

고상공정에 의해 제조된 AlN-Cu 나노복합재료의 조직 특성과 열팽창계수 측정에 관한 연구

이광민[†] · 이지성 · 이승익* · 김지순** · T. Weissgaerber*** · B. Kieback***

전남대학교 공과대학 신소재공학부

*한양대학교 공과대학 재료공학부

**울산대학교 재료금속공학부

Microstructural Characteristics and Thermal Expansion Coefficient of AlN-Cu Nanocomposite Materials Prepared by Solid State Processing

Kwang-Min Lee[†], Ji-Sung, Lee, Seung-Ick Lee*, Ji-Soon Kim**, T. Weissgaerber*** and B. Kieback***

Materials Science and Engineering Dept. Chonnam National University, Kwangju 500-757

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

**School of Materials Science and Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749

***Dept. for Powder Metallurgy and Composite Materials,

Fraunhofer Institute for Applied Materials Research, Dresden 01277, Germany

(2001년 9월 10일 받음, 2001년 10월 5일 최종수정본 받음)

Abstract The present study was carried out to investigate the effect of MA processing variables on the microstructural properties of composite powders and the coefficient of thermal expansion of pulse electric current sintered AlN-Cu powder compacts. The AlN-Cu powders had a size of less than 15 μm with 25 nm size of copper crystallite after MA 32 hours. The finely distributed AlN-Cu powder compacts were completely achieved after PECS. The residual oxygen was considerably removed after hydrogen reduction treatment. The residual carbon was completely removed to 97%. The CTE of AlN-Cu powder compacts showed a good consistency with Kingery-Turner model when the volume fraction of copper was less than 60%. When it was more than 60%, the CTE had a good agreement with Series model.

Key words : Mechanical Alloying, Powder Processing, Composites, Thermal Expansion

1. 서 론

최근 반도체 장비는 그 장비의 mini화를 통하여 성능과 속도를 향상시키고 있는데 이러한 발전 중에 그 컴퓨터 칩에서 발생하는 열방출에 대한 관심이 높아지고 있다. 반도체 칩이 동작할 때 칩 내부회로에서 발생하는 열은 칩의 성능과 신뢰성에 직결되므로 칩에서 발생하는 열을 효과적으로 외부로 방출할 수 있어야 한다. 온도가 10°C 상승할 때 마다 칩의 수명은 50% 씩 저하된다는 분석은 동작 시 발생된 열의 관리가 곧 차세대 전자산업의 발전을 좌우하는 중요한 요소임을 시사하고 있다.^{1~5)}

과거에는 압출된 알루미늄이 열방출재로 사용되어 왔으나 더 높은 전력밀도를 갖는 컴퓨터 칩의 경우에는 알루미늄의 소재로서는 그 기능을 다 할 수 없다. 알루미늄 합금은 22-27 ppm/°C 범위의 열팽창계수를 갖는 반면 반도체 칩의 재료인 실리콘은 3-5 ppm/°C, 갈륨아사이드(GaAs)는 거의 6 ppm/°C의 값을 갖기 때문에 열팽창계수 차이는 열반복에 따라 열응력을 야기시키므로 이 응력을

피하면서 열을 제거해야 한다. 또한 반도체와 열방출재 사이에 삽입되는 세라믹 절연층과의 열팽창률의 불일치는 작동시 열피로 현상으로 인한 부품의 심각한 손상을 가져온다. 현재 지금까지 열방출소재로 연구되어 온 합금으로는 W-Cu, SiC-Al, Mo-Cu, AlN-Y₂O₃, AlN-Al 등이 있다.^{6,7)}

한편 고기능성의 차세대 열방출소재(heat sink materials)로는 높은 열전도도를 갖는 금속상과 낮은 열팽창률의 세라믹 구성체로 이루어져 효과적으로 열적 기능 역할을 하는 금속기 복합재료가 기대된다. 그러나 세라믹-금속계 복합재료 제조시 고/액상간의 젖음성이 나빠 열간등압성형(HIP; Hot Isostatic Pressing)과 같은 강제적인 방법으로 치밀화를 꾀하기 때문에 성분 원소의 복합화를 위한 합금 설계 및 적합한 합금제조 공정이 필요하게 된다. 따라서 이러한 금속기 세라믹 합금계 복합재료의 제조에 있어 앞서 언급한 문제점들을 해결하기 위해서는 합금 제조방법의 선택이 일차적으로 매우 중요한 단계가 되며, 이와 같은 새로운 합금설계방법으로는 액상의 출현없이 고상만으로 합

[†] E-mail: kmlee9@hotmail.com

금을 제조할 수 있는 기계적 합금화 방법을 들 수 있다.

