

탄화규소(SiC) 반도체를 사용한 모듈에서의 방열 거동 해석 연구

정청하 · 서원 · 김구성[†]

강남대학교 전자패키지연구소

Comparative Study on the Characteristics of Heat Dissipation using Silicon Carbide (SiC) Powder Semiconductor Module

Cheong-Ha Jung, Won Seo, and Gu-Sung Kim[†]

Electronic Packaging Research Center, Kangnam University, 20, Gangnamseo-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 16977, Korea

(Received December 19, 2018: Corrected December 24, 2018: Accepted December 26, 2018)

초 록: 1200V 이상 급의 전기자동차의 파워 모듈에 적용되는 세라믹 기판은 구동 전력으로 고전력이 인가되는 특성 상 고열전도도, 고 전기절연성, 저열팽창계수, 급격한 온도 변화에 대한 저항성의 특성이 요구된다. 방열기판에 적용되는 세라믹 중 질화알루미늄과 질화규소는 그 요구를 충족하는 소재로서 고려되고 있다. 이에 따라 본 논문에서는 질화알루미늄과 질화규소의 방열기판 소재로서의 특성을 상용해석프로그램을 통해 비교하였다. 그 결과 질화규소는 질화알루미늄에 대해 각각 동일한 조건의 열을 부여하는 공정을 시뮬레이션으로 구현했을 때 스트레스와 휨이 덜 발생하여 더 우수한 내충격성, 내stress성을 보였다. 열전도도 측면에서는 질화알루미늄이 방열 소재로서 더 우수한 특성을 지니지만 신뢰성 측면에서는 질화규소가 더 우수함을 시뮬레이션을 통해 관찰하였다.

Abstract: Ceramic substrates applied to power modules of electric vehicles are required to have properties of high thermal conductivity, high electrical insulation, low thermal expansion coefficient and resistance to abrupt temperature change due to high power applied by driving power. Aluminum nitride and silicon nitride, which are applied to heat dissipation, are considered as materials meeting their needs. Therefore, in this paper, the properties of aluminum nitride and silicon nitride as radiator plate materials were compared through a commercial analysis program. As a result, when the process of applying heat of the same condition to aluminum nitride was implemented by simulation, the silicon nitride exhibited superior impact resistance and stress resistance due to less stress and warping. In terms of thermal conductivity, aluminum nitride has superior properties as a heat dissipation material, but silicon nitride is more dominant in terms of reliability.

Keywords: Silicon Nitride, Aluminum Nitride, SiC Semiconductor

1. 서 론

4차 산업혁명의 시대를 맞이함에 따라 자동차 동력의 하이브리드화 및 전기모터화가 급속히 진행되면서 전기자동차의 파워 모듈 시장이 급속히 확장되고 있다. 파워 모듈에 적용되는 반도체에 사용되는 전류는 수백 A, 전압은 수백 V로 고전력의 전력이 인가되기 때문에 그에 따른 발열량도 하나의 이슈가 되고있다. 이는 소자의 성능 열화와 신뢰성 저하를 촉진한다.^{1,2)} 하이브리드 및 전기 자동차에 적용되는 파워 모듈의 경우 고온 및 진동 등의 열악한 환경에서 동작해야 하므로 높은 신뢰성이 요

구된다.³⁾ 파워 모듈로서 신뢰성을 저하시키는 가장 큰 원인은 열적 특성으로, 고온의 열을 방출시키는 방열 소재를 적용해 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 파워 모듈은 반도체와 기판, EMC등의 소재로 구성되며, 일반적인 파워 모듈의 구성도는 Fig. 1과 같다. 특히 SiC 반도체는 반도체의 방열특성향상을 위한 기판으로 비활성 세라믹 물질을 사용한다.

