

## 마이크로 전자소자용 PM 방열재료

이재성

한양대학교 공학대학 금속재료공학과

### PM Thermal Management Materials for Microelectronic Applications

Jai-Sung Lee

Department of Metallurgy and Materials Science,  
Hanyang University, Ansan, 425-791 Korea

#### 1. 서론

최근 전자산업과 함께, 이와 관련된 기계, 자동화 등 첨단 산업이 급속도로 발전하면서 고기능, 고성능을 갖는 새로운 전자부품소재에 대한 요구가 급증하고 있다. 輕·薄·短·小로 표현되는 이러한 전자부품소재에 대한 요구는 이에 필수적으로 수반되는 재료의 개발을 전제요건으로 하고 있다. 우리가 사용하는 첨단전자제품들이(고성능 컴퓨터, 레이저를 이용한 각종 음향, 영상기기, microwave electronic package를 이용한 첨단 통신용 기기) 고성능화, 극소형화함에 따라 반도체와 같은 필수 부품소재의 요구특성도 매우 까다롭고, 복잡화 되고 있다. 일례로 소형 전자제품에서 쉽게 생각할 수 있는 재료설계상의 문제가 바로 작동시 발생하는 많은 양의 열을 여하히 효과적으로 방출하는가 하는 점인데, thermal management로 표현되는 발생된 열의 관리는 곧, 차세대 전자산업의 발전을 좌우하는 중요한 요소이다.<sup>1-4)</sup>

재료공학, 특히 분말야금 연구개발분야에서 방열 문제의 재료학적 해결은 PM 산업을 고부가가치형으로 도약시키는 계기를 마련할 수 있다. 방열특성에 관한한 2000 W/mK의 열전도율을 갖는 다이아몬드는 최고의 방열재료이다. 그러나 전자부품소재와 관련해서 고려해야 할 또 다른 물성은 열팽창율이다. 반도체와 방열재 사이에 삽입되는 세라믹 절연층과의 열팽창율의 불일치는 작동시 열피로현상으로 인한 부품의 심각한 손상을 가져온다.<sup>5-7)</sup> 이러한 문제를 해결하기 위해 설계된 재료가 방열용 복합재료이다. 금속기지복합재료는 높은 열전도도를 갖는 금속상과

낮은 열팽창율의 금속 또는 세라믹의 구성체로서, 효과적인 방열기능을 수행한다. 대부분 PM 기술로 제조되는 이들 복합재료는 최근 우주선, 우주망원경, 미사일 유도장치 cover를 비롯해 우주항공재료로도 응용되고 있다.<sup>8,9)</sup>

본 리뷰에서는 마이크로전자용 PM 방열재료의 설계개념을 소개하고 최종 제품의 용도 및 형태를 고려한 가공기술의 접근방안을 제시한다. 특히 금속기지 PM 복합재료를 중심으로, 최근 Lee등<sup>10-13)</sup>에 의해 제시된 극초미립 복합분말(나노복합분말)을 이용한 PM 방열재료의 설계방안을 소개한다.

#### 2. PM 방열재료의 성질 및 설계

전자 패키지재료의 기본적인 기능은 집적회로와 기타 여러 전자소자를 지지, 보호하면서 작동시 발생하는 열을 최대한 효과적으로 방출하는 것이다. 패키지 공정정은 크게 4단계로 나눌 수 있으며(그림 1의 digital and microwave package systems 참조), 각 공정 단계에서 요구되는 재료의 요구조건과 금속복합재료로 대체할 수 있는 부품소재를 표 1에 나타내었다.<sup>4)</sup> 모든 공정단계에서 공통적으로 요구되는 사항은 높은 열전도도 및 세라믹기판재료에 상응하는 적절한 열팽창율이다.

