

수치 해석을 통한 절연 게이트 양극성 트랜지스터 모듈의 히트 싱크 유로 형상에 따른 방열 성능 분석

손종현¹, 박성근², 김영범^{1*}

¹한양대학교 융합기계공학과, ²한양대학교 기계공학부

Numerical analysis of heat dissipation performance of heat sink for IGBT module depending on serpentine channel shape

Jonghyun Son¹, Sungkeun Park², Young-Beom Kim^{1*}

¹Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University

²Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

요약 본 연구는 절연 게이트 양극성 트랜지스터 모듈의 히트 싱크의 유로의 형상으로써 직선 유로, 한 번 꺾인 형태의 유로, 두 번 꺾인 형태의 유로를 적용하여, 유로의 형상에 따른 방열 성능을 분석하였다. 각 유로 형상에서 운전 조건에 대한 영향 또한 분석하기 위하여 냉각수의 유량과 공급 온도를 추가적으로 제어하며 분석을 진행하였다. 본 연구는 유동 해석을 통하여 이루어 졌으며, 상용 소프트웨어인 ANSYS Fluent를 사용하였다. 직선 유로보다 꺾인 형태를 갖는 유로의 방열량이 같은 운전 조건에서 최대 8.0 % 수준 개선되었으며, 개선 정도는 냉각수의 공급 온도와는 무관하였고, 냉각수의 유량이 많아질수록 개선 정도가 2.0 %에서 8.0 %까지 증가하였다. 그러나 두 번 꺾인 유로는 한 번 꺾인 유로와 비슷한 수준의 방열 성능을 보였고, 기생 손실에 영향을 주는 압력 강하량은 2.48~2.55배 수준으로 증가하는 결과를 보여, 방열 효율이 낮아지는 것을 확인 하였다. 이를 단위 압력 강하량 당 방열량으로 계산하여 비교하였으며, 직선 유로를 갖는 히트 싱크에서 그 값이 가장 높은 것을 확인하였다.

Abstract This study analyzed the effect on the cooling performance of the channel shape of a heat sink for an insulated gate bipolar transistor (IGBT). A serpentine channel was used for this analysis, and the parameter for the analysis was the number of curves. The analysis was conducted using computational fluid dynamics with the commercial software ANSYS fluent. One curve in the channel improved the heat dissipation performance of the heat sink by up to 8% compared to a straight-channel heat sink. However, two curves in the channel could not improve the heat discharge performance further. Instead, the two curves caused a higher pressure drop, which induces parasitic loss for the pumping of coolant. The pressure drop of the two-curve channel case was 2.48-2.55 times larger than that of a one-curve channel. This higher pressure drop decreased the heat discharge efficiency of the heat sink with two curves. The discharge heat per unit pressure drop was calculated, and the result of the straight heat sink was highest among the analyzed cases. This means that the heat discharge efficiency of the straight heat sink is the highest.

Keywords : CFD, Heat Sink, IGBT, Serpentine Channel, Water Cooling

본 논문은 한국에너지기술평가원의 산업기술혁신사업(과제번호: 20203030020200, 과제명: 대용량 풍력용 모듈구조 전력품질 제어기술 개발)의 지원을 받아 수행되었음.

*Corresponding Author : Young-Beom Kim(Hanyang Univ.)

