

## 볼밀링한 W-20wt%Cu 분말로 제조된 금속사출성형 부품의 조밀화

김순욱 · 류성수 · 문인형  
한양대학교 재료공학과

### Densification of Metal Injection Molding Parts Made of Ball Milled W-20wt%Cu Powders

Soon-Wook Kim, Sung-Soo Ryu and In-Hyung Moon  
Dept. of Materials Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea  
(Received November 16, 2000)

**Abstract** An investigation was carried out on the possibility whether the ball-milling process of low energy could successfully improve the packing density and flowability for MIM application in W-20wt%Cu system. In this study, W-20wt% Cu powder mixture was prepared by ball-milling. W powder was not fractured by low mechanical impact energy used in the present work during the critical ball-milling time, but the ductile Cu powder was easily deformed to the 3 dimensional equiaxed shape, having the particle size similar to that of W powder. The ball-milled mixture of W-20wt%Cu powder had the more homogeneous distribution of each component and the higher amount of powder loading for molding than the simple mixture of W-Cu powder with an irregular shape and a different size. Accordingly, the MIM W(1.75)-20wt%Cu powder compacts were able to be sintered to the relative density of 99% by sintering at 1400°C for one hour.

#### 1. 서 론

W-Cu 합금은 W의 낮은 열팽창계수, 우수한 내아크성 및 내마모성과 Cu의 우수한 전기전도도 및 열전도도 때문에 그 조성에 따라 고부하 전기접점재료와 아크전극재료 뿐만 아니라 최근에는 고출력 IC 회로의 방열소자까지 응용되고 있다.<sup>1-3)</sup> 특히, 미소전자부품의 방열소자로서 W-Cu 합금에서 요구되는 물성은 우선적으로 높은 열전도도와 세라믹스 기지층과 유사한 열팽창계수이다. 이러한 W-Cu 합금의 제조가 공에 있어서는 열 방출에 유리한 복잡한 형상으로의 가공성과 두 성분간의 큰 비중차로 인한 나쁜 소결성도 고려되어야 할 것이다. 방열소자로서 적합한 물성을 갖는 W-Cu 합금의 조성비는 W-10~20wt%Cu이며 Cu 함량이 작을수록 더욱 우수하다고 보고되고 있다.<sup>4)</sup> 또한, 작고 3차원적으로 복잡한 형태 부품의 대량 생산에는 전통적 분말야금의 성형기술보다는 플라스틱 사출성형기술을 분말야금에 응용한 MIM

(Metal Injection Molding; MIM) 성형공정이 많은 장점을 지닌다. 그러나, 상호 불용인 W-Cu 합금<sup>5)</sup>의 조밀화는 소결초기 액상유동에 의한 입자 재배열 과정에 크게 지배받기 때문에 액상량, 즉 Cu 함량에 크게 의존한다.<sup>6,7)</sup>

최근에 W-Cu 액상소결의 임계 액상량은 35vol% (W-20wt%Cu에 해당)이나 그 이하의 액상량에서 소결성을 증대시키고자 하는 여러가지 연구들이 진행되어지고 있다. 기계적 합금화 방법을 통한 극초미세 구조의 W-Cu 합금을 제조하는 방법,<sup>8)</sup> W 및 Cu 산화물을 혼합하여 볼밀링과 환원과정을 거친 후 nanocomposite W-Cu 분말을 제조하는 방법,<sup>9)</sup> 얇은 층 방법으로 W에 Cu를 균일하게 coating하는 방법<sup>10)</sup> 등이 그것이다. 이러한 제조공정을 통해서 제조된 W-Cu 복합분말은 균질하고 미세한 혼합상으로 소결성 향상에 크게 기여함은 확인되었으나, 이들 분말을 사출성형공정에 응용을 할 경우에 다음과 같은 문제점이 고려되어야 할 것이다.<sup>11)</sup> 즉, 소결성 향상을 위한

극미세화된 입자의 높은 비표면적으로 인해 금속분말 충전율의 큰 감소, 결합제 제거 시간의 연장, 사출성형체의 비이론 밀도가 낮아짐에 따른 소결 후 치수정밀도의 감소 등과 같은 문제점을 갖고 있다.

따라서, 본 연구는 우수한 MIM 성형성과 소결성을 갖는 W-20wt%Cu 분말을 얻기 위하여 단순 기계적 혼합으로 마이크로 단위에서 혼합도를 향상시키고 저에너지 불밀링 방법을 이용하여 W-20wt%Cu 혼합분말을 제조하였다. W-20wt%Cu 혼합분말은 W와 Cu 원료분말의 종류와 불밀링 시간을 변수로 제조하여 MIM 응용을 위하여 그 특성을 평가하였다. 또한, MIM 공정을 통하여 얻어진 성형체의 소결특성으로 혼합도 조사와 소결체의 미세조직과 전기적 특성과의 관계에 대하여 고찰하였다.

