



고출력 전자패키지용 방열소재기술

한병동 · 고재웅 · 김영국 (재료연구소 분말/세라믹연구본부)

1 서론

근래 우리 일상생활 주변에 스마트폰이나 태블릿 PC를 비롯한 다양한 디지털 전자기기들이 생활필수품으로 자리잡고 있으며, 최근 들어서는 디바이스 컨버전스라 하여 다양한 기능의 디바이스들이 하나의 디바이스로 통합되는 경우도 많이 살펴볼 수 있다. 이러한 전자기기의 발전은 근본적으로 반도체 고집적화 기술 발달에 의한 것이다. 하지만, 고집적화 기술은 필연적으로 전자기기의 수명단축과 성능저하, 고장 등의 주된 원인이 되는 열을 발생시키기 때문에 열을 외부로 효과적으로 배출시킬 수 있는 방열기술이 큰 이슈가 되고 있으며, 미래의 전자기기들이 보다 경박단소, 다기능화될 것으로 예상되기 때문에 열관리기술의 필요성과 중요성이 점점 더 커질 것으로

보인다[1].

1960년 중반, 인텔의 공동설립자인 고든 무어는 반도체 집적회로의 성능이 18개월마다 2배로 증가한다는 경험적인 법칙을 발표하였고, 이후 2001년 인텔의 부사장인 패트릭 겔싱어는 무어의 법칙이 실리콘을 기반으로 하는 모든 소자에 확장적용이 가능하다고 선언하였다[2]. 겔싱어는 무어의 법칙에 따라 전자패키지가 고출력, 고집적화됨에 따라 단위면적당 발열량이 급격하게 상승하여 결국 로켓노즐이나 태양 표면과 유사한 발열량을 가져 열이 프로세서의 혁신을 막는 장벽이 될 것이라고 예상한 바 있으며, 실제로 현재 시판중인 LED 패키지나 IGBT 전력반도체 패키지의 경우, 발열량이 핵반응로와 유사하며, 향후 보다 고출력, 고집적화가 이루어짐에 따라 발열량이 더 높아질 것임을 쉽게 예상할 수 있다.

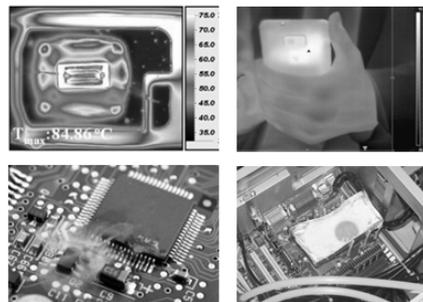
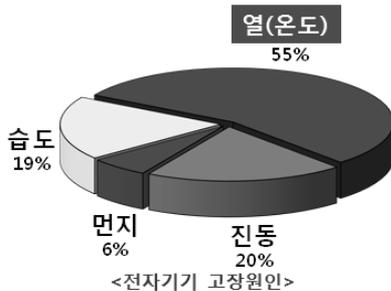


그림 1. 전자기기의 고장원인과 발열문제

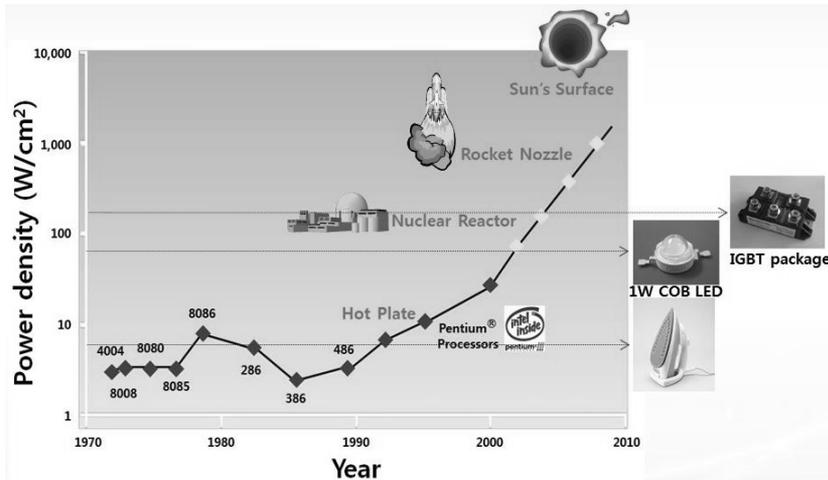


그림 2. 연도별 단위면적당 발열량 변화 추이

이와 같은 이유로 예전부터 방열을 위해 많은 방법들이 시도되었지만, 주로 열설계나 구조설계를 통해 열방출을 도모하는 경우가 많았다. 하지만, 모듈이나 디바이스의 열밀도는 갈수록 높아지는 반면에 구조적인 열적설계를 통해 이를 해결할 수 있는 여지는 점점 줄어들고 있기 때문에 우수한 열방출 특성을 가지는 새로운 고방열소재의 개발 요구가 점점 커지고 있는 실정이다.

