

## 전기자동차 파워모듈용 질화규소 기판의 열기계적 특성 및 열응력 해석에 대한 연구

서 원\*, 정청하\*, 고재웅\*\*, 김구성\*\*

\*강남대학교 전자패키지연구소, \*\*재료연구소

### A Study of Thermo-Mechanical Behavior and Its Simulation of Silicon Nitride Substrate on EV (Electronic Vehicle)'s Power Module

Won Seo\*, Cheong-Ha Jung\*, Jae-Woong Ko\*\* and Gu-Sung Kim\*\*†

\*†Electronic Packaging Research Center, Kangnam University, Yongin, Korea

\*\*Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea

#### ABSTRACT

The technology of electronic packaging among semiconductor technologies is evolving as an axis of the market in its own field beyond the simple assembly process of the past. In the field of electronic packaging technology, the packaging of power modules plays an important role for green electric vehicles. In this power module packaging, the thermal reliability is an important factor, and silicon nitride plays an important part of package substrates, Silicon nitride is a compound that is not found in nature and is made by chemical reaction between silicon and nitrogen. In this study, this core material, silicon nitride, was fabricated by reaction bonded silicon nitride. The fabricated silicon nitride was studied for thermo-mechanical properties, and through this, the structure of power module packaging was made using reaction bonded silicon nitride. And the characteristics of stress were evaluated using finite element analysis conditions. Through this, it was confirmed that reaction bonded silicon nitride could replace the silicon nitride as a package substrate.

**Key Words** : Power Module, EV, RBSN, SiN, System Packaging, Simulation

#### 1. 서 론

우리 주변에서 쉽게 접하게 되는 많은 전자 기기들은 소형화, 고성능화, 다기능화의 요구와 함께<sup>1)</sup> 4차 산업의 물결로 인하여 인공지능(AI), 친환경 기술에 대한 요구도 제품과 접목되고 있다. 이 가운데서도 전자기기의 패키징(Packaging)에 대한 기술은 이미 과거의 단순 조립공정에서 벗어나 독자적인 분야로 시장의 한 축이 되어 발전해 나아가고 있다. 더구나 인공지능 및 친환경 반도체 기술을 위해서 반도체 칩의 발전만큼이나 전자 패키징에서도

소재, 장비, 공정이 동시에 불가분의 관계로 상호적인 기술개발이 필요하게 되었고 이를 위해 다양한 노력들이 이루어 지고 있다. 이 가운데서도 친환경 기술의 대표적인 선발주자인 친환경자동차는 기존의 내연기관 자동차가 화석연료를 사용하는 것과 달리 친환경적인 전기에너지를 사용하게 된다. 전기자동차(EV)의 경우 전기에너지를 사용하게 되면 무엇보다 전기구동 시스템의 고효율화가 가장 중요하게 되며, 이 역할을 하게 되는 것이 전력 모듈(Power Module)이다. 현재 내연기관 자동차의 수준 또는 그 이상을 대체하기 위하여 전기자동차는 보통 600~1200V 급의 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 인버터 모듈을 사용하고 있다. 최근에는 에너지 고효율에 대한 중요

†E-mail: gkim@kangnam.ac.kr

성이 강조되어, 고온, 고전압과 스위칭 손실을 줄이기 위한 WBG(Wide Band Gap)기반의 소자를 적용한 전력 모듈 개발이 이루어 지고 있다. 이를 위한 전력 모듈의 패키징의 기본구조는 절연성 세라믹 기판 (예, 질화규소, 산화알루미나, 질화알루미늄 등)을 DBC(Direct Bond Copper) 방법으로 배선화한 DBC 세라믹의 윗면에는 전력반도체를 탑재하고, 아랫면은 방열판에 연결되는 구조를 가지고 있는데, 본 패키징 기술의 수준에 따라 전기자동차를 사용하는 환경에서 신뢰성 특히 열, 기계적 품질에 대한 부분이 결정되어 진다.