기계적 합금화(Mechanical Alloying : MA)⁸⁾ 공정은 고상 합금화 (solid state alloying) 공정으로 단성분 또는 다성분계 합금을 분쇄 볼 사이에서 연속적으로 압접과 분쇄의 과정을 반복시켜 평균 결정립 크기가 2~20 nm 인 균일하고 미세한 합금상으로 이루어진 나노복합분말을 제조하는 방법이다. 이러한 MA 방법은 용점차가 커서 합금화가 되기 힘든 성분 원소를 혼합하여 나노 결정립의 크기의 복합화합물상으로 얻을 수 있다는 점은 물론 성분의 합금화가 액상의 등장이 없이 고상반응으로만 이루어 진다는 점^{9,10)}에서 금속-세라믹 계의 열방출소재의 응용에 있어서도 더 우수한 조직학적, 열적 특성을 기대해 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 AlN-Cu 복합재료의 고/액상간의 낮은 젖음성과 용점차가 커서 합금화가 어려운 단점을 해결할 수 있는 기계적 합금화 방법으로 고기능성을 갖는 열방출소재를 제조하고자 한다. 이를 위해서 MA 공정 변수에 따른 복합분말의 조직 특성과 펄스통전 소결 방법으로 성형 소결된 AlN-Cu 소결체의 열팽창계수의 열기계적 성질을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 기계적 합금화 및 수소환원 공정

AlN-Cu 복합분말을 제조하기 위하여 사용된 AlN 분말은 독일 Starck 사의 99%의 순도를 갖는 60 μm 이하의 크기이였으며, Cu 분말은 독일 Norddeutsche Affine 사의 25 μm 이하의 크기를 갖는 수지상형이였다. AlN-Cu 복합분말의 조성은 AlN-40vol.%Cu (AlN-64.5wt.%Cu), AlN-60vol.%Cu (AlN-80.3wt.%Cu), AlN-70vol.%Cu (AlN-86.4wt.%Cu), AlN-80vol.%Cu (AlN-91.6wt.%Cu)의 4가지로 하였다.

기계적 합금화 공정은 planetary ball mill (Fritsch Pulverisette 5)을 이용하였으며 250 cc 스테인레스 용기에 볼과 분말의 장입비는 중량비로 10 : 1, 즉 스테인레스 볼 200 g과 원료분말 20 g을 장입하였다. 용기내로의 분말의 장입은 O, H₂O의 함량이 1 ppm으로 자동 제어되는 glove box내에서 행하였다. 기계적 합금화 시간은 1시간부터 32시간까지 행하였으며 기계적 합금화 과정중 분말들의 과잉압접과 응착을 방지하기 위해 공정제어제로 독일 Starck사의 스테아린 산(stearic acid)을 5 wt.% (1 g)을 첨가하였다.

AlN-Cu의 복합분말에 기계적 합금화 도중 혼입되는 산소와 공정제어제로부터 혼입되는 탄소의 양을 제어하기 위하여 각 기계적 합금화가 끝난 AlN-Cu 복합분말들은 600 °C에서 2시간 동안 수증기 함량이 5 ppm 이하로 제어되는 수소분위기 중에서 환원처리하였다.

2.2 AlN-Cu 복합분말의 특성 조사

MA 공정을 통해서 얻어진 AlN-Cu 복합분말의 형상 및 크기는 주사전자현미경(SEM, JEOL, JSM-5400)으로 관찰하였다. 기계적 합금화된 분말의 새로운 합금상 형성과 복합화 경향을 알아보기 위해 X-선 회절시험(Siemens,

D5000 X-ray diffractometer, Cu-K α)을 행하였으며, 회절피크의 반가폭으로부터 결정립 크기를 조사하였다. 이때 주사속도는 10°/min으로 하였으며, 주사각도는 20°~130°이였다.

기계적 합금화 그리고 수소환원 공정후의 AlN-Cu 복합분말에 존재하는 산소 분석은 LECO사 (TC-436)의 N/O 분석기를 이용하였고, 탄소 분석은 LECO사 (CS-300)의 C/S 분석기를 사용하였다.

