

IGBT 배열과 설치 위치에 따른 히트 싱크 방열 성능

Thermal Performance of a Heat Sink According to Insulated Gate Bipolar Transistor Array and Installation Location

박승재(Seung-Jae Park)¹, 윤영찬(Youngchan Yoon)¹, 이태희(Tae-Hee Lee)^{2†}, 이관수(Kwan-Soo Lee)^{1†}
¹한양대학교 기계공학부, ²수원과학대학교 건축기계설비과

¹School of Mechanical Engineering, Hanyang Univeristy, Seoul, 04763, Korea

²Department of Building Technology, Suwon Science College, Hwaseong, 18516, Korea

(Received September 30, 2017; revision received November 6, 2017; Accepted: November 8, 2017)

Abstract Thermal performance of a heat sink for an inverter power stack was analyzed in terms of array and installation location of an Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT). Thermal flow around the heat sink was calculated with a numerical model that could simulate forced convection. Thermal performance was calculated depending on the array and location of high- and low-power IGBTs considering the maximum temperature of IGBT. The optimum array and installation location were found and causes were analyzed based on results of numerical analysis. For the numerical analysis, experiment design considered the installation location of IGBT, ratio of heat generation rates of high- and low-power IGBTs, and velocity of the inlet air as design variables. Based on numerical results, a correlation that could calculate thermal performance of the heat sink was suggested and the maximum temperature of the IGBT could be predicted depending on the installation method.

Key words Heat sink(히트 싱크), Forced convection(강제 대류), Partial heating(부분 발열),
Insulated gate bipolar transistor(절연 게이트 양극성 트랜지스터)

† Corresponding author, E-mail: thlee@ssc.ac.kr, ksleehy@hanyang.ac.kr

기호설명

A	: 면적 [m^2]	Re	: Reynolds 수, 식(7)에서 정의됨
C	: 상수	s	: 환 간격 [mm]
c_p	: 비열 [$J/kg \cdot ^\circ C$]	T	: 온도 [$^\circ C$]
G	: 생성항	t	: 두께 [mm]
H	: 높이 [mm]	u	: 속도 [m/s]
h	: 대류 열전달 계수 [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]	V	: 유입 공기 유속 [m/s]
k	: 전도 열전달 계수 [$W/m \cdot ^\circ C$]	w	: 너비 [mm]
L	: 길이 [mm]	x	: IGBT 설치 위치 [mm]
N	: 환 개수	Y	: 소산항
Nu	: Nusselt 수, hL/k		
P	: 압력 [Pa]		
Pr	: Prandtl 수, $c_p \mu / k$		
\dot{Q}	: 발열량 [W]		
\dot{q}	: 열유속 [W/m^2]		
R_{th}	: 열저항 [$^\circ C/W$]		

그리스 기호

η	: 부분 발열 히트 싱크 효율
μ	: 점성 계수 [$kg/m \cdot s$]
ρ	: 밀도 [kg/m^3]
σ	: 난류 Prandtl 수

하첨자

- ave* : 평균
- b* : 히트 싱크 베이스
- conv* : 대류 열전달
- eff* : 유효
- f* : 환
- high* : 고출력 IGBT

- i* : 이상
- k* : 난류 운동 에너지
- low* : 저출력 IGBT
- max* : 최대값
- t* : 난류
- ω : 난류 소산률
- ∞ : 유입 공기

1. 서 론

기존의 수 MW급 대용량 산업용 팬, 펌프, 컴프레서들은 대부분 직입기동(directly in start-up) 방식으로 작동되고 있어 에너지 소비가 크다. 최근 환경 문제로 인한 에너지 절약에 대한 요구가 높아짐에 따라 대용량 모터의 에너지 사용량을 줄일 수 있는 산업용 인버터가 각광 받고 있다. IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)는 구동 전력이 작고, 고전압 및 대전류 전력의 고속 스위칭이 가능하여 산업용 인버터의 전력 반도체로 사용되고 있다.⁽¹⁾ 하지만 IGBT에는 고전압, 대전류의 전력이 흐를 뿐 아니라, 고속 스위칭 중에 발생하는 스위칭 손실과 도통 손실로 인해 고발열이 발생한다. IGBT 온도가 일정 온도 이상으로 상승할 경우, IGBT 소자에 열화 현상이 발생하고 패키지의 열변형으로 인한 신뢰성 문제가 일어나게 된다.⁽²⁾ 따라서 IGBT를 최대 한계 온도 이하로 유지시킬 수 있는 방열 시스템이 반드시 구비되어야 한다.