위에서 언급한 세라믹 기판들 중에서 질화규소(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)는 대표적인 비산화물계 세라믹스 중의 하나로서 비중이 낮아 가볍고, 열팽창계수가 실리콘과 유사하고, 강도와 경도, 파괴인성 등이 높으며, 우수한 내마모성, 내산화성, 내열충격성, 내열피로성 등의 탁월한 기계적, 열적, 화학적 특성을 가지고 있어서 전력 모듈 패키징에서 중요한 역할을 하는 소재이다<sup>38)</sup>. 질화규소는 자연적으로는 찾을 수 없는 화합물로서 실리콘(Si)과 질소(N)간의 화학적 반응을 통해 인공적으로 합성을 통해 만들어 진다. 실리콘 분말을 사용하여 반응소결 및 재소결 공정을 이용하여 질화규소 절연기판을 제조할 수 있다. 본 연구는 제조된 반응소결 질화규소 (RBSN: Reaction Bonded Silicon Nitride)소재의 특성을 바탕으로 전력 모듈 패키징의 시뮬레이션을 통해 해당 특성을 확인하였다. 나아가 기존에 사용중인 질화규소와의 비교를 위해 전산모사법으로 차이를 확인하였다.

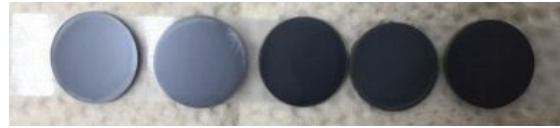


Fig. 2. RBSN Test Coupon.

제작되어진 시편을 이용하여 열전도도 평가를 진행하였다. 진행방법으로 시험전 열전도도 계산을 위한 치수 측정 및 샘플에 대한 전처리를 진행하였다. 전처리는 기본적으로 치수 측정, 밀도 측정, 그래파이트 코팅의 과정으로 이루어진다. 이후 측정 샘플을 열확산율 측정 장비에 장착하여 측정을 진행하였다. 최종적으로 비열 및 밀도 측정 값과 열확산율 측정 값을 통해 열전도도 값을 계산하였다.

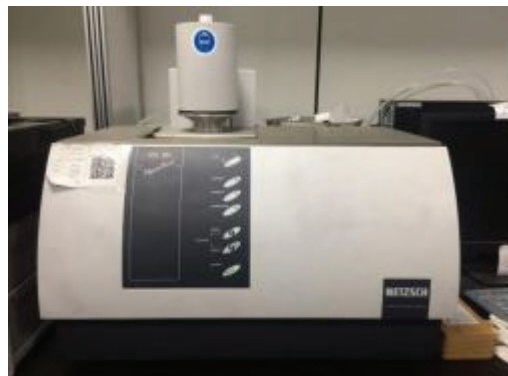


Fig. 3. Thermal Diffusivity Measurement Machine.

## 2. 질화규소 소재 제조

### 2.1 반응소결에 의한 질화규소 소재 제조

Fig 1은 반응소결법을 이용하여 질화규소를 제조 하는 기본적인 공정에 대한 흐름도를 나타내었다. 실리콘 분말과 소결조제(이트리아 및 마그네시아)가 혼합된 분말을 일축프레스법 및 정수압법으로 성형체를 제조한 후, 확립된 최적의 반응소결 스케줄을 이용하여 질화시킨 후, 가스압소결을 통해 재소결하여 치밀화 하였다.



Fig. 1. Reaction Bonded Silicon Nitride Process.

### 2.2 반응소결 질화규소 소재 특성 평가

반응소결법을 통해서 만들어진 질화규소를 전력 모듈 패키징에 사용하기 위하여 열전도도와 이축강도에 대한 평가를 진행하였다. 사용되어진 시편은 Fig 2와 같다.

5개의 시편을 각각 측정하여 Table 1에 열전도도 값을 표시하였다. 파워 모듈 패키징에 사용되기 위한 절연체 소재의 경우 열전도도 값은 90 W/m·K 이상을 만족해야 후속 모듈의 신뢰성 평가를 견딜 수 있다. 본 연구를 통해 도출된 결과값의 경우 5개의 시편 평균 98.72 W/m·K 으로 우수한 결과를 보여주었다.

Table 1. Thermal Conductivity Result

질화규소	열전도도 (W/m·K)				
	#1	#2	#3	#4	#5
	99.68	97.14	100.05	101.04	95.72

또한 열전도도 측정을 마친 반응소결 질화규소 시편을 이용하여 ASTM F394규격에 근거하여 이축강도를 측정하였다. 이축 강도는 Fig 4와 같은 파괴하중 결과로부터 계산하였다.

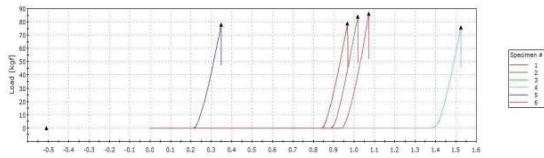


Fig. 4. Compressive Extension Curve (mm).