표 2는 현재 사용되고 있는 마이크로 전자소자용으로 사용되는 재료의 물리적 성질을 나타내고 있다. 일반적으로 열전도도와 같이 전자운동과 관련한 성질은 재료의 순도에 크게 의존한다. 예로서 공업용 순도의 재료의 경우 약 50%의 낮은 전도율을 갖는

다. 표에서 보듯이, 열팽창율이 낮은 invar, silica, cordierite 등은 열전도도가 낮으며, 반면에 높은 열전도도를 갖는 Cu, Ag, Au 와 같은 양전도성 금속은 높은 열팽창율을 보이고 있다. 탄성을 또한 마이크로 전자 소자용 재료에 중요한 성질로서, 작동시 야기되는 계면응력과 변형을 해석하는데 필수적인 인자이다.<sup>6)</sup> 방열재료가 세라믹기판과 접하고 있다는 점에서 방열

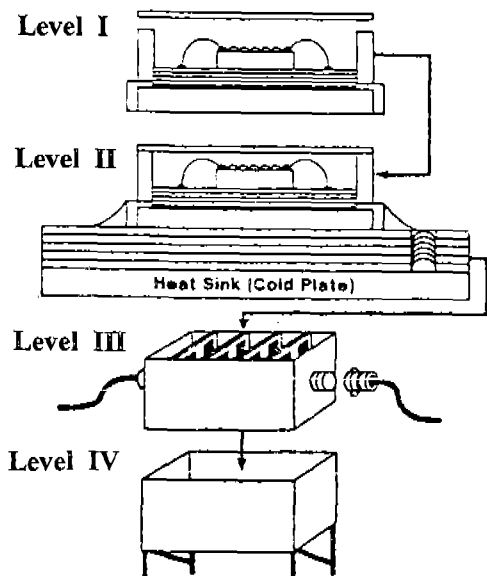


Fig. 1. The levels of electronic packaging.<sup>4)</sup>

Table 2. Properties of common materials used in microelectronics.<sup>2)</sup>

Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Thermal Expansion (ppm/K)	Thermal Conductivity (W/mK)	Elastic Modulus (GPa)
alumina	3.96	7.6	39	360
aluminum alloys	2.70	24	177	71
aluminum nitride	3.29	5.8	270	345
beryllia	2.86	8.0	210	311
beryllium	1.85	12	194	318
boron carbide	2.52	3.5	39	448
boron nitride	2.10	2.0	15	78
cobalt	8.90	13	96	211
copper	8.96	17	403	145
cordierite	2.58	2.3	1	118
epoxy	1.2	60	0	0.1
gallium arsenide	5.32	6	46	100
gold	19.3	14	316	79
invar	8.04	0.4	11	144
iron	7.86	12	75	196
kovar	8.36	6	17	131
molybdenum	10.2	5	138	326
nickel	8.9	13	95	214
silica	2.3	1	2	70
silicon	2.23	4	139	113
silicon carbide	3.21	5	270	414
silver	10.5	19	431	76
stainless steel	8.0	15	14	216
tungsten	19.3	4.5	174	411

Table 1. Requirements and components for electronic packaging composite materials.<sup>4)</sup>

Material requirements	Packaging components
<b>Level I</b> Heat dissipation (high thermal conductivity) Low Thermal Stresses (CTE match) Hemeticity Electromagnetic Shielding	<b>Level I</b> Carriers Electronic Packages Microwave Packages Photonics Packages Laser Diode Packages
<b>Level II</b> Heat Dissipation Low Thermal Stresses Vibration (high stiffness, damping) Light Weight	<b>Level II</b> Printed Circuit Boards Printed Circuit Board Heat Sinks Package Mounting Plates
<b>Level III</b> Heat Dissipation/Insulation Vibration and Shock (high stiffness, strength) Electromagnetic Shielding Light Weight	<b>Level III</b> Electronic Enclosures (chassis, black boxes) Covers
<b>Level IV</b> Vibration and Shock	<b>Level IV</b> Support Structures

재에 요구되는 성질은 낮은 열팽창율과 높은 열전도도이다. 표 3은 두 성질을 만족하는 각각의 재료들을 나타내고 있다. 표에서 보는 바와 같이 SiC, AlN만 두 성질의 요건에 만족되는 단상 재료이다. 그러나 이와 같은 단상재료의 제조는 낮은 전기전도율 및 화학조성의 조절의 어려움으로 용이하지 않다. 이에 새로운 재료설계 방안으로 낮은 열팽창특성의 재료와 고열전도성 재료의 복합화 개념이 나오게 되었다. W-Cu, SiC-Cu, SiC-Al, Mo-Cu, AlN-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 또는 AlN-

Al 등이 대표적인 방열용 복합재료계이다. 특히 이들 재료는 분말가공방법에 의해 제조되는 복합재료라는 점에서 PM 기술의 적용은 매우 중요하다.