Fig. 1은 산업용 인버터의 파워 스택이다. IGBT 6개가 히트 싱크 베이스 면 전면부에 설치되어 있고, 후면부에는 커패시터 14개가 설치되어 있으며 커버가 외부를 둘러싸고 있다. 히트 싱크는 대표적인 전자 기기 방열 시스템으로, 히트 싱크 베이스 면과 발열체의 크기가 유사한 균일 발열 조건에서 히트 싱크의 방열성능을 향상시키기 위한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 하지만 Fig. 1의 인버터용 파워 스택의 경우, IGBT에서 99.5% 이상의 열량이 발생하고 커패시터에서는 0.5% 미만의 열량이 발생하기 때문에 히트 싱크 베이스 면의 IGBT

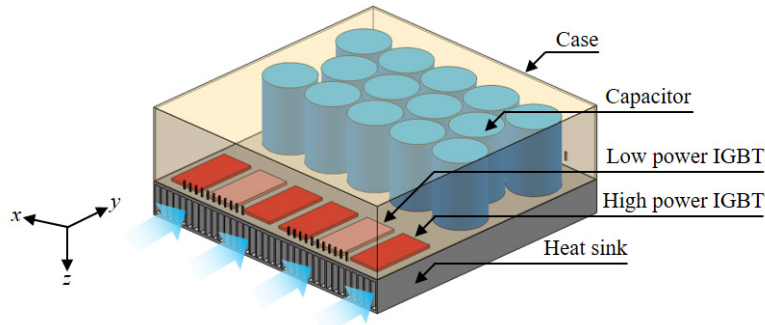
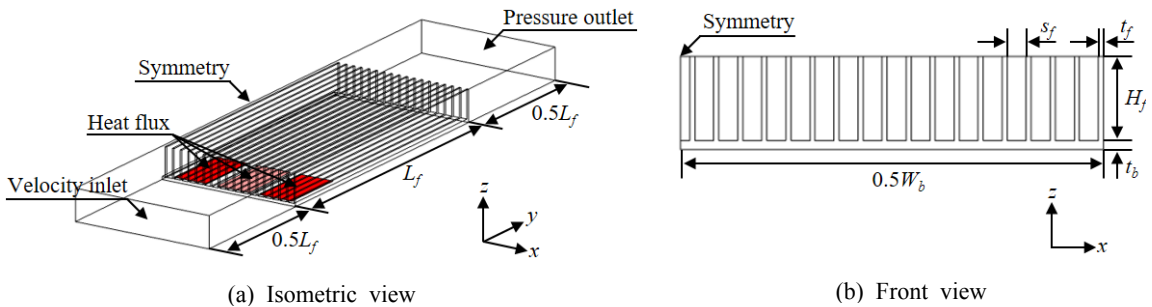


Fig. 1 Configuration of the industrial inverter power stack.



(a) Isometric view (b) Front view

Fig. 2 Computational domain and geometric parameters.