email: ybkim@hanyang.ac.kr

Received December 18, 2020

Revised January 13, 2021

Accepted March 5, 2021

Published March 31, 2021

1. 서론

전 세계의 에너지 소비량은 개발도상국을 필두로 하여 지속적으로 늘어날 전망이다 [1], 인류 사회의 주된 에너지원인 화석연료는 매장량이 한정되어 있을 뿐만 아니라, 지속적인 화석연료의 사용으로 인하여, 지구온난화와 같은 환경오염을 야기하는 환경오염 물질이 계속해서 배출되어 왔다. 따라서 화석 연료를 대체할 수 있는 지속 가능하며 친환경적인 에너지원이 필요한 상황이다. 풍력 발전, 태양광 발전과 같은 신재생 에너지는 자연으로부터 에너지를 얻기 때문에 지속 가능하며, 친환경 적이다. 따라서 석유를 대체할 차세대 에너지원으로 각광받고 있다. 신재생 에너지로부터 생산한 전류를 제어하기 위해서는 인버터 또는 컨버터와 같은 전자 부품이 이용된다. 그 중 대표적인 소자가 절연 게이트 양극성 트랜지스터(IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor, 이하 IGBT)이다. IGBT를 비롯한 전자 소자들이 전류를 제어하는 과정에서 열의 형태로 전력 손실이 발생하는데, 이 열은 소자의 온도를 높여 수명을 단축시키고 소자의 성능을 저하시킨다. 따라서 전력 손실로 인하여 발생된 열을 방출하는 것이 매우 중요한데, 이때 히트 싱크가 이용된다. 히트 싱크는 전자 소자(발열부)와 접촉하여, 열을 핀(Fin)으로 전달하고, 핀 주위의 유체(기체 또는 액체)로 열을 전달하여 열을 시스템 외부로 배출하는 역할을 한다.

히트 싱크의 방열 성능을 높이기 위하여, 즉 열 저항을 낮추기 위하여 많은 여러 연구가 이루어져왔다. Kim 등 [2]은 히트 싱크의 두께를 제어하여 방열률을 계산하였으며, 히트 싱크의 두께가 얇아질수록 베이스의 두께가 얇을수록 방열률이 향상 되는 것을 확인하였다. Song 등 [3]은 재료의 열전도율과 방열 성능 사이에 관계에 대하여 연구하였으며, 전반적으로 열전도율이 좋은 재료보다, 축방향 열전도율이 높은 재료로 설계한다면 더 좋은 방열 성능을 내는 것을 확인하였다. Kim 등 [4]은 핀의 높이에 따른 히트 싱크의 온도 분포에 대하여 실험하였다. 핀의 높이가 감소할수록 열전달 면적이 감소하여 방열 성능이 떨어지는 결과를 보였다. Mohammed 등 [5]은 히트 싱크의 핀의 단면 형상을 지그재그 형상, 곡선 형상, 톱니 형상으로 제작하여 각 형상에 대한 방열 성능을 분석하였는데, 지그재그 형상으로 제작된 핀에서의 방열 성능이 가장 좋은 결과를 보였다. 이전 연구들에서는 베이스와 핀의 파라미터를 변경하여 방열 성능이 변화에 대한 연구를 수행하였으나, 냉각 유체를 제어하여 방열 성능을 개선한 연구가 부재하였다.

본 연구에서는 방열을 위한 유체로 액체를 이용하는 수냉 히트 싱크의 유로 형상을 제어하여, 유로 형상에 따른 방열 성능을 냉각수(coolant)의 유량 및 입구 온도 조건을 변경하며 분석하였다. 연구는 전산 유체 역학(CFD: Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD)을 통해 이루어 졌으며, 상용 소프트웨어인 Fluent를 사용하였다. 분석 결과를 방열량, 열 저항 그리고 기생손실에 영향을 주는 압력 강하 당 방열량으로 제시하여, 전자 소자용 히트 싱크 설계자들에게 설계를 위한 가이드를 제시하는 것을 목표로 하였다.