## 2. 실험방법

본 실험에서 사용된 W 분말은 평균입도가 4.80 μm (이하 W(4.80)로 표기함) 및 1.75 μm (이하 W(1.75)로 표기함)이며, Cu 분말은 평균입도가 3 μm인 수지상 Cu 분말(이하 Cu(3 μm)으로 표기함)과 분급된 -400mesh 분사분의 Cu 분말(이하 Cu(-400)으로 표기함)을 원료분말로 사용하였다. 본 Cu(-400) 분말은 (주)창성의 -325mesh ACU Cu 분사분을 불과의 무게비가 각각 1:10으로 하여 Turbula Mixer에서 62rpm 속도로 1시간 동안 불밀링한 후 분급하였다. 이들 각각의 W 분말과 Cu분말을 무게비로 80:20인 합금계를 택하여 불밀링 방법과 단순혼합 방법으로 W-20wt%Cu (이하 W-20Cu) 혼합분말을 제조하였다. 큰 비중차이가 있는 두 성분의 균일한 혼합을 위한 최적의 불밀링 조건을 확립하기 위하여 분말과 불의 무게비가 1:10이 되도록 장입한 후 Turbula Mixer에서 62rpm 속도로 2시간에서 10시간까지 불밀링을 하였다. 한편, 불밀링 효과를 비교하기 위하여 단순혼합된 W-20Cu 분말은 불을 넣지 않고 불밀

링과 같은 용기와 회전속도로 2시간동안 혼합하였다. 사용된 원료분말의 물리적, 화학적 특성은 표 1에 나타내었으며 그림 1은 원료분말의 형상을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 것이다.

일반적으로 금속분말의 특성은 분말의 충전밀도를 결정하는 중요한 변수이므로 MIM 공정 응용 가능성을 조사하기 위하여 저에너지 불밀링한 W-20Cu 혼합분말의 특성을 분석하였다. Laser particle size analyzer를 사용하여 평균입도 및 입도분포와 비표면적을 조사하였고, SEM을 사용하여 혼합분말의 형상과 입자크기 등을 관찰하였다. Hall Flowmeter (ASTM B417-76)를 사용하여 겉보기밀도와 분말입자간 마찰력을 나타내는 안식각(angle of repose)을 측정하였다.

사출성형 공정에 사용한 결합제는 기존 W-30wt%Cu<sup>12</sup>에 적용된 폴리에틸렌(PE)계의 다성분 결합제로, 30PE + 45PW + 15BW + 10SA로 이루어졌다. W-20Cu 분말과 다성분 결합제를 125°C로 일정하게 유지되도록 자체 제작된 혼합기에서 혼합하여 얻어진 feedstock은 금형과 실린더를 각각 75°C와 125°C로 예열하여 40MPa 압력으로 원통형 T자로 사출성형 되었다. 사출성형체의 결합제 제거는 질소와 수소분위기 하에서 다단계로 나누어 실시하였다. 그림 2는 본 실험에서 사용된 탈지공정을 도식화하여 나타낸 것이다. 또한, 결합제의 완전한 제거여부를 확인하기 위하여 결합제 제거 전후 시편의 무게 변화, 잔류 탄소량을 조사하였다.

결합제를 제거한 시편은 수평관상진기로를 사용하여 1200~1400°C 온도의 수소분위기하에서 1시간 동안 소결하였다. 또한, 제조방법에 따른 소결특성을 비교하기 위하여 MIM 공정으로 제조된 탈지성형체와 같은 밀도를 갖도록 138MPa의 압력하에서 disk 모양의 냉간압축 성형체를 제조한 후 동일한 조건하에서 소결하였다. 소결특성 및 소결거동은 통상적인 방법으로 치수와 무게를 측정하여 수축률과 밀도를 계

Table 1. Physical Characteristics of W and Cu Elemental Powders

	Vendor	Powder Shape	Purity(%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Mean Particle Size (μm)	Angle of Repose (deg)
W(4.80)	Korea-Tungsten Co.	Polygon	99.9	19.26	4.80	48
W(1.75)	Korea-Tungsten Co.	Polygon	99.9	19.26	1.75	47
Cu(-400)	Changsung Co.	Sponge	99.7	8.92	25.23	33
Cu(3 μm)	Aldrich	Dendrite	99.7	8.92	3	33

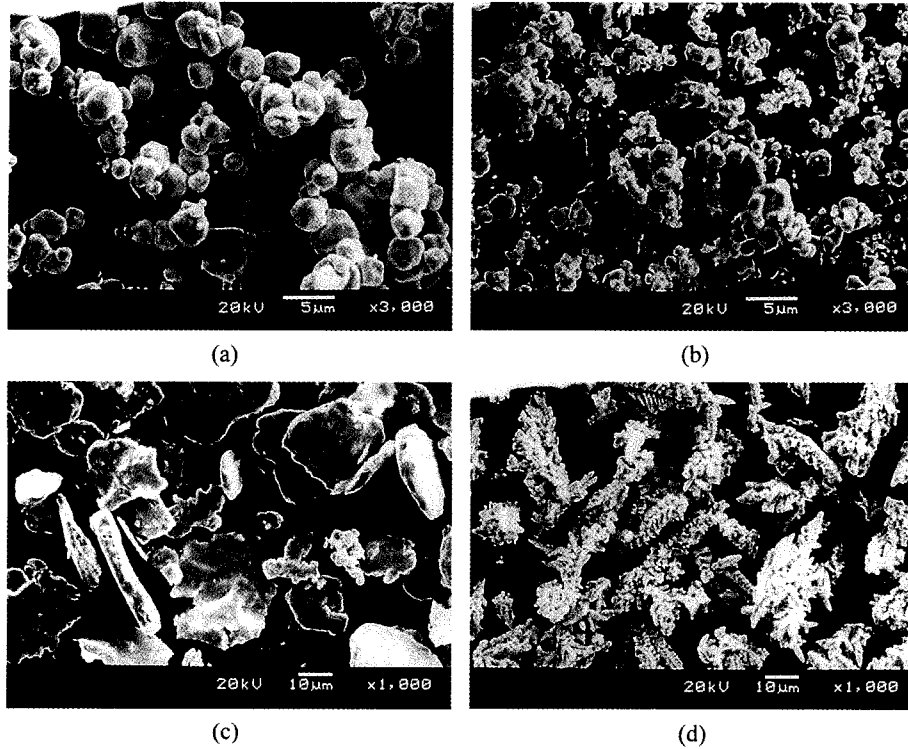


Fig. 1. SEM morphologies of W and Cu elemental powders; (a) W(4.80), (b) W(1.75), (c) Cu(-400) and (d) Cu(3 µm).

