

W 입자크기가 W-Cu 복합재료의 전기 및 열전도도에 미치는 영향

양주환 · 오승탁* · 박상우 · 문인형

한양대학교 재료공학과, *서울산업대학교 신소재공학과

Effect of W Particle Size on the Electrical and Thermal Conductivity of W-Cu Composites

Ju Hwan Yang, Sung-Tag Oh*, Sang-Woo Park and In-Hyung Moon

Dept. of Materials Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

*Dept. of Materials Science and Engineering, Seoul National University of Technology,
Seoul 139-743, Korea

Abstract The electrical and thermal conductivity of W-Cu composites were investigated as a function of the W-particle size and W-W contiguity. Powder mixtures were prepared by ball milling or mechanical alloying process, and then sintered at various temperatures. The electrical conductivity of sintered composite was increased with decreasing W grain size. Dependence of electrical conductivity on the W grain size was explained by the W-W contiguity concept. The thermal conductivity was increased with increasing the temperature up to 600°C but decreased at the temperature above 600°C Also, thermal conductivity value was influenced by the W particle size. Change of thermal conductivity in W-Cu composites was discussed based on the observed microstructural characteristics and theoretical considerations.

Keywords : W-Cu composites, Electrical conductivity, Thermal conductivity, W Particle size, W-W contiguity

1. 서 론

우수한 내이삭성 및 기계적 특성을 갖는 W과 높은 전기 및 열전도도를 갖는 Cu로 이루어진 W-Cu 복합재료는 열소산재료 등 다양한 분야에 사용되고 있으며, 열적 및 전기적 물성에 관해서도 많은 연구가 진행되고 있다.^{1,2)} W-Cu 복합재료의 전기 전도도는 Cu 양이 일정할 경우 내부의 미세결함 (불순물, 기공도, 미세조직)에 크게 의존하는데, 특히 Fe, Ni 등과 같은 미량의 철족 천이원소 불순물이 첨가될 경우 전기전도도는 급격하게 낮아진다고 보고된 바 있다.^{3,4)} 이러한 불순물 이외에 W 입자의 크기도 복합재료의 전기 전도도에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. W 입자가 작아질수록 비표면적(계면)의 상대적인 증가로 인하여 전기적 물성의 저하를 나타내게 되며, 이는 입자가 작아질수록 W을 둘러싼 Cu상들의

연결이 끊어지는 결과를 초래하였기 때문이다.

그러나 최근의 W-Cu 복합재료의 연구에서는 기존에 알려졌던 W 입자크기와 전기전도도의 비례 관계에 상반되는 결과가 보고되었는데, Neumann²⁾은 W-25 wt.% Cu (W-42 vol.% Cu)에서 W 입자가 큰 경우보다 작은 경우에서 우수한 전기 물성 값을 나타내는 결과를 얻었다. 일반적으로 입자크기와 전기 전도도의 역(inverse) 관계에 대한 이유로는, 미세한 W 입자사이의 모세관력에 의한 액상 Cu의 균일한 분포와 이에 따른 contiguity 증가로 설명하고 있으나, 아직까지 이에 대한 정량적인 해석은 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 W 입자크기가 W-Cu 복합재료의 전기적 물성에 미치는 영향에 관하여 정량적인 조사를 하고자 하였다. W 입자크기를 실험변수로 하기 위하여 볼 밀링 방법과 기계적합금화 방법

(mechanical alloy, MA)으로 각각의 복합분말을 제조하였으며, 기공도와 불순물의 영향을 배제한 소결체 시편에서 전기전도도를 측정하였다. 추가적으로, 측정된 전기전도도를 열전도도로 환산하여 이론적인 열전도도 값과 비교하여 입자크기의 효과를 분석하였다. 전도도의 정량적인 해석에 있어서는 복합재료 소결체의 미세조직 특성인 상간 contiguity를 도입하여 빌딩블럭 (building block) 모델로서 설명하고자 하였다.