2.3 펄스통전 소결 (Pulse Electric Current Sintering : PECS)

본 연구에서는 방전 소결장치(Izumi Tech. Comp.)를 이용하여, 소결압력 50 MPa, 승온속도 200 °C/min, 소결 온도 900 °C, 소결시간 5 min의 조건으로 진공분위기(3 × 10⁻² torr)에서 소결체를 제조하였다. 이때 사용한 mold는 내경 10 ϕ 의 흑연 몰드를 사용하였다. 소결시 다이, 펀치와 성형체의 분리를 위해 이형제로 BN 스프레이를 사용하였으며, 온도 측정은 R-type 열전대를 사용하였다. 펄스통전소결된 AlN-Cu 압분체의 미세조직은 광학현미경(Olympus, PMG3)을 이용하여 조사하였다.

2.4 AlN-Cu 소결체의 열팽창계수

펄스통전 소결된 AlN-Cu 소결체의 열팽창계수는 Perkin-Elmer사의 Thermo-Mechanical Analyzer (TMA) 7를 이용하였다. 측정 온도범위는 열방출소재의 상용온도인 상온에서 300 °C까지로 하였다. 이때 승온속도는 5 °C/min 이었으며, 질소분위기하에서 온도증가에 따른 시편의 선팽창율을 측정하여 온도에 따른 그 기율기로부터 AlN-Cu 소결체의 열팽창계수(Coefficient of Thermal Expansion : CTE)를 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 MA AlN-Cu 복합분말의 특성

Fig. 1은 AlN-60vol.%Cu의 원료분말을 32시간 동안 planetary mill에서 200 rpm의 회전속도로 기계적 합금화한 후 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과로서, 그 복합분말은 약 15 μm 크기 이하의 구형에 가까운 모습을 보이고 있다. 이는 기계적 합금화 중 압접과 파괴의 반복작용에 의해 혼합분말들이 미세화되면서 구형화되었기 때문이다.

Fig. 2는 AlN-40vol.%Cu 원료분말을 1, 2, 4, 8, 16, 32시간 동안 기계적 합금화하여 X-선 회절시험을 행한 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 기계적 합금화를 1 시간에서 32시간으로 장시간 진행할 경우, 각 Cu와 AlN의 원소에 해당하는 X-선 회절 피크의 강도는 점점 감소하였으며 그 회절 반가폭은 넓어졌다. 이는 기계적 합금화 중 합금분말의 결정립의 크기가 감소하고 분말 내에 내부 변형량이 증가하였기 때문이다. 비록 32시간의 장시간 합금화를 진행하였어도 AlN-Cu 복합분말 내에 새로운 화합물상은 형성되지 않았고 단지 AlN 분말은 미세한 입자크기로 분쇄되었음을 Fig. 7에서도 확인하였다.

Fig. 3은 AlN-40vol.%Cu과 AlN-60vol.%Cu의 원료



Fig. 1. SEM morphology for AlN-60vol.%Cu powders mechanically alloyed in a planetary ball mill with 200 rpm for 32 hours.

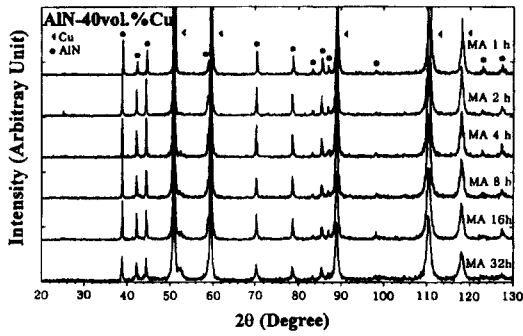


Fig. 2. X-ray powder diffraction patterns for AlN-40vol.%Cu powders as a function of mechanical alloying time.

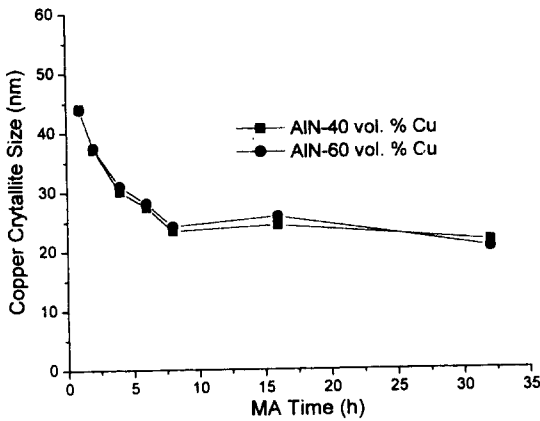
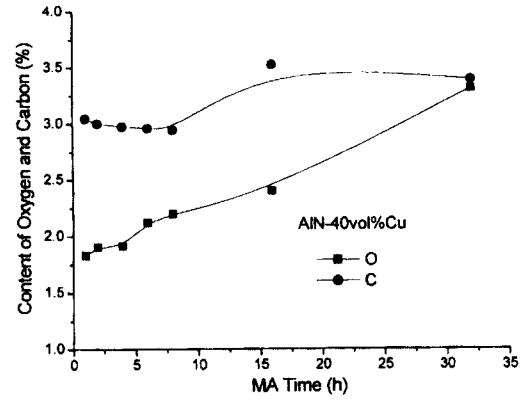