비활성 세라믹 물질 중 하나인 질화알루미늄(Aluminum Nitride, AlN)은 상용화된 열전 냉각소자를 기준으로 알루미늄과 유사한 330-450MPa의 굴곡 강도, 70-250 W/mK의 열전도도, 우수한 전기절연성($> 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$), 실리콘과

[†]Corresponding author
E-mail: gkim@kangnam.ac.kr

© 2018, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

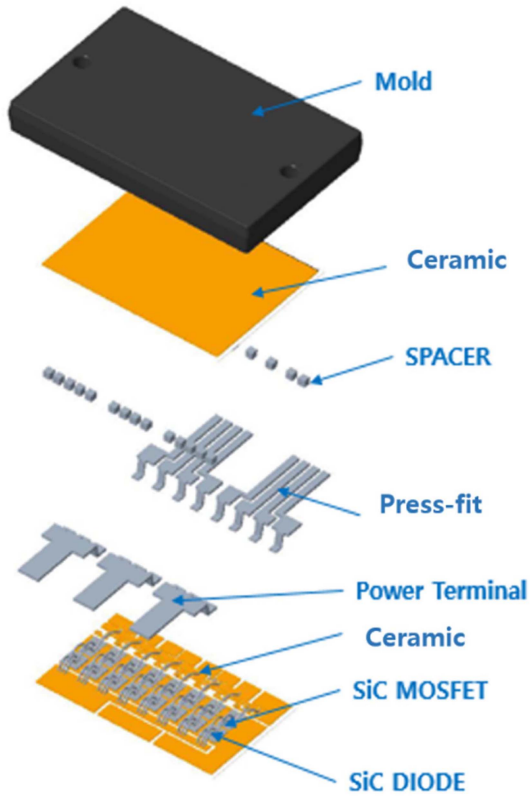


Fig. 1. General power module configuration diagram.

비슷한 저열팽창계수($4.6 \times 10^{-6}/K$), 높은 밴드갭 에너지 (6.2 eV), 무독성, 할로겐 플라즈마에 대하여 높은 저항 특성을 가지고 있다.^{4,5)} 또다른 비활성 세라믹 물질인 질화규소(Silicon Nitride, Si_3N_4)는 상용화된 열전 냉각소자들 기준으로 650MPa의 굴곡강도, 60-250 W/mK의 열전도도, 우수한 전기절연성($> 10^{14} \Omega \cdot cm$), 저열팽창계수($3.2 \times 10^{-6}/C$), 유효성과 내마모성을 가진 초경량 원자 결정 재료이다.

파워 모듈의 세라믹 소재는 고열전도성, 저열팽창률, 전기절연성, 급격한 온도변화에 대한 저항성, 우수한 내식성이 요구되고 있다. 질화알루미늄과 질화규소는 파워 모듈의 세라믹 소재로서 우수한 물성치를 지니는 물질로 주목받고 있다.

본 논문에서는 1200V 이상급의 전기자동차의 모듈에서 방열 기관으로 사용되는 DC 기관의 소재로 질화 알루미늄과 질화규소를 적용하여 이에 대한 상용 해석 프로그램을 통해 열적, 구조적 특성을 연구하였다.

2. 유한 요소 해석 실험

2.1. 유한 요소 해석 조건

질화알루미늄과 질화규소의 방열 특성을 해석하기 위해 power terminal과 signal pin을 포함한 방열기관을 모델링하였다. Fig. 2은 본 연구에서 사용된 방열기관 모델링 사진이며 모델에 mesh를 적용한 사진이다. NP (Neutral Point)는 중심점을 나타내는 용어이다. Fig. 2(a)는 전체 모