2. 실험방법

본 실험에서는 W 입자크기를 변화시키기 위하여 다양한 크기의 W 원료분말 및 밀링공정을 적용하였다. 우선, 볼 밀링 방법을 이용한 복합분말의 제조에서는 각각 0.58 μm , 0.96 μm , 1.82 μm 및 4.92 μm 의 크기를 갖는 순도 99.9%의 대한중석 W 분말과 평균입도가 3.10 μm 이고 순도 99.0%인 Cerac 사의 Cu 분말을 원료로 사용하였다. MA 방법에 사용한 W 분말은 평균입도가 4.92 μm 이고 순도 99.9%인 대한중석 분말이며, Cu 원료분말은 평균입도 50.42 μm 와 순도 99.5%를 갖는 창성의 분사분이었다. 볼 밀링은 W와 Cu 분말을 부피비 50:50로 칭량하여 혼합한 후 3차원 혼합기에서 62회분의 회전속도로 2시간동안 행하였다. 이때 밀링시 밀링매체에서 유입되는 불순물 (Fe등의 철축천이원소)을 최소화하고자 세라믹 볼(ZrO₂)과 플라스틱 용기를 사용하였다. MA는 앞선 50:50 부피비와 유사한 W-30wt.%Cu (W-48vol.%Cu)으로 칭량하여 400 rpm으로 회전속도로 attritor에서 50시간동안 행하였다. 성형체는 냉간 압축법을 이용하여 지름 20 mm, 높이 5 mm인 실린더 형태로 제작하였다. 볼밀한 분말의 성형체와 MA한 분말의 성형체는 각각 1450°C에서 4시간 및 1100-1500°C의 온도에서 1시간씩 소결하였다.

소결체의 W 입자크기는 SEM으로 관찰한 조직사진에서 Image Analysis program (Scion Image Co.)을 이용하여 2차원 단면으로부터 구하였다. W 입자크기는 장축과 단축의 평균값을 전체평균으로 구하였으며, 누적정규 입자절단크기 분포로 나타내었다. contiguity의 측정은 2차원 단면의 미세구조 상에서 실측선(test line)의 단위 길이당 교차점 수 N을 이용하여 구하였다.⁵⁾

소결체의 전기비저항은 와전류식의 IACS (International Annealing Copper System) 측정범위가 10~110%이며 정확도 $\pm 0.5\%$ 인 Digital Conductivity Meter (FM-140XL, Centurion Co.)를 사용하여 측정하였다. 직경 11 mm인 프로브를 평평하게 연마한 시편의 표면에 접촉하여 전기비저항을 측정하였고, 1회 측정시마다 표준시편으로 보정하면서 매 시편마다 20회 이상 측정하여 그 평균값으로 나타내었다. IACS 값은 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 측정된 전기비저항 값을 이용하여 계산한다.

$$\frac{172.41 \times 10^{-8} \Omega m}{\rho_c} = IACS(\%) \quad (1)$$

여기서, ρ_c 는 재료가 갖는 전기비저항이다.

열전도도는 측정된 열확산계수, 밀도, 비열의 곱으로부터 계산하였다. 이때 열확산계수는 레이저를 조사하여 시편의 앞부분을 가열하고 시편을 투과하여 방사된 열과 시편 후미의 열을 적외선 검파기로 측정하는 방식(Laser Flash method)으로 측정하였다. 시편은 직경 10 mm이고 두께가 3 mm인 실린더 모양으로 준비하였고, 상온에서 1000°C까지 10°C/min의 속도로 승온하면서 측정하였다.

3. 실험결과

그림 1은 볼 밀링으로 제조한 W-50vol.%Cu 복합분말의 소결체에서 W 입자크기에 따른 이론밀도와 전기전도도 (IACS) 값의 변화를 나타낸 것이다. W-

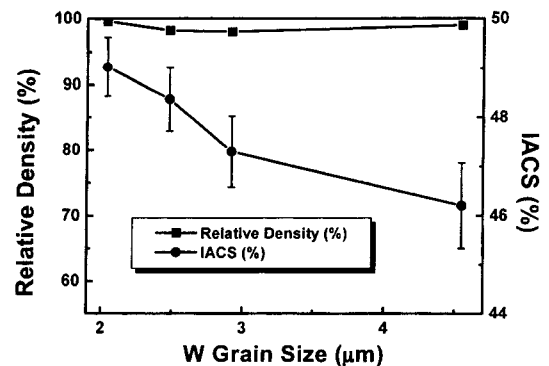


Fig. 1. Relative density and electrical conductivity (IACS) as a function of W grain size for W-50 vol.% Cu composites.