설치 영역에 집중된 부분 발열이 일어난다. 따라서 기존의 균일 발열 조건의 히트 싱크 연구 결과를 파워 스택의 히트 싱크에 적용하기 어렵다. 부분 발열 히트 싱크의 방열 성능은 기본적인 연구만 진행되어 왔다. Lelea⁽³⁾는 부분 발열이 발생하는 마이크로 채널 히트 싱크의 방열 성능에 대해 연구하였다. 부분 발열 위치를 전면부, 중앙, 후면부 이동하며 히트 싱크 최고 온도를 비교하고 그 결과 전면부 설치가 히트 싱크 최고 온도를 낮추는 것을 발견하였다. Anbumeenakshi와 Thansekhar⁽⁴⁾은 다양한 불균일 발열 조건의 마이크로 채널 히트 싱크의 방열 성능에 대해 연구하였다. 그 결과 전면부 쪽의 발열 조건에서 히트 싱크 최고 온도가 낮아짐을 확인하였다. 하지만 이전의 연구들은 작동 유체가 물 또는 물을 기반으로 한 나노 유체이다. 또한 마이크로 단위의 히트 싱크를 연구 대상으로 했기 때문에 인버터 파워 스택용 히트 싱크에 이전의 연구 결과를 적용하기 어렵다. Emekwuru et al.⁽⁵⁾은 50×50 mm 베이스 면을 가지는 히트 싱크의 발열면의 위치를 전면부, 중앙, 후면부로 변경하면서 히트 싱크의 방열 성능을 계산하였다. 그 결과, 발열면을 중앙에 설치한 히트 싱크의 열저항 값이 가장 낮았다. 하지만 그들의 연구에서 발열면의 위치는 연속적으로 변경되지 않고, 전면부, 중앙, 후면부 설치로 3등분하였기 때문에 중앙 설치가 최적의 발열면 위치라고 할 수 없다. 또한 그들이 선정한 히트 싱크 방열 성능 인자인 열저항의 경우, 히트 싱크의 평균 온도를 계산하기 때문에 IGBT가 설치된 위치, 즉, 발열면의 최고 온도를 낮춰야 하는 파워 스택용 히트 싱크에 그들의 결과를 적용하는 것은 바람직하지 않다.

본 연구에서는 4개의 고출력 IGBT와 2개의 저출력 IGBT가 설치된 히트 싱크의 방열 성능에 대해 연구한다. 히트 싱크에서의 대류 열전달을 모사할 수 있는 수치 모델을 사용하고, 기존의 상관식을 이용하여 수치모델의 신뢰도를 검증한다. 신뢰성이 검증된 수치 모델을 이용하여 IGBT 최고 온도를 낮출 수 있는 IGBT 설치 배열을 탐색한다. 또한 최적 배열 IGBT의 설치 위치에 따른 히트 싱크의 방열 성능을 계산하여 최적의 설치 위치를 구하고, 위치에 따른 방열 성능을 예측할 수 있는 상관식을 제안한다.

2. 수학적 모델링

2.1 수치 해석 모델

Fig. 2는 사각 히트 싱크와 주변 공기로 구성된 해석 영역이다. 계산 효율성을 위해 대칭 경계 조건을 이용하여 절반에 해당하는 영역을 계산하였다. IGBT가 설치된 영역에는 열유속 경계 조건을 적용하여 IGBT의 발열을 모사하였다. 공기의 입구와 출구에는 각각 velocity inlet 경계 조건과 pressure outlet 경계 조건을 사용하여 공기의 유동을 설정하였다. 이외의 경계면에서는 모두 단열 경계 조건을 적용하였다. 히트 싱크 주변의 열유동을 해석하기 위하여 다음과 같은 가정이 적용되었다.

- (1) 유동은 3차원 정상상태이다.
- (2) 공기와 히트 싱크의 물성치들은 온도에 독립적이다.
- (3) 복사 열전달은 무시할 수 있다.

Shear Stress Transport(SST) $k-\omega$ 난류 모델을 이용하여 열유동을 해석하였으며, 지배 방정식은 아래와 같다.^(6, 7)

Continuity :

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

Momentum :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

Turbulent kinetic energy :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k \quad (3)$$

Specific dissipation rate :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (4)$$

Energy

$$\rho C_p \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j T) = k_{eff} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} + (\tau_{ij})_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