2. 해석 형상 및 조건

2.1 해석 형상

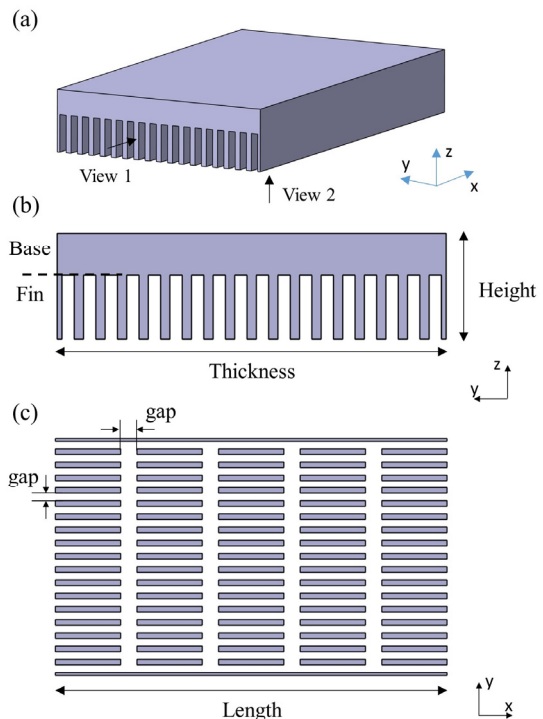


Fig. 1. Default case geometry; (a) 3D default model, (b) side view from View 1, (c) side view from View 2.

본 연구에서는 IGBT 소자의 베이스 플레이트 크기인 36 mm x 60 mm의 면적을 갖는 히트 싱크 베이스를 적용하였으며 [6], 초기 형상이라고 할 수 있는 일반적인 직선 유로를 갖는 형상은 Fig. 1과 같다. Fig. 1 (b)는

View 1에서의 바라보았을 때의 평면도이며, Fig. 1 (c)는 View 2에서 바라보았을 때의 평면도이다. 형상 파라미터의 값은 x방향의 값을 길이, y방향의 값을 두께, z방향의 값을 높이로 하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Geometrical parameters and the values

Geometrical parameter		Value	Unit
Base	Height	4	mm
	Thickness	36	mm
	Length	60	mm
Fin	Height	6	mm
	Thickness	0.86	mm
	Length	10	mm
	Gap (x direction)	2.5	mm
	Gap (y direction)	1.14	mm
Side wall	Thickness	0.43	mm
Internal partition	Thickness	0.86	mm

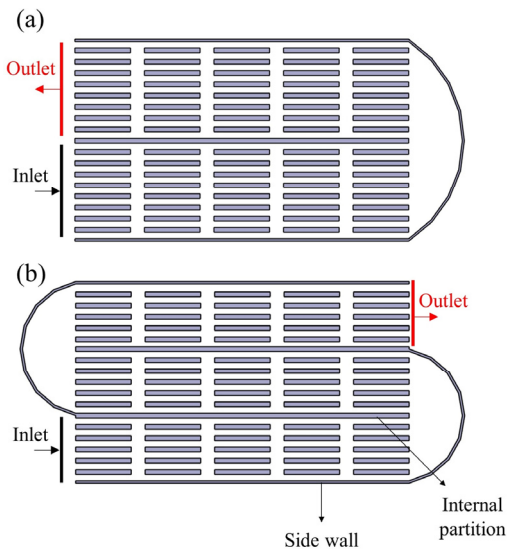


Fig. 2. (a) Fins and channel shape having one curve, (b) fins and channel shape having two curves.

본 연구의 주 변수인 유로의 형상은 Fig. 1의 직선 유로, Fig. 2 (a)인 1번 꺾인 형태의 유로, Fig. 2 (b)인 2번 꺾인 형태의 유로를 선정하였으며, 유로 형상이외의 파라미터는 고정하기 위하여, 유로의 꺾인 부분은 히트 싱크 베이스와 닿지 않도록 모델링을 진행 하였다. 뿐만 아니라 유로의 형상을 제외하고 모든 파라미터의 값은 직선 유로의 모델에 사용된 값을 이용하여 계산되었다.

2.2 지배 방정식

전산 유체 역학을 이용하여 유동 특성을 계산하기 위해서는 계산을 위한 지배 방정식들이 필요하다. 지배 방정식으로는 질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식, 에너지 보존 방정식이 있다.

2.2.1 질량 보존 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

위 식에서, ρ 는 유체의 밀도를 의미하며, u 는 속도를 의미한다.

질량 보존 방정식은 해석을 위하여 나는 부피 요소로 들어오고 나가는 질량의 총합은 0임을 의미하여, 본 연구에서는 생성되거나 소멸되는 질량은 없으므로 우변을 0으로 하였다.

2.2.2 운동량 보존 방정식

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) - \nabla P \quad (2)$$

위 식에서, ρ 는 유체의 밀도, u 는 속도, μ 는 동점도, P 는 압력을 의미한다.

