

Heat Sink용 분말재료의 현황 및 전망

홍성현 · 김용진 · 정형식*

한국기계연구원 재료연구부, *이주대학교 공과대학 화공 및 재료공학부

1. 서 론

최근 정보 통신 및 전자 산업의 발달에 따라 전자 부품의 각종 소자가 고집적화, 고성능화 및 소형화가 요청되고 있다. 국내의 메모리 반도체 등 특정 기술은 선진국보다 우수한 기술적 수준에 도달하고 있으며, 전자 부품 및 관련 소자 기술은 세계적으로 선도 기술의 위치를 확보할 수 있는 유망한 기술 분야이다. 이를 위해 국내 반도체 및 관련 전자부품 산업체에서는 대규모의 시설과 연구투자가 진행되어 왔으며, 국제 경쟁도 치열해지고 있다. 그러나 국내기술이 세계기술을 선도하기 위해서는 각종 소자의 성능 향상과 고부가가치화가 요구되고 있다. 이를 위해서는 소자의 고집적화, 고속도화와 소형화가 필수적이며 기존 메모리 반도체 위주의 대량생산체제에서 비 메모리 반도체 제조분야로 사업 영역도 확대 되어야 한다.

각종 반도체 소자의 고집적화와 소형화는 소자의 단위 면적당 발생하는 열량의 증가를 가져오며 작동 중에 열이 적절하게 발산되지 않을 경우에는 소자의 성능이 급격히 저하되며 수명도 크게 감소한다. 또한 고집적 반도체 소자와 패키지(package)사이의 열팽창 차이로 인해 열응력이 반복적으로 가해져서 solder 등의 접합부나 소자가 열적 피로에 의한 손상이 될 수 있다. 실제로 반도체 소자의 불량률 중 70~75%가 열적인 문제에 의해 발생되고 있다. 따라서 각종 고집적 반도체 소자 등에서 발생하는 열을 최대한 방출시키고 이로 인해 발생하는 열적인 문제점을 최소화하기 위해 heat spreader 및 chip carrier등의 heat sink부품을 반도체 칩 또는 세라믹기판 등에 부착하여 각종 소자에서 발생하는 열을 최대한 방출시키고 있다.

본 고에서는 반도체 등 각종 전자부품용 소자에서 발생하는 열을 방출시키기 위해 사용되고 있는 각종

heat sink 소재 및 그 특성, 문제점을 소개하고 향후 heat sink 소재로서 수요가 급격히 증가될 것으로 예상되는 분말복합재료의 국내외 개발 현황 및 전망에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 전자 부품용 Heat Sink 현황

인텔사의 개인용 컴퓨터 MPU(Micro-Processor Unit)모델의 경우, 1995년 이전에는 5~10W 수준에 불과하던 열량이 1996년에는 13~16W 수준으로 증가하였고 1997년에는 34W, 현재에는 모델의 성능에 따라 20~40W 수준에 이르고 있다. 한편 현재 가장 보편적으로 사용되고 있는 Pentium III, 500+ MHz MPU의 경우 약 30~35W 수준의 열량이 발생되고 있으며 이 열량은 처리속도가 기가 Hz인 MPU의 등장으로 50~70W 수준으로 증가될 것으로 예상된다. 일반적으로 반도체 소자의 온도 증가에 따라 소자의 수명이 급격히 감소한다. Si나 GaAs계 반도체 소자의 경우에는 사용온도가 10°C 증가됨으로서 그 수명은 70~75% 감소된다.

현재 반도체 소자에서 발생하는 열을 방출하기 위한 방법으로 그림 1과 같은 대표적인 방법을 사용하고 있다. 상향식의 경우 열방출을 위한 heat sink는 다이의 밑 부분에 부착되고, 하향식의 경우에는 다이의 윗부분에 부착된다. 그림 1(c)는 하향식에서 heat sink가 부착된 208핀 PQFP(Plastic Quad Plat Pack)의 실제모양을 나타낸다.