여기서,

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (6)$$

2.2 수치 해석 방법

인버터 파워 스택에 설치된 사각 히트 싱크의 기하학적 수치는 흰 길이 $L_f = 500$ mm, 베이스 너비 $W_b = 500$ mm, 흰 높이 $H_f = 50$ mm, 흰 끝단 거리 $s_f = 11.2$ mm, 흰 두께 $t_f = 3$ mm, 베이스 두께 $t_b = 5$ mm이다. 히트 싱크는 알루미늄 합금 6,061($k = 169$ W/m·°C)를 이용하여 제작되었으며, 흰은 동일 간격으로 36개가 설치되었다. 히트 싱크 베이스면에는 120×60 mm 크기의 133 kVA급 파워 스택용 IGBT 6개가 설치되어 있으며, 고출력 IGBT 4개 설치 위치에는 $\dot{q}_{high} = 33,333$ W/m², 저출력 IGBT 2개 설치 위치에는 $\dot{q}_{low} = 16,667$ W/m²의 열유속 경계 조건을 적용하여 IGBT의 발열을 모사하였다. IGBT는 파워 스택 케이스 설치를 고려하여 양 끝에 20 mm 여유 공간을 두고 동일 간격으로 배치되었다. 히트 싱크 앞뒤의 공기 영역의 길이를 0.1 $L_f \sim 1 L_f$ 로 변화시키며 계산한 결과, velocity inlet 경계 조건과 pressure outlet 경계 조건이 히트 싱크 온도에 영향을 미치지 않는 0.5 L_f 를 공기 영역의 길이로 정하였다. 사각 격자를 사용하였고, 히트 싱크와 경계면 영역에서는 격자 간격을 조밀하게 생성하였다. 격자 수를 143,661~978,403개로 변화 시키며 히트 싱크 평균 온도가 1% 이내로 변화하는 406,560개를 기준 격자로 정하였다. 격자는 ANSYS ICEM release 17.0을 이용하여 생성하였다. 수치 해석은 유한 체적법을 사용하는 상용 CFD 해석 프로그램인 ANSYS Fluent release 17.0을 이용하여 지배 방정식을 계산하였다. 반복 계산시 종속 변수의 수렴은 종속 변수의 상대 오차 최대값이 모든 지배 방정식에서 10⁻⁶ 이하일 때 수렴된 것으로 판정하였다.

2.3 수치 해석 모델 검증

수치 해석 모델을 검증하기 위하여 Teertstra et al.⁽⁸⁾이 제안한 균일 열유속 조건에서 Re_{s_f} 에 따른 사각 히트 싱크의 Nu_{s_f} 값을 예측할 수 있는 상관식을 이용하였다. Re 와 Nu 의 특성 길이는 Teertstra et al.⁽⁸⁾이 제안한 바와 같이 흰 끝단 거리 s_f 로 하였다. Fig. 3은 $\dot{Q} = 500$ W, $T_\infty = 25$ °C 조건에서 수치 해석 결과와 상관식을 비교한 그래프이다. Re_{s_f} 는 히트 싱크 흰 채널에서의 공기 속도를 이용하기 위해 velocity inlet 면적과 흰 채널의 단면적의 비를 고려하여 다음과 같이 정의하였다.

$$Re_{s_f} = \frac{\rho V s_f}{\mu} \frac{A_{channel}}{A_{velocity\ inlet}} = \frac{\rho V s_f}{\mu} \frac{(N-1)s_f H_f}{w_b(H_f + t_b)} \quad (7)$$

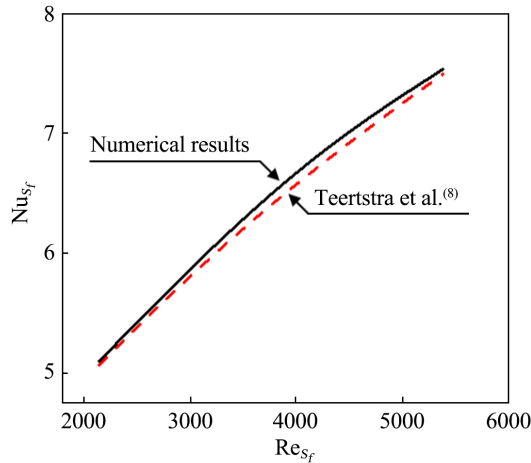


Fig. 3 Comparison of the numerical results and correlation of Teerstra et al.⁽⁸⁾ ($\dot{Q} = 500 \text{ W}$, $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$).

공기 유입 유속 $V = 2\sim 5 \text{ m/s}$ ($Re_{s_f} = 2,150\sim 5,400$) 범위에서 수치 해석과 상관식 사이의 Nu_{s_f} 에 대한 오차가 6% 이내로 발생하여 수치 해석의 해와 상관식의 해가 잘 일치하였다.

