

수치해석을 통한 정현파 형상 유로를 가지는 IGBT 히트싱크의 방열성능 분석

박성근, 김영범*
한양대학교 융합기계공학과

Numerical Analysis of Heat Dissipation Performance of Heat Sink for IGBT with Sinusoidal Flow Shape

Sungkeun Park, Young-Beom Kim*
Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University

요약 본 연구는 전력변환장치에 사용되는 소자인 절연 게이트 양극성 트랜지스터의 열 손실을 효과적으로 방출하는 데에 있다. 기본 직선 유로와 2.5 mm, 5 mm, 7.5 mm, 10 mm의 진폭 수치를 가지는 정현파 형상 유로의 히트싱크를 제작하여 방열 성능을 분석하였다. 각 유로 형상에 대하여 냉각수의 입수 온도를 30 ℃, 40 ℃, 50 ℃, 유량을 4, 8, 12, 16, 20 L/min 으로 해석하여 운전조건에 대한 영향 또한 분석하였다. 전산유체역학을 이용하여 유동해석을 통해 연구를 진행하였으며, ANSYS FLUENT를 사용하여 해석하였다. 정현파 형상 유로를 가지는 히트싱크의 경우, 일반직선 유로를 가지는 히트싱크에 비해서 방열 성능이 17.3 % ~ 23 % 향상되었다. 냉각수의 낮은 입수 온도와 큰 유량은 방열 성능을 개선하였다. 그러나 유량과 정현파 형상의 진폭이 클수록 기생 손실에 영향을 주는 압력 강하 량이 증가하였다. 정현파 유로의 진폭이 커질수록 압력 강하 량이 1.2배에서 2.4배까지 증가하였으며, 각 형상의 방열 효율을 확인하기 위해 압력 강하 량 1 Pa 당 방열량을 계산하여 비교하였다.

Abstract This study analyzed the efficient heat loss emission of an insulated gate bipolar transistor as an element used in a power conversion device. The heat sinks of sinusoidal flow paths with different amplitude values were manufactured to analyze their heat dissipation performance. The effect of the operating conditions was assessed by controlling the temperature and the flow rate of the cooling water. This study was conducted by flow analysis using computational fluid dynamics, and the results were analyzed using ANSYS FLUENT. The heat discharge performance of the sinusoidal heat sink was effectively improved. It was higher by 17.3% ~ 23% than that of the heat sink with a straight flow path. Low inlet temperature and large flow rate of cooling water improved heat dissipation performance. However, the large flow rate of the cooling water and the amplitude of the sinusoidal shape affected the higher pressure drop, which induced a parasitic loss at the pump of cooling water. The rise in the amplitude of the sinusoidal channel caused a 1.2 ~ 2.4-fold increase in the pressure drop. The discharged heat per 1 Pa pressure drop was calculated to measure the efficiency of heat dissipation.

Keywords : Heatsink, IGBT, CFD, Sinusoidal Flow, Water Cooling

이 연구는 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(20203030020200, 대용량풍력용 모듈 구조 전력품질 제어 기술 개발)과 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (20213030030190, 연료전지 시스템의 스마트설계-제조-운전 오픈 플랫폼 개발)