현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 heat sink소재는 Cu나 Al이다. 이들 금속은 열방출 능력은 크지만 열팽창 계수가 Si나 GaAs계열의 반도체 소자에 비해 3~6배 정도 높아 소자에 직접 접합시키지 못하는 단점이 있다. 그러나 메모리 반도체나 일반적인 성능의 각종 소자에는 큰 문제점이 없이 사용되고 있다. 또한 패키징 소재로는 Kovar(Fe-29Ni-17Co)나

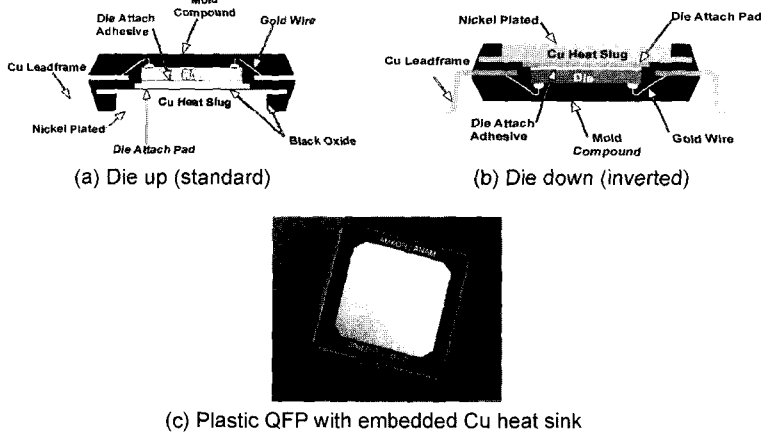


Fig. 1. 반도체 패키징의 개략도(a, b) 및 형상(c).

Table 1. 현재 사용 중인 반도체 소자 및 패키징 관련 소재 특성

Materials	Density (g/cm ³)	Thermal Expansion (ppm/K)	Thermal Conductivity (W/mK)	Elastic Modulus (MPa)
Silicon	2.3	4.1	150	113
GaAs	5.2	6.5	54	100
Alumina	3.9	6.7	20~30	350
AlN	3.3	5.8	250	345
Al	2.7	24	230	69
Cu	8.9	17	400	131
Invar	8.0	0.4	11	144
Kovar	8.3	5.9	17	131
Gold	19.3	14	316	79
Silver	10.5	19	431	76
Epoxy	1.2	60	0	0.1

Invar(Fe-36Ni)를 주로 사용하고 있는데 열팽창 계수는 매우 낮지만 열방출 능력도 매우 낮은 단점이 있다. 표 1은 현재 일반적으로 사용되고 있는 반도체 패키징 관련 소재의 밀도, 열팽창계수, 열전도도 및 탄성계수를 나타낸다.

표 1에서 나타낸 각종 전자 패키징용 소재의 물리적 특성에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 소재의 순도이다. 특히 열전도도는 소재의 순도에 따라 표 1에 제시된 값보다 50% 이상 낮아질 수 있다. Kovar와 Invar와 같은 패키징 재료는 각각 5.8 ppm/K, 0.4 ppm/K의 낮은 열팽창 계수를 가지지만 열전도도도 각각 17W/mK, 11W/mK로 매우 낮음을 알 수 있다. Cu, Ag 및 Au와 같은 금속소재는 열전도도가

316~431W/mK로 매우 높아 heat sink소재로서 적절하지만 열팽창계수가 다이소재인 Si나 GaAs에 비해 최소 2배 이상 높기 때문에 고성능 소자용 heat sink 소재로서는 많은 문제점을 가지고 있다. 한편 소재의 탄성계수는 각종 열에 의해 부품 상호간의 접촉면에서 발생하는 계면응력과 이에 따른 부품의 변형 정도를 예측하고 설계에 반영하는데 매우 중요한 역할을 한다.

반도체 소자의 열방출을 최대화시키기 위해서 가장 효과적인 방법은 heat sink 소재를 소자에 직접 접합시키는 것으로 이를 위해서는 heat sink 소재의 열팽창 계수가 반도체 소자와 유사해야만 사용 시 열응력에 의한 소자의 손상을 막을 수 있다. 그러나 현재 heat sink로 사용되고 있는 Cu나 Al의 경우, 열팽창 계수가 다이 소재와 크게 차이가 나기 때문에 이와 같은 방법으로 접합시킬 수 없는 실정이다. 따라서 이와 같은 열방출 문제를 해결하기 위해 관련 업계에서는 크게 두가지 방법으로 접근하고 있다. 한가지 방법은 heat sink 소재나 패키징의 설계를 최적화하여 열방출량을 최대화하는 방법으로 현재 사용 중인 소재를 이용하여 할 수 있는 가장 손쉬운 방법이다.