운동량 보존 방정식은 유체의 운동량의 변화량은 외부로부터 가해지는 힘과 같다는 것을 의미하는 방정식이다. 여기서 말하는 외부로부터의 힘은 점성으로 인한 힘, 압력을 의미한다. 본 연구에서는 생성되거나 운동량 없으므로 생성 항을 0으로 하였다.

2.2.3 에너지 보존 방정식

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C_p \vec{u} T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

위 식에서, ρ 는 유체의 밀도, C_p 는 비열, u 는 속도, T 는 온도 그리고 k 는 열전도도를 의미한다.

Eq. (3)은 부피 요소로 들어오고 나가는 에너지의 총량은 같음을 보이는 에너지 보존 방정식이다. 좌변은 유체의 흐름으로 인하여 유입, 유출되는 에너지이며, 우변은 전도를 통하여 유입, 유출되는 에너지이다.

2.3 해석 조건

주 변수인 해석 형상에서 운전 조건에 따른 방열량을 분석하기 위하여, 운전 조건 또한 변수로 연구를 진행 하였다. 운전 조건 중 냉각수의 유량과 냉각수의 초기 온도를 선정하였다. 냉각수의 유량은 3, 6, 9, 12, 15 cm³/s

의 조건에 대하여 분석하였으며, 냉각수의 공급 온도는 30, 40, 50 °C에 대하여 분석하였다. 해석에 사용한 히트 싱크의 재료는 AL6063이며 밀도는 2700 kg/m³, 열전도도는 218 W/m·K, 비열은 900 J/kg·K이다[7, 8]. 냉각수로는 에틸렌글리콜 50% 희석 액을 사용하였으며 밀도는 1048.5 kg/m³, 열전도도는 0.435 W/m·K, 비열은 3626 J/kg·K이다[9]. 연구 목적인 방열량 측정을 위하여 히트 싱크의 상단부의 온도(열원의 온도)를 80 °C로 고정하여 해석을 진행하였으며, 냉각수를 통한 방열을 제외한 다른 열전달 현상은 무시하였다. 모든 해석 조건 중 가장 높은 두 번 꺾인 유로의 15 cm³/s 유속 조건에서 Reynolds 수가 102.9 수준이었으므로, 임계값에 미치지 못하여 모든 조건에서의 유동은 층류로 가정하였다. 해석은 ANSYS 13 FLUENT를 사용하여 수행되었으며, 정상상태 해석을 수행하였다. 분석 방법으로는 Finite volume method를 사용하였으며, Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations (SIMPLE) 알고리즘을 사용하여 계산을 수행하였다. Relaxation factor는 pressure는 0.3, momentum은 0.7, Energy는 1로 하여 계산을 진행 하였으며, continuity residual이 1e-7 이하로 내려갔을 때 수렴되었다고 판단하여 계산을 종료 하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구의 목적은 유로의 형상에 따른 방열량 계산이 기 때문에 동일 유로에서의 운전 조건 변화에 대한 방열량 비교는 연구 목적과 벗어난다. 뿐만 아니라 유량이 증가할수록, 냉각수의 초기 농도가 낮을수록 방열량이 늘어나는 것은 자명한 결과이므로 해당 변수에 대한 방열량 비교는 연구 성과로써 의미가 적다. 따라서 본 연구에서는 유로 형상으로 인한 방열량 차이만을 비교하고 분석 하였다. 방열량은 Eq. (4)를 통하여 계산을 하였다.

$$E_{dis} = \rho C_p Q (\bar{T}_{out} - \bar{T}_{in}) \quad (4)$$

위 식에서 E_{dis} 는 방열량, ρ 는 냉각수 밀도, C_p 는 냉각수 비열, Q 는 냉각수 유량, \bar{T} 는 출구와 입구에서의 평균 냉각수 온도이다. 해석 조건에서 언급한 바와 같이, 냉각수로 인한 방열만은 다루었기 때문에, 냉각수에 전달된 열량을 방열량으로 하여 이후 결과 분석을 수행하였다.