Fig. 3. Copper crystallite size measured by Sherrer equation for AlN-40vol.%Cu and AlN-60vol.%Cu powders as a function of mechanical alloying time.

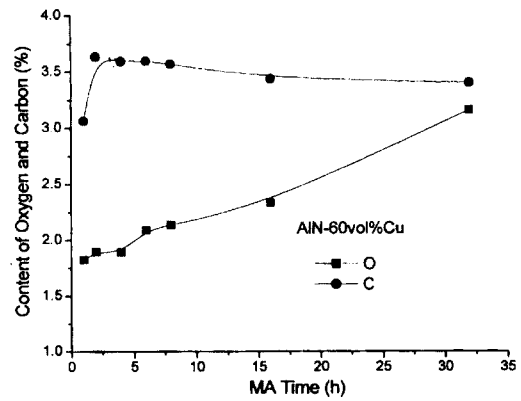
분말을 기계적 합금화하여 X-선 회절시험을 행한 후, 그 X-선 회절피크의 반가폭으로부터 식 (1)의 Sherrer 방정식¹¹⁾을 이용하여 Cu의 결정립 크기를 구하였다.

$$T = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos(\theta)} \quad (1)$$

여기서 β 는 X-선 회절피크의 반가폭, θ 는 Bragg angle, λ 는 X-선 파장 (CuK α), T는 결정립 크기를 나타낸다. AlN-40vol.%Cu 복합분말의 경우가 AlN-60vol.%



(a)



(b)

Fig. 4. The content of oxygen and carbon in (a) AlN-40vol.%Cu and (b) AlN-60vol.%Cu powders as a function of mechanical alloying time.

Cu의 경우보다 MA 시간에 따라 약간 더 큰 결정립 크기를 나타내었다. Cu 결정립 크기의 변화는 MA 시간이 증가할수록 그 결정립 크기가 45 nm에서 25 nm로 점차적으로 감소하는 경향을 보였다. 그러나 MA 8시간 이후에서부터는 그 결정립 크기가 약 25 nm 크기로 두 조성 분말 거의 일정하게 유지되었다.

3.2 MA AlN-Cu 복합분말의 수소환원 특성

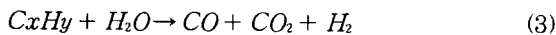
Fig. 4의 (a)는 AlN-40vol.%Cu, (b)는 AlN-60vol.%Cu 복합분말의 기계적 합금화 시간에 따라 분말내에 잔류하는 산소 및 탄소 함량을 각각 나타낸 것이다. 잔류 산소 함량은 MA 초기 약 1.8wt.%로부터 점차적으로 MA 시간과 더불어 증가하다가 MA 16시간에서는 2.3~2.4wt.%, MA 32시간에서는 3.1~3.3wt.%를 나타내었다. 잔류 탄소 함량은 MA 시간에 관계없이 약 2.9~3.5wt.% 범위의 일정한 양을 나타내었다. AlN-Cu 복합분말내의 탄소 함량은 공정제어제인 스테아린산으로부터 혼입된 것으로 판단된다. AlN-Cu 복합분말 내에 존재하는 잔류 산소 및 탄소 함량은 합금 조성과는 큰 관계가 없었다.

Table 1은 기계적 합금화된 AlN-40vol.%Cu, AlN-60vol.%Cu, AlN-70vol.%Cu, AlN-80vol.%Cu의 복합분말과 이 분말을 600°C, 수소분위기에서 2시간 동안 환원 처리하였을 때 그 분말 내에 존재하는 산소 및 탄소 함량

Table 1. Effect of H₂ reduction on the amount of oxygen and carbon in mechanically alloyed AlN-Cu powders.

