

<용용논문>

인버터 IGBT Module의 Heat Sink 핀 구조에 따른 냉각성능비교

정원준*

쾰른 응용과학대학 자동차공학전공

Comparison of Cooling Performance According to Heat Sink Pin Structure in Inverter's IGBT Module

Wonjun Chung*

Cologne University of Applied Sciences, Msc. Automotive Engineering, Köln 50678, Germany

(Received 25 July 2022 / Revised 12 August 2022 / Accepted 16 August 2022)

Abstract : Due to climate change caused by greenhouse gases, many governments have set greenhouse gas reduction targets, and battery electric vehicles(BEVs) have been in the spotlight as automobile manufacturers explore their viability. The DC/AC inverter is responsible for converting the direct current of a battery into alternating current needed to operate the drive motor. When operating at high voltage, operational errors and shortened lifetime may occur due to overheating. Thus, efficient thermal management is necessary to optimize the cooling module. First, the flow rate and the cooling effect of each heat sink fin arrangement of the inverter cooling module were simulated, and then compared. This process confirmed that, assuming the fin area is the same, maximizing the flow rate by simplifying the flow of cooling water, rather than intentionally delaying the flow rate, or causing turbulence, results in the uniform maximum cooling performance of the entire heat sink.

Key words : Electric vehicle(전기자동차), Inverter(인버터), Heat sink(히트 싱크), Optimization(최적화), Cooling module(냉각 모듈)

Nomenclature

T_{vj}	: junction temperature of IGBT chip, °C
W	: module power loss, W
$R_{th(j-win)}$: thermal resistance, °C/W
T_{win}	: cooling water temperature, °C
df	: degrees of freedom
SS	: sum of squares
MS	: mean square
F	: F value
P	: P value
R-sq(adj)	: adjusted R-square

1. 서론

화석연료를 사용하는 내연기관에서 발생하는 이산화탄소 등 온실가스에 의한 지구온난화 현상, 그리고 이에

따른 기후 변화가 현실화하고 있다. 현재 추수직은 21세기 말 지구 평균 기온은 3.7 °C 상승하여 해수면은 63 cm 상승하고 전 세계의 주거가능면적의 5 %가 침수될¹⁾ 뿐만 아니라 평균 지표 온도가 상승함에 따라 다수의 지역에서 계절 간 강수량과 기온의 차이가 더욱 벌어질 것이다.

이에 각국 정부는 온실가스 감축목표를 세우게 되었다. 2015년 맺어진 파리협정은 산업화 이전 대비 지구 평균온도의 1.5 °C 상승을 목표로 하며, 이를 위해 2050년 까지 탄소배출을 0으로 하는 탄소중립 사회를 목표²⁾로 한다. 대한민국은 우선 2030년까지 자동차 평균 온실가스를 70 g/km 기준(2021년 97 g/km)으로 강화하려^{3,5)} 하나 기존 내연기관(ICE) 및 하이브리드 차량(HEV)은 주 동력원이 내연기관이기 때문에 온실가스 저감목표 달성을 한계가 있다.^{18,19)} 이에 자동차업계는 내연기관 차량

*Corresponding author, E-mail: neotical@naver.com

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

개발을 축소하고 전기자동차(EV) 개발에 박차를 가하고 있다. 전기자동차(EV)는 전기에너지를 동력원으로 전기 모터를 회전 시켜 움직이는 자동차로 전기에너지를 공급원에 따라 크게 수소연료전지자동차(FCEV)와 배터리식 전기자동차(BEV)로 분류할 수 있다. 수소연료전지자동차(FCEV)는 전기에너지를 연료전지로부터 공급받으며 이 전기는 저장된 고압 수소와 대기 중 산소와의 반응으로 생성된다. 배터리식 전기자동차(BEV)는 고전압 배터리에 저장된 전기에너지를 모터를 구동하는 자동차이다. 현재는 배터리식 전기자동차(BEV)가 제조사와 소비자들로부터 주목받고 있다. 배터리의 발달로 주행 가능거리가 200 ~ 300 km에서 400 ~ 500 km대로 증가하여 내연기관 차량을 대체할 수 있는 수준에 이르렀고 수소연료 대비 충전 인프라 구성에 장점이 있다. 본 논문은 배터리식 전기자동차(BEV)의 구성품을 연구 대상으로 한다. 수소연료전지자동차(FCEV) 대비 충전에 많은 시간을 필요로 하므로 1회 충전 후 주행거리를 극대화해야 하며 이로 인해 효율적인 에너지관리가 매우 중요하다.