Cu 소결체의 밀도는 W 입자크기에 상관없이 모두 완전 치밀체에 가까운 98.0%이상의 상대밀도를 나타내었다. IACS 값은 소결체의 W 입자크기가 2.04 μm 에서 4.55 μm 로 증가함에 따라 49%에서 46.2%로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 일반적으로 기지상에 입자가 분산된 형태인 W-Cu 복합재료에서 분산상의 W 입자가 작아지면 상대적으로 W와 Cu간의 계면적은 크게 증가한다. 다른 결합에 비해 상대적으로 계면의 저항이 크다면, 이러한 계면적의 증가는 궁극적으로 W-Cu 복합재료의 전기적 물성을 저하시켜 전기전도의 감소를 가져온다. 그러나 그림 1의 결과는 W 입자크기가 미세화 됨에도 불구하고 전기전도도가 향상되었다는 측면에서 매우 흥미로운 현상이다. 한편, 본 실험의 W-Cu 복합재료에서 가장 우수한 IACS 값은 49.0%로서 이는 W-50 vol.% Cu의 이론적 전기전도도 값 (49.5%)과 유사하다.

그림 2는 볼 밀링한 복합분말의 소결체에서 W 입자크기에 따른 IACS 값과 contiguity값의 변화를 동시에 나타낸 것이다. 여기서 contiguity는 고상의 접촉 정도로 정의되며 이 값이 작아질수록 고상입자들 간의 접촉이 감소함을 의미한다. 즉, W-Cu 계의 경우 contiguity의 감소는 고상입자들(W)이 액상들(Cu)에 의한 분리되는 정도가 증가되는 것을 의미한다. 그림 2에서 보는 바와 같이 W-W contiguity는 W 입자크기가 감소할수록 또는 전기전도도 값이 증가할수록 감소하는 경향이 나타났다. 따라서 W 입자미세화에 따른 W-Cu 복합재료의 전기전도도의 향상은 미세조직 내 W의 contiguity 감소로 설명할 수 있다.

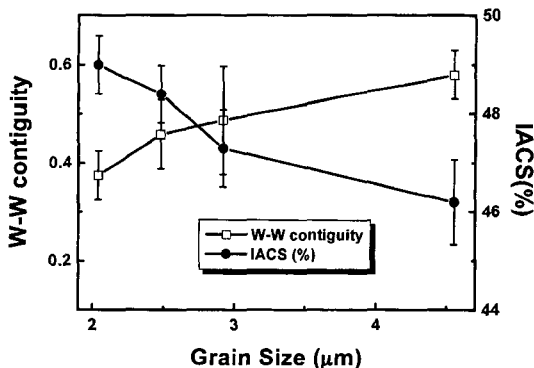


Fig. 2. W-W contiguity and IACS value as a function of W grain size for W-50 vol.% Cu composites.

즉, W-Cu 복합재료에서 분산상 W의 입자미세화에 따른 계면 증가보다는 입자미세화에 따른 contiguity의 감소로 인한 Cu 기지상의 경로 증가가 전기전도도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이러한 경향은 문헌에 보고된 결과^{6,7)}와 비교할 수 있다. 예를 들어, Wang⁶⁾은 용침방법에 의해 제조된 W-15 wt.% Cu (W-28vol.%Cu) 복합재료에서 전기비저항의 차이를 밀도의 영향보다는 미세조직상의 W-W contiguity에 대한 영향으로 설명하였다.