Composition (vol.%)	MA time (h)	Oxygen (wt.%)			Carbon (wt.%)		
		Before	After	Decrement(%)	Before	After	Decrement(%)
AlN-40Cu	8	2.197	1.587	27.8	2.944	0.085	97.1
AlN-60Cu	8	2.138	1.332	37.7	3.570	0.078	97.9
AlN-70Cu	16	2.636	1.012	61.6	3.428	0.063	98.2
AlN-80Cu	16	2.138	0.642	70.0	3.413	0.051	98.5

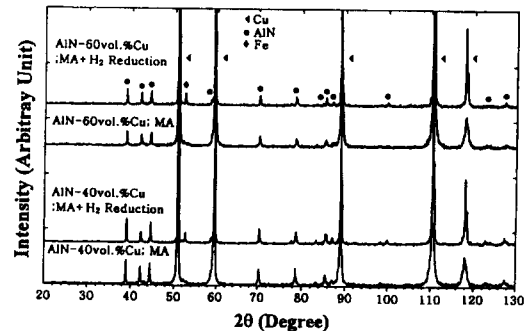
변화를 나타낸 것이다. 단 AlN-40vol.%Cu과 AlN-60vol.%Cu의 조성은 8시간, AlN-70vol.%Cu과 AlN-80vol.%Cu의 조성은 16시간 동안 기계적 합금화된 복합 분말이다. 표에서 볼 수 있는 바와 같이 AlN-Cu 복합분말 내에 존재하는 산소 및 탄소의 불순물은 수소분위기중의 환원처리 후에 많은 양이 감소하였다. 산소 함량은 Cu의 함량이 높을수록 환원공정에 의해 많이 제거되었다. AlN-80vol.%Cu인 경우에는 약 70%까지 산소가 환원 처리되어 제거됨으로써 0.64wt.%만의 잔류산소가 복합분말 내에 존재하게 되었다. 특히 흥미로운 점은 잔류 탄소의 함량이 합금 조성과 MA 시간에 관계없이 약 97% 이상 제거된 것으로 이와 관련된 가능한 수소 환원 중의 화학반응식을 (2)와 (3)에 나타내었다.



비록 수소 중의 수증기 함량이 5 ppm 이하로 제어되었지만 Cu 산화물(MO)이 먼저 수소에 의해 환원되어 식 (2)와 같이 잉여의 H₂O를 생성한 후, 이 H₂O 분자들이 다시 식 (3)과 같이 잔류탄소와 반응하여 탄소를 CO와 CO₂ 가스 혼합물로 치환함으로써 탈탄 현상에 기여한 것으로 생각된다. 환원중의 Cu의 결정립 변화는 앞선 식 (1)의 Sherrer 식을 이용하여 구하였는데, 합금 조성에 관계없이 환원전에 20~24 nm 크기를 갖던 Cu 결정립은 환원처리 후에 77~89 nm 크기로, 약 70% 정도의 결정립 성장이 일어났다.

Fig. 5는 AlN-60vol.%Cu의 혼합분말을 32 시간 동안 기계적 합금화하여 환원 처리한 후 주사전자현미경으로 관찰한 결과이다. AlN-Cu 복합분말은 수소환원처리 후 비록 Cu의 결정립 성장은 있었으나 분말크기의 변화는 없었다. 단 그림에서와 같이 고배율로 관찰했을 때에는 미세한 크기의 AlN 분말과 Cu분말들이 서로 응집(agglomeration)되어 있었으며, 또한 AlN-Cu 복합분말들이 탈가스 과정에 의해 보다 다공화(porous)되어 있었다.

Fig. 6은 AlN-40vol.%Cu와 AlN-60vol.%Cu의 혼합분말을 기계적 합금화하고 환원처리 전후에 X-선 회절시험을 행한 결과이다. 앞선 Table 1에서도 볼 수 있었던 바와 같이 2~3wt.% 정도의 산소 및 탄소 함량이 수소환원처리 전후에 변화가 있었음에도 불구하고 X-선 회절시험 결과에서는 산화물이나 탄화물의 회절 피크를 관찰할 수 없었다. 단 두 조성 모두 환원처리 후 새롭게 확인된 피크는

Fig. 5. SEM morphology for mechanically alloyed AlN-60vol.%Cu powder after H₂ reduction at 600°C for 2 hours.Fig. 6. X-ray powder diffraction patterns of MA AlN-40vol.%Cu and MA AlN-60vol.%Cu powders before and after H₂ reduction at 600°C for 2 hours.