3. 결과 및 고찰

IGBT의 최고 온도를 낮출 수 있는 배열을 찾기 위해서 종 설치와 횡 설치를 고려하였다. 각각의 설치 방법에 대해서 다양한 고출력 IGBT와 저출력 IGBT 설치 위치에 따른 IGBT 최고 온도를 계산하고 최적의 배열을 선정하였다. IGBT 설치 위치를 전면부에서 후면부까지 연속적으로 변화시키며 IGBT 최고 온도 계산하여 최적의 설치 위치를 탐색하였다. 또한 IGBT 설치 위치에 따른 히트 싱크 열저항을 예측할 수 있는 상관식을 제안하였다.

3.1 IGBT 배열에 따른 방열 성능

Table 1은 중앙에 설치된 IGBT들의 다양한 배열에 따른 평균 온도와 국부 최대 온도를 계산한 결과이다. IGBT 설치 방법은 종 방향 설치와 횡 방향 설치를 고려하였으며, 각각의 설치 방법에 대하여 3가지 고출력, 저출력 IGBT 배치 방법을 고려하여 총 6가지 배열에 대한 수치 해석을 하였다. 히트 싱크의 열저항 R_{th} 는 다음 식을 이용하여 구하였다.

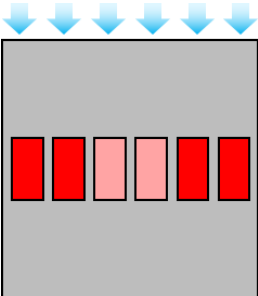
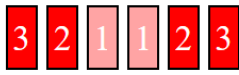
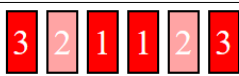
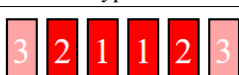
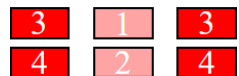


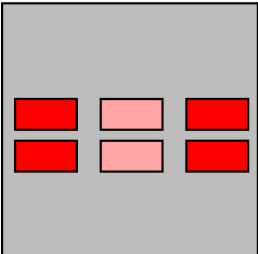
$$R_{th} = \frac{T_{max} - T_{\infty}}{\dot{Q}} \quad (8)$$

여기서, T_{max} 는 IGBT의 국부 최고 온도이다. IGBT는 국부 최고 온도에 따라서 failure가 발생하기 때문에 기존 연구들과 같이 히트 싱크 평균 온도 대신 IGBT 국부 최고 온도를 고려하여 히트 싱크 열저항을 구하였다. T_{∞} 는 공기 온도이고, \dot{Q} 은 IGBT 총 발열량이다.

종 설치(longitudinal installation)의 경우, 열 확산이 잘 발생하도록 고출력 IGBT를 중앙에 설치하는 것이 방열 성능을 개선시킨다. 따라서 Type 1보다 Type 2의 최대 온도가 더 낮게 계산되었다. 하지만 Type 3와 같이 고출력 IGBT들을 모두 중앙에 설치하게 되면 고출력 IGBT들 간의 전도 열전달로 인해 1번 IGBT의 온도가 급격히 상승하게 된다. 따라서 고출력 IGBT를 적절히 분산시킨 Type 2에서 IGBT 최대 온도가 가장 낮았다.

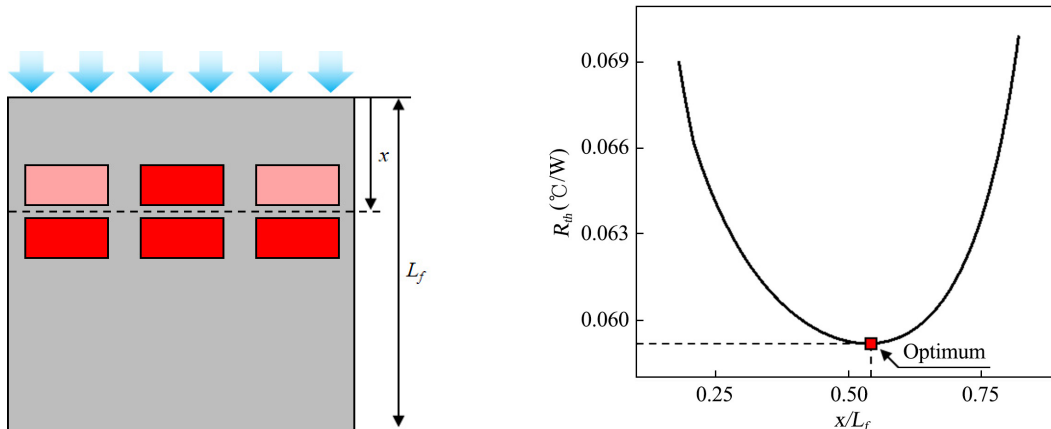
횡 설치(lateral installation)의 경우, 열 확산이 잘 발생하도록 고출력 IGBT를 중앙에 설치한 Type 5, 6의 최대 온도가 측면에 설치한 Type 4보다 낮았다. Type 5의 경우, 4번 IGBT에서 3번 IGBT 방향으로 전도 열전달이 발생하고 Type 6에서는 3번 IGBT에서 4번 IGBT 방향으로 전도 열전달이 발생한다. 공기 유입 방향과 전도 열전달 방향을 비교해보면 Type 5는 반대 방향이고 Type 6는 같은 방향이기 때문에 Type 5에서 IGBT 최대 온도가 가장 낮게 계산 되었다. 6개의 배열을 비교한 결과 횡 설치-Type 5를 최적 배열로 선정하였다.