먼저 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BeO 등 세라믹기판의 열팽창율 6~7 ppm/K를 고려하여 이를 만족하는 복합재료의 조성을 결정하는 것이 중요하다. 이는 복합상의 열팽창특성이 성분상의 양에 1차적으로 지배를 받기 때문이다. 표 4는 위의 열팽창율(7 ppm/K)을 만족하는 조성의 복합재료의 열전도도를 이론적으로 계산한 결과이다.<sup>14)</sup> 결과에서 보는 바와 같이 대부분의 재료는 200 W/mK 이상의 높은 값을 유지하고 있다. 표에서 보는 바와 같이 재료의 열전도도는 기지금속에 의존한다.

미세구조의 관점에서 복합재료의 열전도 특성은 기지상의 분포에 영향을 받는다. 최근 Rayleigh<sup>15)</sup>와 German<sup>14)</sup>은 그림 2에서 보는 바와 같이 서로 다른 미세구조 즉, 전자는 분산상 구조, 후자는 연결구조를 갖는 모델구조에 대해 열전도도를 계산하였다. 이에 대한 열전도도 계산식은 식 (1)<sup>15)</sup>과 (2)<sup>14)</sup>와 같다.

$$Q_M = Q_1 \left[ \frac{1 + 2V_2 \frac{1-k}{2k+1}}{1 - \frac{1-k}{1+k}} V_2 \right] k = Q/Q_2 \quad (1)$$

**Table 3. High thermal conductivity and low thermal expansion materials.<sup>2)</sup>**

High Thermal Conductivity	Low Thermal Expansion
aluminum	aluminum nitride
aluminum nitride	boron carbide
copper	boron nitride
diamond	cordierite
gold	graphite
silver	invar
silicon carbide	osmium
	silica
	silicon
	silicon carbide
	silicon nitride
	tungsten
	tungsten carbide

**Table 4. Predicted attributes of 7 ppm/K CTE systems.<sup>2)</sup>**

Low CTE	High TC	Metal v/o	Metal w/o	TC W/mK	Density g/cm <sup>3</sup>	Modulus GPa
AlN	Cu	12.5	28.0	285	6.70	306
	Ag	10.5	27.2	284	4.05	279
	Al	8.6	7.1	267	3.23	286
	Au	14.5	49.8	277	5.61	261
SiC	Cu	18.8	39.3	293	4.28	330
	Ag	16.2	38.8	293	4.38	284
	Al	13.0	11.2	265	3.14	298
	Au	22.8	64.0	281	6.87	253
W	Cu	20.0	10.4	210	17.2	325
	Ag	17.1	10.1	207	17.8	278
	Al	13.9	2.2	182	17.0	290
	Au	24.0	24.0	203	19.3	247
Mo	Cu	14.9	13.3	166	10.0	287
	Ag	12.6	12.9	162	10.2	258
	Al	10.5	3.0	146	9.4	264
	Au	17.5	28.6	162	11.8	240
WC-Co	Cu	21.0	13.7	161	13.7	432
	Ag	18.0	13.3	158	14.2	353
	Al	14.5	3.0	134	13.2	379
	Au	25.0	30.0	157	16.1	302

dispersed and interconnected microstructures

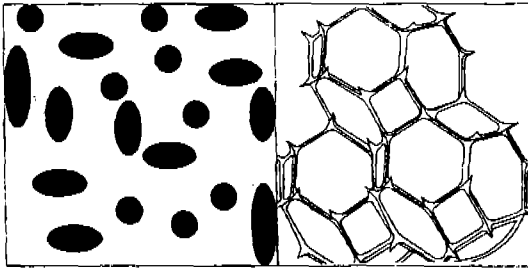


Fig. 2. Schematic microstructures of dispersed low thermal expansion phase and interconnected phases typical of liquid phase sintering.<sup>2)</sup>

$$Q_M = \pi R^2 Q_1 + (1 - 2R)^2 Q_2 + \frac{Q_1 Q_2 (4R - 4R^2 - \pi R^2)}{\frac{3}{2} R Q_2 + (1 - \frac{3}{2} R) Q_1} \quad (2)$$

