

전동차 추진제어용 IGBT 모듈 패키지의 방열 수치해석

서일웅* · 이영호** · 김영훈*** · 좌성훈*†

*서울과학기술대학교 NID융합기술대학원, **우진산전(주), ***에스피반도체 통신(주)

Numerical Thermal Analysis of IGBT Module Package for Electronic Locomotive Power-Control Unit

Il Woong Suh*, Young-ho Lee**, Young-hoon Kim*** and Sung-Hoon Choa*†

* Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National Univ. of Science and Technology,

** Woojin Industrial System Co., Ltd,

*** SP Semiconductor & Communication Co., Ltd.

(Received May 26, 2015 ; Revised July 2, 2015 ; Accepted July 4, 2015)

Key Words: Power Device(전력 반도체), IGBT Module Package(IGBT 모듈패키지), Thermal Management, Thermal Design, Thermal Analysis(방열해석)

초록: Insulated gate bipolar transistor (IGBT) 소자는 전동차, 항공기 및 전기 자동차에 가장 많이 사용되는 고전압, 고전력용 전력 반도체이다. 그러나 IGBT 전력소자는 동작 시 발열 온도가 매우 높고, 이로 인해, IGBT 소자의 신뢰성 및 성능에 큰 영향을 미치고 있다. 따라서 발열 문제를 해결하기 위한 IGBT 모듈 패키지의 방열 설계는 매우 핵심적인 기술이며, 특히, 소자가 동작 한계 온도에 올라가지 않도록 방열 설계를 적절히 수행하여야 한다. 본 논문에서는 전동차에 사용되는 1200 A, 3.3 kV 급 IGBT 모듈 패키지의 열 특성에 대해 수치해석을 이용하여 분석하였다. IGBT 모듈 패키지에 사용되는 다양한 재료 및 소재의 두께에 대한 영향을 분석하였으며, 실험계획법을 이용한 최적화 설계를 수행하였다. 이를 통하여 열 저항을 최소화하기 위한 최적의 방열 설계 가이드 라인을 제시하고자 하였다.

Abstract: Insulated-gate bipolar transistors (IGBTs) are the predominantly used power semiconductors for high-current applications, and are used in trains, airplanes, electrical, and hybrid vehicles. IGBT power modules generate a considerable amount of heat from the dissipation of electric power. This heat generation causes several reliability problems and deteriorates the performances of the IGBT devices. Therefore, thermal management is critical for IGBT modules. In particular, realizing a proper thermal design for which the device temperature does not exceed a specified limit has been a key factor in developing IGBT modules. In this study, we investigate the thermal behavior of the 1200 A, 3.3 kV IGBT module package using finite-element numerical simulation. In order to minimize the temperature of IGBT devices, we analyze the effects of various packaging materials and different thickness values on the thermal characteristics of IGBT modules, and we also perform a design-of-experiment (DOE) optimization

1. 서 론

최근 세계적으로 환경 문제와 에너지 절약 추세에 따라 에너지 사용량을 줄이기 위한 친환경 절전형 전력소자 및 시스템 기술 개발이 큰 이슈가

되고 있으며, 특히 에너지 절감용 고효율 전력 반도체 (power semiconductor) 및 친환경 전력 반도체 기술에 대해 다양한 연구가 이루어지고 있다.^(1,2) 전력 반도체는 전력을 시스템에 맞게 배분하는 제어와 변환기능을 가진 소자이며, 에너지를 절약하고 제품을 축소하기 위한 반도체로, 일반 시스템 반도체와 메모리 반도체에 비해 고내압 특성과 고신뢰성이 요구되어진다.⁽³⁻⁵⁾ 전력 반도체는 소자의

† Corresponding Author, shchoa@seoultech.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

특성과 응용 분야에 따라 분류되며, 하나의 패키지로 구성된 것을 전력 반도체 모듈 패키지(power device module package)라 한다. 전력 반도체의 모듈 패키지는 IGBT (insulated gate bipolar transistor)와 같은 전력 반도체를 외부 환경 변화로부터 보호하며, 방열 특성이 우수한 기판 및 인터커넥션(interconnection) 재료를 이용하여 전력 반도체의 특성을 최소한의 손실로 내부 발열을 외부로 전달하는 기능을 수행한다. 전력 반도체 모듈 패키지에 사용되는 전력 반도체 소자에는 GTO(gate turn-off thyristor), MOSFET(metal oxide semiconductor field effect transistor), Thyristor, IGBT 등이 있다.

전력 반도체의 일종인 IGBT 소자는 MOSFET과 바이폴라 트랜지스터(bipolar transistor)의 구조를 가지는 스위칭 소자이며, 다른 전력 반도체에 비해 구동 전력이 작고, 고속 스위칭, 고내압 특성 및 전류 고밀도화가 가능하다. 이러한 특징 때문에 자동차, 전동차, 항공, 가전 및 태양광 발전, 풍력 발전 등 다양한 산업분야에 응용이 되고 있다. 특히, 최근에는 전기 자동차(electric vehicles) 및 하이브리드 전기차(hybrid electric vehicles, HEV)의 핵심부품으로서 큰 주목을 받고 있다.^(6,7) 하지만, IGBT 소자는 고속 스위칭과 대전류로 인해 동작 시 매우 큰 열이 발생한다. IGBT 소자는 turn-on, turn-off 스위칭을 할 때 발생하는 스위칭 손실로 인해 발열 문제가 존재하고, 기판 소재로 실리콘을 사용하기 때문에 소자의 동작 온도가 약 175℃ 이하의 한계를 가진다. 보고된 바에 의하면 IGBT 소자의 발열은 소자의 성능을 열화시키고, 패키지의 각 부분의 열-기계적 변형 및 응력을 발생시키고, 이로 인해 솔더 및 본딩부의 피로 파괴 및 크랙의 발생 등 모듈 패키지의 다양한 신뢰성 문제를 초래할 수 있다.^(8,9) 즉, 자동차 및 전동차에 사용될 IGBT 소자 및 모듈 패키지는 고온과 발열에 대해 매우 열악한 환경에 노출된 반면, 고신뢰성 및 장기수명을 요구하고 있다. 특히, 전동차 혹은 철도 차량에 사용되는 IGBT 모듈의 경우 고전압 대전류로 높은 열이 발생하며, 이는 전동차의 신뢰성과 수명을 저하시킨다. 따라서, 소자 및 모듈 패키지의 신뢰성을 확보하기 위해서는 IGBT의 발열 문제를 해결하는 것이 필수적이며, 접합부 온도를 최대 한계온도 이내로 유지하기 위한 방열 방안이 마련되어야 한다.