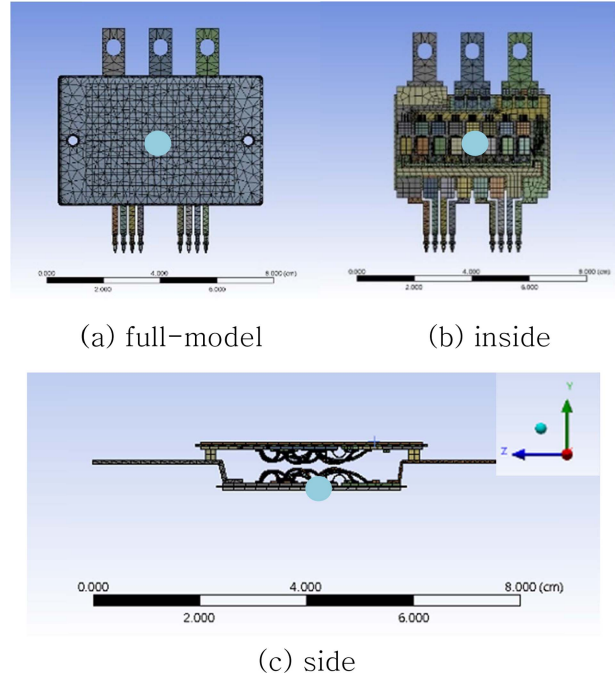


Fig. 2. Mesh of power module.

Table 1. Material properties data used in the simulation.

	AlN	Si_3N_4	
Density (kg/cm^3)	3250	3220	
CTE (ppm/K)	5.6	2.6	
E (Gpa)	3.48	311	
Poisson's ratio	0.27	0.28	
	Al	Copper	EMC
Density (kg/cm^3)	2770	8490	1980
CTE (ppm/K)	23.03	6.4	8
E (Gpa)	71	117	22
Poisson's ratio	0.33	0.33	0.3

델의 XZ 좌표에서의 NP점의 위치를 표현하였고, Fig. 2(c)는 전체 모델의 YZ축에서의 NP점의 위치를 표현하였다. 해석은 3가지의 조건을 적용하여 수행되었다. 첫 번째 해석은 모듈 제조 과정 중 DBC (Direct Bonded Copper) 세라믹이 모듈에 접합되는 공정을 구현한 것으로, 공정 최대 온도인 250°C의 열하중을 전체 모델에 부여한 후 상온(22°C)로 감소시켰을 때의 stress 및 휨 특성을 확인하기 위한 해석을 수행하였다. 두 번째 해석은 모듈이 제조된 후 진행되는 내열성 테스트를 구현한 것으로, 일반적으로 전장 부품의 신뢰성에서 많이 사용하는 -55°C에서 150°C로 온도를 변화시키는 과정을 500번 반복 수행하였을 때의 stress 및 휨 특성을 확인하기 위한 해석을 수행하였다. 세 번째 해석은 모듈이 제조된 후 구동했을 때의 열적 구조적 특성을 관찰하기 위한 것으로, 모듈 내의 칩이 구동되어 칩만 발열한다고 가정하고 이때 모듈 전체에 가해지는 stress와 휨 특성을 확인하였다.

해석에 사용된 절점(node)의 수는 193138개이며 요소(element)의 수는 62819개로 구성되었으며 구조 해석에서 모델이 한 위치에 고정되어 있는 상태에서의 휨 해석을 수행하기 위해 칩에 구속조건을 부여하였다. 해석에 수행된 물질의 물성치는 Table 1과 같다. 실제와 동일한 결과를 얻기 위해서는 모듈의 모든 요소를 각각 정의한 후 해당 물성치를 적용해야 하지만 본 해석은 DBC Ceramic의 물질을 질화알루미늄과 질화규소로 각각 적용했을 때의 열적 구조적 특성을 관찰하기 위한 것이므로 모듈 내부의 전도체는 copper, 칩과 솔더를 연결시키는 와이어는 알루미늄, EMC는 상용화된 임의의 EMC 소재의 물성치를 고정시킨 후, DBC ceramic의 하부 ceramic 물성치를 질화알루미늄과 질화규소로 각각 적용하였다.