열방출을 최대화시키기 위해 heat sink 부품의 표면적을 최대한로 하거나 열발산에 유리한 모양으로 설계하는 것이 필요하며 보다 근본적으로는 고효율 heat sink용 소재의 개발이 필요하게 된다. 즉, 기존의 Cu나 Al 소재 대신에 새로운 소재를 사용하여 제조하는 것이다. 새로운 heat sink 소재로서 갖추어

야 할 특성은 다음과 같다.

- 1) 방열성을 최대화시키기 위해 열전도도가 높아야 한다.
- 2) 열적 특성의 차이로 발생하는 여러 가지 문제점을 최소화시키기 위한 반도체 소자와 유사한 열팽창 계수를 가져야 한다.
- 3) 경량화를 위해 소재의 밀도가 가능한 낮아야 한다.
- 4) 열적응력에 의한 부품의 변형을 최소화하기 위해 높은 강도 및 탄성계수가 요구된다.
- 5) 제조 비용이 가급적 저렴해야 한다.

금속기지 복합재료(metal matrix composites; MMCs)는 높은 열전도성을 가진 금속과 낮은 열팽창성을 가진 강화재를 상호 조합시킴으로서, 재료의 물리적 특성을 인위적으로 조절할 수 있는 장점이 있기 때문에 이러한 특성에 가장 근접할 수 있는 소재로서 많은 주목을 받고 있다. 이 중 W/Cu 및 SiC/Al 복합재료는 상용화에 가장 근접한 소재로 미국 등에서는 부분적으로는 heat sink 소재로 사용되고 있다. 이들 복합재료는 지금까지 많은 연구가 진행되어온 구조용 복합재료의 개념과는 달리 강화재의 양이 최소 40 vol%이상의 고 부피분율을 요구하기 때문에 일반적인 용해, 주조공정으로는 제조할 수 없다. 따라서 near net shaping이 가능하고 고 부피분율의 복합재료를 제조할 수 있는 분말야금공정을 이용하여 이러한 복합재료를 제조하는 것이 현재로서는 가장 경제 적이며 적절한 방법으로 알려져 있다.

3. Heat Sink에 사용되는 분말 복합재료의 현황

3.1. SiC/Al 복합재료

SiC/Al 복합재료는 W/Cu에 비해 밀도가 1/6 수준

에 불과하고, 재료비가 낮은 장점으로 인해 항공기, 방산용 및 휴대용 전자부품 등 무게를 중요시하는 전자부품의 heat sink 소재로서 부분적으로 응용되어지고 있다. 그러나 heat sink용 소재로 응용되기 위해서는 SiC의 부피분율이 최소 60% 이상이어야 하며, W과는 달리 SiC와 Al용탕은 젖음성이 없기 때문에 일반적인 함침법으로는 제조하기가 힘들다는 어려움이 있다. 따라서 일반적인 제조공정은 SiC분말을 이용해 골격체를 제조한 후 Al용탕을 가압하여 함침하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 미국의 Lanxide사에서 Al용탕 성분제어와 적절한 함침온도 및 분위기 조절을 이용하여 무가압 함침공정을 개발, 특허화 하였으며 이로 인해 heat sink용 SiC/Al복합재료 제조 분야에서는 매우 독보적인 위치를 차지하고 있다. 이외 미국의 Advanced composite material사, Ceramic process system사 등에서 가압함침법에 의해 SiC/Al 복합재료를 제조하고 있다. Al과 SiC의 원소 분말을 볼밀링/성형/소결에 의하여 SiC/Al 복합재를 제조하는 연구도 시행되었으나, 일반적인 소결법으로 기공이 없고 높은 체적 분율을 갖는 SiC/Al 복합재를 제조하기는 매우 어려운 것으로 알려져 있다.