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

email: ybkim@hanyang.ac.kr

Received December 7, 2022

Revised January 30, 2023

Accepted February 3, 2023

Published February 28, 2023

1. 서론

전 세계적으로 에너지 소비는 증가하고 있으며, 특히 비 OECD 국가에서 발생하는 경제 성장, 에너지 시장에 대한 증가, 급속한 인구증가로 인해 에너지 소비의 증가는 더욱 빠르게 일어나고 있다[1]. 이러한 에너지 소비 증가의 주된 에너지원은 화석연료이다. 그러나 화석연료의 계속된 사용으로 인한 온실가스 배출로 지구온난화와 같은 환경 문제가 대두되고 있으며, 2015년 유엔기후변화회의에서는 온실가스 배출을 낮추어 지구 평균기온을 낮추기 위한 파리협정이 체결되었다[2]. 화석연료의 이러한 지속된 환경오염 물질 배출과 한정된 매장량 때문에 대체할 수 있는 친환경적이며 지속가능한 에너지원이 필요하다. 태양광 발전, 풍력발전과 같은 재생에너지는 오염물질을 배출하지 않으며 지속가능한 에너지원이다. 그러나 이러한 재생에너지는 자연 환경의 영향을 많이 받는다. 따라서 재생에너지를 통해 생산된 전기를 제어하고 저장할 수 있어야 한다. 이러한 과정에서 인버터와 같은 전류 제어 장치들이 사용된다. 이러한 전류 제어 장치에 사용되는 대표적인 소자로는 게이트 턴 오프 사이리스터(GTO : Gate Turn-off Thyristor), 절연 게이트 양극성 트랜지스터(IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor, 이하 IGBT) 등이 있다. 이러한 전자 소자들은 생산된 전류를 제어하는 과정에서 손실이 발생한다. 이러한 손실은 열의 형태로 발생하며, 이 열은 소자 및 주변 시스템의 온도를 높여 성능을 저하시키거나 수명을 단축시키는 문제를 야기한다. 열손실을 시스템 외부로 방출시키는 것이 시스템 설계에 있어 매우 중요한 요소이며 이를 위해 히트 싱크가 사용된다. 히트 싱크는 전자소자에서 발생된 열을 핀으로 전달하며, 핀에 전달된 열은 핀 주위를 흐르는 유체를 통해 시스템 외부로 배출된다.

히트 싱크는 구동함에 있어 시스템, 사이즈 등 많은 제약이 있어, 그러한 조건 내에서 높은 방열 성능을 가지는 효율이 좋은 히트 싱크를 만들기 위한 연구들이 진행되고 있다. Joo 등[3]은 플레이트 형태의 핀(Fin)과 핀(Pin) 형태의 핀(Fin)을 최적화하여 실제 영역에서 플레이트 핀 히트 싱크가 더 높은 성능을 보이는 것을 확인하였다. Jeon 등[4]은 플레이트 핀의 높이차를 달리하여 열 성능을 비교하였고, 핀의 높이차가 클수록 히트 싱크의 성능이 좋아짐을 확인하였다. Kim 등[5]은 열원과 접촉한 베이스의 두께에 변화를 주어 베이스의 두께가 얇을

수록 방열율이 향상되는 효과를 확인하였다. Yahyaee 등[6]은 히트 싱크의 유로에 꺾임을 주고 핀을 교차로 배치하였다. 히트 싱크와 유체의 접촉면적을 증가시켜 열 저항을 낮추었고, 교차된 핀으로 인해 열전달 계수가 상승하여 방열 성능을 향상시켰다. 이전 연구들에서는 히트 싱크의 베이스, 핀, 유로의 변화를 통한 연구를 수행하였으나, 베이스 파라미터를 조절하여 유로에 따른 성능을 해석한 연구는 부재하였다.

본 연구에서는 열을 방출하기 위한 유체로 액체를 사용하는 수냉식 히트 싱크의 베이스 형상을 제어하였다. 유로의 형태에 따른 방열 성능을 냉각수의 주입 온도 및 유량을 달리하여 분석을 진행하였다. 연구는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD)을 통해 진행되었으며, 상용 소프트웨어인 Fluent 2019 R1을 사용하였다. 히트 싱크의 방열량, 열 저항, 압력 강하를 분석하였으며, 제한된 조건에서 효율적인 히트싱크를 설계하기 위한 방법을 찾고자 하였다.

2. 해석 조건 및 형상

2.1 해석 조건

정현파 형상 유로의 방열 성능과 운전 조건에 따른 방열량 및 손실을 분석하기 위하여, 유로 형상의 치수와 운전 조건을 변수로 해석을 진행하였다. 운전 조건 변수로는 주입되는 냉각수의 유량과 온도를 설정하였다. 냉각수의 유량은 4, 8, 12, 16, 20 L/min 으로, 냉각수의 입수 온도는 30, 40, 50 °C로 각각 설정하여 해석하였다. 히트싱크의 재료는 AL6063을 사용하였으며 비열은 900 J/kg·K, 열전도도는 218 W/m·K, 밀도는 2700 kg/m³이다[7]. 냉각수로는 에틸렌글리콜 50 % 수용액을 사용하였으며, 비열은 3580.5 J/kg·K, 열전도도는 0.4107 W/m·K, 밀도는 1058 kg/m³이다[8]. 각기 다른 치수의 정현파 형상을 가진 히트싱크의 방열성능을 측정하기 위하여 히트싱크와 열원 사이 계면의 온도를 80 °C로 설정하여 해석하였다. 자연냉각 등 다른 열전달 현상을 제외하고 냉각수를 통한 방열만을 고려하였다. Finite volume method를 통하여 정상상태 해석을 진행하였으며, ANSYS 19 FLUENT를 사용하였다. Solution Methods 로는 Coupled 방법을 사용하여 계산을 진행하였다.