한편, W 입자가 미세화 됨에 따라 contiguity가 작아지는 원인은 초기 원료분말에 대한 모세관력으로 설명할 수 있다. 상호 불용계인 W-Cu는 액상 소결 과정에서 용융된 Cu가 모세관력에 의해 W 입자들 사이에 침투되어 치밀화가 진행된다. 이러한 소결과정에서 모세관력과 입자크기의 관계는 식(2)로 나타낼 수 있다.⁸⁾

$$P_n = \frac{5 \cdot 2 \gamma_{LV} \cos \theta}{D(\Delta L/L_0)} \quad (2)$$

여기서 P_n 은 모세관력, D 는 고상입자의 지름, γ_{LV} 는 액상과 기상간의 표면에너지, θ 는 고상-액상-기상의 젖음각, 그리고 $\Delta L/L_0$ 은 초기길이에 대한 수축률이다. 위 식에서 모세관력(P_n)은 고상입자의 크기(D)와 반비례 관계임을 알 수 있다. 따라서 W 입자 크기의 미세화는 액상소결 단계에서 액상 Cu의 모세관력을 증가시킨다. 이러한 액상 Cu는 W입자들 사이에 침투하여 고상 W-W간의 분리를 증가시킴으로써 contiguity의 감소를 초래하게 된다.

일반적으로 액상량, 소결시간, 온도, 분말상태 등에 의존하는 contiguity는⁹⁾ 분산상으로 이루어진 복합재료에서의 물성 중 전기전도도 및 열전도도의 특성에 중요한 영향을 미친다. 예를 들면 Scorey¹⁰⁾는 Mo-Cu 복합재료계에서 고상과 고상간의 contiguity의 중요성을 보고하였다. 이들은 코팅된 Mo-Cu 복합분말과 코팅단계 없이 제조된 복합분말을 성형하여 소결한 뒤 열전도도를 측정된 결과 코팅한 시편이 더 높은 열전도도를 나타냄을 확인하였다. 이는 코팅된 복합분말의 소결체에서 Mo간의 contiguity가 0에 가깝기 때문에, 즉 Cu가 서로 연결된 상으로 존재하여 열전도도가 증가하였기 때문으로 설명하였다. 이러한 결과를 기초로, 본 실험계인 W-Cu 복합체의 경우에서도 빌딩블럭 (building block)모델¹¹⁾을 도입하여 물

성에 미치는 W-W contiguity의 영향을 정량적으로 설명하고자 하였다.

그림 3은 빌딩블럭 모델 중 3-0과 3-3 패턴을 바탕으로 W와 Cu상의 연결형태를 개략적으로 나타낸 것이다. 여기서 전기전도도는 W와 Cu 계면특성에 대한 의존성이 낮고 전자의 주된 흐름은 Cu에 의한 것이라고 가정하였다. 그림 3(a)는 Cu상이 3차원으로 연결되어 있고, W이 고립되어진 것을 나타낸 3-0 패턴이다. 이 패턴에서는 Cu 상이 서로 연결되어 있으므로 W으로 전류가 흐르지 않더라도 Cu 상으로 흐를 수 있는 패턴을 보여준다. 이러한 3-0 패턴은 미세한 W-입자에 기인한 낮은 W-W contiguity를 갖는 즉, W-W이 분리된 형태로 된 소결체의 구조와 같다고 볼 수 있다. 이와 반대로, 그림 3(b)는 3-3 패턴으로서 W과 Cu는 상호 연결되어 있고, 3-0 패턴과 비교할 때 Cu상의 연결이 끊어진 형태이다. 3-3 패턴은 낮은 모세관력이 작용하는 입자가 큰 W의 소결체 미세구조를 나타낸다고 볼 수 있다. 따라서 같은 액상분율을 갖는 W-Cu 복합재료에서는 그림 3(a)와 같이 연결된 Cu상이 많은 미세구조에서 전기전도도가 향상될 것으로 판단된다. 이러한 모델을 바탕으로 본 연구의 실험결과 및 보고된 문헌 등을 종합하여 볼 때, 상호 불용계인 W-Cu 복합재료의 전기 물성에 영향을 미치는 중요한 인자는 W의 입자크기 보다는 W-W contiguity인 것으로 판단된다.