표 2는 미국의 Ceramic process system사에서 시판 중인 SiC/Al 전자 패키징 소재의 기본특성을 나타낸 것이다. W/Cu복합재료와는 달리 열전도도는 SiC함량에 따라 큰 변화가 나타나지 않고, 열팽창계수는 SiC함량에 비례하여 변화되어진다. 사출성형에 의하여 그림 2(상부)와 같은 SiC 성형체를 먼저 제조하고 알루미늄을 용침후 그림 2(하부)와 같은 용침된 SiC/Al 복합재료 판이 제조되고 Ni-Au 도금을 하여 HDI(High-Density Interconnect) microwave MCM

Table 2. SiC/Al복합재료의 특성(미국의 Ceramic process system사)

Materials	Density (g/cm ³)	Thermal Expansion (ppm/K)	Thermal Conductivity (W/mK)	비고
AlSiC7 (Packaging)	3.0	6.9	150	Si device에 잘 부합
AlSiC8 (Packaging)	3.0	7.63	180	
AlSiC9 (Packaging) (63 vol% SiC)	3.0	8.26	180	GaAs이나 alumina와 잘 부합
AlSiC10 (Packaging)	3.0	9.89	165	인쇄회로기판(높은 열팽창계수)에 부착되는 방열 lids
Si (IC)	2.3	4.2	151	-
GaAs (IC)	5.23	6.5	54	-
Alumina(substrate)	3.98	6.5	20-30	-

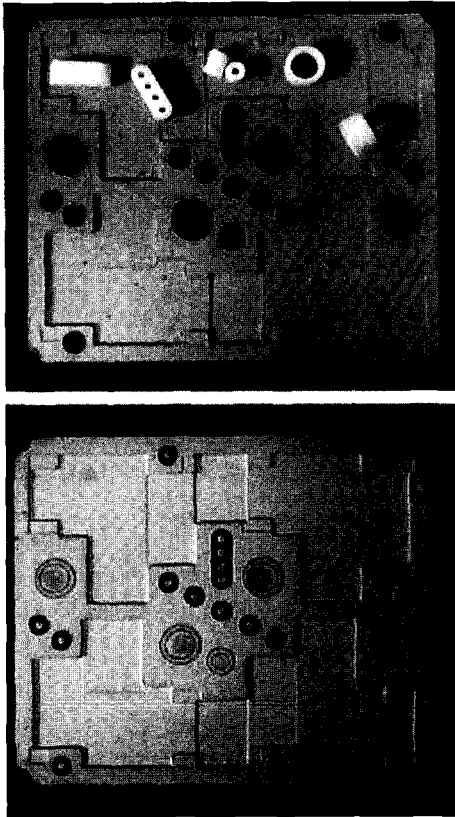


Fig. 2. HDI microwave module용 SiC 성형체(상) 및 Al 용침후 Ni-Au 도금된 MCM(하).

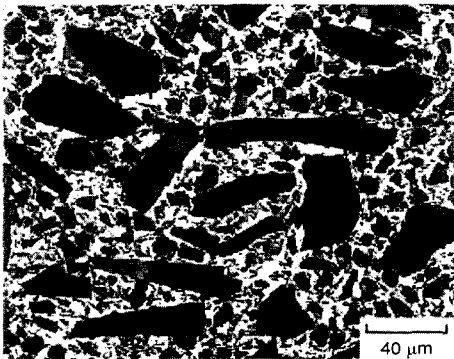


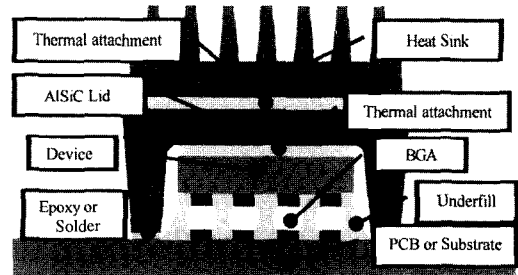
Fig. 3. SiC/Al계 복합재료(grade: Al/SiC9)의 미세조직.

패키지용 제품을 제조할 수 있다. 그림 3은 대표적인 SiC/Al 복합재료의 미세조직이다. 흰색으로 보이는 Al 금속 기지에 수십 μm 크기의 SiC 입자들과 그보다 작은 SiC 입자들이 균일하게 분산된 조직을 보여준다.

그림 4a와 b는 각각 SiC/Al 복합재료 하우스징



(a)



(b)

Fig. 4. SiC/Al복합재료 하우스징(housing)을 사용한 (a) power module과 (b) Microprocessor assembly.