2.2 해석 형상

본 연구에서는 150 mm × 312.5 mm 의 치수를 가지는 히트 싱크 베이스를 적용하여 진행하였다. 정현파 형상이 없는 일반직선 유로의 기본 형상은 Fig. 1과 같다. Fig. 1(b)과 Fig. 1(c)은 각각 Front View와 Top View에서 보았을 때의 평면도이다.

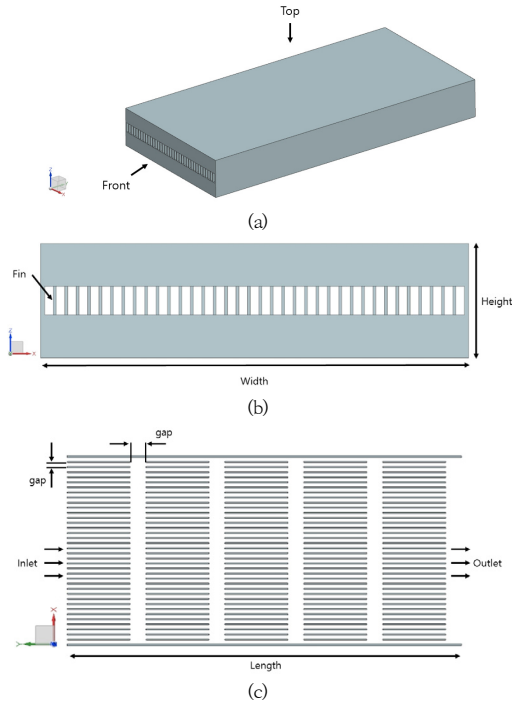


Fig. 1. Default case geometry
(a) Isometric view of default model, (b) Front view, (c) Top view

히트싱크의 핀의 치수는 1 mm * 50 mm 이며 핀 사이 간격 등 구체적인 파라미터 치수는 Table 1과 같다. x방향의 값을 너비, y방향의 값을 길이, z방향의 값을 높이로 하였다. 히트싱크 내부의 핀은 5행으로 제작되어, 파형 주기가 5개인 정현파 형상과 동일한 주기를 가지도록 설계하였다.

본 연구에서는 정현파 유로의 진폭을 변수로 두어 모델을 제작하였다. Fig. 1의 기본 형상의 길이 내에서 파형 주기가 5개인 정현파 형상을 선정하였고, 진폭을 2.5, 5, 7.5, 10 mm로 두어 진폭이 각기 다른 유로를 가지는 히트싱크의 성능 및 특성을 확인하였다.

Table 1. Parameters and value of heatsink dimensions

Parameter		Value	Unit
Heatsink	Length	312.5	mm
	Width	150	
	Height	40	
Fin	Length	50	
	Width	1	
	Height	20	
	x direction Gap	3	
	y direction Gap	12.5	
Wall	Width	1.56	

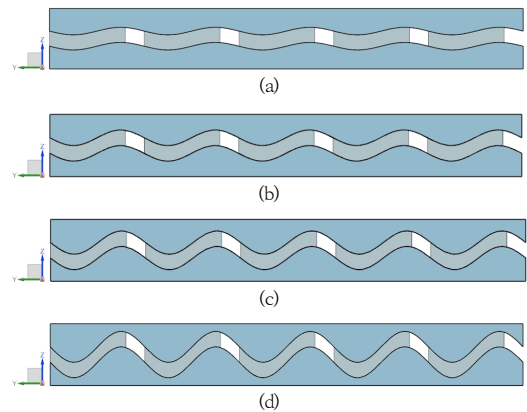


Fig. 2. Models with various amplitudes
(a) Model with amplitude 2.5 mm, (b) Model with amplitude 5 mm, (c) Model with amplitude 7.5 mm, (d) Model with amplitude 10 mm

3. 결과 및 고찰

히트싱크 유로의 형상이 방열 성능에 미치는 영향을 확인하기 위해서 우선 각기 다른 진폭을 가진 형상의 히트싱크에 대해서 분석을 진행하였다. 히트싱크의 주요 성능인 방열량은 방정식 Eq. (1) 로 계산하였다.

$$Q = \rho C_p \dot{m} (T_{out,ave} - T_{in,ave}) \quad (1)$$

Where, Q denotes dissipated heat, ρ denotes density of fluid, C_p denotes specific heat capacity, \dot{m} denotes mass flow rate of fluid, $T_{out,ave}$ denotes average temperature at outlet, $T_{in,ave}$ denotes average temperature at inlet.