이에 따라, 본 연구에서는 전동차에서 추진제어 장치 등 전력 변환 장치로 많이 사용되고 있는 고전압 대전류 (3,300 V / 1200 A급)용 IGBT 모듈 패키지에 대하여 방열해석을 수행하였다. 이를 위하여 유한요소법(finite element method)과 실험계획법(design of

experiment)를 이용하여 열 저항 감소와 효과적인 패키지의 열 방출을 분석하기 위한 해석을 수행하였다. 특히, IGBT 모듈의 구성하고 있는 소재인 DBC(direct bonding copper), 솔더, 베이스 플레이트의 재료 및 두께 변화에 따른 열방출의 효과를 비교 분석하였다. 또한 DBC의 두께 감소에 따른 열 저항과 절연 성능의 트레이드-오프 관계를 분석하였다. 궁극적으로 실험계획법을 사용하여 IGBT 모듈 패키지의 열 방출에 주요 영향을 미치는 인자에 대한 분석과 열 저항을 최소화하기 위한 최적의 방열 설계 가이드 라인을 제시하고자 하였다.

2. 유한요소해석 모델 및 조건

본 연구에서는 전동차용 전력 반도체인 3,300 V / 1200 A급 IGBT 모듈 패키지의 열 특성을 분석하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 우선 IGBT의 개략적인 구성도가 Fig. 1에 나타나 있다. IGBT 모듈 패키지의 구조는 베이스 플레이트 위에 구리와 세라믹 기판의 샌드위치 구조로 구성된 DBC가 위치하고 있으며, DBC 위에 IGBT 소자와 FRD(fast recovery diode) 소자가 DBC에 본딩되어 있다. FRD는 일반 다이오드와 같은 구조지만, 고주파 정류에 사용되는 다이오드를 말한다. 본 연구에서 사용된 IGBT 모듈 패키지 각 구성층의 치수가 Table 1에 나타나 있다. Fig. 2(a)는

Table 1 Dimensions of various materials in IGBT module package used in the finite element analysis

Item	Dimension (mm)		
	Width	Length	Thickness
IGBT	13.7	13.7	0.4
FRD	13.7	13.7	0.4
Solder	13.7	13.7	0.15
Copper	54	45	0.3
Substrate	59	49	1
Copper	56	48	0.3
Solder	56	48	0.2
Base plate	79	69	5

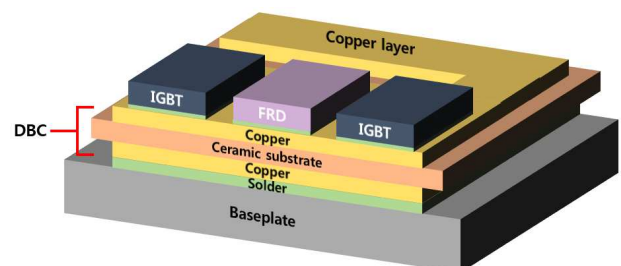


Fig. 1 Schematic drawing of IGBT module package

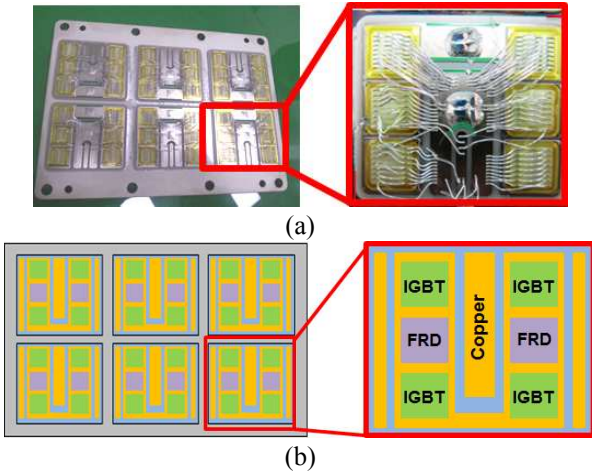


Fig. 2 (a) Picture image of IGBT module package (b) Schematic drawing of IGBT devices in IGBT module package

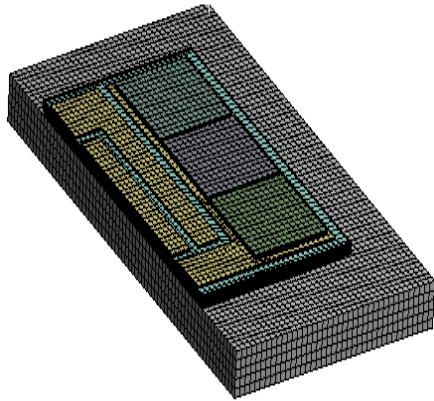


Fig. 3 Three-dimensional FEM mesh modelling of IGBT module package

본 논문에서 사용된 실제 철도차량 추진제어용 IGBT 모듈 패키지의 사진으로써 베이스 플레이트 위에 같은 패턴의 DBC 모듈이 6 개 부착되어 있다. 또한, 한 개의 DBC 모듈에는 Fig. 2(b)와 같이 IGBT 소자 4 개, FRD 소자 2 개가 각각 위치하고 있다.