전기자동차(EV)의 구동시스템은 크게 배터리 또는 연료전지와 같은 에너지원, 인버터, 컨버터, 모터, 충전기 모듈로 구성되어 있다. 전기자동차의 구동모터는 효율 및 출력을 고려하여 3상 모터를 사용하며 DC/AC 인버터는 배터리의 직류를 3상 교류로 변환하는 기능을 담당한다.

DC/AC 인버터는 외부 교류전원에 의한 배터리의 충전, 모터의 구동, 회생 제동에 의한 배터리 재충전에 사용되며, 고전압/고전류 조건에서 작동되나 제품 특성상 밀폐된 구조이기 때문에 냉각이 필수적이다. 특히 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 같은 스위칭 소자에서 고온이 발생하기 때문에 고열 발생 소자류에 대한 냉각 효율 확보가 필요하다. 열을 효과적으로 냉각시키기 위해 수냉식 구조가 필수적이며 동일한 조건의 수압, 유량에 보다 높은 방열 특성을 가지기 위해 냉각 구조에 대한 해석이 제품을 개발 전에 선행되어야 한다.¹⁰⁾

인버터 모듈은 고전압 상태에서 많은 열을 발생시키며 작동 중인 접합 온도가 최대 정격에 가까울 경우 열폐로 파괴가 촉진되어 제품 수명 저하가 발생할 수 있다. 과열이 심한 경우 작동 상의 오류 혹은 화재를 발생시킬 수 있기 때문에 이를 예방하기 위한 열관리(Thermal management)가 필요하다. 냉각 성능이 불충분할 경우 냉각 용량을 키우기 위한 설계, 예를 들어 냉각로의 확대 혹은 유량 증대(냉각수 펌프 사용 증대)가 필요하게 되어 무게 및 에너지 손실로 연결될 것이다. 이는 전기자동차(BEV)에서 가장 중요한 상품성 요소 중 하나인 주행 거리의 감소로 이어질 수 있으므로 이 열관리 모듈은 최적화된 설계가 필요하다(Fig. 1 참조).^{8,9)}

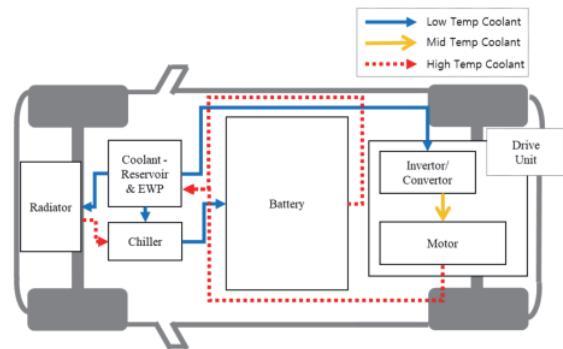


Fig. 1 Cooling system of BEV

2. 실험 방법

본 논문에서는 IGBT 모듈을 사용한 인버터에서 발생하는 열을 제어하기 위한 최적화된 히트싱크 형상을 시험할 것이다. IGBT 모듈의 열전도는 전기 회로로 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 방열판에 장착된 하나의 IGBT 모듈만 고려하며, 이 경우는 Fig. 2와 같이 열적으로 등가 회로로 나타낼 수 있다. Fig. 2에 표시된 등가 회로에서 접합 온도(T_{vj})는 다음 열 방정식을 사용하여 계산할 수 있다.

$$T_{vj} = W \times \{R_{th(j-win)}\} + T_{win}$$

T_{vj}
 $R_{th(j-win)}$
 T_{win}
 W : Module power loss
 T_{vj} : Junction temperature of IGBT chip
 T_{win} : Cooling water temperature
 $R_{th(j-win)}$: Thermal resistance between junction and cooling water

Fig. 2 Structure of IGBT cooler

여기서, 입구 냉각수 온도 T_{win} 은 Fig. 4의 Inlet과 같은 위치에서의 온도를 나타낸다. Fig. 4의 Inlet의 해당 지점 이외의 지점 온도는 실제 상태에서 낮게 측정되며, 이는 워터 재킷의 방열 성능에 따라 달라진다.⁴⁾ IGBT를 안전하게 동작시키기 위해서는 접합부 온도 T_{vj} 가 설계상 최대온도를 초과하지 않도록 할 필요가 있다. 정격 부하에서의 동작뿐만 아니라 비정상 동작에서도 설계상 최대온도를 초과하지 않도록 충분한 여유를 두고 열 설계를 해야 한다.