자연냉각과 같은 다른 열전달은 제외하고 냉각수를 통한 방열량만을 방열 성능으로 고려하였다.

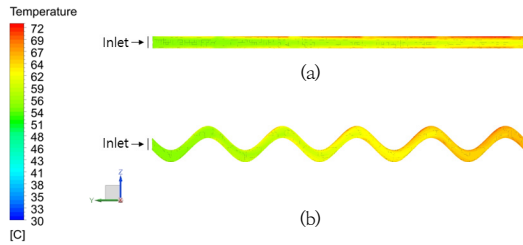


Fig. 3. Temperature Contour
(a) Temperature contour of no amplitude model
(b) Temperature Contour of amplitude 10 mm model

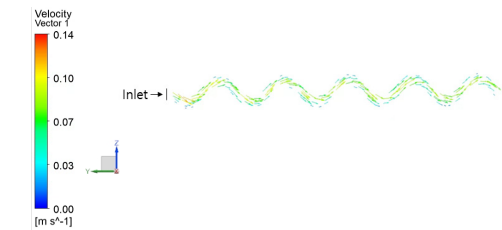


Fig. 4. Vector of cooling water, amplitude 10 mm model

Fig. 3은 온도 30 ℃ 유량 4 L/min 의 해석 조건에서 진폭 10 mm를 가진 모델과 진폭이 없는 기본 모델의 온도 Contour 단면이다. 기본 모델의 냉각수 온도 분포 (Fig. 3(a))를 보면, z축 방향으로 냉각수의 온도 분포가 고르지 못한 것을 확인할 수 있다. 히트싱크와 냉각수 계면에서 상대적으로 멀리 위치한 냉각수는 온도가 낮은 것으로 보아 열원의 열이 냉각수 내부로 전달되지 않고, 열을 효과적으로 방출하지 못하는 것을 의미한다. 반면 정현파 형상의 유로를 가진 히트싱크의 출구 쪽 냉각수 온도 분포(Fig. 3(b))를 보면 냉각수의 온도 분포가 고른 것을 확인할 수 있다. Fig. 4의 냉각수 벡터에 의해, 냉각수가 정현파 형상의 유로를 따라 흐르는 것을 확인할 수 있다. 냉각수 벡터의 상단 부를 확인하면, 상대적으로 히트싱크와 가까운 곳에 위치한 높은 온도의 냉각수는 유로를 따라서 하단 방향으로 향하게 되어, 자연스럽게 상대적으로 온도가 낮은 냉각수와 혼합이 이루어진다. 결국, 냉각수의 혼합은 고른 온도 분포를 유도한다. 냉각수와 냉각수가 맞닿은 히트싱크면 사이의 큰 온도차는 높은 방열 성능을 야기하는데, 냉각수의 혼합으로 히트싱크와 맞닿은 부분의 냉각수 온도를 낮춰줌으로써 더 높은 방열 성능을 보인다. 진폭, 유량, 온도에 상관없이 정현파 형상을 가지는 유로에서 이와 같은 현상을 확인할 수 있다.

Table 2. Discharged heat under cooling water temperature, 30 ℃ condition

Operating condition		Value	Unit
A0	4 L/min	4090.717	W
	8 L/min	4793.297	
	12 L/min	5136.757	
	16 L/min	5323.64	
	20 L/min	5429.709	
A2.5	4 L/min	4797.842	
	8 L/min	5525.676	
	12 L/min	5939.849	
	16 L/min	6273.208	
	20 L/min	6490.396	
A5	4 L/min	4873.353	
	8 L/min	5742.864	
	12 L/min	6129.257	
	16 L/min	6374.226	
	20 L/min	6503.023	
A7.5	4 L/min	4975.634	
	8 L/min	5919.645	
	12 L/min	6318.666	
	16 L/min	6556.058	
	20 L/min	6742.941	
A10	4 L/min	5047.356	
	8 L/min	5988.843	
	12 L/min	6440.645	
	16 L/min	6701.524	
	20 L/min	6864.162	

냉각수는 대류를 통해 열원의 열을 방출한다. 기본적인 대류열전달 식은 Eq. (2)를 따른다. 대류열전달 계수 h는 고체 표면과 유동을 가지는 액체 또는 기체 사이의 열전달을 표현하는 계수로, 전도와 유체의 복합적인 효과를 포함한다. 본 연구에서는 냉각수와 히트싱크 사이 계면 면적과 온도 차를 이용하여 대류열전달계수를 계산하였다.