전술한 바와 같이 IGBT 모듈 패키지는 베이스 플레이트 위에 같은 패턴의 DBC 가 6 개 부착되어 있으므로, 효율적인 해석을 위해 한 개의 DBC 모듈에 대하여 좌우대칭 1/2 모델로 열 해석을 진행하였다. Fig. 3 은 IGBT 모듈 패키지의 유한요소 모델링을 나타낸 것이다. 20 절점 3 차원 요소를 사용하였으며, 절점의 수는 약 123,000 개, 요소의 수는 약 26,000 개로 구성되었다. 본 해석에서는 IGBT 소자의 발열에 대한 최대 온도와 온도 분포의 분석이 목적이므로, 열의 흐름이 시간에 따라 더 이상 변하지 않는 상태인 정상상태(steady state)의 열 해석을 수행하였다. 한편, 일반적으로 IGBT 패키지는 충격 및 진동 완화와 외부로부터

Table 2 Material properties of various materials in IGBT module package used in the finite element analysis

Item	Materials	Thermal conductivity (W/m·K)
Chip	Si	148
Ceramic substrate	Al ₂ O ₃	43
	Si ₃ N ₄	46
	AlN	170
	BeO	265
Metallization	Cu	393
Solder	SAC305	58
Base plate	AlSiC	180
	Al	270
	Cu	393
	Cu-graphite	356

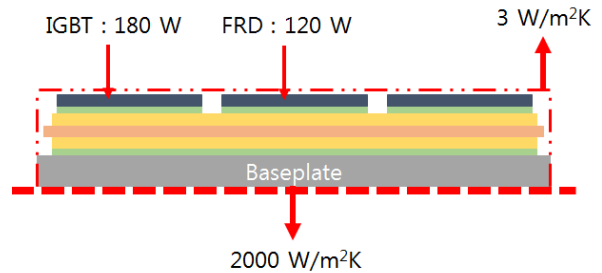


Fig. 4 Thermal and boundary conditions used in finite element analysis

보호를 위해 케이스 안에 젤(gel)이 충전되어 있으나, 예비 해석 수행결과, 젤의 존재가 해석 결과에 영향이 크지 않아 젤을 제외하고 모델링하였다. IGBT 열 해석에 사용된 구성층 재료들의 물성은 Table 2 와 같다.^(10,11)

소자에서의 발열 조건은 소자의 전력 손실과 관련이 있기 때문에 IGBT 소자의 경우, 소자의 최대 순방향 전압 강하(forward voltage drop)인 3 V와 인가 전류인 60 A의 곱한 값인 전력 180 W를 발열 조건으로 하였다. 다이오드의 경우 전압 강하 1 V와 인가전류 120 A의 곱한 값인 전력 120 W를 발열 조건으로 하였다.

통상적으로 IGBT 모듈 밑에는 히트싱크가 있기 때문에 열 해석의 경계 조건(boundary condition)은 IGBT 모듈이 히트싱크 위에 있다고 가정하였다. 베이스 플레이트 밑면에서 히트싱크로 열전달을 나타내는 열전달계수(h)는 열저항(R_{th})과 접촉면적

(A)에 대한 식인 $R_{th} = 1/h \cdot A$ 식을 통해 적용하였다.⁽¹²⁾ 고전력 IGBT 모듈용 공랭식 히트싱크의 열저항은 자연 대류 상태에서 약 $0.2 \text{ }^\circ\text{C/W} \sim 0.3 \text{ }^\circ\text{C/W}$ 이며, 해석 대칭모델의 베이스플레이트의 접촉면적 2725.5 mm^2 이다. 그 결과, 열전달계수는 약 $1,834 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 로 계산되었으며, 이에 따라, 베이스플레이트의 아래 면에서 열전달계수는 유사값인 $2000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 로 가정하였다. 또한, 모듈 외관에서는 모듈 패키지가 외부 공기 노출된 상태를 가정하여 자연 대류 계수인 $3 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 로 해석을 진행하였다.⁽¹³⁾ 본 해석의 발열조건과 경계 조건을 Fig. 4에 나타내었다.

IGBT 소자의 접합부 온도가 과도할 경우 소자의 열화로 인한 성능이 저하되거나 파괴될 수 있다. 통상적으로 IGBT 소자의 성능 저하 및 파괴 온도, 즉, 최대 한계온도는 $150^\circ\text{C} \sim 175^\circ\text{C}$ 로 알려져 있다. 따라서, 소자의 최대 온도가 한계 온도 이내에서 유지될 수 있도록, 열 방출 패키지를 이루고 있는 재료 및 재료의 두께 변화에 따른 패키지의 온도 분포와 소자의 최대 온도를 분석하였다.

3. 수치해석 결과 및 고찰

본 연구에서는 IGBT 모듈 패키지를 구성하고 있는 재료 중에서 특히 열 방출에 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 DBC 및 솔더에 대하여 재료 및 두께의 영향을 우선적으로 검토하였다.

3.1 DBC의 영향

DBC는 베이스 플레이트 위에 위치하고 있으며, 구리 층과 세라믹 기판으로 구성된 샌드위치 형태이다. DBC의 세라믹 기판은 절연 역할을 하며, 또한, 열전도성이 높아 IGBT의 발열을 효과적으로 베이스 플레이트로 배출하는 역할을 한다.⁽¹⁴⁾ 현재 IGBT 모듈에서는 세라믹 기판인 Al_2O_3 혹은 AlN 가 주로 사용되고 있으나, 최근 Si_3N_4 및 BeO 의 사용이 고려되고 있다. 따라서 본 연구에서는 현재 DBC 기판으로 사용 중인 Al_2O_3 와 향후 사용이 고려되고 있는 AlN , Si_3N_4 및 BeO 에 대해서 기판의 두께가 IGBT 소자의 온도에 미치는 영향을 분석하였다.