여기서  $Q_M$ 은 복합재료의 열전도도,  $Q_i$ ,  $V_i$ 는 각각 성분상  $i$ 의 열전도도와 체적분율이다. 또한  $R$ 은 망상구조를 하고 있는 기지상의 반경이며 다음의 식으로 표시된다.

$$R = 0.00113 + 1.58V_1 + 1.83V_1^{3/2} + 1.06V_1^3 \quad (3)$$

이상의 미세구조에 기초한 복합재료의 열전도도 계산은 실험적인 결과와 잘 일치하는 것으로 보고되고 있다. 그러나 상기 모델식을 비롯한 대부분의 이론식이 PM 복합재료의 변형, 기공도 및 계면상태의 영향을 고려하지 못하고 있기 때문에 실제 측정값에 비해 높이가 평가되고 있다. 아울러 기지상의 불순물 농도 또한 간과할 수 없는 중요한 인자이다. 이에 대한 연구결과에 의하면 잔류기공도가 5% 정도인 경우 7.5%미만의 낮은 열전도도 감소가 나타난 반면, 열산란 장소로 작용하는 불순물과 계면등은 상당량의 저하를 초래하였다.<sup>16,17)</sup>

### 3. PM 방열재료의 가공

표 5는 방열용 복합재료의 가공기술 특징을 간단히 비교한 것이다. SiC-Al 과 같은 경량재료는 항공 전자소자용 방열재료로 적합하다. 열전도 특성면에서는 SiC-Cu, AlN-Cu 등이 가장 우수한 소재가 될 것이다(표 4 참조). 그러나 금속복합재료를 제외한 모든 세라믹-금속계 복합재료의 경우 제조시 고액상

Table 5. Characteristics and processes of composite thermal management materials.

Materials	Application	Process	Advantage
W-Cu Mo-Cu	PC & workstation (heat loaded; 40-125 W/cm <sup>2</sup> )	• MIM-LPS • Infiltration Process	Cost
SiC-Al AlN-Cu SiC-Cu	Avionic applications	• Pressure infiltration process	Density

간의 젖음성이 나빠 가압용침(pressure infiltration)과 같은 강제적인 방법으로 치밀화를 꾀한다. W-Cu, Mo-Cu와 같은 금속복합재료는 전통적인 방법인 용침법이나, 액상소결기술로 제조된다. 특히 마이크로 전자 패키지용 방열재료가 작고, 복잡한 형태를 갖기 때문에, 이들의 효과적인 성형가공방안으로 분말사출성형기술(PIM)이 적용되고 있는데, 이 기술은 제품의 모양이 정교한 밀폐형 패키지(hermetic package)의 net shaping 가공을 위해서는 최적의 가공기술이다.<sup>18)</sup> 최근 PIM 기술을 통해 방열재를 가공하고자 하는 복합재료의 대표적인 예는 W-Cu 합금이다. 따라서 W-Cu 방열재료의 PIM 가공과 관련한 제조기술에 대해 상술하고자 한다.

표 2에서 알 수 있듯이 6~7 ppm/K의 열팽창율을 만족하는 W-Cu 합금의 조성은 W-10~15wt%Cu에 해당한다. 대체로 W-Cu 재료의 제조에 사용되는 W 분말의 입도가 10 μm 미만인 점을 고려할때 실제 제조현장에서 택하고 있는 상기 조성 W-Cu 합금의 제조기술은 액상소결방법이다(그림 3 참조). 이와 같은 점에서 W-Cu 방열재료의 제조는 PIM과 소결기술을 조합한 방법으로 이루어 지게 된다. 그러나 상호 용해도가 없는 W-Cu 계의 경우, 더우기 10~15%Cu의 적은 액상량 조건에서는 소결에 의한 완전치밀화를 기대할 수 없다. 물론 용침법으로 간단히 치밀화를 꾀할 수 있지만, 10~15%Cu의 적은 액상량을 채울 수 있는 W 골격체의 가공이 완전한 open pore로 이루어 지기는 어렵기 때문에 이 방법 또한 제한적이다. 결과적으로 소결에 의해 W-Cu 분말의 치밀화를 얻어야 하는데, 이를 위해서 상호 용해반응을 유도하는 Ni, Co와 같은 제3원소의 첨가와 함께 1350℃ 이상의 고온에서 소결하는 방법이 이용되고 있다.<sup>19-21)</sup> 그러나 제3원소의 첨가와 함께 고온 소결을 하는 경우, Cu 기지상의 합금화로 인한 열전도도의 급격한