IGBT에는 쿨러가 부착되어 냉각을 돋는다. 실험에 이용되는 쿨러는 차량용 상용 IGBT 모듈을 참고하여 모델링하였다. IGBT 상단에 쿨러가 위치하고 수냉식 구조가 적용되었다. 냉각수가 통과하는 Inlet과 Outlet은 각 1개이며 쿨러 상단에 중앙에 위치되었고 쿨러 바닥면이 지표면을 향하도록 설정하였다(Figs. 3, 4 참조).^{13,14,16)}

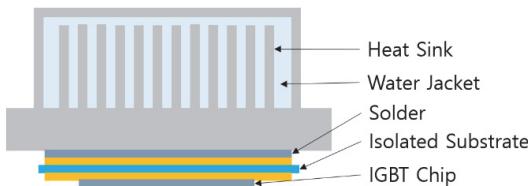


Fig. 3 Structure of IGBT cooler

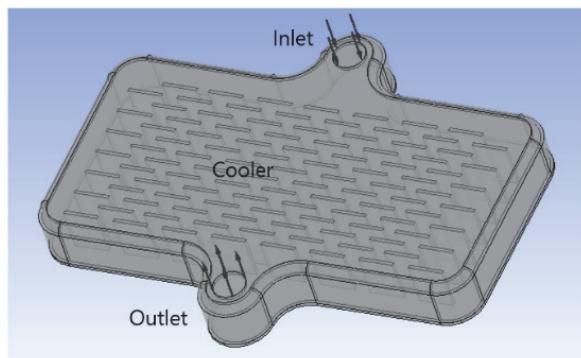


Fig. 4 3D-Model of IGBT cooler

동일 Pin 면적에서 배열 형상만을 달리하여 냉각수의 흐름을 변화시켰을 때 냉각 효율이 달라지는지 확인하고 어떤 형상이 가장 효율적인지 비교하였다. 이러한 해석을 진행하기 위해 상용 수치해석 프로그램인 Ansys 2021 R2를 이용하였다. 전산 유체해석(CFD: Computational Fluid Dynamics)을 위해 Ansys의 Fluid Flow Analysis(CFX) 모듈을 사용하였다.⁷⁾

3. 실험 조건

쿨러의 하우징과 핀의 재질은 모두 알루미늄이며, 냉각수로는 물과 에틸렌글리콜의 50:50 비율의 혼합 액체를 사용한다. 해석에 있어 필요한 하우징과 핀, 냉각수의 물성을 Table 1과 같이 설정하였다.⁶⁾

Table 1 Material property of parts

Part	Material	Heat conductivity (W/mK)	Specific gravity (g/cm³)	Specific heat (J/kg·K)	Viscosity (cP)
Housing & Pin	Aluminium (A1050P)	231	2.705	900	-
Cooling fluid	50 % Water 50 % Ethylene Glycol	76.2	1.1	157.1	18

냉각수에 포함된 불순물은 유로의 막힘을 유발하여 압력 손실을 증가시키고 냉각 성능을 저하하므로 필터에 의해 제거된 것으로 가정한다. 냉각수의 유량은 Spec

sheet에 따라 10 L/min, 냉각수 입력 온도는 65 °C로 설정하였다. 쿨러 하단 온도는 Spec sheet에서 MOSFET에 허용된 최대 온도 175 °C로 설정하였다. 가장 가혹한 조건을 가정하고 해석 과정에 필요한 물성을 설정하였다. IGBT 모듈이 균등 발열이라 가정하여 각 IGBT 모듈에 대응되는 발열원을 상용 IGBT 모듈의 사양서를 참고하여 890 W로 정의⁴⁾하고 나머지 조건은 시스템 설계 사양과 동일하게 적용하였다. 히트싱크 핀 형상에 따른 냉각 효과를 비교하기 위하여 하기와 같이 3가지 비교군을 고안하였으며, 유형별 냉각 핀의 전체 단면적은 동일하게 설정하였다.¹²⁾