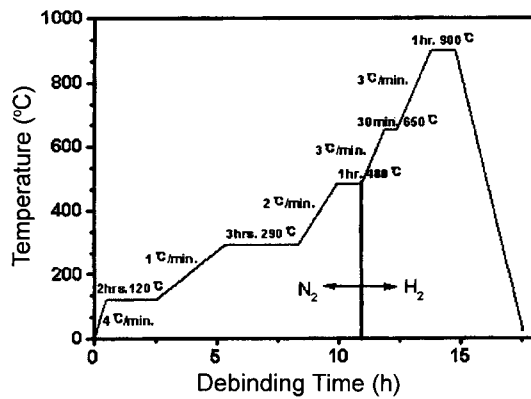


Fig. 2. Schematic diagram of debinding process.

산함으로써 조사하였다. 소결체의 균질한 미세조직의 혼합도 평가를 위하여 미소경도기(microhardness)를 사용하여 경도를 측정하였고, 이때 혼합도의 신뢰성 및 편차를 최소화하기 위하여 50회 이상 측정하였다. 소결체의 전기적 특성, 전기비저항측정은 전류원으로 부터 일정한 전류를 시편에 흘려주고 nanovoltmeter 를 사용하여 일정거리에서의 전위차를 측정하는 4단

자법(four point probe method)으로 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 불밀링한 W-Cu 분말의 물리적 특성

표 2는 W-20Cu 혼합분말의 종류와 혼합방법에 따라 준비된 W-20Cu 혼합분말의 특성을 요약한 것이다. 표에서 보여주는 바와 같이 W-20Cu 혼합분말은 W 출발분말의 평균입도 뿐만 아니라 단순 혼합하였느냐 불밀링 방법으로 처리하였느냐 등의 제조방법에 따라 큰 특성차이를 나타내고 있다. 단순혼합의 경우 비록 2시간동안 혼합과정을 거쳤지만 W과 Cu 모두 각 분말 특성이 원료분말의 특성을 그대로 유지하였다. 따라서, W의 평균입도가 일정할 경우 Cu의 특성에 의해 W-20Cu 혼합분말의 특성이 결정되었다. 즉, 불규칙한 판상의 Cu(-400) 분말은 W 분말과의 큰 입도 차이에 의한 bimodal 혼합상태이기 때문에 높은 충전율과 낮은 안식각 특성을 나타내었다. 반면, 수지상의 Cu(3 µm) 분말은 큰 분말간의 마찰력으로 낮은 충전율과 높은 안식각의 값을 가졌다. 그러나,

Table 2. Characteristics of Various W-20Cu Mixture Powders

	Mixing Method		Mean Particle Size ( $\mu\text{m}$ )	Specific Surface Area ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	Apparent Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Angle of Repose (deg.)
w(4.80)-20Cu(-400)	SM	2h	22.05	0.363	5.410	27.39
	BM	2h	5.760	1.153	4.028	45.32
	BM	5h	5.535	1.155	3.945	46.32
	BM	10h	5.665	1.124	3.984	46.71
W(4.80)-20Cu(3 $\mu\text{m}$ )	SM	2h	19.45	0.379	2.810	44.80
	BM	2h	5.137	1.237	4.466	45.03
	BM	5h	5.377	1.199	4.404	44.41
	BM	10h	6.495	1.005	4.098	44.46
W(1.75)-20Cu(-400)	SM	2h	18.05	0.603	3.960	45.05
	BM	2h	2.605	3.019	3.849	45.70
W(1.75)-20Cu(3 $\mu\text{m}$ )	BM	2h	11.37	0.684	2.170	51.02
	BM	2h	2.835	2.581	3.785	48.59

\* In the mixing method, "Simple Mixing" and "Ball Milling" are abbreviated to SM and BM.

볼밀링한 혼합분말의 특성은 Cu 분말의 특성에 상관 없이 W의 평균입도에 크게 의존하였다. 2시간 이상 볼밀링 처리 후에는 혼합분말의 평균입도가 원료 Cu 분말입도에 무관하게 원료 W 분말의 크기로 급격하

게 감소하였다. 또한 볼밀링한 혼합분말의 안식각은 볼밀링 시간에 무관하게 44~46° 값을 가졌다. 높은 안식각은 혼합분말 사이의 마찰력을 유지하여 사출 성형체에서 결합제가 제거될 때, 성형체의 형상유지