또한, 가치사슬지도를 통해 우리나라 방열소재산업의 특성을 고찰해보면, 세라믹, 고분자 등의 원료분말은 전량 수입되고 있으며, 중간단계인 방열소재 또한 원천기술의 부족으로 미국, 일본, 독일 등의 기술선진국으로부터 수입에 의존하고 있다. 따라서 국내의 패키지, 모듈업체에서 다양한 방열제품을 생산하고 있지만, 핵심부품을 수입하여 이를 단순히 조립하는데 그치는 경우가 많아서 전체적으로 국산화율이 매우 저조하고 대외무역역조가 심각하여 핵심방열소재의 원천기술 확보가 매우 시급한 상황이다.

본고에서는 대표적인 발열패키지인 LED와 전력반도체에 공통적으로 적용이 가능한 절연기판과 열계면소재를 고방열을 위한 핵심요소기술로 선정하였고,

세부적으로는 고방열 세라믹 절연기판, 고열전도 세라믹 절연 후막, 유·무기 복합 열계면소재 기술을 소개하고 이들 기술의 국내외 연구현황을 살펴보고자 한다.

2. 고방열 세라믹 기판 기술

전자패키지용 기판은 그림 3과 같이 그 위에 각종 전자부품을 실장하여 이를 기계적으로 고정시키고, 기판 표면 혹은 내부에 회로를 형성하여 기판 위에 실장된 전자부품을 전기적으로 연결하여 이를 동작시키는 역할을 하는 필수적인 기능성 부품이다. 기판소재는 기본적으로 열적, 전기적, 기계적으로 안정해야 하므로 종래에는 우수한 절연성 및 성형성을 가지는 폴리이미드계 수지, 플루오르계 수지 등의 고분자소재가 주로 사용되었으나, 고분자소재의 경우 열전도도가 매우 낮기 때문에 방열 특성이 열악하다는 단점이 있어 최근에는 절연처리를 한 금속이나 고열전도 세라믹 소재 기판이 많이 사용되고 있다.

세라믹 소재는 금속에 비해 우수한 전기 절연성을 가지고, 고분자보다 열전도도가 높으며 Si와 열팽창

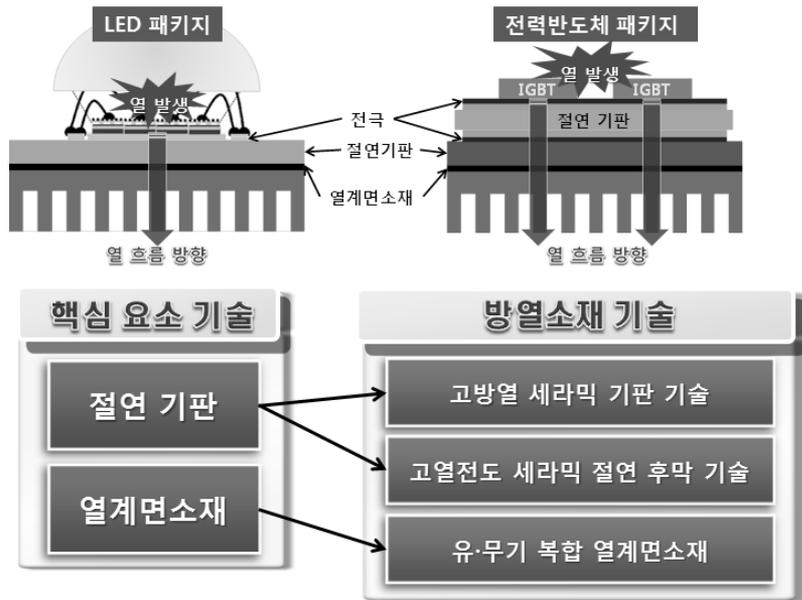


그림 3. LED, 전력반도체 패키지용 핵심방열소재 기술

계수가 유사하여 기판위에 반도체 칩을 직접 장착할 수 있다는 장점이 있어 고출력 고방열 디바이스의 고방열 기판으로 사용되기에 매우 적합한 소재이다. 특히, 최근 전자부품의 고성능, 다기능화 및 고집적화에 따라 반도체 칩에서 발생하는 열의 밀도가 급속히 높아지고 있으며, 향후 이러한 추세가 더욱 심각해 질 것으로 예상되기 때문에 고방열 세라믹 절연기판 소재의 필요성이 더욱 절실해질 것으로 보인다.