Fig. 5는 기판이 Al_2O_3 , 베이스 플레이트가 구리인 경우에 대한 패키지의 온도 분포를 나타낸 것이다. 발열부인 IGBT 소자의 최대 온도는 약 160°C 까지 상승 것을 알 수 있으며, IGBT 소자의 최대 한계 온도에 근접함을 보여준다. 한편 다이오드의 최대 온도는 약 152°C 이다.

Fig. 6은 DBC 기판의 종류에 따른 베이스 플레이트 밀면을 기준으로 IGBT 소자까지의 높이에

따른 각 층의 온도를 나타내고 있다. Al_2O_3 기판을 사용할 경우 IGBT의 소자의 최대 온도는 160°C 였으며, Si_3N_4 기판의 경우는 154°C , AlN 기판은 139°C , BeO 기판의 경우 소자의 온도는 137°C 임을 알 수 있다. 기판의 재질을 Al_2O_3 를 사용할 경우가 IGBT 소자의 온도가 가장 높았으며, BeO 의 경우 IGBT의 소자의 온도가 가장 낮았다. 열전도계수가 가장 낮은 기판인 Al_2O_3 ($43 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) 사용할 경우에 비하여, 열전도계수가 가장 높은 기판인 BeO ($265 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)을 사용할 경우 소자의 온도가 약 23°C 까지 저하됨을 알 수 있다. Si_3N_4 기판은 Al_2O_3 보다 열전도계수가 약 $3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 높으며 소자의 온도를 6°C 정도 낮출 수 있다. 또한, AlN 기판의 경우 Al_2O_3 보다 열전도계수가 약 $130 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 높기 때문에 소자의 온도가 약 21°C 감소하였다. 한편, BeO 기판의 경우 AlN 기판보다 열전도계수가 약 $100 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 가 높지만, 소자의 온도는 약 3°C 만 감소하였다. 즉, 열전도계수가 높은 기판을 사용할수록 소자의 온도가 감소하기는 하나, 일정 기준 이상이 되면, 소자의 온도를 감소시키는 효과가 적음을 알 수 있다.

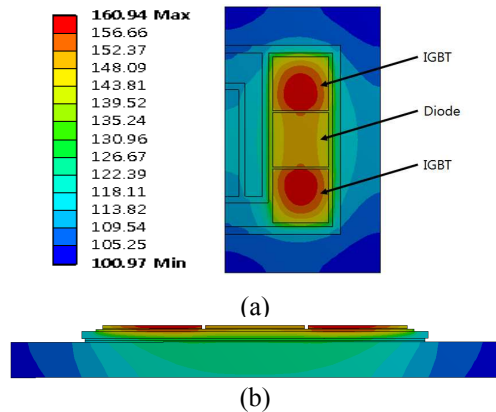


Fig. 5 Temperature distribution of IGBT package module (a) Top view (b) Cross sectional view

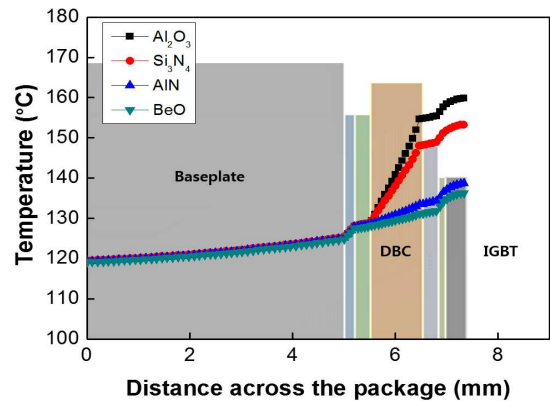


Fig. 6 Temperature distribution depending on various DBC substrate materials

Fig. 7 은 DBC 에 사용된 세라믹 기판의 두께 변화에 따른 소자의 온도 변화를 나타낸 것이며, 본 연구에서 사용된 DBC 세라믹 기판의 기준 두께는 1 mm 이다. Al_2O_3 기판의 경우, 두께가 0.25 mm 에서 1.75 mm 로 두꺼워 질 때, 소자의 온도가 약 145°C에서 175°C까지 30°C 증가하여 두께의 변화가 소자의 온도에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 또한, Si_3N_4 기판도 두께가 증가할수록 최대 온도가 증가하는 폭이 매우 큰 것을 확인할 수 있다. 반면, 열전도계수가 높은 AlN 기판과 BeO 기판의 경우 두께가 1.75 mm 로 두꺼워 질 때, 소자의 온도가 약 4°C 증가함으로써 Al_2O_3 과 Si_3N_4 기판보다는 상대적으로 온도의 증가가 적은 것을 알 수 있다. AlN 기판과 BeO 기판은 열전도계수가 높기 때문에 두께의 변화에 대한 변화가 적다고 할 수 있겠다. 결론적으로, 두께가 증가할수록 열 저항이 커지기 때문에 열 방출이 방해되며, DBC 기판이 얇을수록 열 저항이 낮아지기 때문에 DBC 의 두께를 가능한 얇은 것이 열 방출에 효과적이다. 특히, 열전도계수가 낮은 Al_2O_3 및 Si_3N_4 의 경우 두께에 대한 열 저항 변화가 크기 때문에 두께를 얇게 하는 것이 중요하다.