감소를 피할 수 없다. 설상가상으로, PIM 가공성형을 하는 경우, 바인더 제거후 남은 50%에 달하는 많은 양의 기공을 단순히 소결에 의해 없애야 하는 문제를 고려하면 제 3원소 첨가와 고온 소결은 불가피하다.

**3.1. 극초미립 W-Cu 복합분말을 이용한 설계방안**

제 3원소의 첨가 없이 W-Cu 계의 치밀화를 얻을 수 있는 방안은 분말의 미세화 및 복합화를 통한 소결성의 극대화이다. 최근 Lee 등은 나노크기의 W-Cu 복합분말의 합성을 통해 이상의 문제를 해결하였

다.<sup>10-13,22,23</sup> 특히 PIM용 출발원료분말을 겨냥한 W-Cu 나노복합분말의 기본설계개념은 표 6에서 보는 바와 같다. 분말제조의 기본공정은 WO<sub>3</sub>, CuO 분말을 볼밀링 혼합한후, 최적설계된 2단계 수소환원과정을 거치는 두 기본공정으로 구성되어 있다. 이에 대한 모식도를 그림 4에 나타내었다. 이 공정의 특징은 깨지기 쉬운 금속산화물을 원료로 사용하기 때문에 짧은 시간내에서의 분쇄혼합이 쉽고, 조성조절의 폭이 크다는 점이다. 최종 2단계 수소환원을 통해 얻은 복합분말은 30~50 nm의 W 입자가 Cu 상에 의해 연결된 구조를 이루고 있는 형태로서 20 μm 크기의 덩

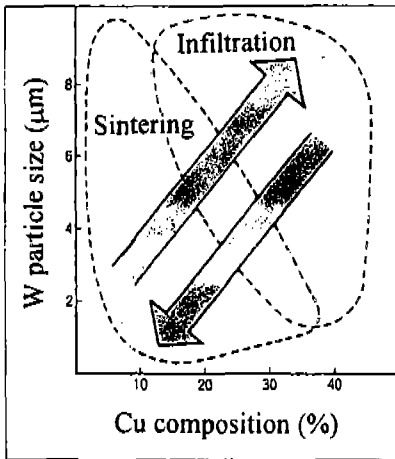


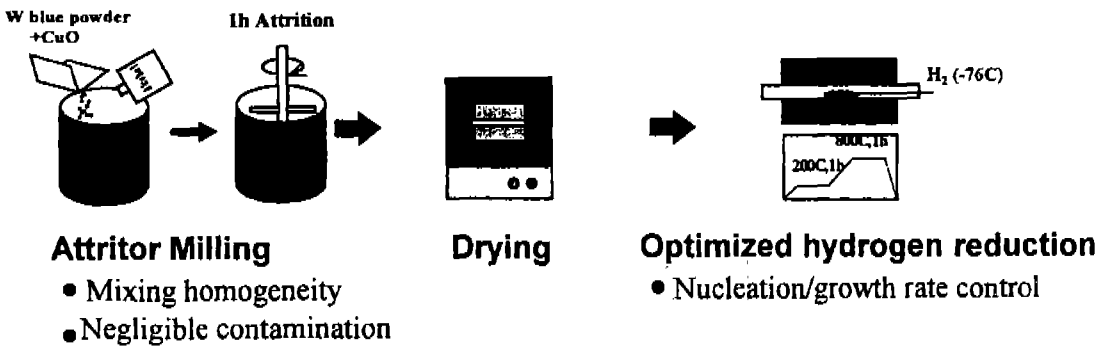
Fig. 3. Processing of PM W-Cu alloy.