- 1) 수평형(Horizontal) 일자 가이드 핀: 냉각핀을 수로방향과 직각방향으로 배치해 냉각수의 흐름을 지연시켜 냉각수의 열 교환시간을 높이고자 함
- 2) 수직형(Vertical) 일자 가이드 핀: 냉각핀을 수로방향과 평행한 일자형 형상으로 설계함으로써 난류 발생 없이 냉각수의 빠른 통과를 목표함
- 3) V형(V-type) 가이드핀: 냉각핀을 비스듬하게 교차로 배치시켜 냉각수 흐름상 난류를 발생시켜 냉각수 열 교환 효율을 극대화하고자 함.

4. 실험 결과

해석 결과는 온도, 흐름과 속도를 바탕으로 분석하였다. 또한 정량적 비교를 위하여 바닥면의 15개 좌표를 지정하여 온도와 속도를 측정하고 비교하였다. Fig. 11과 Table 2와 같이 히트싱크 중앙을 기준 중심으로 하여 X축 방향 5개 지점과 Y축 기준 3개 지점을 선정하였다.

- 1) 온도 비교: 냉각 핀 바닥 면(Bottom plate)과 냉각수가 접촉하는 면에서 Z 방향 -0.1 mm지점 Section에서의 온도 분포를 비교하였다. 시험결과 수직형 일자 가이드 핀이 가장 낮고 위치별로 고른 온도 분포를 보였다. 위치별 온도에서도 가장 낮은 평균온도와 가장 큰 최소-최대값 편차를 나타내었다. 수직형 핀의 냉각수 냉각이 가장 활성화된 것으로 보인다. V형 핀은 상대적으로 높은 온도분포를 보였고 위치 별 온도도 동일한 경향을 보였다. V형 핀 사이의 유로에서 가장 낮은 온도분포를 보인 것으로 보아 냉각수의 흐름이 집중된 것으로 보인다. 수평형 핀은 가장 낮은 냉각효율을 보여주었다. 가장 높은 온도분포를 보였고 위치별 최소-최댓값 편차도 가장 작은 것으로 확인되었다(Figs. 5, 7, 9, Table 2 참조).
- 2) 흐름 및 속도 비교: 냉각수의 흐름, 방향과 속도를 벡터로 표현하여 비교하였다. 냉각수 흐름이 가장 잘 나타나는 바닥 면(Bottom plate)에서 Z 방향 7 mm 지점

에서 확인하였다. 수직형 핀은 전체적으로 Inlet에서 유입된 냉각수가 고르게 분배되고 핀 배열 내에서의 빠른 흐름(Avg. 0.159 m/s)이 관찰되었다. 지점별 속도도 동일한 결과를 보여주었다. V형 핀의 경우 핀 배열 관통부에서는 빠른 흐름이 관찰되었으나 개별 핀 사이에서는 느린 흐름이 관찰되었다. 지점별 속도에서도 수직형 대비 낮은 유속을 나타내었다. 수평형 일자 핀은 핀 배열 내에서의 유동이 낮게 관찰되었다. 특히 지점별 유속은 수직형 핀 대비 38 % 낮게(0.099 m/s) 관찰된 것으로 보아 저항이 가장 크게 발생한 것으로 보인다. 특이사항으로는 V형과 수평형 핀 배열 외곽으로 많은 냉각수가 흐름을 확인하였다. 난류 발생 및 접촉 시간 증가를 목적으로 핀 배열로 인하여 유속의 저하로 발생하였고, 이로 인하여 저항이 적은 유로로 냉각수가 집중된 것으로 보인다(Figs. 6, 8, 10, Table 2 참조).