평가를 통해 질화규소 시편의 이축강도( $\sigma$ ) 평균값은 658 MPa 이었으며 이는 기본적으로 요구되어지는 파워 모듈 패키징의 절연체 강도가 가지는 300 MPa의 2배 이상의 값으로 우수한 특성을 나타내었다.

### 3. Simulation을 통한 질화규소 해석

상용화된 1200V급 전기자동차 파워 모듈에 사용되는 패키징 구조와 동일한 구조를 제작하여 이를 전산모사 해석하는 방법으로 기존의 질화규소 방열기판과 실리콘 기판의 반응소결법을 통해 제작된 반응소결 질화규소 방열기판을 비교하였다.

서로 다른 방법으로 만들어진 질화규소의 비교를 위하여 기존의 질화규소 기판과 본 연구를 통하여 제작된 반응소결 질화규소 기판의 물성에 대한 특성값을 정리하였다. 이를 이용하여 유한요소해석을 통해 파워 모듈구조에서 각 질화규소 기판들이 가지는 열 해석을 실시하고 이를 비교하였다.

#### 3.1 유한요소해석 조건

기존의 질화규소와 반응소결 질화규소의 비교를 위해 Fig 5와 같이 방열기판을 모델링하였다. 방열기판 내부에 한 면이 SiC MOSFET소자 8개로 구성된 구조가 양면으로 적용된 Double-sided구조를 지닌다. 내외부의 소자 및 부품들은 Aluminum wire를 통해 연결되어 있으며 내부에서 발생한 열은 DBC 판을 통해 외부의 EMC (Epoxy Molding Compound) Molding으로 방출된다. 해석을 위해 형성된 절점(node)의 수는 약52만개, 요소(element)의 수는 약 38만개이며 경계 조건으로 모듈 내부의 중심점에 해당하는 절점에 대해 xyz 축으로 구속하였다. 또한 해석을 통해 모사하고자 한 공정은 DBC가 모듈에 접합되는 DBC 접합 공정으로, 공정시 약 250℃의 최대온도가 인가되기 때문에 250℃를 Stress-free로 가정하여 상온으로 온도가 하강하였을 때의 Warpage 및 Stress를 해석하였다.<sup>9)</sup>

해석에 사용된 물성 data는 Table 2와 같다. 해당 표에서 일반 질화규소를 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-A, 제작된 반응소결 질화규소를 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-B로 표현하였다.

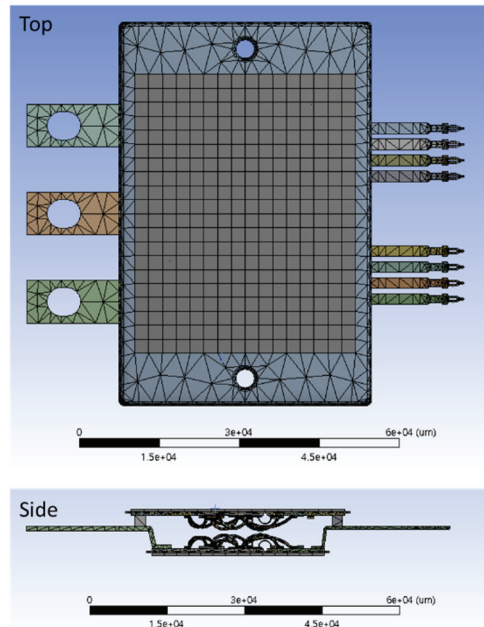


Fig. 5. Finite Element Modeling.

Table 2. Material Properties at Power Module.

	Al	Copper	EMC
Density(kg/cm <sup>-3</sup> )	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

	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -A	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -B
Density(kg/cm <sup>-3</sup> )	3200	3200
CTE(ppm/K)	2.6	2.6
E(GPa)	310	317
Poisson's ratio	0.27	0.28

#### 3.2 일반 질화규소 특성 해석

DBC Ceramic의 소재로 일반 질화규소의 물성을 적용했을 때의 해석 결과는 다음과 같다. Fig 6은 공정 온도250℃에서 상온으로 하강한 지점에서 발생한 Warpage contour이며 외부에서는 Power terminal에서 60.619μm의 최대 휨이 나타나며 모듈의 최외곽을 중심으로 휨이 발생하는 양상을 보인다. 또한 모듈 내부에서는 Aluminum wire에서 휨이 가장 먼저 발생하였다. Fig 7은 이때 발생한 Stress contour로 Aluminum wire와 접합된 DBC 면에서 가장 큰 응력이 발생하였다. 또한 250℃에서 상온으로 하강함에 따라 발생한 Stress 변화를 추적한 결과 초기에 Aluminum Wire에서 발생

하여 시간이 흐름에 따라 wire와 DBC 접합부에서 최대 응력이 발생한다.