기존에 가장 널리 사용되고 있는 고열전도 세라믹 기판소재는 질화알루미늄(AlN)이다. AlN은 알루미늄나(Al₂O₃)에 비해 약 9배 높은 열전도도를 가지며, 이와 동시에 10¹⁴Ω·cm의 높은 전기 절연성을 나타내어 고열전도성 세라믹스가 적용되는 반도체용 기판이나 부품, 고출력 LED 패키지 등 다양한 분야로의 적용이 확대되고 있다. 그러나, AlN은 높은 열전도도에 비해 기계적 물성이나 화학적 안정성이 취약하여 최근에는 고열전도도를 가지는 질화규소(Si₃N₄) 소재에 대한 관심이 점차 높아지고 있다. 질화규소 세라

믹스는 상대적으로 낮은 열전도도에도 불구하고 높은 열적, 기계적 특성을 겸비하여 디바이스의 장수명화 및 신뢰성 향상에 유리한 것으로 알려져 있다.

고열전도도 질화규소 소재는 일본의 연구소(AIST)와 기업(Nissan, DKK) 주도 하에 1990년대 중반부터 연구결과가 보고되고 있다. AIST는 “93mol% Si₃N₄ - 2mol% Y₂O₃ - 5mol% MgO” 조성으로 97W/m·K의 열전도도를 얻었으며[3], Nissan은 “97mol% Si₃N₄ - 0.5mol% Y₂O₃ - 0.5mol% Nd₂O₃ - 2mol% MgO” 조성의 최소한도의 소결조제만으로 128W/m·K의 열전도도를 발표한 바 있다[4]. 그리고, DKK는 Si₃N₄ 출발원료의 입도 분포를 조절함으로써 고열전도도와 기계적 특성을 동시에 고려한 질화규소 기판 소재를 개발했다고 보고한 바 있다[5]. 이상의 질화규소 개발은 출발원료로 Si₃N₄ 분말을 사용한 통상소결법의 결과이며 2004년 이후 AIST에서는 출발원료로 Si를 사용한 반응소결질화규소 연구를 집중적으로 수행하여 실험실

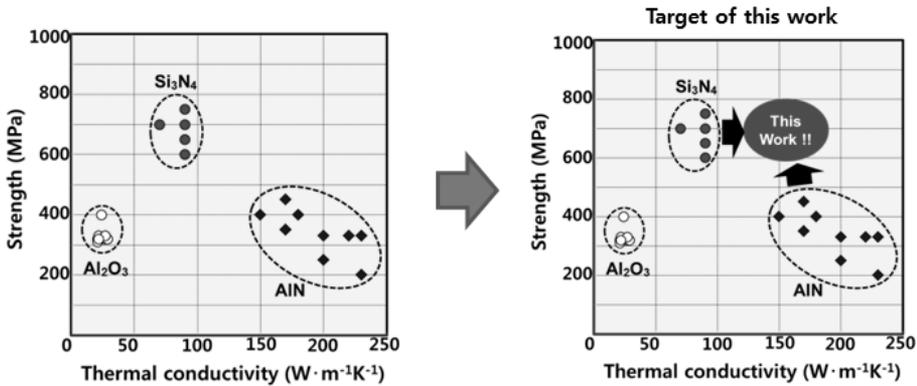


그림 4. 상용 세라믹 기판의 강도와 열전도도 간의 관계 및 최근 연구 개발 방향(7)