Table 1 Temperatures of IGBTs with various installation methods and arrays

IGBTs installation method	Array of high power and low power IGBTs	Temperature of IGBTs(°C)
 Longitudinal installation	 Type 1	$T_{1_ave} = 76.0, T_{2_ave} = 90.7,$ $T_{3_ave} = 92.4$ $T_{max} = 98.6(\text{in IGBT } 3)$
	 Type 2	$T_{1_ave} = 91.4, T_{2_ave} = 80.4,$ $T_{3_ave} = 87.6$ $T_{max} = 97.7(\text{in IGBT } 1)$
	 Type 3	$T_{1_ave} = 96.5, T_{2_ave} = 91.1,$ $T_{3_ave} = 73.5$ $T_{max} = 102.6(\text{in IGBT } 1)$
	 Type 4	$T_{1_ave} = 69.4, T_{2_ave} = 72.7,$ $T_{3_ave} = 87.8, T_{3_ave} = 92.1$ $T_{max} = 97.7(\text{in IGBT } 4)$
	 Type 5	$T_{1_ave} = 86.2, T_{2_ave} = 90.9,$ $T_{3_ave} = 74.7, T_{3_ave} = 85.6$ $T_{max} = 96.0(\text{in IGBT } 2)$
	 Type 6	$T_{1_ave} = 87.3, T_{2_ave} = 91.0,$ $T_{3_ave} = 83.0, T_{3_ave} = 79.8$ $T_{max} = 96.5(\text{in IGBT } 2)$
 Lateral installation		

3.2 IGBT 설치 위치에 따른 방열 성능

IGBT 설치 위치의 히트 싱크 방열 성능에 대한 영향을 분석하기 위하여 IGBT 설치 위치 x 를 Fig. 4(a)와 같이 정의 하였다. IGBT 최고 온도를 낮출 수 있는 횡 설치-Type 5 배열 위치에 따라 고풍력 IGBT와 저출력 IGBT 설치 방법을 선정하였다. Fig. 4(b)는 $x/L_f = 0.18 \sim 0.82$ 범위에서 IGBT 설치 위치를 전면부에서 후면부로 변경하며 계산한 히트 싱크 열저항 R_{th} 이다. 그 결과, $x/L_f = 0.54$ 에서 가장 낮은 열저항 값이 계산되었다. 열 확산이 잘 발생하는 중앙 설치($x/L_f = 0.5$)보다 후면부 쪽이 최적 설치 위치인 이유는 공기 유입(대류 열전달) 방향과 전도 열전달 방향이 반대 방향으로 형성되면 열교환 효율이 증가하기 때문이다.



(a) Installation location of the IGBTs (b) Thermal resistance of heat sink according to the location of IGBTs

Fig. 4 Effect of installation location of IGBTs on the thermal performance of the heat sink.