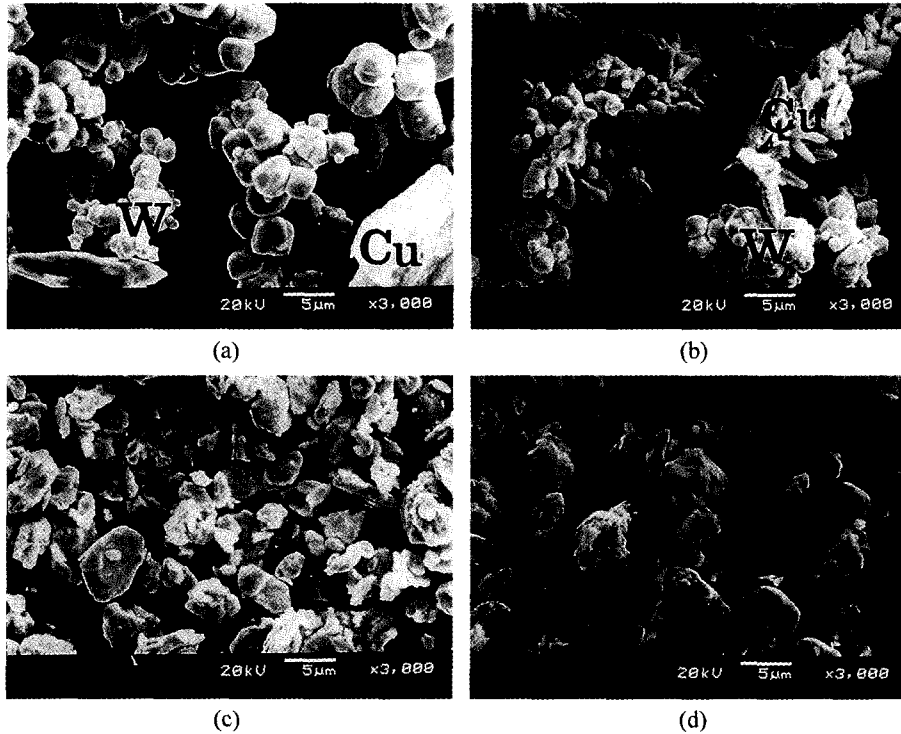


Fig. 3. SEM morphologies of simple mixed and ball-milled W-20Cu powders with W particle size of 4.80  $\mu\text{m}$ ; simple mixed (a) W-20Cu(-400), (b) W-20Cu( $\mu\text{m}$ ), 10 h ball milled (c) W-20Cu(-400) and (d) W-20Cu(3  $\mu\text{m}$ ).

능의 향상에 도움이 될 것이다.<sup>13)</sup>

그림 3은 서로 다른 Cu 원료분말로 제조된 W(4.80)-20Cu 혼합분말의 볼밀링 시간에 따른 morphology 변화를 SEM으로 관찰한 것이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 볼을 사용하지 않고 단순혼합된 분말은 W 분말과 Cu 분말의 큰 비중차로 인해 편석이 일어나는 반면, 볼밀링한 분말은 볼에 의한 기계적 혼합으로 W와 Cu 상이 균일하게 혼합되어 있음을 보여주었다. 여기서 흥미로운 결과는 비록

저에너지 볼밀링이 진행되었지만, W 분말에 비해 상대적으로 매우 조대한 Cu(-400) 분말은 미세화되었고, 표면적이 큰 수지상 Cu(3 μm) 분말은 덩어리화 및 분쇄 과정을 거쳐 W 분말과 거의 비슷한 크기의 다각형 형상을 가진다는 점이다. 이러한 미세구조의 변화는 입도분석 결과를 나타내는 그림 4와도 일치한다. 즉, Cu(-400) 분말을 출발분말로 사용한 경우에 초기 볼밀링에서 W에 비하여 상대적으로 조대한 Cu의 크기에 의하여 넓은 입도 분포를 나타내나, 볼

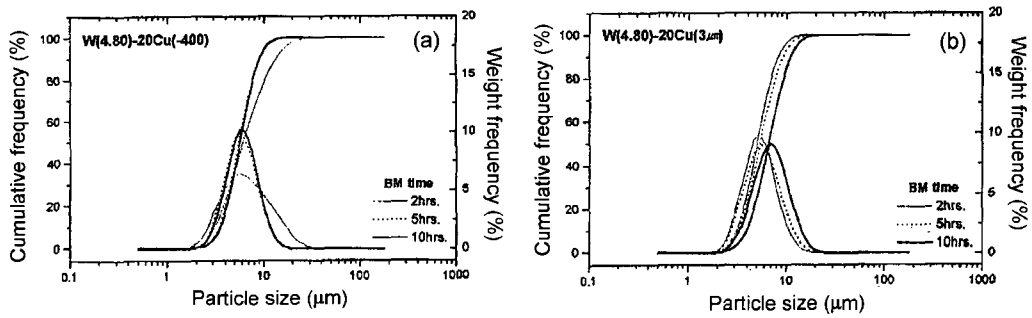


Fig. 4. Particle size distribution of W(4.80)-20Cu powders as the milling time; (a) W-20Cu(-400) and (b) W-20Cu(3 μm).