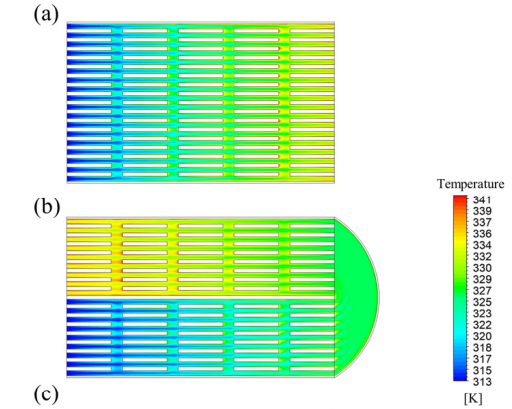


Fig. 3. Temperature contour at center plane of channel; (a) straight channel case, (b) one curve channel case, (c) two curves channel case.

Fig. 3은 여러 운전 조건의 중간 값이라고 할 수 있는 9 cm³/s 유량조건과 40 °C의 냉각수 공급온도 조건의 온도 contour이다. 해당 면은 유로의 중앙 면이다. 모든 케이스가 입구에서 출구로 갈수록 점점 온도가 높아지는 양상을 보이며, 두 번 꺾인 유로를 가진 케이스(Fig. 3 (c))에서는 출구 근처에서 유체 간 온도 구배가 커지는 것을 확인할 수 있다. 공급 유량이 증가할수록, 즉 유로 내에서의 유속이 빨라질수록 온도 구배가 커지는 경향을 보이며, 이는 원심력에 의하여 냉각수가 유로의 바깥 방향으로 많이 공급되고 안쪽 방향으로는 적게 공급되어, 냉각수가 적게 공급되는 부위에서 열용량이 작아 온도가 급격하게 증가하기 때문이다. 두 번 꺾인 유로를 갖는 케이스에서의 속도 벡터는 Fig. 4에서 확인할 수 있다.

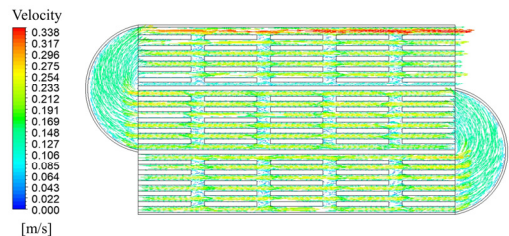


Fig. 4. Velocity vector at two curves channel case.

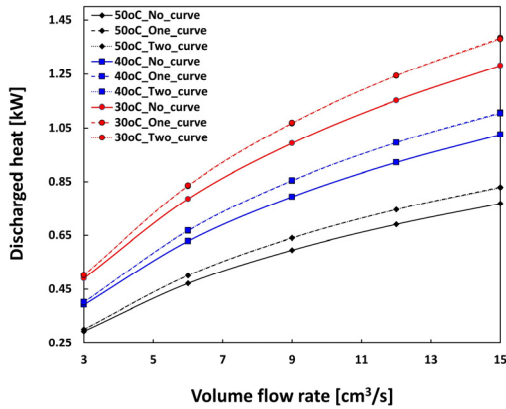


Fig. 5. Discharged heat for volume flow rate at different channel shape cases; (a) 50 °C of coolant initial temperature condition, (b) 30 °C of coolant initial temperature condition.

각 유로의 형상에 대한 방열량은 Fig. 5에 제시되어있다. 본 연구에서는 냉각수의 공급 온도를 3가지 조건 (30, 40, 50 °C)에 대하여 분석하였다. 직선 유로에 비해서 꺾인 형상을 가진 유로가 유량이 늘어날수록 큰 성능 개선을 보인 것은 주목할 만한 결과이다. 그러나 꺾인 횟수가 증가하여도 성능은 거의 변화가 없었으며, 유량이 늘어나면 오히려 조금이나마 방열량이 감소하는 결과를 보였다. Fig. 6에서는 냉각수 전반의 온도 분포를 확인할 수 있다. Fig. 3에서와 같이 냉각핀의 뒷부분, 2번 꺾인 유로의 경우는 꺾인 후 유로의 안쪽에서 유속이 낮아 냉각수의 온도가 높은 경향을 보인다. 또 히트 싱크의 하판과 접촉하는 부분의 냉각수의 온도는 중앙부의 냉각수 온도보다 높은 경향을 보이는데, 이는 히트 싱크를 따라 하판까지 전도된 열이 냉각수로 전달되기 때문이다. Table 2에서 50 °C 냉각수 입구 온도 조건에서의 방열량 값을 확인할 수 있다.