2.2. 해석 1: DBC Ceramic 접합 공정

첫 번째 해석은 제작된 모듈을 패키징하는 공정 중 솔더에 DBC ceramic을 부착하는 공정으로, 부착시 약 250°C의 온도가 인가된다. Table 1의 물성치를 해석 모델에 적

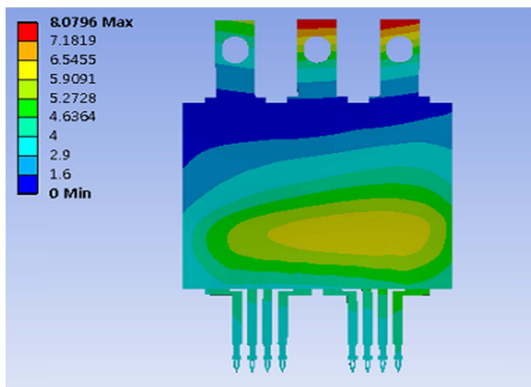


Fig. 3-1. Results of warpage analysis on DBC ceramic bonding process (AlN).

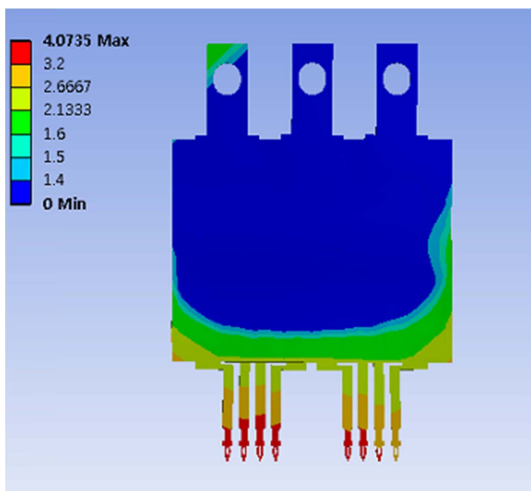


Fig. 3-2. Results of warpage analysis on DBC ceramic bonding process (Si₃N_x substrate).

용하여 모델 전체에 250°C의 온도를 적용한 후 상온으로 온도를 식혔을 때의 해석을 수행하였다.

DBC ceramic으로 질화알루미늄을 적용했을 때 모듈에 가해지는 최대 von-mises stress는 47.254MPa 로 모델의 NP점에서 Y방향으로 발생하였고, warpage는 7.4052 μm 로 power terminal에서 발생하였다. 이때의 전체 warpage contour는 Fig. 3-1와 같다. DBC ceramic으로 질화규소를 적용했을 때 모듈에 가해지는 최대 von-mises stress는 40.637MPa이며 모델의 NP점에서 Y방향으로 발생하였고, warpage는 4.0735 μm 이며, signal pin의 끝단에서 발생하였다. 이 때의 전체 warpage contour는 Fig. 3-2와 같다.

2.3. 해석2: 내열성 테스트

두 번째 해석은 모듈이 제조된 후 진행하는 내열성 테스트를 구현한 해석이다. Table 1의 물성치를 적용하여 모듈 전체에 열 하중 조건으로 55°C를 적용한 후 150°C로 온도를 변화시켰으며, 이 하나의 cycle을 500번 반복 수행하였다.

내열성 테스트 후 DBC ceramic 소재로 질화알루미늄을 적용했을 때 가해지는 최대 von-mises stress는 31.854 MPa로 모델의 NP점에서 Y방향으로 발생하였고 warpage

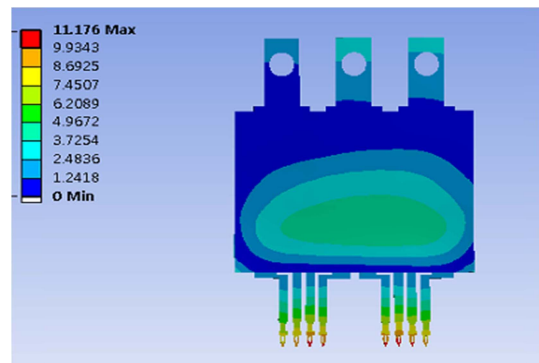


Fig. 4-1. Results of warpage analysis on heat resistance test (AlN substrate).