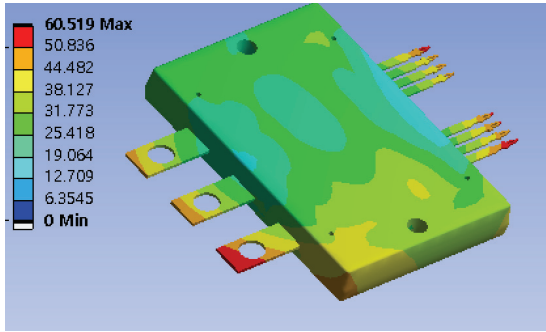


Fig. 6. Warpage Contour of Si<sub>3</sub>N<sub>x</sub>-A Substrate Power Module.

Fig. 9는 250°C에서부터 상온으로 하강하면서 발생하는 응력 분포를 관찰할 결과로, 초기에 Aluminum wire에서 발생하여 시간의 흐름에 따라 wire와 접합된 DBC에서 최대 응력이 발생한다.

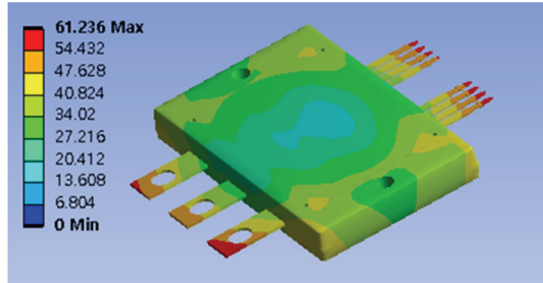


Fig. 8. Warpage Contour of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-B Substrate Power Module.

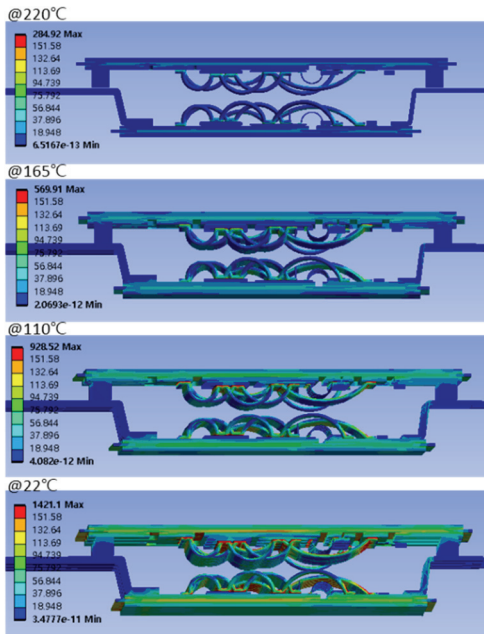


Fig. 7. Stress Contour of Si<sub>3</sub>N<sub>x</sub>-A Substrate Power Module  
(a) Stress @ 22°C (b) Stress tracking from 250°C to 22°C.

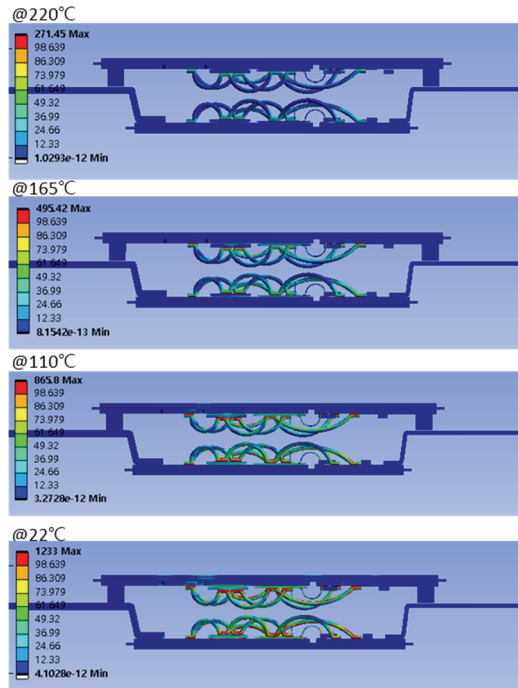


Fig. 9. Stress Contour Tracking of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-B Substrate Power Module.