그러나, IGBT 모듈 패키지에서는 방열 특성 외에 DBC 기판의 절연 특성도 매우 중요하다. 따라서 DBC 의 두께가 얇아질 경우, 절연 특성에 대한 고려가 반드시 필요하다. 기판이 얇아졌을 때, 기판의 절연 강도 보다 높은 전압이 인가될 경우, DBC 의 절연파괴(dielectric breakdown)가 발생할 수 있으며, 이는 IGBT 모듈 패키지의 파괴를 초래한다. Table 3 은 기판의 재질 종류에 따른 절연특성에 대한 물성값이며, Fig. 8 은 기판의 두께에 따른 절연 파괴 전압(dielectric breakdown voltage) 혹은 항복 전압을 그래프로 나

타낸 것이다. 그림에서 보듯이, 현재 DBC 의 기판의 두께인 1 mm 에서는 절연 파괴가 발생하지 않는다. 하지만, 기판의 두께가 얇을수록 기판의 항복 전압도 낮아짐을 알 수 있다. BeO 기판의 경우 두께가 약 0.3 mm 일 때, 절연 파괴가 일어날 것으로 판단된다. Al_2O_3 기판과 Si_3N_4 기판의 경우, 두께가 0.2 mm 일 때 3,300 V 전압에 대해 절연 파괴가 일어날 것으로 판단된다. 반면, 절연 파괴강도가 가장 높은 AlN 기판의 경우, 0.2 mm 두께에서의 절연 파괴 전압이 약 4.0 kV 로 절연 파괴가 일어나지 않아 절연 특성을 유지할 것으로 판단된다. 즉, 소자의 온도를 최소화 하기 위해서 열전도계수가 높고, 절연 강도가 강한 AlN 기판을 절연 강도 내에서 두께를 얇게 제작하면, 기판의 열 저항을 최소화 할 수 있고, 소자의 온도가 최소화 될 것으로 판단된다.

3.2 솔더의 영향

IGBT 소자에서 발생한 열은 솔더와 DBC, 베이스 플레이트를 지나 히트싱크로 전달되어 열을 방출하게 된다. 솔더는 소자에서 발생하는 열을 가장 먼저 하위 층으로 전달해주기 때문에 솔더의 열전도율은 매우 중요하다. 또한, IGBT의 파워 사이클에서 솔더의 팽창과 수축으로 인해

Table 3 Dielectric properties of various substrates

	Dielectric strength (kV/mm)	Dielectric constant	Volume resistivity (ohm·cm)
Al_2O_3	14.6	9.8	$>10^{14}$
Si_3N_4	16	9.5	$>10^{14}$
AlN	20	9.0	$>10^{14}$
BeO	12	6.6	-

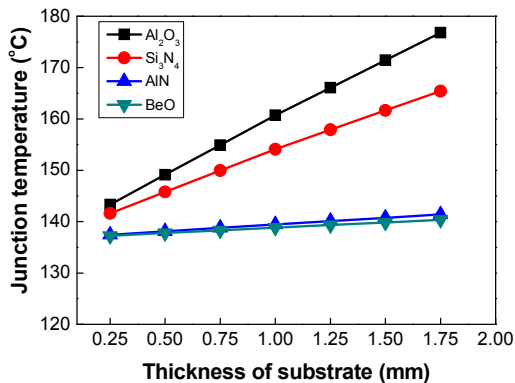


Fig. 7 Junction temperature as a function of the thickness for different DBC substrate materials

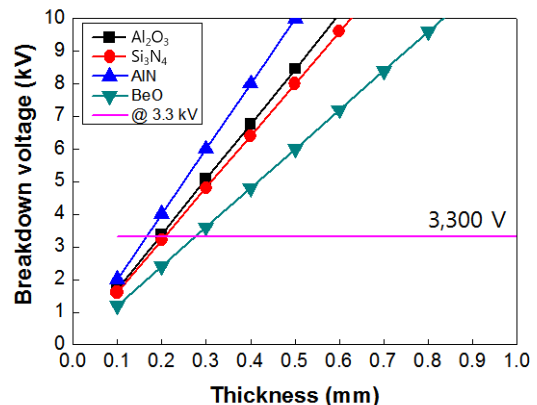


Fig. 8 Breakdown voltages for different dielectric substrates

Table 4 Thermal properties of various solder materials

Solder materials (wt %)	Thermal conductivity (W/m·K)	Melting temperature (°C)
AuSi (97/3)	27	363
AuGe (88/12)	44	356
PbSnAg (92.5/5/2.5)	53	-
SnAgCu (96.5/3/0.5)	57	217
SnCuNi (99.25/0.7/0.05)	64	227
SnCu (99.3/0.7)	65	227
SnAg (96.5/3.5)	78	221

피로 및 깨짐 현상이 발생할 수 있고, IGBT의 열 특성을 저하시켜 소자를 더욱 열화시킬 수 있다. 따라서, 솔더의 재질과 두께로 인한 소자의 온도 변화를 분석하기 위해 열 해석을 수행하였다. 현재 IGBT 모듈에서 솔더로서 PbSnAg를 사용하고 있으며, 향후 무연 솔더의 사용이 고려되고 있다. 본 연구에서는 열전도계수가 다른 다양한 솔더의 재질, 즉, 97Au-3.0Si, 88Au-12Ge, 92.5Pb-5.0Sn-2.5Ag, 96.5Sn-3.0Ag-0.5Cu, 99.25Sn-0.7Cu-0.05Ni, 99.3Sn-0.7Cu, 96.5Sn-3.5Ag에 대해서 그 영향을 검토하였다.

Table 4는 다양한 솔더의 열전도계수를 나타낸 것이다. AuSi (27 W/m·K)에서 SnAg (78 W/m·K)까지 각각 다른 열전도계수를 갖고 있는 7 개의 솔더에 대하여 열 해석 결과를 비교하였다. Fig. 9는 솔더의 종류와 DBC의 기판 종류에 따른 소자의 온도를 나타낸 결과이다. 열전도계수가 가장 높은 솔더인 SnAg는 열전도계수가 가장 낮은 솔더인 AuSi에 비하여, 열전도계수는 약 50 W/m·K 차이가 나며, IGBT 소자의 온도는 SnAg 솔더의 경우 약 170°C, SnAg 솔더는 약 160°C로 약 10°C 감소하였다. 따라서 전체적으로 볼 때 솔더 재질이 IGBT 소자 온도에 미치는 영향은 DBC 보다 적음을 알 수 있다.