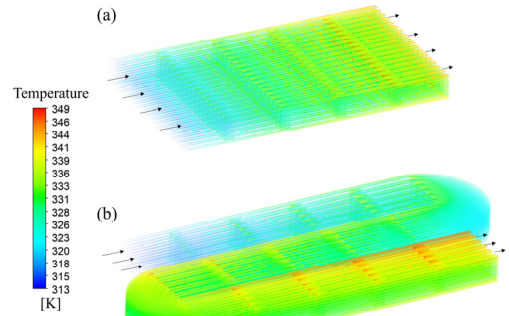


Fig. 6. Temperature volume rendering at coolant channel; (a) straight channel case, (c) two curves channel case.

Table 2. Discharged heat under coolant initial temperature, 50 °C condition.

Analysis condition		Value	Unit
No curve ($T_1=50\text{ }^\circ\text{C}$)	3 cm^3/s	0.295	kW
	6 cm^3/s	0.472	kW
	9 cm^3/s	0.596	kW
	12 cm^3/s	0.691	kW
	15 cm^3/s	0.769	kW
One curve ($T_1=50\text{ }^\circ\text{C}$)	3 cm^3/s	0.301	kW
	6 cm^3/s	0.500	kW
	9 cm^3/s	0.640	kW
	12 cm^3/s	0.746	kW
	15 cm^3/s	0.830	kW
Two curve ($T_1=50\text{ }^\circ\text{C}$)	3 cm^3/s	0.302	kW
	6 cm^3/s	0.502	kW
	9 cm^3/s	0.641	kW
	12 cm^3/s	0.746	kW
	15 cm^3/s	0.828	kW

열 저항도 방열량과 비슷한 경향을 보였다. 직선 유로에서 높은 열 저항을 보였으며, 한 번 꺾인 유로를 갖는

Table 3. Calculated discharged heat at 9 cm^3/s and 40 °C inlet condition for CFD model validation.

	Straight channel	1 curve channel	2 curves channel	Unit
Interface area, A	0.01366	0.01455	0.01492	m^2
Average velocity, V	0.0504	0.0955	0.1571	m/s
Reynolds number, Re	19.79	37.51	61.72	-
Nusselt number, Nu	7.07	7.92	8.87	-
Thermal transfer coefficient, h	1605.75	1799.27	2014.84	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
Discharged heat	0.88	1.05	1.20	kW
Discharged heat (CFD)	0.79	0.85	0.86	kW

히트 싱크와 두 번 꺾인 유로를 갖는 히트 싱크의 열 저항이 거의 동일한 수준의 값을 보였다. 그 경향은 Fig. 7에서 확인 할 수 있다. 유량이 늘어나면 급격히 개선되다가, 특정 값(본 연구에서는 $6 \text{ cm}^3/\text{s}$) 이후로는 개선 정도가 완만해 지는 결과를 보였다. 여기서 비교해야 할 결과 값이 하나 더 있는데, 바로 압력 강하량 이다. 압력 강하량은 냉각수를 공급하기 위해서 사용하는 기생 손실과 직접적인 연관이 있는 결과 값이다.

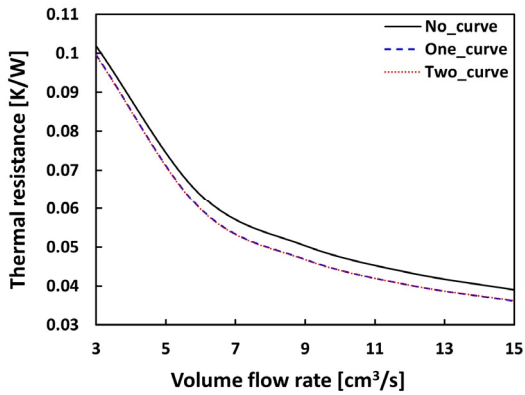


Fig. 7. Thermal resistance of each channel case.