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Where \dot{Q}_{conv} denotes heat flow rate by convection, h denotes heat convection coefficient, A_s denotes interface area, T_s denotes temperature of surface of solid, T_∞ denotes temperature of fluid.

히트싱크의 방열 성능에 영향을 미치는 요소 중 하나는 유체와 고체가 맞닿아 있는 면적이다. 정현파 형상의 히트싱크는 이 면적을 제한된 조건에서 극대화 시켜준다. 이는 대류열전달의 열저항 R_{th} (Eq. (3))을 낮춰주는 역할을 한다.

Table 3. Pressure drop under cooling water temperature, 30°C condition

Operating condition		Value	Unit
A0	4 L/min	32.788	Pa
	8 L/min	70.74	
	12 L/min	114.37	
	16 L/min	162.51	
	20 L/min	214.58	
A2.5	4 L/min	41.565	
	8 L/min	96.18	
	12 L/min	159.61	
	16 L/min	229.29	
	20 L/min	304.13	
A5	4 L/min	48.665	
	8 L/min	116.47	
	12 L/min	196.79	
	16 L/min	285.94	
	20 L/min	382.43	
A7.5	4 L/min	61.869	
	8 L/min	154.6	
	12 L/min	266.35	
	16 L/min	391.73	
	20 L/min	528.28	
A10	4 L/min	79.891	
	8 L/min	206.85	
	12 L/min	361.38	
	16 L/min	537.56	
	20 L/min	734.09	

$$R_{th} = \frac{1}{hA_s} \quad (3)$$

Where, R_{th} denotes thermal resistance of convection, h denotes heat convection coefficient, A_s denotes interface area.

Table 2와 Table 3 에서 30°C 냉각수 온도 조건에서의 종합적인 결과 값을 나타내었고, 방열 성능과 압력강하에 대한 정현파 형상의 진폭과 유량의 영향을 확인할 수 있다. Fig. 5에서 유량 4 L/min, 냉각수 입수 온도 30 °C 조건에서의 방열량과 압력 강하 량을 분석하였다. Table 2와 마찬가지로 형상의 진폭이 커짐에 따라 방열량이 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 냉각수가 히트싱크와 접촉하는 면적이 늘어나면서 열 저항을 감소시키기 때문이다. Table 4에서 각 모델별 중요 요소의 해석 결과 값을 확인할 수 있다. 정현파 형상 유로의 진폭이 커질수록 접촉 면적이 늘어나고, 면적에 영향을 받는 대류

열전달 계수, 열 저항이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 면적이 늘어남에 따라 대류 열전달계수가 높아지며, 열 저항은 낮아진다. 방열량 또한 증가하는 것을 볼 수 있으며, 정현파 형상의 유로가 히트싱크의 성능을 높여주는 것을 의미한다. 그러나 압력 강하 량 (Pressure Drop) 또한 주목해야할 값이다. 압력 강하 량은 냉각수를 히트싱크에 공급함에 있어 사용되는 기생손실과 연관이 있는 값으로, 압력 강하 량이 클수록 손실이 많음을 의미한다. 유로 형상의 진폭이 커질수록 압력 강하 량이 커지며, 이는 형상의 변화로 인하여 유로의 길이가 길어지고 냉각수가 유로에 부딪히면서 발생하는 결과로 볼 수 있다. 여기서 주목해야할 점은 방열량의 증가량이 진폭이 커짐에 따라 선형적으로 증가하지 않는다는 점이다. 진폭 2.5 mm 의 유로를 가지는 히트싱크의 방열량은 4797.84 W 로 진폭이 없는 일반 유로 모델의 방열량 4090.72 W 보다 17.3 % 상승함에 비해, 진폭 5 mm 의 유로를 가지는 히트싱크의 방열량은 진폭 2.5 mm의 히트싱크 보다 1.5 % 상승을 보였다. Table 4의 계면 면적 값은 유체와 냉각수의 맞는 면적으로 진폭에 따른 방열 성능 향상 수치는 계면 면적 증가 수치와 유사함을 확인할 수 있다. 진폭 2.5 mm 의 유로를 가지는 히트싱크의 계면 면적은 0.265 m²로, 진폭이 없는 일반 유로 모델의 계면 면적 0.221 m² 보다 19.9 % 증가하지만, 진폭 5 mm 모델의 계면 면적은 0.268 m²로 진폭 2.5 mm 모델에 비해 1 % 증가함을 확인할 수 있다. 이는 정현파 형상의 히트싱크의 방열 성능은 정현파 형상 유로의 진폭이 아닌 진폭에 의해 변하는 계면 면적에 비례하여 향상되는 것을 의미한다. 열 성능이 비례하여 증가하지 않음을 의미한다.