Fig. 10는 솔더의 두께에 따른 소자의 온도를 나타낸 결과이다. 본 연구에서 사용된 솔더의 기준 두께는 0.15 mm이다. 열전도계수가 가장 낮은 솔더인 AuSi의 경우 두께가 0.3 mm일 때, 소자의 온도는 약 150°C이다. 솔더의 두께가 0.05 mm로 얇아지면 140°C로 약 10°C 감소하였으며, 두께에 따라 변화하는 정도가 가장 크다.

PbSnAg 솔더의 경우 0.3 mm일 때의 온도는 142°C이며, 0.05 mm일 때는 137°C로 약 5°C 감소하였다. 열전도계수가 가장 높은 SnAg 솔더의

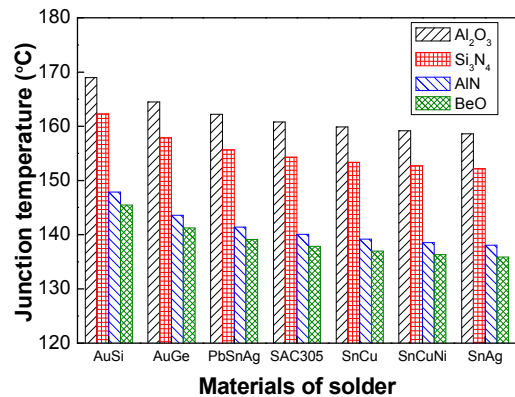


Fig. 9 Junction temperature depending on various solder materials

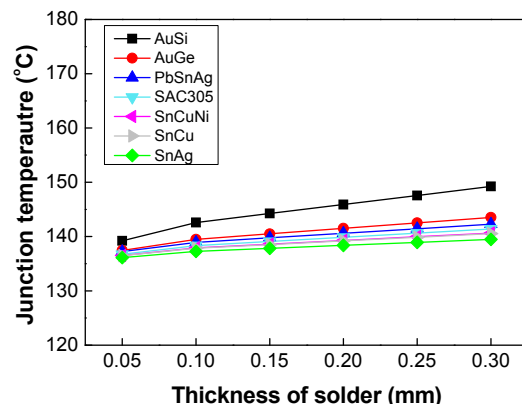


Fig. 10 Junction temperature as a function of the thickness for different solder materials

경우 두께 0.3 mm일 때는 140°C이며, 0.05 mm로 두께가 감소할 경우의 온도는 135°C로 약 5°C 감소하였다. 즉, 솔더의 두께가 얇을수록 소자의 온도가 감소하며, 솔더의 열전도계수가 낮을수록 두께 변화에 대해 소자의 온도 변화 폭이 크다. 또한, 결과를 보았을 때, 솔더의 재질과 두께가 IGBT 소자의 온도에 미치는 영향은 DBC의 재질과 두께에 비해 비교적 영향이 적음을 알 수 있다.

한편, 열 저항을 고려하였을 때, 솔더의 열전도계수와 두께에 따라 열 저항을 줄이는 것이 중요하지만, 솔더 재료의 특성에 따라 공동(void)의 정도와 팽창, 수축에 의한 크랙 발생이 열 저항에 더 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 재료의 특성과 신뢰성에 대한 연구도 추가적으로 필요하다.⁽¹⁶⁻¹⁷⁾

3.3 실험계획법을 통한 해석 결과

IGBT 모듈 패키지에서 열 방출에 영향을 줄 수 있는 인자로는 DBC 기판의 재질 및 두께, DBC 금속 층의 두께, 솔더의 재질 및 두께, 베이스 플

레이트의 재질 등이 있다. 본 연구에서는 실험계획법 및 반응표면법 (response surface method)을 이용하여 IGBT의 효과적인 열 방출을 위한 최적 설계 및 최적 조합을 연구하였다. 우선 현 상태에서 조절이 가능한 전술한 6개의 인자인 DBC 기판의 재질 및 두께, DBC 금속 층의 두께, 솔더의 재질 및 두께, 베이스 플레이트의 재질들이 IGBT의 열 방출에 얼마나 영향을 미치는지 알아보기 위하여 요인 배치법(factorial design) 이용하여 파레토 (pareto) 차트를 작성하였고, 각 인자들이 IGBT의 열 방출에 어느 정도 영향이 있는지를 파악하였다.

Fig. 11은 6개의 인자들에 대한 파레토 차트이다. DBC 기판의 열전도계수가 IGBT 모듈 패키지의 열 방출에 가장 큰 영향을 미치는 인자임을 알 수 있다. 그 다음으로는 베이스 플레이트의 열전도계수, DBC 기판의 두께 순이었다. 솔더의 열전도계수, 솔더의 두께, DBC 구리층의 두께는 IGBT 모듈 패키지의 열 방출에 미치는 영향이 비교적 크지 않은 것으로 보인다.

한편, IGBT 각 재료의 두께가 얇을수록 소자의 온도는 감소한다. 그러나 DBC에 구성된 금속 층

인 구리 층의 경우, 구리 층의 두께는 얇을 때보다 두꺼울수록 열 방출에 효과적이고, 소자의 온도가 감소한다는 연구 결과가 있다. 이러한 상반된 결과는 소자의 솔더와 DBC 윗면 구리층의 열전도계수 차이가 크기 때문에 열 전달 각(heat spread angle)이 커지고, 그로 인해 열-유동 및 열-전달 면적이 넓어지기 때문이다. 따라서 DBC 구리 층의 두께를 너무 얇게 할 필요는 없다. 이에 대한 상세한 연구 결과는 기존의 연구 논문에 자세히 나타나 있다.^(18,19)

결론적으로 IGBT 모듈 패키지의 효과적인 열 방출을 위해서는 열전도 계수가 높은 DBC 기판 사용과 베이스 플레이트 및 DBC 기판의 두께를 얇게 하는 것이 중요하다.