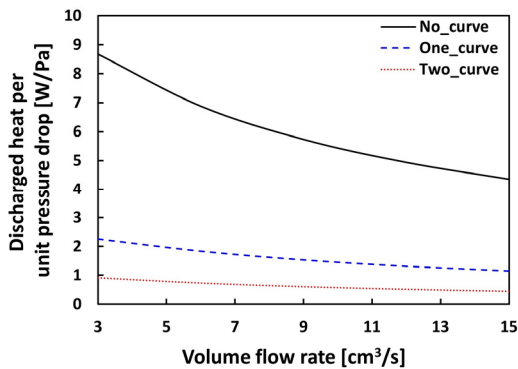


Fig. 8. Discharged heat per unit pressure drop of each channel case.

위의 그래프(Fig. 8)는 압력 강하 1 Pa당 열 배출량을 나타낸 그래프이다. 직선 유로에서 가장 높은 수치를 보이며, 꺾인 횟수가 늘어날수록 크게 감소하는 결과를 보였다. 특히 방열량이 비슷했던 한번 꺾인 유로를 갖는 히트 싱크와 두 번 꺾인 유로를 갖는 히트 싱크에서의 압력 강하량이 약 2배가 차이 나서, 두 번 꺾인 유로를 갖는 히트 싱크에서 1 Pa당 방열량이 한번 꺾인 유로를 갖는 히트 싱크의 값의 반에 머무는 결과를 확인 할 수 있다. 따라서 설계 제약 조건으로 냉각수 공급을 위하여 쓸 수 있

는 출력이 낮은 경우에는 직선 유로의 히트 싱크를 쓰는 것이 좋으며, 냉각수 공급을 위한 출력에 여유가 있을 경우에는 한 번 꺾인 유로를 갖는 히트 싱크를 사용하는 것이 효율적임을 알 수 있다.

3.1 해석 결과 검증

위의 결과를 검증하기 위하여 이상적인 조건에서의 방열량을 계산하여 비교하였다. 이상적인 조건에 적용된 가정은 아래와 같다.

- 냉각수의 온도는 유로를 흐르는 동안 변하지 않는다.
- 히트 싱크의 온도는 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 유지된다.
- 흐름 방향 길이가 수력학적 지름보다 크기 때문에 입구 영역에서 발달 중인 층류 유동이다.

위와 같은 가정을 통하여 1D로 다룰 수 있으며, 직접 계산이 가능하다. 냉각수의 공급 유량 $9 \text{ cm}^3/\text{s}$ 공급 온도 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 조건에서의 계산 값을 Table 3에 나타내었다. 이상적인 조건에서 계산된 값보다 해석을 통해 얻어진 값이 낮으며, 이상적인 조건에서 가장 먼 해석 조건인 두 번 꺾인 유로에서 그 차이가 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 위 계산을 통하여, 해석 결과가 타당한 범위 안에 들어온다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 IGBT 모듈에서 발생하는 손실에 의한 열에너지를 효과적으로 배출하여 IGBT 성능 유지와 내구성을 향상시키기 위한 히트 싱크의 형상을 설계하였고, 히트 싱크의 유로 형상에 따른 방열량을 분석하였다. 연구의 결과를 요약하면 아래와 같다.

첫째, 직선 유로에 비해서 꺾인 형상이 있는 유로가 방열량이 개선되는 결과를 보였으며, 개선 정도는 냉각수의 유량이 증가할수록 증가였다. 본 연구에서는 최대 약 8%의 방열량 개선을 보였다.

둘째, 꺾인 횟수가 늘어나면 유속이 늘어나고, 그로인하여 원심력의 영향을 크게 받아 방열량이 더 이상 개선되지 않는 경향을 보였다.