**Table 6. Material design of W-Cu heat sinks using nanocomposite powder.**

Requirement	Design
Compatible CTE (6~7 ppm/K)	W-10~20wt% Cu
<ul style="list-style-type: none"> <li>• High thermal conductivity</li> <li>• Dimensional stability</li> <li>• High strength &amp; toughness</li> <li>• Microwave absorption</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Full density</li> <li>• Homogeneous microstructure</li> <li>• Particle refinement</li> </ul>
Complex shaping (hermetic package)	Metal injection molding



Synthesis of nanocomposite W-Cu powder



**IMPROVEMENTS:**

- Whole range of commercially useful compositions can be achieved easily.
- Micropore of ball milled oxide controls reduction rate.

Fig. 4. Mechano-chemical process for synthesis of nanocomposite W-Cu powder.<sup>10)</sup>

어리 구조를 이루고 있다. 이들 나노복합분말의 형성 기구에 대한 최근 연구결과에 의하면 무엇보다도 분

쇄혼합된 산화물입자간에 존재하는 미세기공이 열역학적으로, 동력학적으로 나노크기의 W 입자생성에 주도적인 역할을 하는 것으로 나타났다.<sup>10,13)</sup> 이들 분말을 이용하여 소결치밀화<sup>22,23)</sup> 및 PIM 실험한 결과,<sup>29)</sup> W-Cu 방열재 제조를 위한 PIM 출발분말로서 매우 성공적임을 확인할 수 있었다(그림 5 참조). 최근의 결과에 의하면 바인더 제거 후 잔류하는 미량의 탄소 및 산소 등이 소결치밀화를 악화시키지 않으며, 오히려 소결 초기단계에서는(고상소결시) 잔류 산화물의 환원을 통해 소결을 촉진하는 것으로 나타났다.<sup>25)</sup>

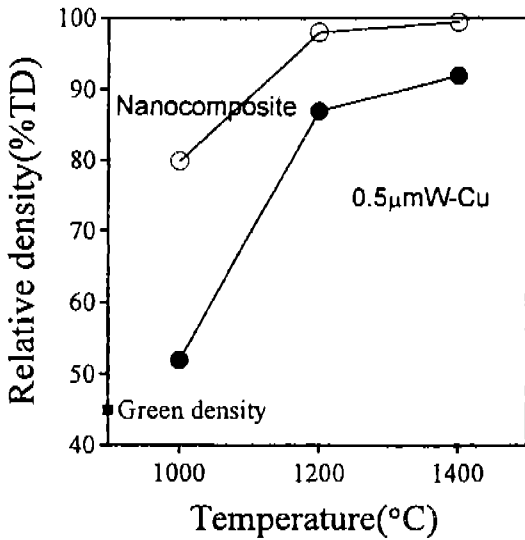


Fig. 5. Densification process of nanocomposite W-Cu powder depending on sintering temperature.

#### 4. 응용 및 전망

초기 많은 연구개발에도 불구하고, 마이크로 전자 소자용 PM 재료설계 및 가공을 위해 해결해야 할 과제는 많다. 전술한 바와 같이 이는, 이들 재료가 요구하는 성질이 열적, 전기적, 기계적 성질들 매우 복잡하고 까다롭기 때문이다. 아울러, net shaping을 위한 정밀가공기술과 연계한 가공기술의 확립 또한 풀어