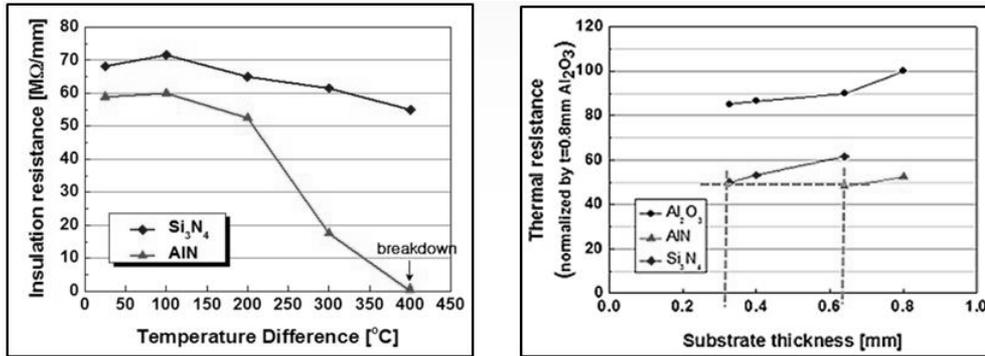


그림 5. Si₃N₄ 기판과 AlN 기판의 열저항 비교

규모의 연구에서 보고된 최고치인 177W/m·K를 나타내는 질화규소 기판 소재를 개발한 바 있다(6).

1980년대부터 현재에 이르기까지 고열전도율 세라믹 소재의 연구는 주로 AlN에 한정되었으며, 국내의 질화규소 기판 관련 연구는 세라믹 복합재료의 하나로 Si₃N₄ 미세분말의 합성이나 마모 특성 연구가 대부분이며 서울 반도체에서 2006년 출원한 고풍력 발광다이오드 패키지에 사용되는 재료는 Al₂O₃, SiC, AlN이며, 고열전도도 Si₃N₄에 관한 연구는 별로 이루어지지 않고 있다. 또한, 현재까지는 국내 산업 현장에서 기계적 물성이 고려된 고열전도도 세라믹 소재의 필요성이 직접적으로 요구되지 않은 것에

기인하여 연구기관 및 기업체에서도 질화규소 기판에 관한 연구는 최근까지도 수행된 실적이 없으며, 최근 2~3년 전부터 국내에서는 유일하게 재료연구소에서 반응소결법에 의한 고열전도율 질화규소 소재 개발에 관한 연구를 수행하고 있다.

재료연구소에서는 출발원료 Si의 순도 및 크기와 희석제 Si₃N₄의 첨가가 반응소결질화규소의 소결밀도 및 열전도율에 미치는 영향을 분석하는 시드형 연구를 수행하여 일본의 AIST 연구실에 의한 결과와 유사한 특성을 나타내는 소재를 개발하는데 성공하였으며, 현재 AIST 연구실 대비 70% 정도의 기술 수준을 가지고 있다고 평가되고 있다.

3. 고열전도 세라믹 절연 후막 기술

종래의 세라믹 기판 패키지의 경우, 세라믹 기판과 히트싱크를 서로 접합시키기 위해 계면접착물질 (Thermal Interface Materials, TIM)이 반드시 필요하며, TIM의 낮은 열전도도로 인해 전체 패키지의 열저항이 높아지는 문제가 발생한다. 세라믹 후막 패키지는 금속 히트싱크 표면에 고열전도를 가지는 세라믹 절연층을 직접 형성시킨 것으로서, TIM이 필요 없으므로 공정이 단축되고 열저항이 크게 감소하는 장점이 있다.

고열전도 세라믹 절연층으로 가장 널리 사용되고 있는 소재는 AlN으로서, 기존에 AlN 코팅층 형성을 위해 CVD, PVD, reactive sputtering 등의 박막 공정과 plasma spraying과 같은 후막 공정이 주로 많이 사용되었으나, AlN 박막 코팅층의 경우 고전압이 인가되는 응용분야에 사용이 불가하며, plasma spraying은 후막 형성 공정으로 매우 적합하지만, 높은 공정 온도로 인해 AlN이 열분해되거나 산화되어 열전도도가 크게 저하된다는 문제점이 있다[8].

최근 일본 Toyohashi University of Technology에서는 기존 plasma spraying 공정의 문제점을 보완하여 고순도의 AlN 후막 코팅층을 제조하기 위해 reactive plasma spraying 공정을 개발하였다[9]. 이 공정은 수소/질소의 환원가스 분위기에서 알루미늄(Al) 분말을 용사함으로써 Al의 질화반응을 통해 코팅과 동시에 AlN 후막코팅층을 형성하

는 방법으로 Al의 산화로 인한 Al₂O₃상의 형성을 억제할 수 있다는 장점이 있으나, Al 분말의 비행 도중 질화반응을 제어하기가 쉽지 않기 때문에 코팅층 내에 미반응된 Al이 잔존하기 쉽고, 원하는 두께를 얻기가 어렵다는 단점이 있다.