(housing)을 사용하여 조립된 Motorola사의 power module 및 Microprocessor assembly의 예를 나타낸다.

국내의 경우 KAIST에서 가압함침공정 및 분말야금 공정을 이용해 전자 패키징용 SiC/Al 복합재료 개발 연구를 수행하였으며 최근 한국기계연구원에서 용사법에 의한 대면적의 SiC/Al 박판 제조에 관하여 연구중이다.

3.2. W-Cu 및 Mo-Cu계 복합재료

금속복합재료를 전자 패키징의 heat sink 부품으로 응용하기 위한 연구는 1990년 초 W/Cu계 복합재료를 시초로 현재까지 Cu 및 Al을 기지로 한 많은 복합재료들을 대상으로 연구가 진행되고 있다. W/Cu계 복합재료는 지난 20년 동안 전기접점재료로서 연구 개발 및 상용화되어 왔다. 이 복합재료는 W의 낮은 열팽창계수(4.5 ppm/K)와 Cu의 높은 열전도도를 조합시켜 heat sink 소재로 응용하는 것으로 분말을 성형 후 액상소결에 의해 제조하는 방법이나 W분말을 성형, 소결하여 W골격체를 제조한 후 Cu의 함침에

Table 3. Heat sink용 W/Cu 및 Mo/Cu 복합재료의 특성 (미국의 Ametek 사)

Materials (wt%)	Density (g/cm ³)	Thermal Expansion (ppm/K)	Thermal Conductivity (W/mK)
90W-10Cu	17.0	6.5	175
88W-12Cu	16.9	6.8	180
85W-15Cu	16.4	7.4	185
85Mo-15Cu	10.01	7.0	165

의해 제조하는 방법을 주로 사용하고 있다. 현재는 미국의 Ametek, Polese, 일본의 Sumitomo 등에서 합침공정을 이용해 제조하고 있다.

표 3은 미국 Ametek사에서 시판 중인 W/Cu계 복합재료의 주요 특성을 나타낸다. 일반적으로 W/Cu계 복합재료에서 열팽창 계수는 W함량의 증가에 비례하게 감소하며, 열전도도는 복합재료에 함유된 불순물량과 잔류기공의 양에 크게 의존되어지기 때문에 제조회사에 따라 열적 특성이 다소 차이가 있다. 그림 5는 일본의 Matsushita사에서 제조된 GaAs용 고성능 반도체 패키지를 나타낸 것으로 heat sink부품을 W/Cu 복합재료로 사용하여 44W까지 열방출이 가능하도록 제작되었다.

Mo-Cu계 합금은 W-Cu계 합금에 비하여 열전도성이 유사하면서 단위부피당 중량이 작으므로 이를 이용한 응용 제품이 외국에서는 일부 상품화되어 있으나 국내에서는 전혀 연구가 되어 있지 않다.

한편 국내에서는 한양대를 중심으로 W 및 Cu 분말의 기계적 합금화, W 산화물과 Cu 산화물의 고에너지 밀링/환원에 의한 heat sink용 W-Cu계 복합

분말의 제조, 관련 분말의 사출 성형에 관한 연구가 체계적으로 장기간에 걸쳐 진행되어 왔다. 또한, KIST에서는 용침법에 의한 W-Cu 제품을 제조하는 기술을 개발하였고 RIST에서는 near net 부품을 제조할 수 있는 W/Cu의 분말사출 성형기술을 중점적으로 개발하였다. 2-3군데의 중소기업에서 W/Cu heat sink 제품을 일부 생산하거나 사업화를 검토하고 있으나 매출 실적은 현재 미미한 수준이다. 최근, 한국기계연구원과 (주)나노테크는 금속염 수용액의 분무건조/하소/환원공정에 의하여 소결성이 양호하고 전기전도성 및 열전도성이 우수한 heat-sink용 W/Cu계 복합 분말 및 관련 판재 제조 기술을 공동으로 개발하여 사업화 추진중이다.