Fig. 12는 요인배치법 결과에 대한 주효과도 (main effect plot)이다. Table 5는 요인배치법의 인자로 선정된 재료의 열전도계수와 두께의 수준을 나타내고 있으며, 6 인자 2 수준의 1/2 부분 요인 설계(fractional factorial designs)를 하여 총 32 회 수행하였다. 요인배치법의 수행 결과로부터 IGBT 소자의 온도를 최소화하기 위한 최적 설계조건은 DBC 기판의 열전도계수가 265 W/m·K, 두께는 0.25 mm, 솔더의 열전도계수가 78 W/m·K, 두께는 0.05 mm, 베이스 플레이트는 393 W/m·K, 그리고 DBC의 금속 층의 두께는 1 mm일 때이다. Fig. 13 및 Fig. 14는 최적화된 설계 변수들의 조합을 사용하여 열 저항을 최소화한 모델의 온도 분포이다. 최적화된 모델을 해석한 결과는 Fig. 14와 같이 소자의 온도가 약 130℃로 최소화 되는 것을 확인할 수 있다. 현재 사용된 모델의 IGBT 소자의 온도가 160℃임을 감안하면, 최적 설계를 통하여 온도를 약 30℃ 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 제작된 IGBT 모듈 패키지에서 IGBT소자의 열측정을 통하여 실험값과 수치해석

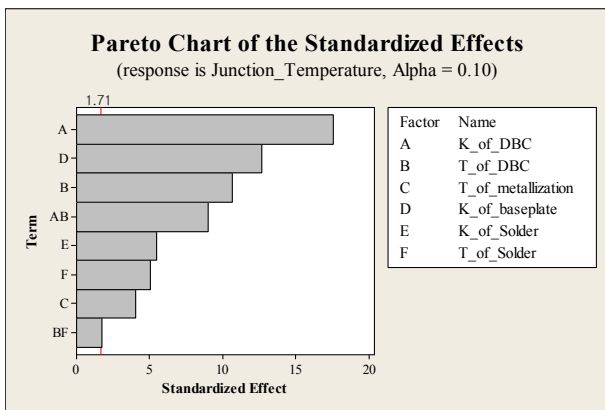


Fig. 11 Pareto chart of the factor effects

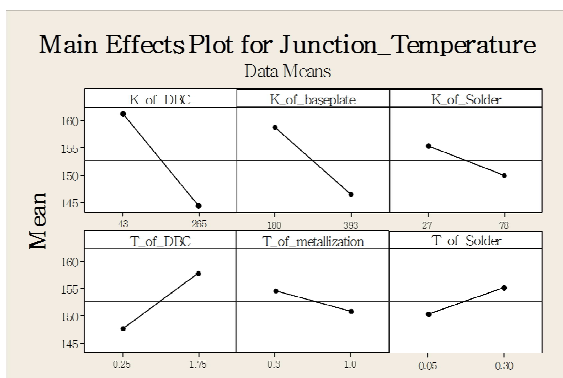


Fig. 12 Main effects plot for junction temperature

Table 5 Factors and levels in DOE matrix for numerical simulation

Factors		Low	High
Thermal conductivity (W/m·K)	Solder	27	78
	DBC substrate	43	265
	Baseplate	180	393
Thickness (mm)	Solder	0.05	0.3
	DBC substrate	0.5	1.75
	Copper of DBC	0.3	1

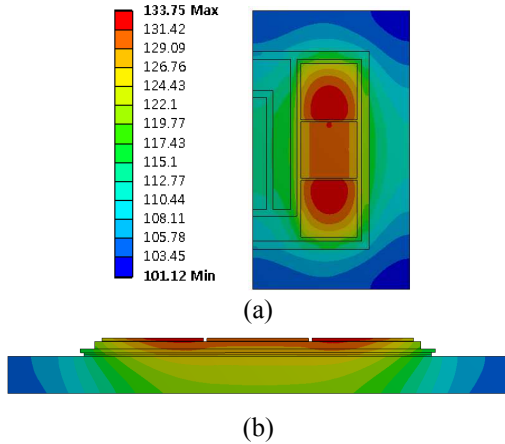


Fig. 13 Results of temperature distribution for the optimization model by RSM (a) Top view (b) Cross sectional view

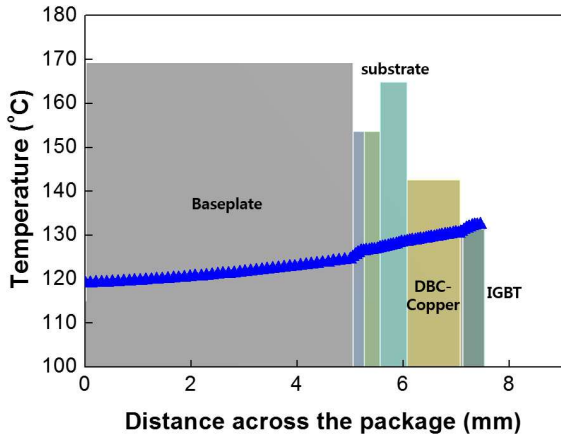


Fig. 14 Results of temperature across the IGBT module package using the optimization model

값을 비교하지는 못하였다. 이는 IGBT 모듈 패키지를 설계함에 있어서, 우선 수치해석을 통하여 모듈 패키지의 재료 및 구조의 설계 가이드라인을 주고자 함이며, 실제 온도 측정을 통한 실험값과 수치해석의 온도 값의 비교는 향후에 진행될 예정이다.

4. 결론

본 연구에서는 전동차용 고전압 대전류용 IGBT 모듈 패키지에 대하여 유한요소 방열해석을 수행하였다. 또한 실험계획법을 이용하여 열 저항 감소와 효과적인 패키지의 열 방출을 위한 주요 인자 분석을 수행하였다.