현재 고순도 AlN 세라믹 절연 후막을 형성하기 위해 가장 적합한 코팅 기술은 상온 분말 분사 코팅의 일종인 에어로졸 대포지선(Aerosol Deposition: AD) 공정이다. 일본 AIST에서는 AD 공정을 사용하여 AlN 코팅층을 형성하는 연구를 진행한 바 있다 [10]. AD 공정은 상온에서 코팅층 제조가 이루어지기 때문에 이전의 후막형성기술과는 달리 고순도 AlN 코팅층 형성이 가능하다는 장점이 있으나, AIST에서 발표한 결과로는 AlN 코팅층의 최대 두께가 10 μ m에 불과하며, 이 경우 얇은 두께로 인한 낮은 내전압성 때문에 고전압이 요구되는 전자패키지에 사용이 불가하다.

최근, 영국의 Cambridge Nanotherm사는 Al 히트싱크 표면을 Anodizing함으로써 Al 히트싱크 표면에 수십 마이크론 두께의 Al₂O₃ 산화 피막을 형성시키는 COH (Chip on Heatsink)를 개발하였다 [11]. Al 히트싱크 위에 계면접착물질 없이 세라믹 절연층을 형성시킴으로써 공정의 간소화, 열저항 감소 등의 장점이 있으나, Al₂O₃ 절연층의 열전도도가 매우 낮고(Nanotherm 제공 열전도도 : 5~7.2W/m·K), Anodizing에 의해 형성된 Al₂O₃ 절연층의 특성상, 내전압이 낮고 균일성이 떨어지는 단

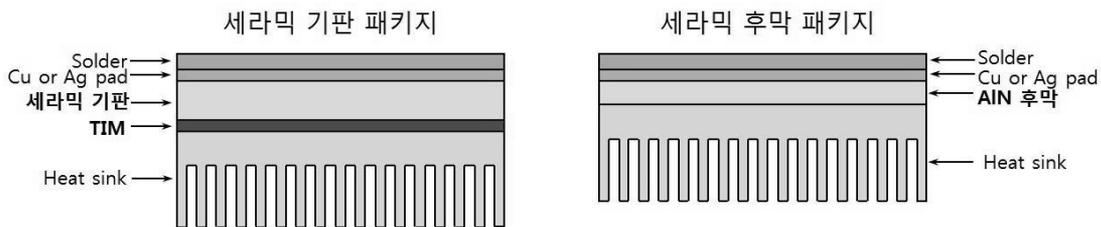


그림 6. 기존 세라믹 기판 패키지와 절연 후막 패키지의 구조 비교

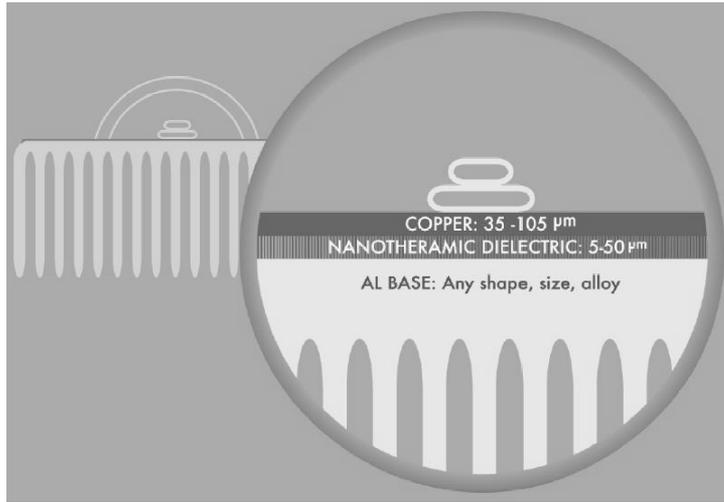


그림 7. Cambridge Nanotherm社의 Chip on Heatsink 패키지

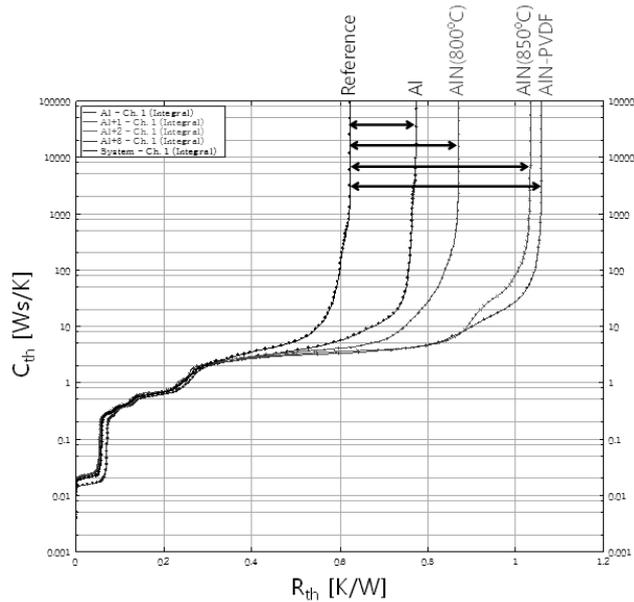


그림 8. AlN 절연 후막 시편의 열저항 평가 결과

점이 있다.