### 3.3 반응소결 질화규소 특성 해석

DBC Ceramic의 소재로 반응소결법으로 제작된 질화규소의 물성을 적용했을 때 해석한 결과는 다음과 같다. Fig. 8은 공정온도로 설정한 250°C에서 22°C로 하강했을 때 발생한 Warpage contour이다. 외부의 Power terminal에서 61.236μm의 최대 휨이 발생하였으며 내부에서는 Aluminum wire이 휨에 큰 영향을 받는 것으로 보인다. 전체적인 휨 발생양상은 모듈의 최외곽을 중심으로 발생할 것으로 예측된다.

### 3.4 질화규소 특성 비교 해석

일반 질화규소와 반응소결법으로 제작된 질화규소의 물성 data를 적용하여 구조해석을 수행하였다. Warpage 및 Stress 해석 결과를 비교하였을 때 유사한 경향과 값이 예측되었다. 휨에 있어서 두 해석 결과 모두 Power terminal에서 최대 휨이 발생하고 내부에서는 Aluminum wire에서부

터 힘이 발생하기 시작하였다. 최대 응력값은 일반 질화규소와 반응소결 질화규소가 각각 60.519 $\mu\text{m}$ , 61.236 $\mu\text{m}$ 로 약 1 $\mu\text{m}$ 의 미세한 차이로 거의 유사한 결과를 보였다. 또한 응력에 있어서 두 질화규소 모두 내부의 Aluminum wire에서 부터 응력이 발생하기 시작하여 Aluminum과 DBC 접합부에서 최대 응력이 발생하는 동일한 경향을 보였다. 상온으로 온도가 하강한 시점을 기준으로 일반 질화규소는 1421.1MPa, 반응소결 질화규소는 1233MPa의 최대 응력이 발생하여 반응소결 질화규소가 약 190MPa 크기의 응력이 더 크게 발생하였다.

#### 4. 결 론

전기자동차의 핵심 부품인 전력 모듈 가운데 핵심 소재인 질화규소에 대한 열기계적 특성 연구와 나아가 질화규소 기판을 이용한 전력 모듈 패키징에 대한 유한요소 해석을 진행하였다. 반응소결을 통해 제작된 질화규소의 열 기계적 특성이 현재 사용되어지고 있는 질화규소의 특성 수준 또는 그 이상을 보이는 것을 확인하였고 이에 대한 수준은 열전도도의 경우 98.72 W/m·K를 달성하였고 이축강도의 경우 658 Mpa로 우수한 특성을 확인하였다. 제작된 특성을 바탕으로 유한요소해석을 통해 기존 질화규소와 반응소결 질화규소에 대한 비교 해석을 실시하였고 그 결과 유사한 결과를 보이는 것을 확인하였다. 이를 통해 반응소결 질화규소가 파워 모듈 패키징을 위한 기판 소재로 사용될 수 있음을 확인하였다.

#### 감사의 글

이 연구는 2019년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(10080502).

#### 참고문헌

1. Rao R. Tummala, "Fundamentals of Microsystems Packaging" pp. 24-26, 2001.
2. S.M. SZE, "VLSI Technology", pp. 213-214, 1988.
3. X. Zhu, Y. Zhou and K. Hirao, J. Ceram. Soc. Jpn., 112[Suppl. 112-1], S410S414 (2004).
4. Y. Zhou, H. Hyuga, D. Kusano, Y. I. Yoshizawa and K. Hirao, Adv. Mater., 23, pp. 4563-4567 (2011).
5. Y. J. Park, M. J. Park, J. M. Kim, J. W. Lee, J. W. Ko and H. D. Kim, J. Eur. Ceram. Soc., 34, pp. 1105-1113 (2014).
6. S. I. Go, Y. Li, J. W. Ko, H. N. Kim, S. H. Kwon, H. D. Kim and Y. J. Park, Adv. Mater. Sci. Eng., 4263497, 2018.
7. T. N. Tieggs, J. O. Kiggans and K. L. Ploetz, In A Collection of Papers Presented at the 94th Annual Meeting and the 1992 Fall Meeting of the Materials & Equipment/Whitewares Manufacturing: Ceramic Engineering and Science Proceedings, Volume 14, Issue 1/2. John Wiley & Sons, Inc. pp. 378-388, 2008.
8. J. A. Mangels, In Proc. of the 5th Annual Conference on Composites and Advanced Ceramic Materials pp. 589-603, 1981.
9. K. H. Kim, T. W. Kim, M. G. Woo, B. J. Jeon and H. G. Choi, "A Numerical Study on the Effect of Battery-Pack Shape of E," Journal of the Semiconductor & Display Technology, pp16-19 (2016).

접수일: 2019년 12월 24일, 심사일: 2019년 12월 26일,  
게재확정일: 2019년 12월 27일