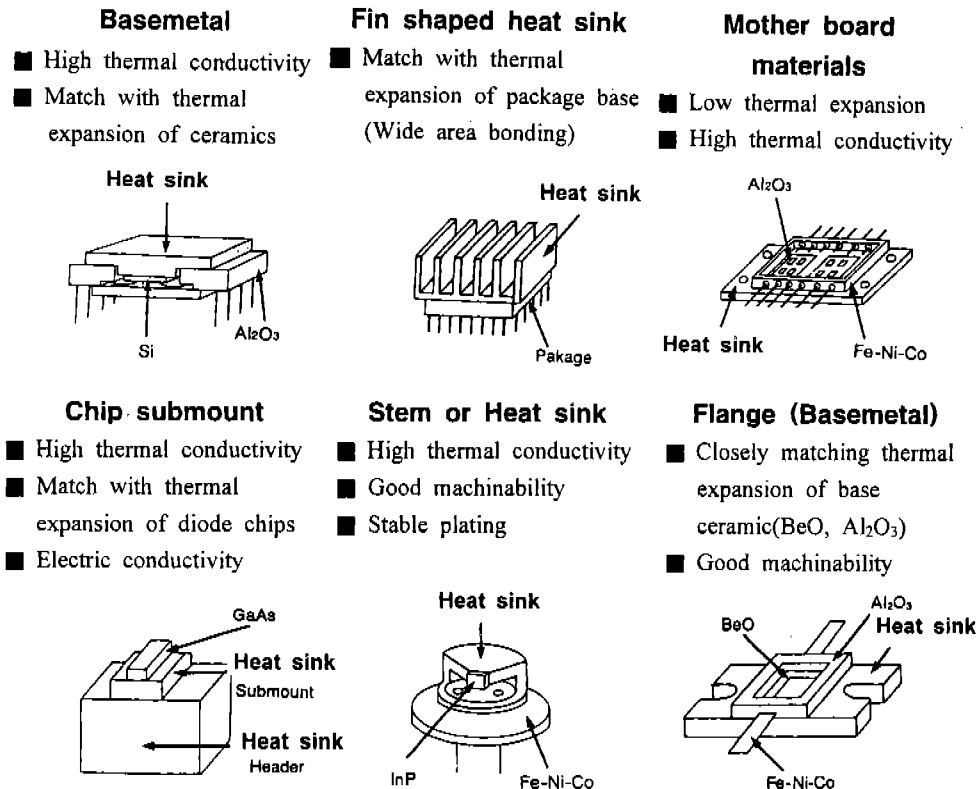


Fig. 6. Schematic diagrams of composite heat sink materials for microelectronic applications.

야 할 PM 기술과제이다. 이점은 패키지의 크기가 통상 8~125 mm, 두께는 1~3 mm, 그리고 허용공차는  $\pm 25 \mu\text{m}$ 으로 매우 엄격하기 때문이다. 특히 밀폐형 부품소자의 경우, 재료의 기공이 폐기공 상태로, 5% 이내로 유지되어야 한다. 아울러 후속되는 표면금속 coating 처리를 위한 표면미세연마기공등에 대한 기술적 고려도 고려해야 할 부분이다.<sup>2)</sup>

재료적인 측면에서 PM 복합재료는 크게 SiC-Al 계와 W-Cu 계로 대별되며, 이들의 기본적인 기능의 차이는 전술한 바와 같다(표 5 참조). PM 복합재료가 응용되는 마이크로 패키지용 부품의 구체적인 응용 예를 그림 7에 나타내었다. 경제적인 측면에서 현재 PM 산업체에서 가장 쉽게 접근할 수 있는 재료는 W-Cu 계이다. 이에 대해서는 새로운 PIM 가공기술과 관련하여, 전장에서 소개한 바와 같다. 아직은 안정화된 화학적 성질의 AlN 분말의 제조가 경제성면에서도 많은 어려움이 있기 때문에 AlN-Al, AlN-Cu 등 이들 복합재료의 응용이 제약을 받지만 추후, 많은 연구개발과 함께 매우 큰 잠재성이 있다. 이점은 다이아몬드계 복합재료에도 마찬가지로 적용된다. 합성다이아몬드 분말의 경우,  $\mu\text{m}$  범위의 미세분말 생산의 가격경쟁력이 보장된다면, diamond-Cu, -Al 등의 복합재료 또한 가장 강력한 PM 방열재료로 전망된다. 다만, 이 경우 다이아몬드의 물성 및 구조변화가 일어나지 않는 제조기술의 개발이 선결되어야 할 과제이다.