국내의 heat-sink W/Cu 소재 기술의 연구 수준은 세계의 상위이나 국내 시장이 아직은 작고 패키지화 기술도 부족한 실정이다. 관련업체에서 지속적인 시장 조사, 용도 개발, 수요처 발굴등을 통하여 응용 제품을 상품화하는 노력을 기울여야 한다. 제품화 및 패키지화에 대한 지속적 기술 개발이 분말제조업체, 사출성형업체, 소결업체, 가공업체, 도금업체, 브레이징업체, 수요업체등의 상호간 기술교류를 통하여 이루어져야 한다.

3.3. 차세대 유망 복합재료

위에서 언급된 W/Cu 보다 밀도가 낮고, 경제적이면서 SiC/Al 복합소재보다 열전도도가 높은 새로운 차세대 heat sink용 분말복합소재를 개발하고자 하는 연구가 미국, 일본, 대만 등 반도체 및 패키징 제조 기술을 보유한 국가에서 기초 연구단계로 수행되고

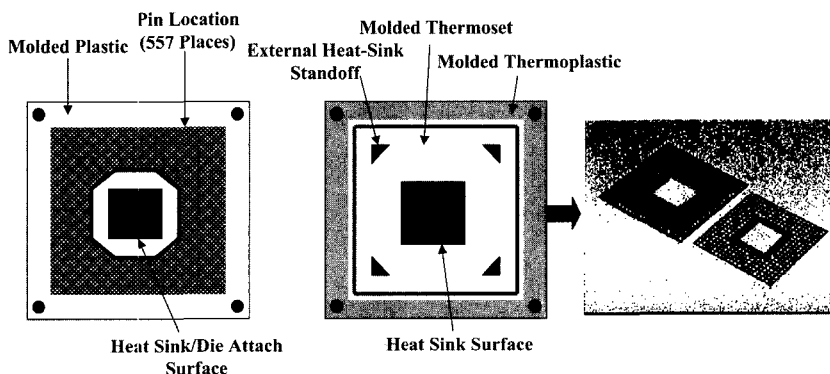


Fig. 5. W/Cu를 Heat sink로 사용한 예(GaAs 게이트 배열을 위한 반도체 패키지, Die Pad: W-Cu, 발산열: 최고 44 W).

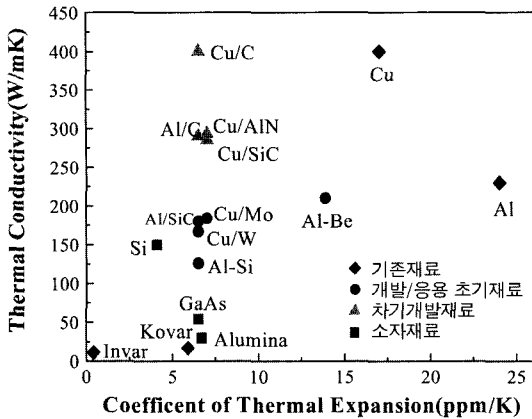


그림 6. 반도체 소자 및 heat sink 관련 소재의 열특성 비교.

있으며 국내에서도 한국기계연구원, 아주대학교, KAIST 등에서 연구가 진행되고 있다.

그림 6은 지금까지 언급된 반도체 소자 및 heat sink 관련 소재의 열특성을 사용현황을 재료별로 구분하여 나타낸 것이다. 이중 차기 heat sink용 개발 재료는 현재까지 신뢰성 있는 연구결과가 발표되지 않았기 때문에 관련 model식을 적용하여 이론적으로 계산된 값을 나타낸 것이다.

현재 중점적으로 주목을 받고 있는 복합재료는 SiC/Cu, AlN/Cu, Cu/C 등 Cu를 기지로 하여 열팽창 계수가 낮은 SiC, graphite 또는 fiber, 탄소나노튜브 등을 강화재로 한 복합재료이다. 최근, 한국기계연구원과 아주대에서 분말야금 및 냉간압연 공정에 의하여 적절한 열팽창계수(8-9 ppm/°C)를 갖으면서 열전도도성(233-268W/mK)이 우수한 Cu-SiC (40-50 vol%) 복합재료 판재(1 mm 두께)를 실험실적 수준에서 개발하였다.