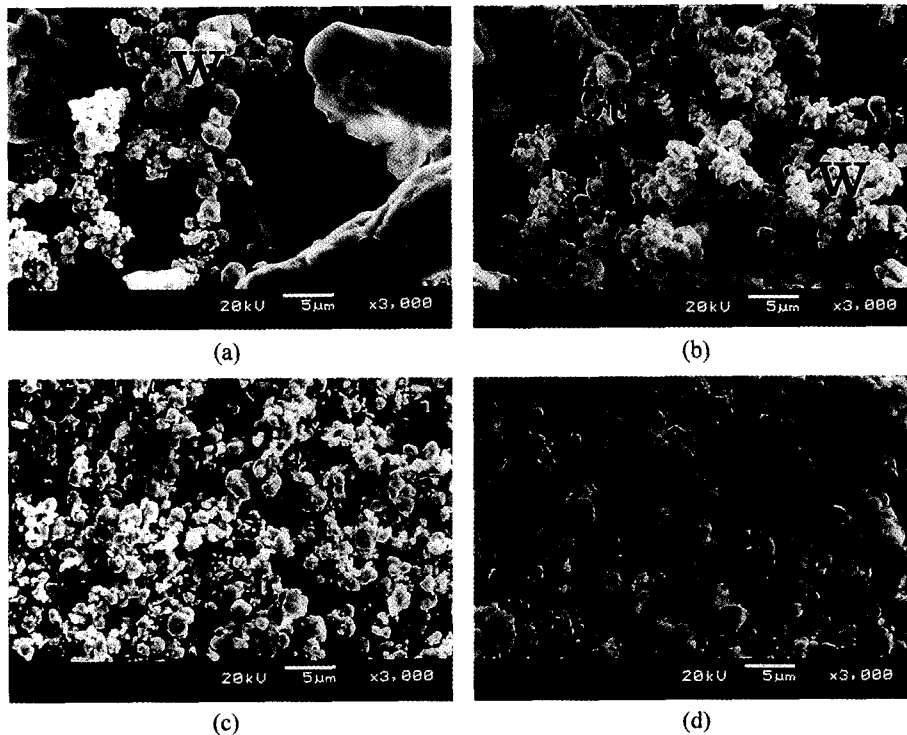


Fig. 5. SEM morphologies of simple mixed and ball-milled W-20Cu powders with W particle size of 1.75 μm; simple mixed (a) W-20Cu(-400), (b) W-20Cu(μm), 10 h ball milled (c) W-20Cu(-400) and (d) W-20Cu(μm).

밀링 시간이 증가하면서 Cu 입자의 미세화로 W과 Cu의 균일한 분포와 입도분포 폭의 감소가 일어났다. 이와 같이 입도분포 폭이 좁아져 분말의 충전율이나 유동성 등에 좋은 특성을 나타낼 것으로 예상된다. 반면, W 분말의 크기보다 상대적으로 작은 Cu(3 μm)를 사용하는 경우에는 볼밀링 시간이 2, 5, 10시간으로 연장되면서 전체 입도분포도가 오른쪽으로 이동, 즉 W-20Cu 혼합분말의 평균입도가 증가하는 것을 나타내었다.

그림 5는 평균입도가 1.75 μm인 W 분말을 사용한 단순혼합된 W(1.75)-20Cu 분말과 2시간 볼밀링한 W(1.75)-20Cu 혼합분말의 morphology를 SEM으로 관찰한 것이다. 그림에서 뚜렷이 보여주는 바와 같이 볼밀링 처리를 통하여 Cu 분말이 분쇄되고 W 분말의 형상과 크기로 변화를 되어서, W-20Cu 혼합분말의 혼합도와 균질화가 크게 향상됨을 알 수 있다. 평균입도가 4.80 μm인 W을 사용한 W-20Cu 혼합분말에서 보다 더 짧은 2시간에 최적의 혼합상태를 얻을 수 있는 것은 입계 볼밀링 시간이 출발 W 분말의 크기에 크게 의존하였기 때문이다. 이는 출발 분말 W의 미세화가 WC 볼과 Cu 분말의 접촉 확률의 증가를 가능하게 함으로써 Cu 분말의 분쇄가 보다 짧은 시간에 이루어져 입계 볼밀링 시간이 단축되었다고 판단된다.

그림 6은 앞선 분말특성의 요약과 혼합분말 형상 변화의 SEM 관찰로부터 저에너지 볼밀링 과정에서의 W-Cu 혼합분말의 형상변화를 도식적으로 나타낸 것이다. 평균입도 4.8 μm W 분말보다 훨씬 조대한 Cu(-400) 분말은 볼밀링 시간이 증가하면서 W 분말

의 크기와 형상으로 분쇄되며, 평균입도 4.8 μm W 분말보다 작은 수지상 Cu(3 μm) 분말은 볼밀링 과정에서 덩어리화를 거쳐 최종 입계 볼밀링 후에 W 분말의 크기와 형상으로 변형됨을 나타내는 도식적 그림이다. 즉, 본 실험에서 택한 저에너지 볼밀링 처리에서 hard한 W은 분쇄되지 않았으나, ductile한 Cu는 쉽게 변형되어 원료 W 분말의 입도에 가까운 크기로 분쇄되었다. Cu 형태 또한 초기의 형상에 관계없이 등축형의 3차원 형상을 나타낸다. W-20Cu 혼합분말이 입계시간의 볼밀링 처리 후에 초기의 Cu 형상에 관계없이 일정한 등축형의 3차원 형상을 갖는 것은 볼 사이의 압축 응력으로 Cu 분말의 변형이 이루어지는 가운데, hard한 W이 분쇄되지 않으면서 볼사이의 간격을 일정하게 유지하였기 때문이다. 따라서, 저에너지 볼밀링을 이용하여 금속시출성형에 적합한 분말간의 마찰력과 높은 충전율을 갖는 W-20Cu를 제조 할 수 있음을 기대할 수 있다.