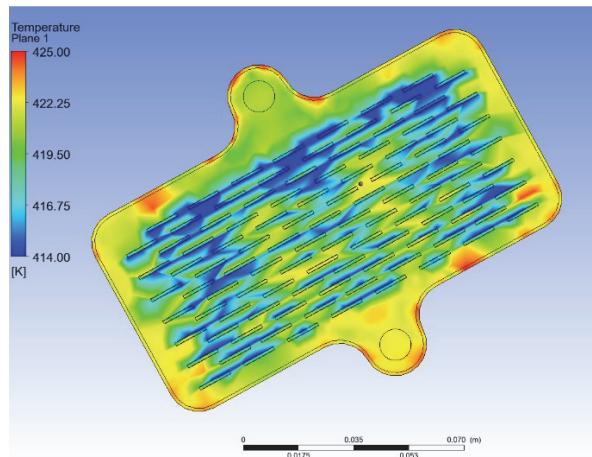


Fig. 5 Coolant temperature of horizontal pin

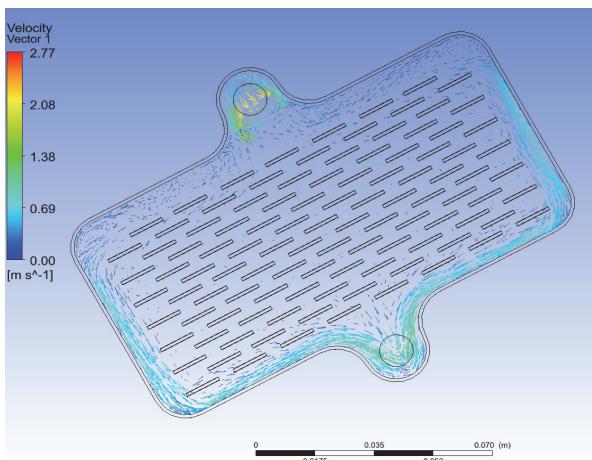


Fig. 6 Coolant velocity of horizontal pin

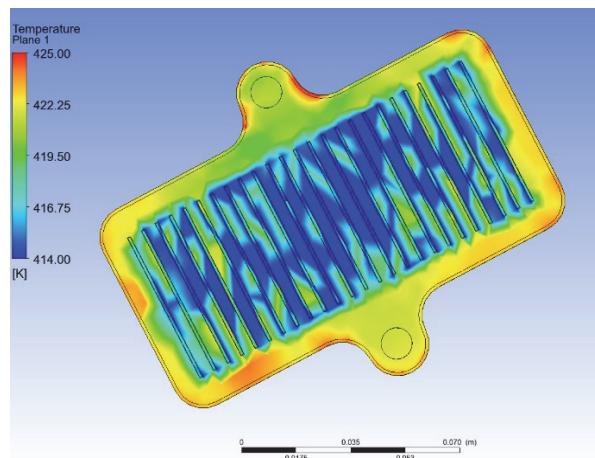


Fig. 7 Coolant temperature of vertical pin

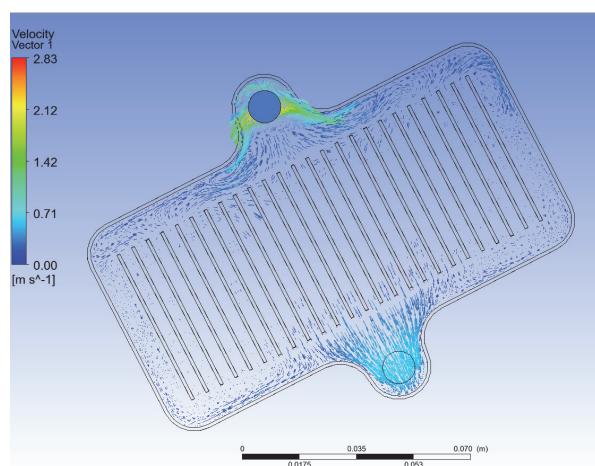


Fig. 8 Coolant velocity of vertical pin

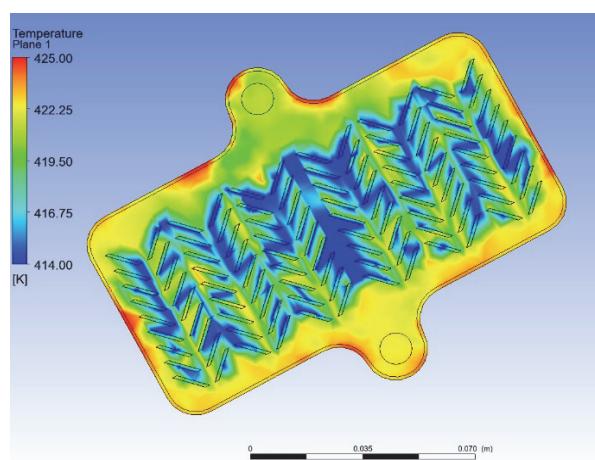


Fig. 9 Coolant temperature of V-type pin

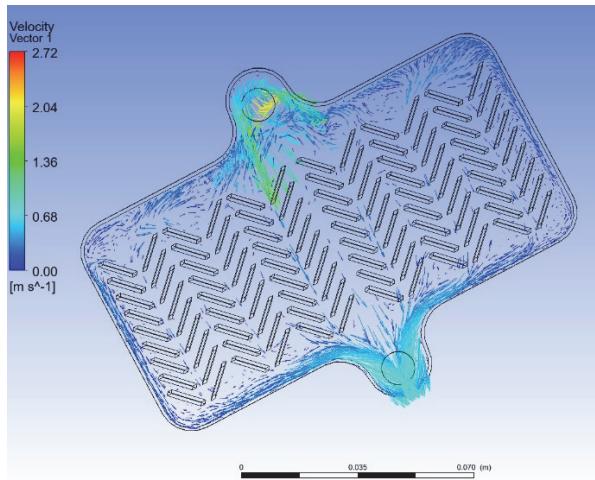


Fig. 10 Coolant velocity of V-type pin

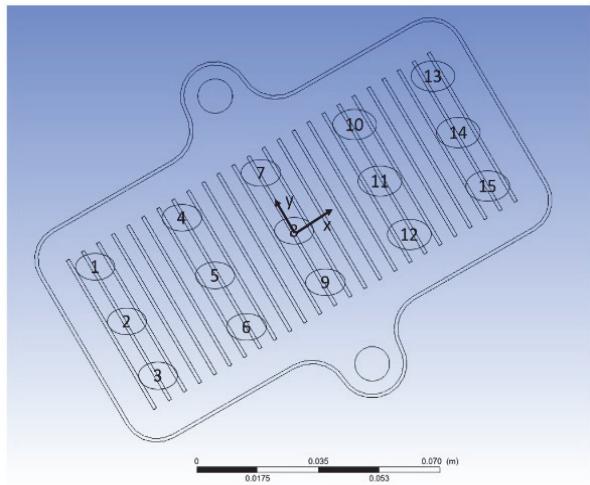


Fig. 11 Measurement position of cooler

Table 2 Comparison of temperature and velocity by position

No	Temperature (K)			Velocity (m/s)		
	Horizontal	Vertical	V-Type	Horizontal	Vertical	V-Type
1	420.854	420.844	420.840	0.263	0.091	0.022
2	422.161	421.694	420.860	0.040	0.008	0.045
3	422.300	420.989	420.860	0.114	0.020	0.065