Fe 이었는데 이는 비정질화 되어있던 Fe 산화물이 환원처리되고 결정화됨으로써 나타난 결과로 판단된다. Fe 성분의 혼입은 planetary mill의 용기와 볼로부터 혼입된 것으로 판단된다. 한편 환원 공정에 따른 후속 열적 효과는 AlN-Cu 복합분말의 원자 규칙화(atomic ordering)^{1,2)}를 가져와 X-선 회절피크의 강도는 약간 증가하고 그 회절 반가폭도 감소하였다.

3.3 MA AlN-Cu 소결체의 열팽창계수

Fig. 7은 펄스통전소결된 AlN-60vol.%Cu 소결체를 광학현미경으로 관찰한 미세조직이다. 여기서 검은 부위는 기공, 회색부위는 AlN, 백색은 Cu의 기지 조직을 나타내고 있다. (a)의 미세조직은 8시간 동안 기계적 합금화된 것으로서 조대한 AlN 입자와 부분적으로 큰 기공들을 관찰할 수 있으나, 32시간 동안 기계적 합금화한 (b)의 경우는 AlN과 Cu이 매우 미세하고 조밀하게 잘 복합화되어 있음을 알 수 있다.

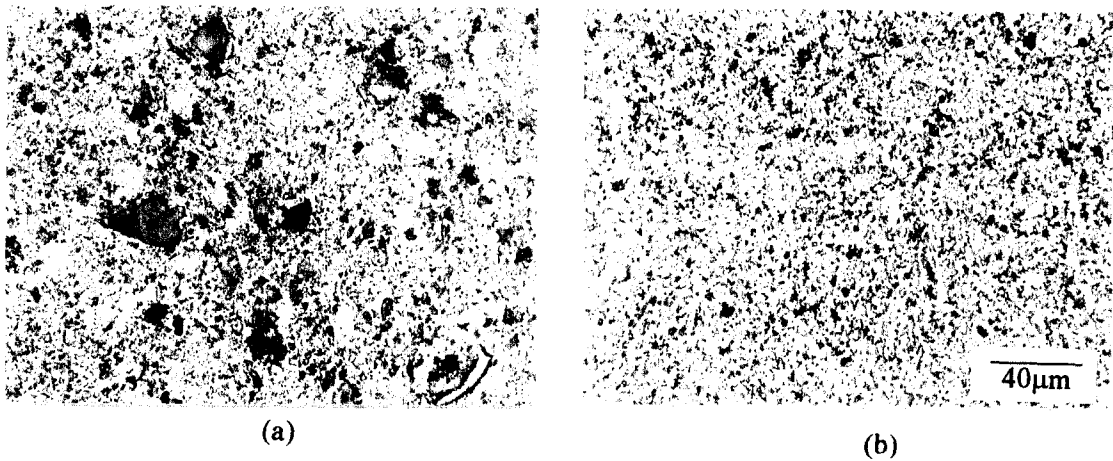


Fig. 7. Optical micrographs of AlN-60vol.%Cu powder compacts after PECS at 900°C for 5 min: (a) MA 8 h and (b) MA 32 h.