### 3.2. 시출성형과 결합제 제거

표 3은 W-20Cu 혼합분말과 본 실험에서 사용한 결합제로 이루어진 혼합체의 금속분말충진율과 비이론밀도를 나타낸 것이다. 단순혼합된 W-20Cu 혼합분말은 40~50vol%의 낮은 금속분말충진율을 갖는데 반하여, 볼밀링 방법으로 제조된 W-20Cu 혼합분말은 58~60vol%의 높은 분말충진율을 나타내었다. 이와 같이 W-Cu 혼합분말의 제조방법에 따라서 금속분말충진율의 큰 차이는 앞서 고찰한 분말의 물리적 특성에 기인한다. 다시 말해, 볼밀링한 혼합분말은 입자크기의 균일화와 입자모양의 구형화 때문에 단순

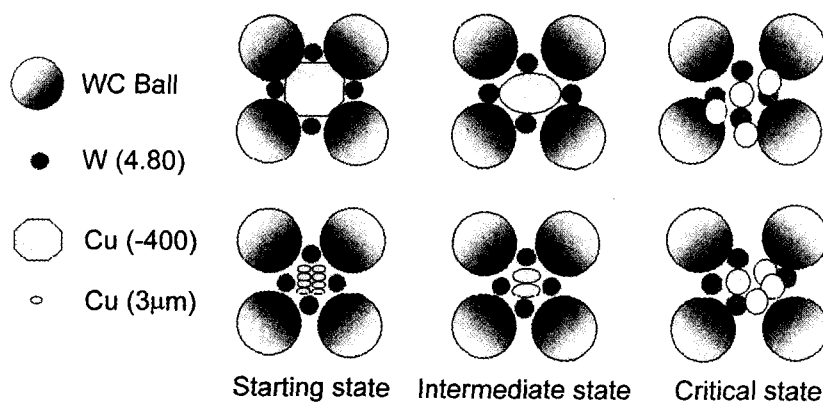


Fig. 6. Schematic diagram of morphological changes in W-Cu powder during the ball milling process.

Table 3. The Solid Loading and Relative Density of W-20Cu MIM Mixture

	Mixing Method	Mixing Time (h)	Solid Loading (%)	Relative Density (%)
W(4.80)-20Cu(-400)	SM	2h	48	99
	BM	2h	58	99
	BM	5h	60	98
	BM	10h	60	97
W(4.80)-20Cu(3 $\mu$ m)	SM	2h	40	100
	BM	2h	58	98
	BM	5h	60	97
	BM	10h	60	97
W(1.75)-20Cu(-400)	SM	2h	50	96
	BM	2h	58	97
W(1.75)-20Cu(3 $\mu$ m)	SM	2h	45	98
	BM	2h	60	98

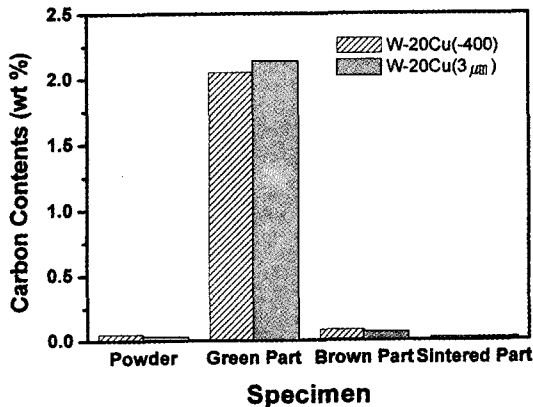


Fig. 7. The carbon contents in the W-20Cu specimens at the different stages of MIM process.

혼합한 분말보다 높은 금속분말 부피충진율을 가졌다.

그림 7은 결합제 제거여부에 대한 정량분석을 위하여 혼합분말, 혼합분말과 결합제가 혼합된 사출성형체, 결합제가 제거된 탈지체, 그리고 소결체의 잔류탄소량을 조사한 결과이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 탈지시편의 잔류탄소량은 혼합분말의 탄소 함량과 큰 차이가 없는 것으로 보아 본 실험의 탈지 공정에 의해 결합제가 제거되었음을 확인할 수 있었다. 탈지시편에서 잔류 탄소량은 소결체와 비교할 때 다소 높은 경향을 보이고 있는데 이는 표면적이 매우 넓은 성형체내로 결합제가 분해되면서 형성된 탄소중 일부가 표면 침탄되었기 때문으로 생각된다. 이렇게 다소 유입된 불순물은 소결과정의 수소 분위기

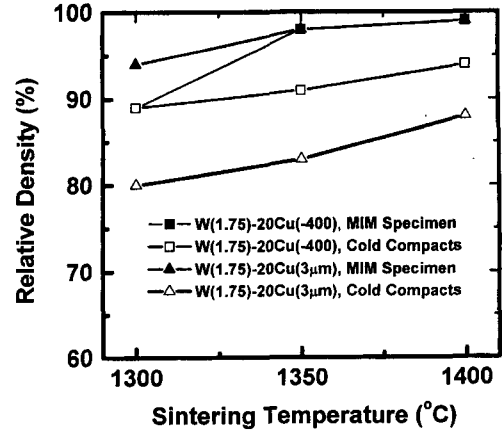


Fig. 8. Sintered relative density as the sintering temperature for MIM and cold compaction, which were prepared by milled W(1.75)-20Cu powder for 2hours, by sintering at 1400°C for 1hour in H<sub>2</sub> atmosphere.

에서 환원될 것을 고려하면 결합제는 완전히 제거된 것으로 판단된다.