3.3 상관식

IGBT가 횡 설치-Type 5로 설치된 히트 싱크의 강제 대류 열전달량을 다음 식과 같이 정의 할 수 있다.

$$\eta h A_{heatsink} (T_{max} - T_{\infty}) = \dot{Q}_{conv} \quad (9)$$

여기서, T_{max} 는 IGBT의 국부 최고 온도, T_{∞} 는 유입 공기 온도이다. $A_{heatsink}$ 는 히트 싱크의 열교환 면적이며, 다음 식을 이용해 구한다.

$$A_{heatsink} = 2(N-1)L_f t_f + N L_f t_f + (N-1)L_f s_f + 2(w_b t_b + N H_f t_f) \quad (10)$$

η 는 부분 방열 히트 싱크 효율로 균일 방열 히트 싱크와 상대적인 방열 성능을 나타내는 값이다. h 는 대류 열전달 계수로 Teertstra et al.⁽⁸⁾이 제안한 다음 식들을 이용해 구한다.

$$h = \frac{\tanh \sqrt{2Nu_i \frac{k_{\infty}}{k_{heatsink}} \frac{H_f}{s_f} \frac{H_f}{t_f} \left(\frac{t_f}{L_f} + 1 \right)}}{\sqrt{2Nu_i \frac{k_{\infty}}{k_{heatsink}} \frac{H_f}{s_f} \frac{H_f}{t_f} \left(\frac{t_f}{L_f} + 1 \right)}} \frac{k_{\infty}}{s_f} Nu_i \quad (11)$$

여기서,

$$Nu_i = \left[\frac{1}{\left(0.5 Re_{s_f} Pr \frac{L_f}{s_f} \right)} + \frac{1}{\left(0.664 \sqrt{Re_{s_f} \frac{L_f}{s_f}} Pr^{1/3} \sqrt{1 + \frac{3.65}{\sqrt{Re_{s_f} \frac{L_f}{s_f}}}} \right)} \right]^{-1/3} \quad (12)$$

\dot{Q}_{conv} 은 히트 싱크 대류 열전달량이다. 에너지 보존 법칙에 의해서 히트 싱크 대류 열전달량은 IGBT 총 방열량 \dot{Q} 과 동일하다. 따라서 η 값을 구할 수 있다면, 식(9)를 이용하여 히트 싱크의 열저항 값을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{T_{max} - T_{\infty}}{\dot{Q}} = R_{th} = \frac{1}{\eta h A_{heatsink}} \quad (13)$$

IGBT 설치 위치(x/L_f), 유입 공기 유속(Re_{s_f}), 고출력과 저출력 IGBT 방열량 비율($\dot{q}_{low}/\dot{q}_{high}$)에 따라 히트 싱크 R_{th} 를 구하기 위하여 η 를 계산할 수 있는 상관식을 탐색하였다. Table 2의 설계 인자 범위와 level에서 Full Factorial Design(FFD)을 사용하여 실험점을 선정하였다. x/L_f 는 케이스 설치를 위해 양 끝 20 mm의 여유 간격을 고려한 범위를 탐색하였으며, Re_{s_f} 와 $\dot{q}_{low}/\dot{q}_{high}$ 의 범위는 인버터에서 발생할 수 있는 운전 조건들을 고려하여 선정하였다. 총 656개의 실험점에서 수치 해석을 진행하고 수치 해석 결과를 회기 분석 하였다. 그 결과, x/L_f , Re_{s_f} , $\dot{q}_{low}/\dot{q}_{high}$ 에 따라 η 를 예측할 수 있는 다음과 같은 상관식을 제안하였다.

Table 2 Range and level of the design variables in the regression analysis

Design variable	Range	Level
x/L_f	$0.18 < x/L_f < 0.82$	41
Re_{s_f}	$1,009 < Re_{s_f} < 4,037$ ($1 \text{ m/s} < V < 4 \text{ m/s}$)	4
$\dot{q}_{low}/\dot{q}_{high}$	$0.1 < \dot{q}_{low}/\dot{q}_{high} < 1$	4

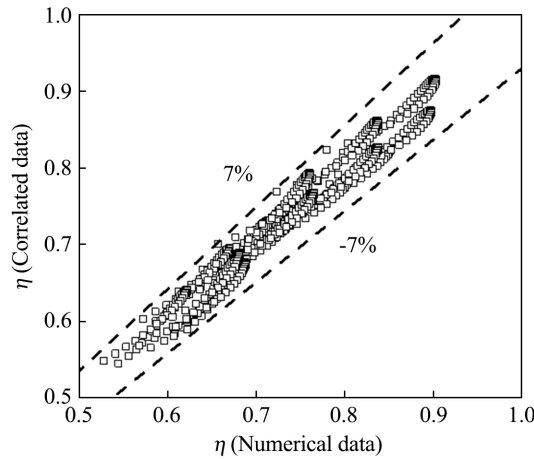


Fig. 5 Comparison of η of the numerical analysis and correlation.