국내에서도 AD 공정을 이용하여 AlN 후막코팅층 제조에 관한 연구를 일부 기관에서 수행한 바 있다. 전자부품연구원은 지난 2008년부터 고열전도 절연

층으로서 Al₂O₃, AlN 후막 코팅층 형성에 관한 연구를 수행했으며, AlN 후막의 두께를 높이기 위해 AlN 분말에 유기물이 첨가된 복합분말을 사용함으로써 AD 공정을 통해 100μm 이상의 두꺼운 AlN-유기물

복합코팅층 제조에 성공하였으나, 유기물 첨가에 따라 전체 코팅층의 열전도도 및 내전압성이 크게 저하되는 결과를 보여 개선이 요구되고 있다.

종래의 AD 공정을 이용한 타 연구자의 AlN 후막 연구 결과를 살펴보면, 순수한 AlN 후막의 경우 10 μm 이상의 두께를 얻기 힘들었으며, 이러한 결과는 코팅 공정변수의 문제와 원료분말의 입도를 적절하게 제어하지 못했기 때문으로 추정된다. 최근 재료연구소에서는 원료분말의 순도, 입자 크기, 코팅 공정 변수 제어를 통해 AlN 단일상으로 두께 30 μm 인 절연 후막 제조에 성공했으며, Laser Flash 장비를 이용한 열확산도 평가 결과, 종래의 Al+에폭시+AlN 소결기판 시편보다 열확산도가 약 30배 이상 높았으며, 동적열특성평가장비를 이용한 열저항 또한 기존의 Chip on Board(COB) 패키지의 절반에 불과한 우수한 열특성을 보였다.

4. 유·무기 복합 열계면 소재

전자패키지를 구성하는 칩, 기판과 히트싱크 등 주요 구조체들은 그 자체로 결합성능이 미미하고 단순 결합시 표면의 요철로 인하여 공극이 발생하고 칩에서 발생하는 열의 효과적인 제거가 불가능하다. 열계면 소재는 LED 칩과 패키지, 패키지와 기판 또는 기판과 히트싱크 등의 접합에 사용되는 고분자 기반의 접착소재로서, 기계적인 접합뿐만 아니라 열 방출의 기능도 있기 때문에 열전도성 고분자와 고열전도성 무기 필러의 복합소재의 형태로 주로 사용된다. 이는 고분자 소재 자체가 열전도도가 매우 낮고, 온도 및 기계적 충격에 대한 내성 측면에서 금속 또는 세라믹 소재에 비해 단점이 있기 때문이다. 따라서, 현재의 주된 기술 개발 방향은 고분자내에 열전도성 무기 필러 입자를 균일 분산함으로써 낮은 필러 함량에도 우수한 열전도성과 접착력을 가지는 유·무기 복합 열계면소재를 개발하는 것이며, 이와 동시에 저가공정

으로 고열전도를 가지는 무기 필러를 개발하여 종래 고가의 고열전도 무기 필러를 대체하는 것입니다.

전자 패키지용 필름형 접착소재 분야에서는 일본업체가 대부분의 시장을 장악하고 있으며, 특히 반도체 패키지용 DAF(Die Attach Film)의 경우, 히다치 케미컬이 세계 시장의 70% 정도를 점유하고 있으며, 열전도도가 $2\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$, 접착필름 두께가 50 μm 수준의 높은 기술력을 보유하고 있다. 최근, 기존 조명에 대한 LED 조명의 대체율이 늘어나면서 LED 패키지에 사용되는 접착필름에 대한 수요가 늘어나고 있으며, 이 경우에도 일본업체가 대부분의 시장을 장악하고 있다. 대표적으로 마쯔우라사에서 최고 $2\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 수준, 제품 두께 0.5mm~2.0mm 수준의 접착필름을 생산하고 있고, Denka에서는 $5\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 수준의 열전도도를 가지는 방열 시트형 열계면소재를 개발하여 LED 조명에 적용하고 있다.