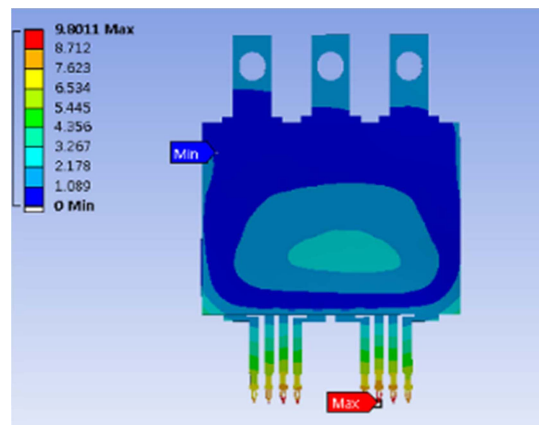
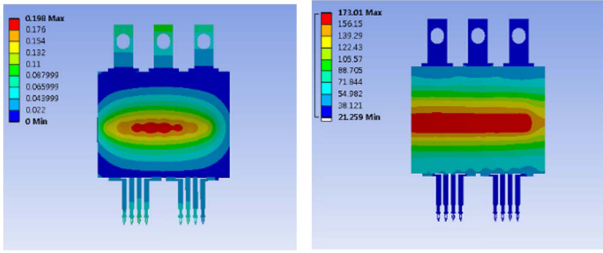
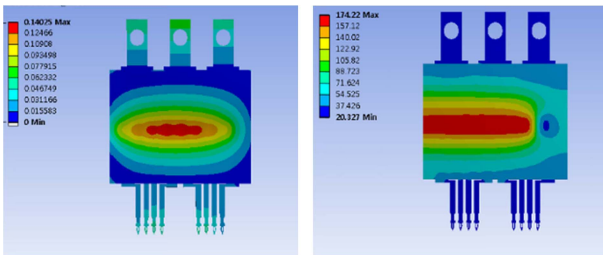


Fig. 4-2. Results of warpage analysis on heat resistance test (Si₃N_x substrate).



(a) Warpage contour (b) thermal contour

Fig. 5-1. Results contour of AlN substrate on module drive test.



(a) Warpage contour (b) thermal contour

Fig. 5-2. Results contour of Si₃N₄ substrate on module drive test.

는 11.176 μm 으로 power terminal의 끝단에서 발생하였다. 이때의 전체 warpage contour는 Fig. 4-1와 같다

또한 질화규소를 적용했을 때 모듈에 가해지는 최대 von-mises stress는 21.411MPa로 모듈의 NP점에서 Y방향으로 발생하였으며, warpage는 9.8011 μm 으로 power terminal의 끝단에서 발생하였다. 이 때의 전체 warpage contour는 Fig. 4-2와 같다.

2.4. 해석3: 모듈 구동 테스트

세 번째 해석은 모듈이 제작되었다고 가정한 후 모듈에 전원을 공급했을 때 칩의 발열량에 의한 열적 구조적 해석을 수행하였다. 실험에 사용된 물성치는 Table 1을 적용하였으며, 모듈구동시에 전원을 공급하면 칩에서 발열이 발생하므로 모듈 전체가 아닌 칩에만 칩의 최대 발열량을 조건으로 부여하였다.

칩이 발열함에 따른 모듈의 질화알루미늄과 질화규소 기판을 적용한 모듈의 열 분포도는 각각 Fig. 5-1, Fig. 1-2와 같다. 열 분포는 두 기판 모두에서 칩에서부터 가장자리로 뻗어나가는 동일한 경향성을 보였으며, 최대 warpage는 MOSFET 소자에서 질화알루미늄 기판을 적용했을 때 0.198 μm , 질화규소 기판을 적용했을 때 0.14025 μm 가 발생했다.