그림 4는 MA한 W-30 wt.%Cu 복합분말로 제조된 소결체에서 소결온도에 따른 W 입자크기 및 IACS 값을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 소결

체의 W 입자크기가 0.37 μm 에서 0.98 μm 로 성장함에 따라 IACS 값은 35.0%에서 31.0%로 감소하였다. 이러한 결과는 불 밀링한 W-50 vol.% Cu 혼합 분말로 제조된 소결체에서 얻은 결과와 일치하는 경향임을 알 수 있다.

그림 5는 MA한 복합분말의 소결온도에 따른 미세조직 특성을 나타내고 있다. 소결온도가 1100°C인 경우 (그림 5a) 복합체는 미세한 입자크기와 함께 응집체가 존재하는 불균질한 미세조직을 보여주나, 온도가 증가함에 따라 W-Cu 복합체는 조대한 입자를 갖는 균질한 조직으로 변화되는 것을 알 수 있었다. 이러한 미세조직 변화를 측정된 전기전도도 (그림 4)와 비교할 때, 미세조직이 불균질하고 W 입자크기가 작은 저온 소결체에서 오히려 높은 전기전도도를 갖

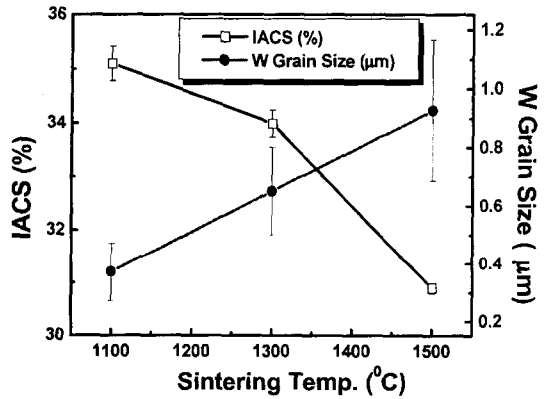


Fig. 4. IACS value and W grain size as a function of sintering temperature for MA W-30 wt.% Cu composites.

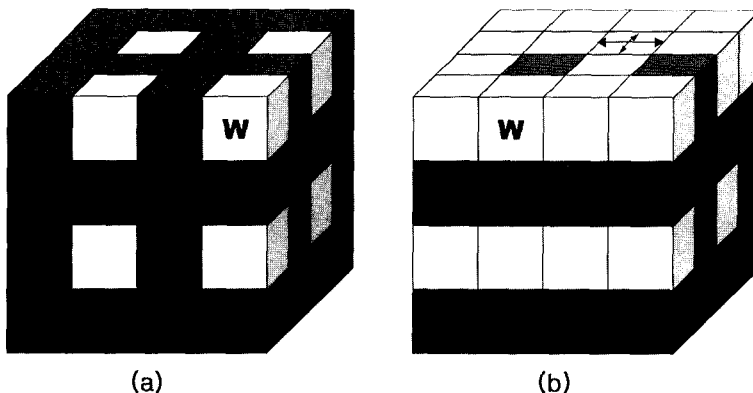


Fig. 3. Connectivity patterns of a W-Cu two-phase composite; (a) the W phase is not interconnecting while Cu has a three-dimensional conduction path; and (b) both W and Cu have interconnecting conduction paths