### 5. 맺음말

최근 우리나라의 전자산업도 미국, 일본등 선진 전자산업국과 같이, 종래의 메모리용 반도체산업에서 고부가가치의 기능성 및 고출력 반도체산업으로 전환하고 있다. 이와 함께 기존의 저출력 소자에서는 크게 문제시 되지 않았던 방열문제가 소자의 소형화로 인해 재료자체의 설계로 해결해야 하는 문제에 이르게 되었다. 이점이 바로 마이크로 전자산업이 왜 PM 복합재료를 요구하게 되었는가에 대한 동기이다. 이제까지 대부분의 국내외 PM 산업이 부가가치가 높지 않은 구조용 기계부품생산에 머물러 왔던 점을 감안할 때, PM 방열재료산업에 대한 관심은 때 늦은 감 없지 않다. 일천한 국내 PM 산업의 역사에도 불구하고, 우리나라에는 많은 고급 연구인력과 함께 현

장 경험이 풍부한 기술인력이 국제 경쟁력을 갖추고 있다. 특히 국제경쟁력을 갖고 있는 한국의 전자산업을 바탕으로 PM 방열재료의 개발에 대한 국내 PM 산업체와 학·연간의 연구협력은 새로운 PM 부품산업의 창출에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

### 참 고 문 헌

1. C. Zweben and K. A. Schmidt, *Packaging vol. 1 of Electronic Materials Handbook* (Materials Park, OH: ASM, 1989).
2. R. M. German, K. F. Hens, and J. L. Johnson, Intern. J. Powder Metallurgy, **30**(2) (1994) 205.
3. A. H. Kumar and R. R. Tummala, J. Met., **44** (1992) 10.
4. C. Zweben, J. Met., **44** (1992) 15.
5. J. Knickerbocker, Ceramic Bull., **71** (1992) 1393.
6. D. B. Knorr, J. Met., **44** (1992) 29.
7. R. R. Tummala, J. Amer. Ceramic Soc., **74** (1991) 895.
8. *Composite Materials Handbook*, 2nd ed. (M. Schwartz, ed), New York, McGraw-Hill, 1992.
9. *Composites, Vol.1 of Engineered Material Handbook* (Materials Park, OH: ASM International, (1987).
10. J. S. Lee and T. H. Kim, *Proc. of The Fourth Nisshin Engineering Particle Technology International Seminar*, Dec. 6-8, Osaka (1996) 59.
11. 김태형, 변 준, 이재성, 대한금속학회지, **30**(2) (1992) 203.
12. 강택규, 김태형, 이재성, 하이브리드 마이크로일렉트로닉스, **1**(5) (1994) 135.
13. T. H. Kim, J. H. Yu and J. S. Lee, Nanostructured Materials, **9** (1997) in press.
14. R. M. German, Metall. Trans.A, **24A** (1993) 1754.
15. L. Rayleigh, Phil. Mag., **34** (1892) 481.
16. D. P. Hasselman, K. Y. Donaldson and A. L. Geiger, J. Amer. Ceramic Soc. **75** (1992) 3137.
17. A. G. Every, Y. Tzou, D. P. H. Hasselman and R. Raj, Acta. Met. Mater. **40** (1992) 123.
18. S. Ludvik, S. Clair, R. Krishmann and I. Clark, *Advances in Powder Metallurgy*, Metal Powder Industries Federation, Princeton N.J., **2** (1991) 225.
19. V. Panichkina, M. M. Sirotyuk and V. V. Skorokhod, Poroshkovaya Metallurgiya, **6** (1982) 27.
20. I. H. Moon and J. S. Lee, Powder Metallurgy, **22** (1979) 5.
21. J. L. Johnson and R. M. German, *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, MPIF., Princeton, N. J., **4** (1993) 201.
22. J. S. Lee, T. H. Kim and T. G. Kang, *Proc. World Congress on PM'93, Kyoto*, JSPM (1993) 365.
23. J. S. Lee and T. H. Kim, Nanostructured Materials, **6**

- (1995) 691.
24. I. H. Moon, T. G. Kang, J. S. Lee, J. K. Lee and Y. D. Kim, *Proc. of Powder Metallurgy '94 World Congress, Paris, France, 3* (1994) 1807.
25. 윤의식, 유지훈, 이재성, 한국분말야금학회 춘계학술대회발표, 1997년 4월18일. 서울.