고방열 하이브리드 접착소재의 경우, 일본 AIST의 Ohashi 그룹에서 열전도도가 우수하고 실리콘과 유사한 열팽창계수를 갖는 판상 형태의 AlN과 구형의 AlN을 필러로 사용하여 에폭시와의 고분자 복합재료를 제조하였는데, 구형의 AlN 필러가 74vol%까지 충전되며 이때의 열전도도가 $8.2\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 인 우수한 값을 보였으나, 수분에 민감한 AlN이 가수분해되어 산화물이 됨으로써 본래의 열전도도가 떨어지는 단점이 있다. 고내열 접착소재로서 최근 연구되고 있는 실리콘 기반 접착제의 경우, 높은 접착강도, 열안정성의 물성이 요구되며 실리콘에이트, 알루미늄 등의 하이브리드 나노입자를 이용하여 방열 특성을 부여하는 복합 기능성 접착제 연구가 해외 선진업체에서 진행되고 있다.

국내업체의 경우, 패키지용 접착필름 개발 및 시판은 거의 전무한 상태이며, DAF 분야에서 제일모직, 에이스인더스트리 등의 일부 업체에서 $1\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 급의 열전도도를 가지는 제품 개발을 진행하고 있는 수준이다. LED 접착필름의 경우, 두성산업, 써모텍 등

TIM		Advantages	Disadvantages
Thermal Grease		<ul style="list-style-type: none"> High thermal conductivity Thin joint with minimal attach pressure therefore low thermal resistance No curing required Delamination not an issue Low cost 	<ul style="list-style-type: none"> Thermal cycling can result in pump-out and phase separation Can be messy and in a manufacturing environment can pollute assemblies and reflow baths Dry-out over time reducing reliability Thickness difficult to control Excess grease can flow out beyond the edges
Phase Change Materials	Polymers	<ul style="list-style-type: none"> Increased stability and less susceptibility to pump-out Easier application and handling compared to greases No cure Delamination not an issue No dry-out Lower thermal resistance than greases 	<ul style="list-style-type: none"> Lower thermal conductivity than greases Surface resistance can be greater than greases. Can be reduced by thermal pre-treatment Constant pressure required which can cause mechanical stresses VOIDS can result with thermal cycles and subsequent phase changes that cannot be refilled
	Low Melting Alloys	<ul style="list-style-type: none"> Easy to apply All metal path No cure required 	<ul style="list-style-type: none"> Dry-out causing voids at interfaces Intermetallic growth at the interface Oxidation/Corrosion at elevated temperature cycles
Filled Polymers		<ul style="list-style-type: none"> Not messy easy to handle Eliminates problem of applying exact the amount of grease with each application Conforms to surface irregularity before cure No pump-out or migration Resists humidity and other harsh environments Good dielectric properties Low modulus (stress) Can be easily cut to size of mounting surfaces 	<ul style="list-style-type: none"> Curing required Thermal conductivity lower than grease Delamination can be a problem Do not flow freely Permanent clamping needed Higher cost than grease



그림 9. 열계면 소재의 종류와 장·단점

의 업체에서 열전도도 1~2W/m·K 수준의 접착제 개발이 진행중이지만, 아직 상품화되지 않은 상태이다. 열전도성 필러로 사용되는 BN, AlN 등의 세라믹 소재는 일본, 미국 등 선진국에서 대부분 수입하고 있는 실정이며, 국내 개발품의 경우 선진 제품과 기술 격차를 가지고 있다. 고내열 실리콘 점착소재의 경우에도 높은 점착강도와 열안정성이 요구되어 국내 기술의 접근이 어려운 상황이다.

5. 맺음말

대부분의 전자패키지에 적용가능한 핵심방열기술로서 고방열 세라믹 절연기판, 고열전도 세라믹 절연 후막, 유·무기 복합 열계면소재 기술 동향을 살펴보았다.

고방열 세라믹 기판의 경우, 종래의 AlN 기판은 기계적 물성이 낮아서 고출력, 고신뢰성이 요구되는

미래형 전자패키지에는 사용이 불가능할 것으로 판단되며, 따라서 고열전도/고강도 질화규소 기판 소재 개발에 주력하는 것이 바람직할 것으로 보인다. 이를 통해 미래 자동차의 트랜드인 하이브리드 자동차 또는 전기 자동차 분야의 신 시장 개척과 높은 junction 온도에서 작동하는 소형 고출력 SiC 반도체소자 또는 GaN 반도체소자에 적용 가능한 기판 기술 선점이 가능할 것으로 기대된다.