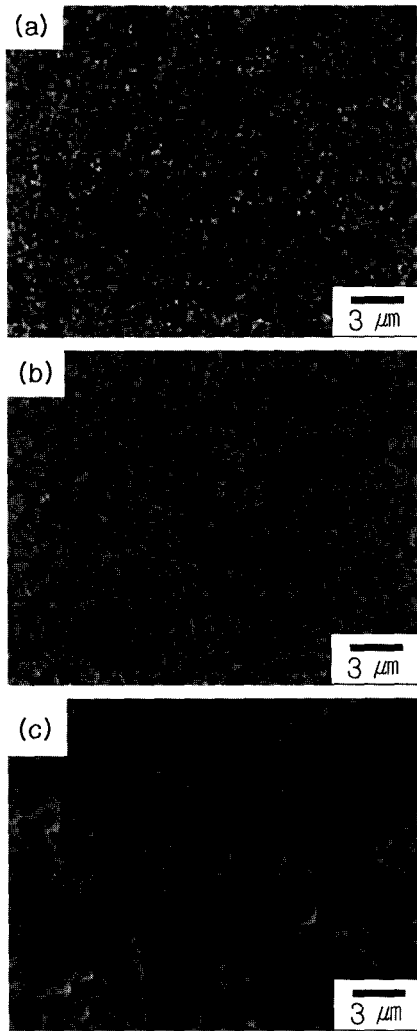


Fig. 5. SEM morphologies of MA W-30wt.% Cu sintered specimens as a function of sintering temperature; at (a) 1100°C, (b)1300°C and (c)1500°C.

는 결과를 나타낸다. 즉, W-Cu 복합재료의 전기전도도는 미세조직의 불균질성에 상관없이 W 입자크기가 감소함에 따라 전기전도도가 향상됨을 알 수 있다.

한편 고에너지 밀링 방법인 MA로 제조한 W-Cu 복합재료에서는 복합분말 제조시 밀링매체로부터 불순물의 유입을 배제할 수 없다. 표 1은 50 h 동안 MA한 W-30 wt.% Cu 분말의 조성을 분석한 것으로서 Fe, Cr, Ni 등과 같은 미량의 불순물 원소들이 유입된 것을 알 수 있다. 전기비저항이 불순물원자의 함량에 반비례하는 Nordheim 법칙을 이용하면 불순

Table 1. Chemical analysis of MA W-30wt.% Cu powders, milled for 50 h. (wt.%)

	W	Cu	Fe	Cr	Ni	Mn
Contents	70.17	29.38	0.333	0.098	0.010	0.003

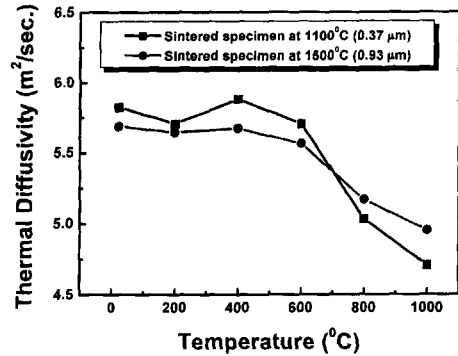


Fig. 6. Estimated thermal diffusivities for MA W-30 wt.% Cu specimens as a function of sintering temperature and W grain size.

물 원소인 Fe의 첨가량에 따른 전기비저항 값을 계산할 수 있다.¹²⁾ 예를 들어 0.05 wt.%의 Fe가 첨가된 Cu의 전기전도도는 순수한 Cu의 경우보다 약 20% 이상 감소된 값을 나타낸다. 따라서 MA한 W-Cu 복합체에서 측정된 IACS 값 35%은 (그림 4) 이론적인 값 (약 50%)보다 약 25%정도 감소한 값으로서 이는 불순물의 존재에 기인한 것으로 해석된다.

그림 6은 MA한 W-30 wt.% Cu 복합분말의 소결체에 대한 열확산 계수를 온도와 W 입자크기의 함수로 나타낸 것이다. 열확산 계수의 경우 약 600°C까지는 모든 시편에서 일정한 값을 유지하다가 그 이상의 온도에서는 감소하는 결과를 나타낸다. 한편 W 입자크기가 미세한 소결체는 조대한 입자크기를 갖는 소결체와 비교하여 상온에서 약 700°C까지 범위에서 높은 열확산 계수 값을 나타내나 그 이상의 온도에서는 반대로 낮은 값을 보여준다. 이러한 열확산 계수의 변화를 설명하고자 이론적인 열전도도 값을 계산하여 비교하였다.