### 3.3. 소결 및 특성평가

그림 8은 볼밀링 처리를 한 후 얻어진 W-20Cu 혼합분말을 냉간압축성형 방법과 MIM 방법으로 성형하여 수소분위기에서 1시간 동안 소결하여 얻어진 시편의 비이론밀도를 소결온도의 함수로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 입제시간 볼밀링 처리를 한 혼합분말로 만든 W-20Cu는 MIM 공정에 의하여 만들어진 시편이 냉간압축성형으로 제조된 시편보다 높은 소결 비이론밀도를 나타내었다. 여기서 MIM 방법은 복잡한 형태의 부품 성형성에 유리할 뿐만 아니라 소결과정 중에는 등방수축이라는 장점도 갖는다. 즉, MIM 공정으로 제조된 시편이 냉간 압축방법으로 성형된 시편보다 높은 소결 수축성을 나타내는 것은 균일한 성형체 밀도분포를 가지고 있어 액상소결의 초기 재배열 과정에서 상대적으로 많은 이점이 있기 때문이다. 성분간의 고용도가 거의 없거나 불용계로 알려진 W-Cu는 조밀화를 위한 지배적 기구가 액상 Cu에 의한 W의 재배열인 액상 소결체로서 두 상의 균질한 혼합상태는 성형체의 소결성을 크게 향상시킨다고 보고되고 있다.<sup>14)</sup>

그림 9는 입제시간 동안 볼밀링 처리한 혼합분말로 금속사출성형한 W-20Cu 시편을 1400°C에서 1시간 동안 소결한 후 관찰한 미세조직이다. 그림에서

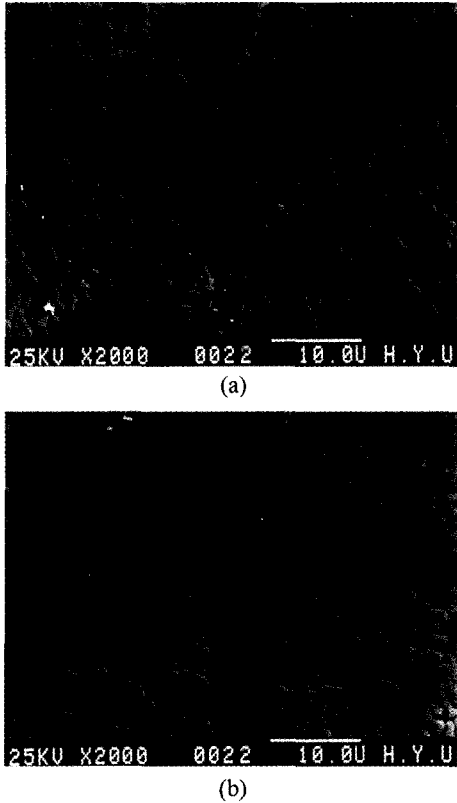


Fig. 9. SEM micrographs of W-20Cu MIM specimens which were prepared by 2h ball milled W-20Cu powders with W particle size of 1.75 μm; (a) W-20Cu(-400) and (b) W-20Cu(3 μm).

보여주는 바와 같이 W-20Cu 시편은 완전한 조밀화를 이루면서 Cu 기지상에 W 결정립들이 균일하게 분포함을 알 수 있다. 균질한 혼합상태의 W-20Cu의 미세조직은 우수한 전기적, 열적 물성을 나타낼 것으로 기대된다. 이는 W-20Cu 복합재료에서 두상의 균질한 혼합상태의 정도가 소결체의 물리적 특성을 결정하기 때문이다. 따라서, 본 연구에서 W-20Cu의 혼합상태의 정도와 전기적 특성 사이의 관계를 고찰하기 위하여 혼합도와 전기전도도 값의 관계를 조사하였다.

혼합도의 정도는 미소경도 측정을 통해 간접적으로 조사하였으며, 물리적 특성은 소결체의 전기적 특성인 전기전도도로 나타내었다. 먼저, 혼합도와 미세경도 값의 관계는 다음 식 1과 같이 표현된다.<sup>15)</sup>

$$HI = \frac{S}{H} \times 100 \tag{1}$$

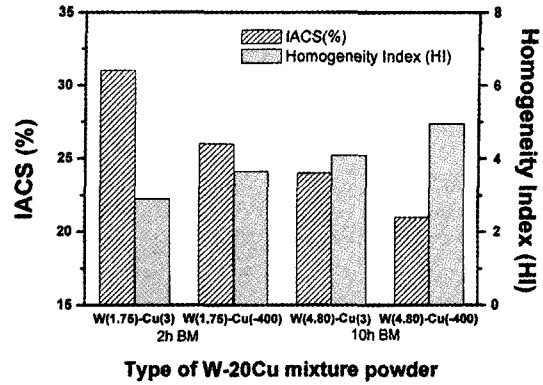


Fig. 10. Relationship by between the homogeneity index(HI) and electrical conductivity of W-20Cu MIM specimens.