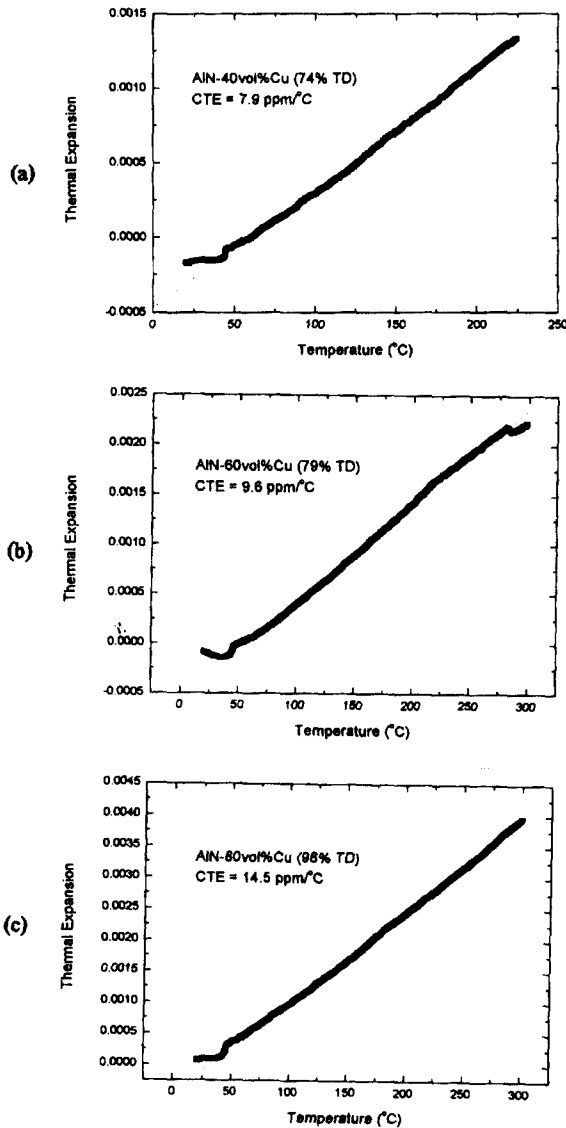


Fig. 8. Linear thermal expansion of AlN-Cu powder compacts after PECS at 900°C for 5 min: (a) AlN-40vol.%Cu, (b) AlN-60vol.%Cu and (c) AlN-80vol.%Cu.

Fig. 8은 AlN-Cu 복합분말을 16시간 동안 기계적 합금화한 후, 펄스통전 소결하여 TMA로 측정된 선팽창율을 나타내었다. 여기서 (a)는 이론밀도의 74%를 갖는 AlN-40vol.%Cu, (b)는 이론밀도의 79%를 갖는 AlN-60vol.%Cu 그리고 (c)는 이론밀도의 98%를 갖는 AlN-80vol.%Cu의 복합 소결체의 경우이다. 시편의 길이는 선형적으로 증가하므로 식 (4)와 같이 직선의 기울기를 구하면 열팽창계수가 구해진다.¹³⁾

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta T \quad (4)$$

여기서 L은 시편의 길이, α 는 열팽창계수, 그리고 T는 절대온도이다. Fig. 8의 직선의 기울기로부터 식 (4)를 이용하여 계산된 AlN-40vol.%Cu, AlN-60vol.%Cu, AlN-80vol.%Cu 복합 소결체의 열팽창계수는 각각 7.9 ppm/°C, 9.6 ppm/°C, 14.5 ppm/°C의 값을 나타내었다. 즉 AlN-Cu 복합 소결체에서 Cu의 함량이 증가할수록 높은 열팽창계수를 나타내었다.

AlN-Cu 복합재료의 열팽창계수는 “rule of mixture”를 적용한 Series model에 의해 식 (5)와 같이 간단하게 나타내어진다.

$$\alpha = \alpha_{AlN} f_{AlN} + \alpha_{Cu} f_{Cu} \quad (5)$$

여기서 α_{AlN} 와 α_{Cu} 는 각 성분원소의 열팽창계수이고 f_{AlN} 와 f_{Cu} 는 각 AlN과 Cu의 부피분율이다. Kingery-Tuner¹⁴⁾는 등압조건하에서의 복합재료의 열팽창계수를 예측하였는데 그들이 제안한 열팽창계수는 식 (6)과 같다.

$$\alpha = \frac{\alpha_{AlN} f_{AlN} K_{AlN} + \alpha_{Cu} f_{Cu} K_{Cu}}{f_{AlN} K_{AlN} + f_{Cu} K_{Cu}} \quad (6)$$

여기서 α 는 복합재료의 열팽창계수이고 α_{AlN} 와 α_{Cu} 는 각 성분원소의 열팽창계수이고 f_{AlN} 와 f_{Cu} 는 각 AlN과 Cu의 부피분율이고 K_{AlN} 와 K_{Cu} 는 각 성분원소의 bulk modulus

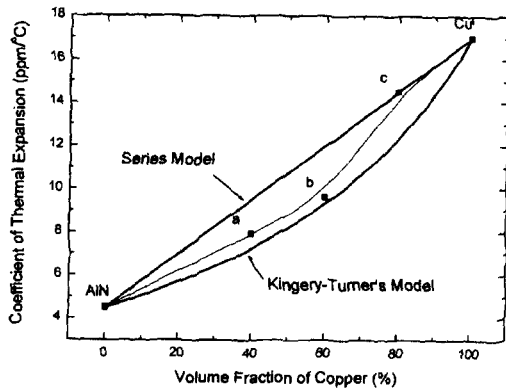


Fig. 9. Comparison of the measured and the modeled thermal expansion coefficient for AlN-Cu powder compacts as a function of copper content.

이다.