DBC 기판의 경우 열전도계수가 높은 BeO 기판과 AlN 기판이 열 방출에 가장 효과적이다. 하지만, 기판의 두께가 얇아질 경우 BeO 기판은 절연 특성을 유지하지 못한다. 반면, AlN 기판은 0.5 mm

이하의 얇은 두께에서도 절연 특성을 유지할 수 있어, AlN 기판이 열 방출에 가장 효과적이라고 판단된다. 솔더의 경우 열전도계수가 높고 두께가 얇을 수록 열 방출에 효과적이다. 또한, 열전도계수가 낮은 재료의 솔더는 두께에 따른 소자의 온도 변화 차이가 크다. 요인배치법과 반응표면법 분석 결과 소자의 열 방출에 영향을 미치는 인자는 DBC의 열전도계수, 베이스플레이트의 열전도계수, DBC의 두께 순으로 주요 인자임을 알 수 있었다. 솔더의 두께와 열전도계수는 비교적 영향이 적었다. 실험계획법의 요인배치법과 반응표면법을 통해 IGBT 모듈 패키지를 최적화하였을 때, 현재 모델의 소자 온도인 약 160°C에서 약 130°C로 약 30°C 가량 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 소관 연구개발사업의 일환인 “전동차 동력제어용 모듈형 IGBT 개발”의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

(References)

- (1) Wang, Y., Wu, Y., Jones, S., Dai, X. and Liu, G., 2014, “Challenges and Trends of High Power IGBT Module Packaging,” *Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, pp. 1~7.
- (2) Jung, C. H., Chung, Y. S. and Lee, H. W., 2009, “Investigation on Thermal Characteristics of Heat Sinks for Power Module Using STM,” *J. Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, pp. 686~697
- (3) Kim, K. S., Choi, D. H. and Jung, S. B., 2014, “Overview on Thermal Management Technology for High Power Device Packaging,” *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 21(2), pp. 13~21.
- (4) Lu, H., Bailey, C. and Yin, C., 2009, “Design for Reliability of Power Electronics Modules,” *Microelectron. Reliab.*, Vol. 49, No. 9-11, pp. 1250~1255.
- (5) Yoon, J. W., Bang, J. H., Ko, Y. H., Yoo, S. H., Kim, J. K. and Lee, C. W., 2014 “Power Module Packaging Technology with Extended Reliability for Electric Vehicle Application,” *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 21(4), pp. 1~13.
- (6) Schilling, O., Schäfer, M., Mainka, K., Thoben, M. and Sauerland, F., 2012, “Power Cycling Testing and FE Modelling Focused on Al Wire Bond Fatigue in High Power IGBT Modules,” *Microelectron. Reliab.*, Vol. 52, pp. 2347~2352.

- (7) Marcault, E., Breil, M., Bourennane, A., Tounsi, P. and Dupuy, P., 2011, "Impact of the Solder Joint Ageing on IGBT I-V Characteristics Using 2D Physical Simulations," *Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems*, pp. 1~4.
- (8) Liao, L. L., Hung, T. Y., Liu, C. K., Li, W., Dai, M. J. and Chiang, K. N., 2014, "Electro-Thermal Finite Element Analysis and Verification of Power Module with Aluminum Wire," *Microelectronic Engineering*, Vol. 120, pp. 114~120.
- (9) Hung, T. Y., Chiang, S. Y., Chou, C. Y., Chiu, C. C. and Chiang, K. N., 2010, "Thermal Design and Transient Analysis of Insulated Gate Bipolar Transistors of Power Module," *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 12th IEEE Intersociety Conference*, pp. 1~5.
- (10) Ishizaki, T., Satoh, T., Kuno, A., Tane, A., Yanase, M., Osawa, F. and Yamada, Y., 2013, "Thermal Characterizations of Cu Nanoparticle Joints for Power Semiconductor Devices," *Microelectron. Reliab.*, Vol. 53, pp. 1543~1547.
- (11) Hocine, R., Stambouli, A. B. and Saidane, A., 2003, "A Three-Dimensional TLM Simulation Method for Thermal Effect in High Power Insulated Gate Bipolar Transistors," *Microelectronic Engineering*, Vol. 65, pp. 293~306.
- (12) Trigkidis, G., Bousbaine, A. and Thorn, R., 2006, "Thermal Modelling of IGBT Devices" *Proceedings of the 41st International, Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Vol. 2, pp. 584~588.
- (13) Wang, Z., Qiao, W., Tian, B. and Qu, L., 2014, "An Effective Heat Propagation Path-Based Online Adaptive Thermal Model for IGBT Modules," *Application Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 513~518.
- (14) Godbold, C. V., Sankaran, V. A. and Hudgins, J. L., 1995, "Thermal Analysis of High Power Modules," *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Vol. 1, pp. 140~146
- (15) Nishimura, Y., Morozumi, A., Mochizuki, E. and Takahashi, Y., 2006, "Investigations of all Lead Free IGBT Module Structure with Low Thermal Resistance and High Reliability," *Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD)*, pp. 1~4.
- (16) Wang, Z., Qiao, W., Tian, B. and Qu, L., 2014, "An Effective Heat Propagation Path-Based Online Adaptive Thermal Model for IGBT Modules," *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 513~518.
- (17) Ishizaki, T., Satoh, T., Kuno, A., Tane, A., Yanase, M., Osawa, F. and Yamada, Y., 2013, "Thermal Characterizations of Cu Nanoparticle Joints for Power Semiconductor Devices," *Microelectron Reliab.*, Vol. 53, pp. 1543~1547.
- (18) Kwak, Y. H., Lee, Y.K., Cho, J. H., Hong, C. S., Kim, K. S. and Suh, B. S., 2013, "Numerical Study on Thermal Characteristics of High Power Semiconductor Modules," *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 7, pp. 87~90.
- (19) Xu, Y. and Hopkins, D. C., 2014, "Misconception of Thermal Spreading Angle and Misapplication to IGBT Power Modules," *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 545~551.