3. 결 론

본 연구에서는 전기자동차의 파워 모듈에 적용되는 방열 기판의 소재로서 질화알루미늄과 질화규소의 특성 비

교를 수행하였다. 첫째, 모듈의 솔더와 방열기판을 부착하는 공정을 구현한 실험에서 질화규소 기판보다 질화알루미늄 기판을 적용했을 때 상대적으로 모듈이 받는 최대 von-mises stress는 6.617MPa, warpage는 3.9823 μm 만큼 더 발생하였으며 응력은 전체 모델의 NP 지점에서 Y 방향으로 발생하였다. 둘째, 내열성을 테스트하기 위한 실험으로 극한의 조건인 -55°C - 150°C 의 heat cycle을 적용한 시뮬레이션 결과 질화규소 기판보다 질화알루미늄 기판을 적용했을 때 상대적으로 모듈이 받는 최대 von-mises stress는 10.433MPa, warpage는 1.3749 μm 만큼 더 발생하였으며 응력은 첫째 해석과 동일하게 모델 전체의 NP 지점에서 Y 방향으로 발생하였다. 셋째, 제작이 완성된 모듈에 전원을 공급하여 구동 시킬 때의 열 분포 및 warpage 관찰한 시뮬레이션 결과 열 분포는 칩에서 발생한 열이 모듈의 가장자리로 번져 나가는 형태로 두 소재를 적용했을 때 모두 동일한 경향성을 보였다. 또한 휨의 경우 기판으로 질화알루미늄을 적용했을 때 질화규소를 적용했을 때보다 0.0578 μm 더 발생하였다.

앞서 수행한 3가지의 시뮬레이션은 서로 다른 공정에 대한 해석이지만 모두 열하중을 부여함에 따른 결과를 관찰하였다는 공통점을 지닌다. 3가지의 서로 다른 실험은 모두 같은 열조건을 부여했을 때 기판으로 질화알루미늄을 적용했을 때보다 질화규소를 적용했을 때의 휨 특성이 더 우수하였다. 즉, 열에 의한 변형 특성은 질화규소가 더 좋다고 판단된다. 현재 전기자동차 모듈에 적용되는 질화알루미늄은 열전도성이 높아 상대적으로 열전도성이 낮은 질화규소보다 많이 쓰이고 있다. 그러나 질화규소는 질화알루미늄에 비해 내충격성 및 내스트레스성이 높다는 강점을 지닌다. 그러므로 환경조건이 빠르게 변화하기 때문에 고신뢰성을 요구하는 자동차 모듈 개발에 적용된다면 이러한 강점과 함께 신뢰성 부분의 개선에 도움을 줄 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 ‘전기자동차 및 신재생에너지용 1200V급 Trench용 SiC 모듈 개발’의 후원을 받아 수행되었음(10080502)

References

1. Y. J. Park, J. W. Ko, J. M. Kim, J. W. Lee, and H. D. Kim, "High Thermal Conductivity Silicon Nitride Substrate Material for Power Devices(in Kor.)", CERAMIST, 15(5), 7 (2012).
2. J. Faltenbacher, and C. Gobl, "Low temperature sinter technology Die attachment for power electronic applications", Proc. 6th International Conference on Integrated Power Electronics System (CIPS), 1 (2010).
3. J. W. Yoon, J. H. Bang, Y. H. Ko, S. H. Yoo, J. K. Kim, and

- C. W. Lee, "Power Module Packaging Technology with Extended Reliability for Electric Vehicle Applications (in Kor.)", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 21(4), 1 (2014).
4. K. Shinozaki, and A. Tsuge, "Characterization Techniques of Ceramics: Development of High Thermal Conductive Aluminum Nitride (in Japan)", *Ceramics*, 12, (1986).
5. K. I. Kim, S. C. Choi, K. S. Han, K. T. Hwang, and J. H. Kim, "Synthesis of high purity aluminum nitride nanopowder by RF induction thermal plasma(in Kor.)", *Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology*, 24(1), 1 (2014).
6. K. Bai, S. K. Woo, I. S. Han, and D. W. Seo, "Fabrication of Silicon Nitride Ceramics by Gel-Casting and Microwave Gas Phase Reaction Sintering(I)", *Journal of the Korean Ceramic Society*, 48(5), 348 (2011).
7. O. S. Jeon, G. Y. Jeun, S. Y. Park, K. H. Lee, and B. G. Kim, "Cost-effective Power Module Package using Leadframe and Ceramic substrate", *Proc. 6th International Joint Symposium on Microelectronics and Packaging (ISMP)*, Seoul, 9 (2001).