4	420.624	418.543	421.398	0.064	0.201	0.095
5	422.034	419.280	421.582	0.070	0.135	0.090
6	422.304	420.007	418.591	0.069	0.156	0.212
7	420.198	416.555	421.543	0.125	0.254	0.386
8	422.104	416.101	420.598	0.086	0.399	0.144
9	422.191	418.471	419.943	0.084	0.416	0.146
10	420.629	419.006	421.251	0.093	0.226	0.097
11	422.050	420.573	420.845	0.044	0.119	0.080
12	422.177	420.554	418.758	0.073	0.108	0.195
13	421.874	420.833	421.351	0.229	0.137	0.035
14	422.279	420.723	421.460	0.020	0.050	0.052
15	422.191	420.906	420.560	0.088	0.072	0.066
Min	420.198	416.101	418.591	0.020	0.008	0.022
Max	422.304	421.694	421.582	0.263	0.416	0.386
Average	421.731	419.673	420.696	0.099	0.159	0.115
Standard Deviation	0.740	1.662	0.933	0.066	0.121	0.094

Table 3 Regression analysis by pin type

Fin type	df	SS	MS	F	P	R-sq(adj)
Horizontal	1	1.2	1.2	2.41	0.14	9.16 %
Vertical	1	28.2	28.2	34.96	0	70.81 %
V-type	1	0.91	0.91	1.05	0.32	0.36 %