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2 \tag{2}$$

여기서, S는 미세경도의 표준편차이며,  $\bar{H}$ 는 평균경도 값을 나타낸다. HI는 Homogeneity Index(HI)로서 일반적으로 낮은 HI 값은 높은 혼합도를 의미한다. 그리고, 전기전도도는 식 3과 같이 IACS (international annealed copper standard) 값으로 환산하였다.

$$\frac{172.41 \times 10^{-8} \Omega m}{\rho} = IACS \tag{3}$$

그림 10은 임계시간 불밀링한 W-Cu 혼합분말을 MIM 공정으로 제조한 성형체를 1400°C의 수소분위기에서 1시간 동안 소결한 시편의 혼합도(HI)와 전기전도도를 나타낸 것이다. 출발 W 입도가 미세한 W-20Cu가 상대적으로 낮은 HI 값, 즉 높은 혼합도와 높은 IACS 값을 갖는 것은 성분 분말이 작을 경우가 큰 경우보다 서로 인접할 가능성이 더 높으므로 입자가 미세할수록 성분간의 혼합상태가 더욱 더 향상되기 때문이다. 일반적으로 입자의 미세화는 많은 계면의 생성으로 전기전도도의 감소를 가져다 주나, 복합재료의 관점에서 W-Cu 열물성은 W와 W의 contiguity에 크게 의존하여 contiguity의 변화에 따른 전기전도도는 서로 반비례한다고 연구결과가 보고된바 있다.<sup>16)</sup> 다시 말해, W의 contiguity의 감소는 전자이동의 지배적 경로인 Cu 상의 평균거리의 향상



으로 전기전도도의 증가를 일으키므로 소결체의 혼합도의 향상은 전기전도도의 향상을 가져다준다고 할 수 있다. 또한, 초기 서로 다른 Cu 분말의 영향은 볼밀링 과정에서 용기벽과 볼의 마찰로 유입되는 불순물을 고려해야 한다. 사전 볼밀링 처리를 행한 Cu(-400)로 제조된 W-20Cu 합금이 상대적으로 Cu(3 μm) 보다 불순물의 영향을 많이 받기 때문에 낮은 IACS 값을 갖게 된 것으로 판단된다. 그리고, 본 연구에서 볼밀링 처리를 통해서 W-20Cu 혼합분말의 MIM 성형체로부터 얻어진 소결체의 최대 전기전도도 IACS 값은 32%로 계의 이론적 기대값의 약 70%에 해당된다.

#### 4. 결 론

1. 볼밀링 방법으로 제조된 W-20Cu 혼합분말은 단순혼합 방법으로 제조된 분말에서 편석이 일어나는 데 반해 미세하고 균일한 분포를 나타내었다. 즉, 본 실험에서 택한 저에너지 볼밀링 처리를 통하여 W-Cu 계의 경우에 hard한 W의 분쇄는 없이 ductile한 Cu의 크기는 원료 W 분말의 입도에 가까운 크기로 접근하며 그 형태는 또한 초기의 Cu 형상에 관계없이 등축형의 3차원 형상을 보였기 때문이다.

2. 단순혼합 방법으로 제조된 W-20Cu 혼합분말은 40~50vol%의 낮은 금속분말충진율을 갖는데 반하여, 볼밀링 방법으로 제조된 미세하고 균일한 혼합상태를 갖는 W-20Cu 혼합분말은 58~60vol%의 높은 금속분말충진율을 나타내었다.

3. W-20Cu 합금의 조밀화는 W 원료분말의 입자 크기 및 W-20Cu 혼합분말의 혼합도에 의존하였다. 즉, 10시간동안 볼밀링한 W(4.80)-20Cu(-400) MIM 시편은 1400°C, 수소 분위기하에서 1시간동안 소결할 때 95%의 비이론밀도를 나타내었으나 2시간동안 볼밀링한 W(1.75)-20Cu MIM 시편은 미세한 W 입자크기 및 높은 혼합도 때문에 99%의 높은 비이론밀도를 나타내었다.

4. 출발 W 입도가 미세한 W-20Cu가 상대적으로

낮은 HI와 높은 IACS 값을 갖는 것은 성분 분말이 작을 경우가 큰 경우보다 서로가 인접할 가능성이 더 높은 까닭으로 입자가 미세할수록 성분간의 혼합상태가 더욱 더 향상되기 때문이다.

#### 감사의 글

본 연구는 포항산업과학기술연구원을 통한 선도기술개발사업(정보-전자-에너지 첨단소재기술사업) 센터의 지원금으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. B. Williams: Int. J. Refractory & Hard Metals, **7** (1988) 134
2. 문인형: 한국물리학회지-새물리, **38** (1998) 243
3. J. Sepulveda and L. Valenzuela: Metal Powder Report, **52** (1998) 24
4. M. K. Premkumar, W. H. Hunt and R. R. Sawtell: J. Metals, **44** (1992) 24
5. T. B. Massalski: Binary Alloy Phase Diagrams (2nd ed.), ASM, Metals Park, Ohio, **2** (1990) 1503
6. W. D. Kingery: J. Appl. Phys., **30** (1959) 301
7. W. D. Kingery and M. D. Narasimhan: J. Appl. Phys., **30** (1959) 307
8. J. C. Kim, S. S. Ryu, Y. D. Kim and I. H. Moon: Scripta Materials, **39** (1998) 669
9. J. S. Lee and T. H. Kim: Nanostructured Materials, **6** (1995) 691
10. 인태형, 이석운, 주승기: 한국재료학회지, **4** (1994) 393
11. E. S. Yoon, J. H. Yu and J. S. Lee: J. of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, **46**(8) (1999) 898-903
12. I. H. Moon, E. P. Kim and G. Petzow: Powder Metall., **41** (1998) 51
13. R. M. German: Metal Injection Molding, MPIF, Princeton, NJ (1990) 302
14. W. J. Huppman, H. Rigger, W. A. Kaysser, V. Smolej and S. Pejovnik: Z. Metallkd., **30** (1979) 707
15. K. V. Sebastian and G. S. Tendolkar: Int. J. Powder & Powder Tech., **15** (1979) 45
16. 강택규: 한양대학교 석사학위논문 (1993) 44