고내전압성을 가지는 고열전도 AlN 세라믹 절연 후막소재기술을 통해 열계면소재 없이 금속 방열판 위에 세라믹 절연층의 직접 형성이 가능해지면, 구조가 단순해지고, 열계면소재 제거에 따라 열저항이 크게 낮아져, 사업화를 위한 저가화 공정 기술이 뒤이어 개발된다면, 종래의 고출력 LED 세라믹 패키지의 상당 부분을 대체할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 향후 AlN 절연후막의 두께 향상 기술 및 고열전도 기술이 보다 고도화된다면 전력반도체와 같은 고출력, 고

신뢰성이 요구되는 전자패키지에도 적용이 가능할 것으로 예상되므로 연구개발 투자가 절실하다.

최근 열계면소재 기술의 개발 방향은 열전도성 무기 필러 입자의 낮은 함량에도 우수한 열전도성과 접착력을 가지는 열계면소재를 개발하는 것이며, 이를 위해 필요한 핵심기술을 무기 필러 입자의 균일 분산 기술, 고열전도 무기 필러 입자 합성 기술, 고분자 기지의 열전도도 향상 기술 등으로 들 수 있다. 특히, 최근에는 디스플레이 부품이나 소형 IT기기에서 수평방향으로의 열전달이 더욱 중요해짐에 따라 무기 필러 입자의 배향을 조절함으로써 열전달 방향을 제어할 수 있는 소재 개발의 중요성이 커지고 있다.

향후 전자부품의 고집적화/다기능화 추세에 부응한 궁극적인 부품소재 패키징 기술은 단위 면적당 발열량이 많을 수밖에 없는 다중칩 또는 적층형 구조로 진화할 것으로 예상된다. 본 고에서 선정된 핵심방열소재기술의 개발 및 발전을 통해 고효율 전자부품 패키지 기술 구현에 있어 주요 걸림돌이었던 열관리 문제가 해결된다면 기존의 기술로는 구현 및 신뢰성 확보가 어려웠던 다양한 형태 및 성능의 소자 구현이 가능해질 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 'Advanced Materials for Thermal Management of Electronic Packaging', Springer Series in Advanced Microelectronics 30 (2011).
- [2] 'Microprocessors for the New Millenium: Challenges, Opportunities, and New Frontiers', In Solid-State Circuits Conference (2001).
- [3] 'Influence of additive composition on thermal and mechanical properties of β -Si₃N₄ ceramics', J. Mater. Res. 19(11) 3270-3278 (2004).
- [4] 'Effect of sintering additive composition on the thermal conductivity of silicon nitride', J. Mater. Res. 13(12) 3473-3477 (1998).
- [5] 'Microstructure tailoring for high thermal conductivity of β -Si₃N₄ ceramics', J. Am. Ceram. Soc. 86(1) 197-199 (2003).
- [6] 'A Tough Silicon Nitride Ceramic with High Thermal Conductivity', Adv. Materials 23 4563-4567 (2011).
- [7] 'High thermal conductivity silicon nitride ceramics', J. Kor. Ceram. Soc. 49(4) 380-384 (2012).
- [8] 'Thermal spray coating of aluminum nitride utilizing the

detonation spray technique', J. Mater. Res. 17(10) 2514-2523 (2002).

- [9] 'Fabrication of AlN Coatings by Reactive Atmospheric Plasma Spray Nitriding of Al Powders', Mater. Trans. 51(5) 957-961 (2010).
- [10] 'Hexagonal to cubic crystal structure transformation during aerosol deposition of aluminum nitride', J. Am. Ceram. Soc. 88(4) 1067-1069 (2005).
- [11] http://www.camnano.com/wp/wp-content/uploads/Nanotherm_Datasheet_two.pdf

◇ 저 자 소 개 ◇



한병동 (韓秉東)

1972년 2월 11일. 서울대학교 재료공학부 졸업(박사). 재료연구소 책임연구원.

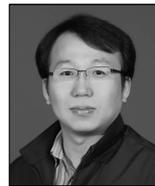
E-mail: cera72@kims.re.kr



고재웅 (高在雄)

1964년 8월 30일. 서울대학교 재료공학부 졸업(박사). 재료연구소 책임연구원.

E-mail : kjw1572@kims.re.kr



김영국 (金榮國)

1973년 2월 20일. 포항공과대학교 신소재공학과 졸업(박사). 재료연구소 책임연구원.