동 시 접점표층부에서 W 골격구조의 파괴, W 입자의 소성변형 및 산화물형성 등과 같은 W 상의 미세구조변화가 수반될 수 있기 때문이다. 따라서 이 점에 대한 정확한 해석을 위해서는 실제 작동과정에서의 미세구조변화를 정량적으로 분석해야 하는 어려움이 따른다.

4.2.2. 균열파괴효과

Gessinger 등³⁾은 W 입도가 작을수록 접점표면으로부터 시편내부 방향으로 균열 발생이 심화됨을 보고하였다. 그러나 본 연구결과는 이와 상반되고 있다. 심한 표면균열이 형성된 용침시편(그림 7(a))과는 달리, 1 μm 미만의 미세한 W 입자로 구성된 복합분말시편에는 시편내부방향으로의 균열이 관찰되지 않았다(그림 7(b)). 이러한 표면구조의 차이는 무엇보다도 두 시편표층부에서의 W 입도분포와 골격구조의 균일성 차이에 기인한다. 균열이 심한 용침시편의 경우, 그림 (a)에서 보는 바와 같이 W 입도분포 뿐만 아니라 Cu상의 분포 역시 불균일함을 알 수 있다. 구체적으로, 표층의 B 부위는 Cu 조성이 큼으로 인해 Cu 상의 증발소모가 커서 형성된 균열이며, 반면에 A, C 부위는 W 조성이 커서 접촉저항의 상승과 함께 높은 아크열이 유도된 부위로서, 결과적으로 극부적인 소결치밀화와 W 입자의 조대화, 그리고 표면산화가 컸던 곳이다. 이러한 불균일한 표면구조는 표층부의 취성을 증대시켜, 결국 개폐작동 시 표면이 쉽게 파괴유실되고 시편내부가 표면으로 노출되게 한다. 또한 새로운 표면이 형성된 후에는 위의 거동이 다시 반복된다. 이상의 해석은 전체적으로 높은 저항과 함께, 불규칙한 변화를 보이며 3000회와 5000회 부근에서 초기와 비슷한 접촉저항을 갖는 용침시편의 접점특성(그림 2)에서 잘 뒷받침된다. 결과적으로 균일한 미세구조를 갖는 복합분말시편(그림 6(b))에서는 개폐작동에 의한 표면균열의 형성가능성이 낮다. 이는 그림 (b)에서 보는 바와 같이 접촉시험이 끝난 복합분말시편의 표층구조가 시편내부와 차이를 보이지 않는데서 쉽게 이해될 수 있다. 즉, 복합분말시편의 우수한 미세구조 특성이 전 표면에 걸쳐 균일한 Cu 증발을 유도하였고, 동시에 아크열이 효과적으로 방출됨으로써 균열의 형성없이 안정된 아크소모거동을 보인 것이다. 이는 개폐시험 시 접촉저항의 변화가 거의 없었던 복합분말시편의 접촉시험결과(그림 2)와 잘 일치한다.

5. 결 론

W, Cu 산화물로 제조한 W-Cu 초미립복합분말을 이용하여 액상소결공정만으로 제조한 W-20%Cu 접점은 용침법으로 제조된 상용 W-Cu 접점재료에

비하여 낮은 아크소모와 안정된 접촉저항변화로 우수한 접점특성을 나타내었다. 복합분말시편의 이러한 접점특성은 이상적인 미세구조 균질성에 기인한다. 제3원소 첨가없이 완전치밀화를 이루고 미세한 W 입자들이 균일하게 분포한 복합분말합금의 미세구조는 기계적 강도와 전기적 성질의 향상을 동시에 꾀할 수 있었다. 복합분말시편의 아크소모가 낮은 주된 요인은 먼저, W 입자미세화로 인해 작아진 모세관이 아크발생 시 Cu 증발을 억제했기 때문이다. 이와 더불어 균질한 미세구조가 개폐작동 시 표면 균열의 발생을 크게 낮춤으로써 접촉저항변화의 안정화를 이룬 것으로 생각된다. 상용 W-Cu 용침시편에 대한 비교실험결과, W-Cu 접점의 표면균열에 의한 파괴소모는 W 입도보다는 미세구조 균질성에 의해 지배됨을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초 연구사업의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 김태형, 배광욱, 이재성 : 전기전자재료학회지, **3**(4) (1990) 325
2. B. Althaus and E. Vinaricky : Metall., **22** (1968) 698
3. G. H. Gessinger and K. N. Melton : Powder Metall. Intern., **9**(2) (1977) 67
4. G. J. Witter and W. R. Warke : IEEE Trans. Parts Hybrids Packaging, **11** (1975) 21
5. J. S. Lee, I. S. Ahn and I. H. Moon : Intern. J. Ref. Hard Metals, **5**(2) (1986) 113
6. 이재성 : 분말야금심포지엄(대한금속학회), **1** (1989) 70
7. J. S. Lee and I. H. Moon : *Horizons of Powder Metallurgy*, W. A. Kaysser and W. Huppman (Eds.), Verlag Schmid GmbH, Freiburg, (1986) 1115
8. W. Haufe, W. Reichel and H. Schreiner : Z. Metallk., **63** (1972) 651
9. J. S. Lee and T. H. Kim : Solid State Phenomena, **25-26** (1992) 143
10. J. S. Lee, T. H. Kim and T. G. Kang : Proceedings of 1993 Powder Metallurgy World Congress, JSPM, Kyoto (1993) 365
11. A. J. Stevens : Powder Metall., **17** (1974) 331
12. P. G. Slade : J. of Appl. Phys., **47**(8) (1976) 3438
13. P. P. Koren, P. G. Slade and C. Y. Lin : IEEE Transactions Components, Hybrids and Manufacturing Technology, CHMT-3 **1** (1980) 67
14. N. C. Kothari : Powder Metall. Intern., **14** (1982) 139
15. M. Yokota : 粉體および粉末冶金, **38**(4) (1991) 12