셋째, 냉각수의 공급 온도의 영향은 유로의 형상에 따라 바뀌지 않았다. 방열량에 대하여 냉각수의 공급 온도와 유로의 형상은 독립된 인자임을 확인하였다.

넷째, 단위 압력 강하량 당 방열량은 직선 유로의 히트 싱크가 가장 높은 값을 보였고, 그 값은 꺾인 횟수가 증가할수록 낮아졌다.

본 연구는 IGBT용 히트 싱크를 포함한 산업 전반에 사용되는 히트 싱크를 설계하는 설계자들이 각자의 설계 제약 조건에 맞는 효율적인 방열이 가능한 히트 싱크의 유로를 설계하는데 방향을 제시하여, 다양한 산업 분야에 이바지할 수 있기를 기대한다. 뿐만 아니라, 본 연구 결과를 토대로, 곡률부에 대한 히트 싱크의 형상 파라미터를 다루는 추가적인 연구가 이루어 져야하며, 이를 통하여 더 향상된 방열량을 얻을 수 있을 수 있을 것이라 생각된다.

References

- [1] U. S. Energy Information Administration, International Energy Outlook 2019, Report, U. S. Department of Energy, United States, pp.23.
- [2] J. H. Kim, G. W. Lee, "Effect of the variation of base thickness on the heat release performance of the heat sink", *Journal of the Korea Academia Industrial cooperation Society*, Vol.15, No.8, pp.4749-4755, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.8.4749>
- [3] E. H. Song, R. Chi, D. G. Yu, S. H. Rhi, D. J. Lee, K. B. Lee, "Thermal performance analysis by different material characteristics of electronics cooling heat sink", *Journal of Industrial Science and Technology Institute*, Vol.33, No.1, pp.41-45, 2019.
- [4] D. U. Kim, H. S. Chung, H. M. Jeong, C. S. Yi, "An Experimental Study on the Temperature Distribution according to the Heat Sink Height of 30W LED Floodlight", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol.16, No.5, pp.150-156, 2017. DOI: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2017.16.5.150>
- [5] H. A. Mohammed, P. Gunnasegaran, N. H. Shualib, "Influence of channel shape on the thermal and hydraulic performance of microchannel heat sink", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol.38, No.4, pp.474-480, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.12.031>
- [6] A. Yahyae, A. S. Bahman, F. Blaabjerg, "A Modification of Offset Strip Fin Heatsink with High-Performance Cooling for IGBT Modules", *Applied Sciences*, Vol.10, No.3, 1112, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10031112>
- [7] ASM Handbook Committee, "A Metals Handbook, Vol.2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials", ASM International, 1990.
- [8] J. M. Holt, H. Mindlin, C. Y. Ho, "Structural Alloys Handbook", West Lafayette, 1996.
- [9] D. Bohne, S. Fischer, E. Obermeier "Thermal Conductivity, Density, Viscosity, and Prandtl-Numbers of Ethylene Glycol-Water Mixtures", *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, Vol.88, No.8, pp739-742, 1984. DOI: <https://doi.org/10.1002/bbpc.1984088013>

손 종 현(Jonghyun Son)

[정회원]



- 2017년 2월 : 한양대학교 대학원 융합기계공학과 (공학석사)
- 2021년 2월 : 한양대학교 대학원 융합기계공학과 (공학박사)

<관심분야>

CFD, 열 유체 전달, 에너지 변환 장치, 연료 전지

박 성 근(Sungkeun Park)

[준회원]



- 2021년 2월 : 한양대학교 기계공학과 졸업

<관심분야>

CFD, 열 유체 전달, 에너지 변환 장치, 연료 전지

김 영 범(Young-Beom Kim)

[정회원]



- 2004년 2월 : 한양대학교 기계공학과 졸업
- 2007년 2월 : Stanford University Mechanical Engineering (공학 석사)
- 2011년 2월 : Stanford University Mechanical Engineering (공학 박사)
- 2012년 2월 ~ 현재 : 한양대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

신재생 에너지, 박막 제작 공정, 에너지 변환 장치,