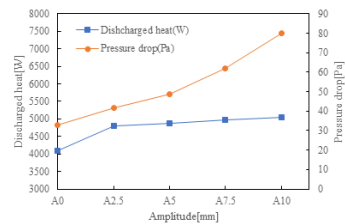


Fig. 5. Discharged heat and Pressure drop of heatsink with each amplitude at 4 L/min and 30 °C inlet condition

유량 4 L/min 의 유량 조건과 30 °C 냉각수 온도 조건에서 히트싱크의 열저항은 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 진폭이 커질수록 열저항이 낮아진다. 진폭이 커지면서 유체와 히트싱크 사이의 접촉 면적이 늘어나면서 식 (6)

Table 4. Value of each model CFD analysis at 4L/min and 30°C inlet condition

	A0	A2.5	A5	A7.5	A10	unit
Interface Area	0.221	0.265	0.268	0.273	0.280	m ²
Average Velocity	0.054	0.056	0.058	0.062	0.067	m/s
Thermal transfer Coefficient	1530.097	2094.595	2176.804	2284.996	2360.230	W/m ² ·°C
Thermal Resistance	0.00296	0.00180	0.00171	0.00160	0.00151	°C/W
Pressure Drop	32.788	41.565	48.665	61.869	79.891	Pa
Discharged Heat	4090.717	4797.842	4873.353	4975.634	5047.356	W

에 의해 열저항이 낮아지고, 결과적으로 방열량이 커지는 것을 Table 2에서 확인할 수 있다. 정현파 형상의 진폭이 2.5 mm 이상 커질수록 열저항의 감소율이 일반직선 유로 히트싱크에서 2.5 mm 진폭 히트싱크로 감소율에 비해 떨어짐을 알 수 있다. 이는 앞서 확인했던 히트싱크 방열 성능과 유사한 성향을 보이는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 각 히트싱크의 압력 강하량 1 Pa 당 방열량을 나타내는 그래프이다. 이 값은 히트싱크의 성능이라고 볼 수 있는 방열량을 손실인 압력 강하량으로 나눈 값으로 진폭이 커질수록 감소하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 히트싱크의 방열 효율은 오히려 감소하는 것을 확인할 수 있다.

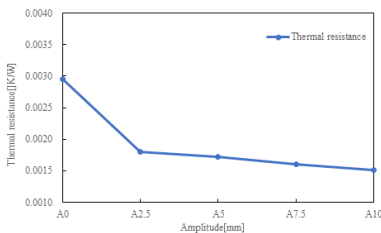


Fig. 6. Thermal resistance of heatsink with each amplitude at 4 L/min and 30 °C inlet condition

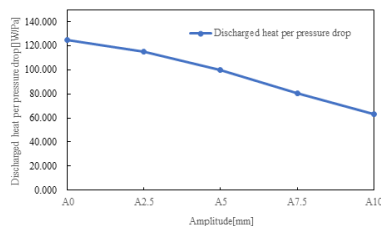


Fig. 7. Discharged heat per pressure drop of heatsink with each amplitude

Fig. 8에서 진폭 10 mm 정현파 형상 유로를 가진 히트싱크의 유량별 방열량을 확인할 수 있다. 냉각수의 입수 온도를 달리하여 해석한 결과, 입수온도가 낮을수록

히트싱크의 방열량은 증가 하였다. 방열량은 열원과 냉각수의 온도차에 비례하기 때문에 자명한 결과로 볼 수 있다. 유량이 증가할수록 방열 성능이 증가하나, 특정 값인 8 L/min의 유량 이상으로는 방열량에 큰 변화가 없음을 확인할 수 있다.