일반적으로 복합재료인 W-Cu의 비열은 식(3)에 의해 부피 분율을 고려한 유효질량과 유효비열로부터 계산할 수 있다.¹³⁾

$$C = \frac{(\rho_w C_w V_w + \rho_{Cu} C_{Cu} V_{Cu})}{\rho_{Composites}} \quad (3)$$

여기서 C 는 비열, ρ 는 밀도, V 는 부피분율이다. 열전도도는 아래의 식(4)와 같이 그림 6에 나타난 열확산계수에 밀도와 비열을 곱하여 열전도도로 환산할 수 있다.¹⁴⁾

$$Q_0 = kpC \quad (4)$$

여기서 Q_0 은 열전도도이고, k 는 열확산계수이다. 그러나 본 실험계는 일부 기공을 함유하고 있으므로 다음 식과 같이 기공도를 고려한 보정한 식을 사용하여 최종 열전도도를 구할 수 있다.¹⁵⁾

$$Q = Q_0 \frac{1-\xi}{1+11\xi^2} \quad (5)$$

여기서 Q 는 최종 열전도도, ξ 는 W-Cu의 기공도를 나타낸다.

그림 7은 위식 (5)에 의해 계산한 열전도도를 온도에 따라 나타낸 것이다. 그림에 보는 바와 같이 상온에서 600°C까지 열전도도가 증가하다가 그 이상의 온도에서는 감소하는 것을 볼 수 있다. 선행연구결과¹⁶⁾에 따르면, 그림 8과 같이 순수한 W과 Cu는 온도가 증가함에 따라 열전도도가 감소하는 경향으로 나타난다. 이는 금속의 주된 열전도 기구인 자유전자가 원자진동에 의하여 산란되어 평균자유행로가 짧아지기 때문이다. 그러나 본 실험계의 경우 600°C까지는 오히려 온도의 증가에 따라 열전도도가 증가하는 경향을 나타낸다. 최근의 연구에서 Kim 등¹⁶⁾은 이러한 결과를 금속내부에 존재하는 결정립계, 불순물, 기공 등과 같은 결합에 열에너지가 가해져서 자유전자가

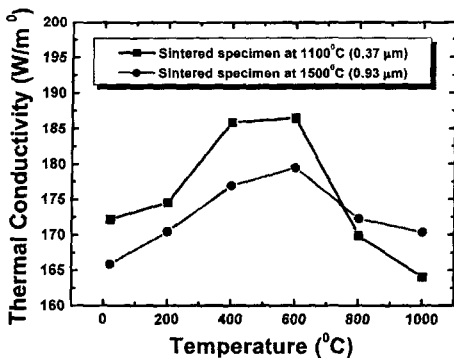


Fig. 7. Calculated thermal conductivities from thermal diffusivities for MA W-30 wt.% Cu specimens.

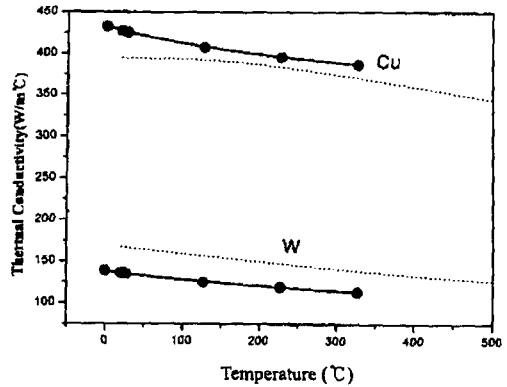


Fig. 8. Comparison of thermal conductivities of pure W and Cu with derivations from electrical resistivity by Wiedemann and Franz equation.

금속에 존재하는 결합을 통해 이동할 수 있는 확률이 높아지고 페르미 에너지 준위를 갖는 전자의 수도 증가하기 때문이라고 보고하였다. 따라서 본 실험계의 경우 600°C까지의 열전도도 증가는 결합에 의한 전자의 이동확률이 증가하는 것이 지배적인 기구로, 600°C이후에서의 열전도도 감소는 앞선 설명과 같이 원자진동에 의한 영향이 지배적인 기구로 작용하였기 때문이라고 해석된다.