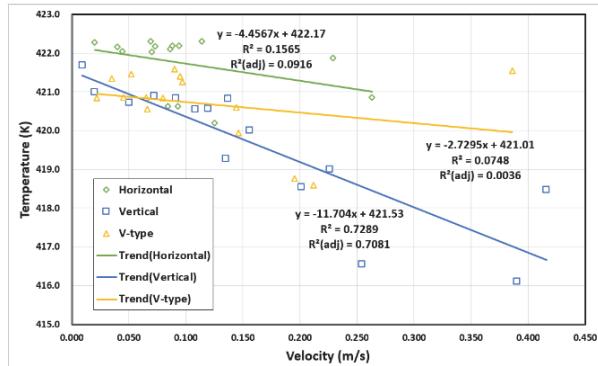


Fig. 12 Regression analysis by pin type

위치별 온도 및 속도 측정을 통하여 펀 배열 별 온도와 유속은 평균값에서 유사한 경향을 보여서 두 요소의 연관성을 확인하고자 회귀분석을 하였다. 펀 배열 별 측정 데이터를 통합하여 미니탭을 통한 회귀분석 결과 수직형 펀 배열에서만 p-값은 0으로 온도와 속도 간 연관성이 있음을 나타내었다. 반면에 다른 펀 배열에서는 p-값 > 0.05로 연관성을 확인할 수 없었다(Table 3 참조). Fig. 12는 펀 유형별 유속과 온도 그리고 회귀선을 보여준다. 수평형 펀의 회귀 방정식은 온도(K)=421.5-11.7*유속(m/s)로 음의 상관관계가 있음이 확인된다. 설명력(R²-sq)은 70.81 %로 일정한 경향성을 확인할 수 있었다. 반면에 수평형 펀과 V형 펀의 경우 유속과 온도 간 음의 상관관계는 있지만 설명력(R²-sq)이 각각 9.16 %, 0.36 %로 온도에 의한 영향이 적음을 의미한다.

원인으로는 다른 유로에서 냉각수의 합류나 분산이 발생하여 형성된 난류에서 불규칙한 열교환이 발생했거나 측정지점이 펀에 근접하여 발생된 열전달 혹은 유속 저하를 추정할 수 있다.

5. 결 론

온실가스에 의한 지구온난화 및 기후변화로 인하여 각국 정부는 온실가스 감축목표를 세웠고 이에 따라 자동차 제조사에서는 온실가스 배출을 최소화 할 수 있는 전기자동차(EV) 개발에 집중하게 되었다. 배터리식 전기자동차(BEV)는 최근 배터리 기술발달로 인한 주행거리 증가와 수소연료전지자동차(FCEV) 대비 충전 인프

라 구성에 장점이 있어 자동차 제조사들로부터 각광받고 있다. 배터리식 전기자동차(BEV)의 콤포넌트 중 DC/AC 인버터는 배터리의 직류를 구동모터를 작동하기 위한 교류로 변환하는 역할을 담당하며, 고전압 상태로 동작 시 발열로 인한 작동상의 오류 및 수명 단축이 발생 할 수 있어 냉각 모듈 최적화에 의한 효율적인 열관리가 필요하다. 이를 위해 인버터 냉각 모듈의 히트싱크 팁 배열 구조를 달리하여 냉각수의 유속을 지연시키거나 난류를 발생시켰을 때 유속 및 냉각효과가 어떻게 달라지는지 시뮬레이션을 통하여 비교하였다. 차량용 상용 IGBT 모듈을 참고하여 알루미늄 소재의 쿨러를 모델링 하였고 쿨러 내 히트싱크의 팁 배열을 3가지(수평형/수직형/V형)로 고안하였다. 시험은 전산 유체해석(CFD: Computational Fluid Dynamics)으로 진행하였고 Ansys의 Fluid Flow Analysis(CFX) 모듈을 사용하였다. 해석시험 결과 수직형 팁에서의 지점 별 온도가 가장 낮게 측정되었고 온도분포도 균일하여 냉각효율이 가장 좋은 것으로 확인되었다. 또한 수직형 팁에서의 온도·속도를 회귀 분석 결과 음의 상관관계를 확인할 수 있었다. 이를 통해 동일한 팁 면적을 가정할 때 의도적인 유속 지연이나 난류를 발생시키는 것보다는 냉각수의 흐름을 단순하여 유속을 최대화하는 것이 전체 히트싱크의 균일한 최대 냉각성능을 나타냄을 확인하였다. 가장 효율적인 수직형 냉각판에서 어떤 요소를 추가 시 효율성을 극대화할 수 있는지 추가 연구를 통해 확인하고자 한다.^{11,15,17)}