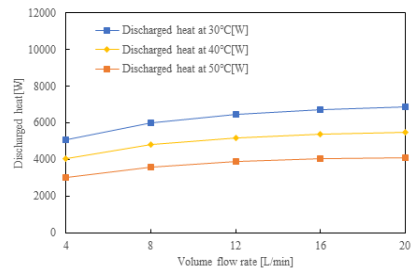


Fig. 8. Discharged heat and Pressure drop of A10 heatsink with various volume flow rate at 30 °C, 40 °C, 50 °C inlet condition

4. 결론

본 연구에서는 전력 변환 장치 중 하나인 IGBT 모듈에서 발생하는 열 형태의 손실을 효과적으로 방출하기 위한 연구를 진행하였다. 효과적인 열 배출은 IGBT의 성능과 내구성을 위한 필수적인 요소이며, 이를 위한 정현파 형상의 유로를 가지는 히트싱크를 설계하고 유로 형상과 조건에 따른 분석을 진행하였다.

일반적인 직선 유로 형상이 아닌 정현파 형상의 유로를 가지는 히트싱크의 방열량은 향상되는 결과를 보였으며, 정현파 형상 유로의 진폭이 커짐에 따라 증가하였다. 진폭 10 mm의 형상을 가지는 히트싱크는 직선 유로 대비 23 % 향상됨을 확인할 수 있었다. 그러나 일정 수준(진폭 2.5 mm) 이상으로는 방열량이 크게 향상되지 않았다.

냉각수의 온도가 낮을수록, 공급 유량이 클수록 높은

방열량을 보였다. 이는 유로의 진폭과는 상관없이 모든 진폭에서 같은 경향을 보이는 것을 확인하였다. 방열량을 늘리기 위해서 냉각수의 온도와 유량은 지배적인 요소이지만, 정형파 형상 유로의 진폭과는 독립된 인자이다.

압력 강하 량 1 Pa 당 방열량은 일반적인 직선 유로의 히트싱크에서 가장 높고, 진폭이 커질수록 감소하는 것을 확인하였다.

본 연구는 제약된 조건 하에서 효율적인 방열을 위한 히트싱크의 유로 설계 방향을 제시한다. 곡면 유로를 가진 히트싱크에 대한 연구는 아직 부족한 상황이며 추가적인 연구가 이루어져야 한다. 전력변환소자인 IGBT를 포함하여, 방열이 필요한 여러 분야에서 방향을 제시하기를 기대한다.

References

- [1] ZHONGMING, Zhu, et al, International Energy Outlook 2019 projects nearly 50% increase in world energy usage by 2050, led by growth in Asia, U.S. Energy Information Administration, 2019, United States, Available from: <http://resp.llas.ac.cn/C666/handle/2XK7JSWQ/219062> (accessed Sep. 2019)
- [2] Sutter, John D., and Joshua Berlinger, Final draft of climate deal formally accepted in Paris, CNN. Cable News Network; Turner Broadcasting System, Inc, 2015, (accessed Dec. 12, 2015)
- [3] Y. H. Joo, S. J. Kim, "Comparison of Thermal Performance of Pin-fin and Plate-fin Heat Sink in Natural Convection", KSME conference, The Korean Society of Mechanical Engineers, Korea, pp 659-661, 2013.
- [4] D. C. Jeon, C. Byon, "Study on thermal performance of plate fin heat sinks with height-differences subject to natural convection", KSME conference, The Korean Society of Mechanical Engineers, Korea, pp 140~141, 2017.
- [5] 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>
- [6] Yahyaee, A.; Bahman, A.S.; Blaabjerg, F, "Modification of offset strip fin heatsink with high-performance cooling for IGBT modules", Applied Sciences, 10, 3, pp 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] 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.19840880813>

박 성 근(Sungkeun Park)

[준회원]



- 2021년 2월 : 한양대학교 기계공학부 졸업
- 2021년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 융합기계공학과 석사과정

<관심분야>

CFD, 열 유체 전달, 에너지 변환 장치, 연료전지

김 영 범(Young-Beom Kim)

[정회원]



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

<관심분야>

신재생 에너지, 박막 제작 공정, 에너지 변환 장치