한편 그림 7에서 나타낸 바와 같이, 상온에서 700°C까지는 W 입자크기가 작은 소결체에서 높은 열전도도 값을 보여주고, 그 이후에서는 W 입자크기가 큰 소결체가 높은 열전도 값을 나타낸다. 이러한 현상은 열에너지 증가로 인해 불순물의 자유전자가 열의 이동에 관여를 하다가, 어느 온도이상에서는 원자진동과 W-Cu의 계면작용의 영향으로 열전도도가 감소되었기 때문으로 해석된다. 즉, 많은 W-Cu 계면을 갖는 W 입자크기가 작은 소결체의 경우 700°C이후에서는 이러한 계면의 영향으로 열전도도가 감소하게 된 것으로 판단된다. 물론, 700°C이후의 온도에서 열전도도 변화는 이러한 계면의 영향뿐만 아니라 두 시편간 열전도도 변화, Cu 상 내 불순물의 영향, 고온에서 열팽창에 대한 미세조직 변화 등의 작용 가능성도 포함할 것으로 판단된다.

4. 결 론

상호 불용계인 W-Cu 복합재료를 볼 밀링 방법과 MA로 분말을 제조한 후 소결을 통하여 이론밀도

에 가까운 소결체를 얻었으며, W-Cu 소결체의 전기 전도도 및 열전도도에 미치는 W 입자크기의 영향에 대해 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 볼 밀링 방법과 MA로 제조한 시편은 소결을 통하여 이론밀도에 가까운 98.0%이상의 치밀체를 얻을 수 있었다. 볼 밀링 방법으로 제조한 W-50 vol.% Cu 소결체는 W 입자가 증가함에 따라 IACS 값은 감소하는 경향을 나타내었으며, MA로 제조한 W-30 wt.% Cu의 경우도 동일한 경향을 보여주었다.

2) W-Cu 복합재료의 전기전도도는 W 입자크기 보다는 주로 W-W contiguity에 의존한다고 해석되었다. 또한, W-W contiguity와 전기전도도의 관계는 빌딩블럭 모델로 설명할 수 있었다.

3) MA한 복합분말의 소결체에서 온도가 증가함에 따라 열전도도가 증가하는 것은 결정립계, 불순물, 기공 등의 결함에 의해 열전도에 기여하는 페르미 준위를 갖는 전자의 존재확률이 높아지기 때문이다. 따라서 W-Cu 복합재료의 열전도도 변화는 기존의 모델 식으로는 예측하기 어렵고 W 입자의 contiguity, 입자크기, 불순물 등에 의한 영향을 고려하여 해석하여야 한다.

감사의 글

이 논문은 2001년 한양대학교 교내연구비 지원으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. R.M German, K.F. Hens and J.L. Johnson, *Int. J. Powder Metall.*, **30** (1994) 205.
2. W. Neumann, E. Kny, *High Temp. High Press.*, **21** (1989) 525.
3. J.H. Yu, T.H. Kim and J.S. Lee, *Nanostructured Mater.*, **9** (1997) 229.
4. 김진천, 류성수, 이혁, 문인형, *한국분말야금학회지*, **4** (1997) 122.
5. R.M. German, *Sintering Theory and Practice*, J. Wiley & Sons. Inc., (1996) 256.
6. W.S. Wang and K.S. Hwang, *Metallurgical and Material Transactions A*, **29A** (1998) 1509.
7. 강택규, *한양대학교 석사학위논문* (1993) 44.
8. R.M. German, *Metall. Mater. Trans. A*, **28A** (1997) 1553.
9. Y.V. Milman, S.Chungunva, V.Goncharuck and S.Luyckx, *Int. J. of Refractory Met. & Hard Materials*, **15** (1997) 97.
10. Scorey, US patent 5912399
11. D.S. McLachlan, M. Blaszkiewicz and R.E. Newhnam, *J. Am. Ceram. Soc.*, **73** (1990) 2187.
12. R. Barrett, *The Principles of Engineering Materials*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 393.
13. Jerry F. Kerrisk, *Journal of Appl. Phys.*, **43** (1972) 122.
14. H.J. Lee and R.E. Taylor, *Journal of Appl. Phys.*, **47** (1976) 148.
15. J.C.Y. Koh and A. Fortini, *Inter. J. Heat Mass Trans.*, **16** (1973) 2013
16. Y.D. Kim, N.L. Oh, S.T. Oh, I.H. Moon, *Materials letters*, **51** (2001) 420.