$$\eta = C_1 + C_2 \left[\left(\frac{x}{L_f} \right)^2 + C_3 \left(\frac{x}{L_f} \right) + C_4 \right] + C_5 \left(\frac{\dot{q}_{low}}{\dot{q}_{high}} \right)^{C_6} \left(\frac{Re_{sf}}{1000} \right)^{C_7} \quad (14)$$

여기서,

$$\begin{aligned} C_1 &= 0.8212, C_2 = -0.9227, C_3 = -1.006, C_4 = 0.5051, \\ C_5 &= 0.1712, C_6 = 0.5117, C_7 = 0.4658 \end{aligned} \quad (15)$$

식(14), 식(15)의 결정 계수 R^2 는 0.96이다. Fig. 5는 수치 해석 결과와 상관식의 η 값을 비교한 그래프이다. 수치 해석과 상관식의 결과의 최대 오차는 7% 이하로 측정되어 상관식이 수치 해석의 결과를 잘 반영하고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 IGBT 배열과 설치 위치에 따른 인버터 파워 스택용 히트 싱크의 방열 성능을 분석하였다. SST $k-\omega$ 난류 모델을 이용하여 히트 싱크에서의 대류 열전달 현상을 모사하고, 기존의 상관식을 이용하여 수치 모델의 타당성을 검증하였다. IGBT 최고 온도를 낮출 수 있는 고출력 및 저출력 IGBT 배열을 탐색하였다. 그 결과 횡 설치-Type 5 배열이 최적의 배열임을 알 수 있었다. 최적 배열의 IGBT 설치 위치를 히트 싱크 전면부에서 후면부로 이동 시키며 IGBT 최고 온도를 고려한 히트 싱크 열저항을 계산하였다. 그 결과 후면부쪽으로 치우친 중앙 설치 위치가 히트 싱크 방열 성능을 개선 할 수 있는 설치 위치임을 알 수 있었다. FFD 실험 계획법을 이용해 얻은 656개 실험점들에 대해 수치 해석 및 회기 분석을 하여, IGBT 설치 위치, 고출력 IGBT와 저출력 IGBT의 발열량 비율, 유입 공기 속도에 따라 부분 발열 히트 싱크 효율 η 를 예측할 수 있는 상관식을 제안하였다.

본 연구 결과는 히트 싱크 베이스면에서 국부적인 고발열원인 IGBT의 설치 위치 최적화로 IGBT 최고 온도를 낮출 수 있을 뿐만 아니라, 상관식을 이용하여 설치 환경에 따른 IGBT의 최고 온도를 예측할 수 있어 좀 더 안전한 방열 설계를 가능하게 할 것이다.

후 기

본 연구는 2017년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20162010103830, 20164010200860).

References

1. Batard, C., Ginot, N., and Antonios, J., 2015, Lumped dynamic electrothermal model of IGBT module of inverters, *IEEE Transaction on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, Vol. 5, pp. 355-364.
2. 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.
3. Lelea, D., 2009, The heat transfer and fluid flow of a partially heated microchannel heat sink, *International Communication in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 794-798.
4. Anbumeenakshi, C. and Thansekhar, M. R., 2017, On the effectiveness of a nanofluid cooled microchannel heat sink under non-uniform heating condition, Vol. 113, pp. 1437-1443.
5. Emekwuru, N. G., Hall, F. R., and Spence, P. J., 2012, Partially heated heat sinks in a zero-bypass, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 343-349.
6. Menter, F. R., 1994, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA-Journal*, Vol. 32, pp. 269-289.
7. ANSYS Fluent 17.0 Theory Guide, 2015, Canonsburg, PA 15317 : ANSYS, Inc.
8. Teertstra, P., Yovanovich, M. M., and Culham, J. R., 2000, Analytical forced convection modeling of plate fin heat sinks, *Journal of Electronics Manufacturing*, Vol. 10, pp. 253-261.