또한, Al 기지에 탄소를 강화재로 한 Al/C 복합재료, AlN/Al 복합재등도 주목받을 수 있는 재료이다. 그러나 이들 재료들은 SiC/Al 복합재료의 경우와 같이 기지와 강화재 사이가 젖음성이 없기 때문에 액상소결, 단순함침 등 일반적인 소결기술로는 고밀도화된 소결체를 제조하는 것이 어렵다는 기술적인 문제점을 가지고 있다. 따라서 치밀화가 용이한 복합분말 및 고밀도화하는 기술 개발, 강화재와 기지와의 접합력 향상 방안, 강화재의 방향성/크기/분포 조절기술등이 연구되어야 한다. 특히, 새로운 소결기술의 개발이나 보다 경제적으로 진밀도를 얻을 수 있는 소

결 후공정기술을 개발하는 것이 향후 SiC/Cu 등 차세대 heat sink 복합재료를 상용화하기 위해서 시급히 해결해야 할 과제이다.

한편, 미국의 Brush Wellman에서는 특이한 조성의 BeO-Be계 복합소재를 개발하였다. E60 [60BeO-40% Be, 2.52 g/cm³, 6.1 ppm/°C, 230W/mK], E40 [40% BeO-60%Be, 2.3 g/cm³, 7.5 ppm/°C, 220W/mK], E20 [20%BeO-80%Be, 2.06 g/cm³, 8.7 ppm/°C, 210W/mK]과 같은 가볍고 열팽창계수도 작고 열전도성이 우수하며 탄성율(303-330 GPa)도 높은 특이한 소재는 AuSn과 AuGe등과 같은 브레이징/솔더링온도에서 잘 견디는 장점도 보유하고 있으며 진동이 심한 응용분야에 기대된다.

3. 향후 전망

지금까지 heat sink 관련 소재의 개요, 제조공정, 연구개발동향 등에 대해서 살펴보았다. 그러나 이러한 heat sink 소재를 고집적 반도체 소자, 고풍출력 powder module, RF부품 등에 응용하기 위해서는 앞에서 언급된 열적 및 기계적인 기초특성 외에 Ni이나 Au 등을 표면에 코팅하기 위한 코팅성, 이종 소재와의 접합성, microwave 흡수성, 판재의 평탄도, 치수 정밀도 등 다른 여러 가지 특성도 동시에 요구된다. 또한 제조원가도 가장 고려해야 할 사항 중에 하나이다.

Heat sink용 분말복합재료의 현재 국내 수요는 미미한 수준이지만 그 수요량이 매년 12% 이상 증가될 것으로 예측되고 있고, 각종 반도체 및 통신용 부품의 고성능화에 따라 응용분야도 향후 크게 다양화될 것으로 예측되어진다. 이를 대비하기 위한 향후 연구개발 방향은 W/Cu, SiC/Al 등 기존 개발중인 재료의 제조공정을 확립시키고 경제성을 향상시켜 조기에 상용화시키는 방향과 C/Cu, SiC/Cu, Al/C 등 기존 개발중인 재료보다 값싸고 우수한 특성의 새로운 소재를 개발하는 방향 등 크게 두가지로 진행되어야 할 것이다. 또한 heat sink용 복합재료는 현재 우리나라가 다른 나라에 비해 기술적으로 우위를 확보하고 있는 전자 및 반도체 산업과 직접적인 연관을 가지고 있기 때문에 연구개발의 결과에 따라 세계적으로 선도기술을 보유한 국가로 부상할 가능성이 높은 분야일 것으로 예상된다.

참고 문헌

1. 이재성 : 한국분말야금학회지, **4** (1997) 1.
2. 이효수, 홍순형 : 재료마당, **14** (2001) 18.
3. 나노테크(주), Home page; <http://www.nanopowder.co.kr>
4. Lanxide Elec. Components, Inc, Home Page; <http://www.lanxide.com>
5. Cera. Pro. Sys. Co., Home page; <http://www.alsic.com>
6. Ametek, Home page; <http://www.ametek84.com>
7. Sumitomo electric, Home page; <http://www.sumitomo-electricusa.com>
8. Polese, Home page; <http://www.polese.com>
9. Brush Wellman : Metal Powder Report, **June** (1998) 24.
10. K. V. Sebastian : Int. J. Powder Met. and Powder Tech., **17** (1981) 297.
11. R. M. German, K. F. Hens and J. L. Johnson : Int. J. Powder Metall., **30** (1994) 205.
12. J. L. Johnson and R. M. German : Metall. Trans. **24A** (1993) 2369.