Fig. 9는 본 연구에서 측정된 AlN-Cu 열팽창재료의 열팽창계수와 식 (5)와 (6)에서 제시한 Series model과 Kingery-Tuner model에 의해 예측된 열팽창계수를 Cu 함량에 따라 함께 나타내었다. a는 AlN-40vol.%Cu, b는 AlN-60vol.%Cu, c는 AlN-80vol.%Cu의 합금 조성에 해당한다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 AlN-Cu 복합재료에서의 열팽창계수 값은 주로 Cu의 조성에 지배되는 것으로 판단되며, 기공이 상당량 존재하더라도 Cu의 부피분율이 60%이하일 때는 Kingery-Tuner의 model에 잘 일치하며 그 이상일 경우에는 Series model ("rule of mixture")에 잘 일치하였다. 이러한 AlN-Cu 복합재료에서의 Cu 조성에 따른 열팽창계수 값의 변화는 기 보고된 W-Cu의 복합재료의 결과¹⁵⁾와도 매우 비슷한 경향을 나타내었다.

4. 결 론

1) AlN-Cu 복합분말을 200 rpm의 회전속도로 planetary mill에서 32시간 기계적 합금화하였을 때의 입자크기는 약 15 μm 이었으며, X-선 회절 피크의 반가폭으로부터 계산된 Cu의 결정립 크기는 약 25 nm이었다.

2) AlN-Cu 복합분말 내에 존재하는 산소 및 탄소의 불순물은 수소분위기중의 환원처리 후에 많은 양이 감소하였으며 Cu 함량이 높을수록 더욱 많은 잔류 산소가 제거되었다. 탄소의 함량은 합금 조성과 MA 시간에 관계없이 약 97% 이상 제거되었다.

3) AlN-Cu 혼합분말을 32 시간 동안 기계적 합금화한 후, 펄스통전 소결한 소결체의 미세조직을 통하여 AlN과 Cu이 매우 미세하고 조밀하게 잘 복합화되었음을 알 수 있었다.

4) 펄스통전소결된 AlN-40vol.%Cu, AlN-60vol.%

Cu, AlN-80vol.%Cu 나노복합 소결체의 열팽창계수는 각각 7.9 ppm/°C, 9.6 ppm/°C, 14.5 ppm/°C의 값을 나타내었다. AlN-Cu 나노복합재료에서의 열팽창계수는 주로 Cu의 조성에 지배되는 것으로 판단되었으며, 기공이 상당량 존재하더라도 Cu의 부피분율이 60%이하일 때는 Kingery-Tuner의 model에 잘 일치하였고 그 이상일 경우에는 Series model에 잘 일치하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단에서 지원한 "1999년도 국제공동연구과제 연구비(과제번호 : 995-0800-00902)"로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. J. I. Kim, Bulletin of the Kor. Inst. of Met. & Mat., 10 (1), 11 (1997).
2. C. Zweben and K. A. Schmidt, Packaging of Electronic Materials Handbook, Materials Park, vol. 1, OH, ASM (1989).
3. J. S. Lee, J. Kor. Powder Met., 4(1), 1 (1997).
4. A. H. Kumar and R. R. Tummala, J. Met., 22, 10 (1992).
5. C. Zweben, J. Met., 44, 15 (1992).
6. R. M. German, K. F. Hens and J. L. Johnson, Intern. J. Powder Metall., 30(2), 205 (1994).
7. S. Fuchs and P. G. Barnwell, Intern. J. Microcircuits and Electronic Packaging, 20, 61 (1997).
8. J. S. Benjamin, New Materials by Mechanical Alloying Techniques, ed. E. Arzt and L. Schultz, p. 3, Deutsche Gesellschaft für Metallkunde, Oberursel (1989).
9. F. H. Froes, J. Met., 41, 25 (1989).
10. J. S. Benjamin, Metal Powder Report, 45, 122 (1990).
11. B. D. Cullity, Elements of X-ray Diffraction, 2nd ed., p. 356, Addison-Wesley Pub. Co Inc., New York (1978).
12. K. M. Lee, Ji-Sung Lee, Doh-Jae Lee, Sang-Shik Kim, In-Sub Ahn and Min-Woo Park, J. of Alloys and Compound, 313(1-2), p. 214 (2001).
13. R. E. Hummel, Electronic Properties of Materials, 2nd Ed., p. 354, Springer-Verlag, USA (1994).
14. S. I. Lee, M. K. Yoo and I. H. Moon, Proceedings of the 2000 Intern. Conf. on P/M & Particulate Materials (2000) p. 13
15. W. D. Kingery, J. Am. Ceram. Soc., 40, 351, (1957).