References

- 1) The Third National Climate Change Adaptation Measures, http://www.climate.go.kr/home/cc_data/policy/3_nation_climate_change_adaptation_step_summary.pdf, 2022.
- 2) 2050 Carbon Neutral, Korea Policy Briefing, Ministry of Economy and Finance, <https://www.korea.kr/special/policyCurationView.do?newsId=148881562>, 2021.
- 3) 2050 Establishment of 2030 Automobile Greenhouse Gas Standards toward Carbon Neutrality, Ministry of Environment, <https://me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=286&orgCd=&boardId=1431450&boardMasterId=1>, 2021.
- 4) IGBT Modules for EV, HEV 750V Class(6MBI800XV https://www.fujielectric.com/products/semiconductor/model/igbt/application/box/doc/pdf/MT5F33743/MT5F33743_E_Rev.1.0_03.pdf, 2021.
- 5) Paris Climate Agreement, Ministry of Foreign Affairs, https://www.mofa.go.kr/www/wpge/m_20150/contents.do.
- 6) G. Kim, B. Woo, C. Kang, S. Cho, Y. Yun and T. Chun, A Study of the Cooling Effect for a Water-cooled Heat Structure of the Electric Vehicle Inverter System Egtronics, Hyundai Rotem, Department of Electrical Engineering, University of Ulsan, Korea, 2010.
- 7) S. Moon and H. Kim, "Optimal Cooling Design for DC-AC Inverter Using Simulation," KSAE Fall Conference Proceedings, p.523, 2018.
- 8) J. Seo and M. Lee, Study on the Cooling Control Algorithm of Electronic Devices for an Electric Vehicle: Part 1 Effectiveness Analysis of General Control Logic, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, School of Mechanical Engineering, Dong-A University, Busan, 2014.
- 9) J. Lee, S. Han, G. Lee, C. Kim, H. Kim and H. Lee, "Optimization of Cooling System for High Power Inverter's Power Module with Numerical Analysis," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.1290-1291, 2013.
- 10) T. Kimura, R. Saitou, K. Kubo, K. Nakatsu, H. Ishikawa and K. Sasaki, "High-power-density Inverter Technology for Hybrid and Electric Vehicle Applications," Hitachi Review, Vol.63, pp.96-102, 2014.
- 11) S. Kim, "Thermal Performance of Motor and Inverter in an Integrated Starter Generator System for a Hybrid Electric Vehicle," Energies, Vol.6, No.11, pp.6102-6119, 2013.
- 12) C. Zhang, S. Srdic, S. Lukic, Y. Kang, E. Choi and E. Tafti, A SiC-Based 100 kW High-Power-Density (34 kW/L) Electric Vehicle Traction Inverter, North Carolina State University Raleigh, USA, 2018.
- 13) J. Marcinkowski, A. Kempitiya, V. A. Prabhala, M. Kim, R. Proch, B. Dee and P. Garg, Dual-sided Cooling for Automotive Inverters – Practical Implementation with Power Module, Infineon Technologies Company, 2015.
- 14) J. Vetrovec, High-performance Heat Sink for Hybrid Electric Vehicle Inverters, Aqwest LLC, 2010.
- 15) Y. Li, Z. Li, S. Zhu, M. Jiao and C. Wu, Junction Temperature Post-Fault Analysis of Single IGBT Short-Circuit for Double-Side Cooling Inverter Used for Electric Vehicle, Dynex Semiconductor Ltd, Lincoln, UK, 2017.
- 16) D. L. Saums, S. Gill, T. Louvar, A. Sathe and D. Thompson, Vaporizable Dielectric Fluid Cooling of IGBT Power Semiconductors for Vehicle Powertrains, DS&A LLC, USA, 2009.

- 17) M. Fakhfakh, M. Ayadi and R. Neji, Thermal Behavior of a Three Phase Inverter for EV (Electric Vehicle), Department of Electrical Engineering, University of Sfax & Electric Vehicle and Power Electronics Group(VEEP), Sfax, Tunisia, 2010.
- 18) I. Lopez, E. Ibarra, A. Matallana, J. Andreu and I. Kortabarria, "Next Generation Electric Drives for HEV/EV Propulsion Systems," Technology, Trends and Challenges, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.114, 2019.
- 19) Global Warming Promotion Portal, Ministry of Environment, <https://www.gihoo.or.kr/portal/kr/change/globalWarming.do>.