

# BAJA 전기 차량 모터 컨트롤러 냉각유로 설계

심기범·이상열\*

한성대학교 기계전자공학부

## Design of Cooling Channels for Motor Controller in a Baja KSAE Electric Vehicle

Kibum Shim · Sangyul Lee\*

Department of Mechanical and Electronic Engineering, Hansung University, Seoul 02876, Korea

(Received 6 March 2025 / Revised 13 April 2025 / Accepted 14 April 2025)

**Abstract :** This study presents a new water-cooling channel design for a 10 kW motor controller used in an electric vehicle for the KSAE BAJA competition. The existing cooling channel exhibited temperature variations, uneven coolant distribution, and excessive weight. Three fin geometries (rectangular, triangular, and diamond-shaped) were compared through CFD analysis, with rectangular fins (3.5 mm thickness) demonstrating superior performance. A full-scale model analysis led to design improvements, including modified inlet position, wedge-shaped structures, and vertical channels that could enhance fluid distribution and reduce pressure differences. The final design achieved a 4.2 % reduction in maximum temperature, a 1 % decrease in pressure difference, and reduced channel thickness, from 40 mm to 15 mm. These improvements contribute to stable motor controller operation and vehicle weight reduction in electric vehicles.

**Key words :** Electric vehicle(전기자동차), Water cooling channel(수냉식 냉각 유로), Motor controller(모터 컨트롤러), CFD simulation(전산유체역학 해석), Heat dissipation(열 방출), Thermal management(열 관리), KSAE(한국자동차공학회), Baja student korea(대학생 자작자동차 대회)

### Nomenclature

$t$	: fin thickness, mm
$R1$	: end round radius, mm
$R2$	: middle round radius, mm
$\Delta P$	: inlet-outlet pressure difference, Pa
$v$	: fluid velocity, m/s
$T_0$	: initial coolant inlet temperature, °C
$\dot{Q}$	: flow rate, kg/s

### Subscripts

in	: inlet
out	: outlet

## 1. 서론

전 지구적 기후위기에 대응하기 위한 환경규제가 강

화되면서, 자동차 산업에서도 친환경 동력원에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 전기자동차(EV, Electric Vehicle)와 하이브리드 차량이 주목받으며, 이에 따른 전동화 구동시스템의 기술개발과 성능 향상 연구가 활발히 진행되고 있다. 그중 배터리에 저장된 에너지를 모터에 적합한 수준으로 변환 및 제어하는 인버터의 연구개발 또한 증가하고 있다.<sup>1)</sup> 최근에는 EV 차량의 성능 향상을 위해 배터리, 인버터, 모터를 통합적으로 관리하는 열 관리 시스템에 대한 연구도 활발하다.<sup>2)</sup> 모터 컨트롤러나 인버터에 장착되는 스위칭 소자, 열전계 게이트 마이폴라 트랜지스터, 다이오드 등은 작동 시 상당한 열을 발생시킨다.<sup>3)</sup> 이러한 소자들이 밀폐된 공간에 장착되면 발생한 열이 제품의 동작 효율과 내구성에 큰 영향을 미치게 된다.<sup>4)</sup> 더욱이 소형화 및 경량화 추세와 함께 고성능 EV 차량 개발에 따라 모터 컨트롤러와 인버터에 요구되는 출력은 계속 증가하고 있어 발열 문제는 더욱 중요해지고

\*Corresponding author, E-mail: sangyul.lee@hansung.ac.kr

<sup>1)</sup>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.

있다.<sup>5)</sup>

이러한 발열 문제를 효과적으로 해결하기 위해서는 효율적인 냉각 유로 설계가 필수적이다. 본 논문에서는 KSAE 자작자동차 대회 BAJA 부문에 참가하는 전기차량에 사용되는 10 kW급 모터 컨트롤러의 발열 문제를 해결하기 위한 새로운 냉각 유로를 설계하고자 한다.

BAJA 차량은 1인용 오프로드 차량으로, 10 kW 이상의 모터와 200 A 이상의 전류를 사용하는 모터 컨트롤러를 사용한다. 일반 차량에 비해 낮은 출력이지만, 실제 주행 시 소자 부품의 충분한 열해가 불가하여 주행 중 전력이 차단되는 문제를 발견하였다. 실제 EV 차량에도 냉각 효율 측면에서 이점이 있는 수랭식 냉각이 주로 사용되고 있다.<sup>6)</sup> 2023년도에 설계된 냉각 유로는 모터 컨트롤러의 평균 온도를 65 °C이하로 유지하며 발열 문제를 일정 부분 해결하였으나, 냉각수 유동 영역에 따른 온도 편차가 크고 유로 내부의 유체 분산이 불균일하며, 40 mm의 유로 두께로 인한 중량 증가라는 한계점이 존재한다.

본 연구에서는 기존 유로의 냉각 성능을 유지하면서 온도 편차를 줄이고 경량화를 달성할 수 있는 새로운 유로를 설계하였다. 유로의 폭 증가와 다양한 핀 형상을 적용하여 유체 흐름 분산을 개선하였으며, 축소 모델과 실제 크기 모델의 순차적 해석을 통해 최적화된 설계를 도출하였다. 또한 실제 제작을 통해 해석 결과의 타당성을 검증하였다.

## 2. 초기 유로 설계 분석

### 2.1 모터 컨트롤러 사양 및 요구 조건

본 연구에 사용된 모터 컨트롤러는 Golden Motor사의 VEC500으로, 10 kW 모터와 함께 사용할 경우 전체 시스템 효율은 86 %이다. 제조사 매뉴얼에 따르면, 컨트롤러의 내부 온도가 70 °C이상일 경우 회로 손상이 발생할 수 있으며, 90 °C이상에서는 보호회로가 작동하여 전력 공급이 자동으로 차단된다.



Fig. 1 Flat heat sink structure of motor controller (VEC500): (a) top surface, (b) bottom surface

이러한 사양을 고려하여 냉각 유로 설계 시 시스템 열 손실을 10 %로 가정하였으며, 안전 마진을 확보하기 위해 방열판의 최대 온도를 60 °C이하로 유지하는 것을 목표로 하였다. 컨트롤러의 방열판 크기는 201 × 172 mm이며, Fig. 1과 같이 상하면이 평판 형태로 구성되어 있다. 이러한 평판 구조의 방열판은 자연 대류만으로는 발열 해소에 한계가 있어, 보다 효과적인 냉각을 위한 추가적인 설계가 필요하다.

### 2.2 초기 유로의 설계 및 문제점

평판 형태 방열판의 냉각 성능 한계를 극복하기 위해 수랭식 냉각 유로를 설계하였다. Fig. 2는 초기 설계된 냉각 유로와 이를 실제 차량에 장착한 모습을 보여준다. 이 초기 유로는 방열 성능 향상을 위해 단면이 사각형인 핀 구조를 적용하였으며, 실제 주행 테스트에서 방열판의 온도를 최대 65 °C이하로 유지하여 기본적인 냉각 성능을 확보할 수 있었다.

Fig. 3은 초기 냉각 유로의 CFD 온도 분포 해석 결과를 보여준다. 이 결과에서 방열판 위치에 따른 온도 편차가 크게 나타나는 문제점이 확인되었다. 이러한 현상은 냉각수가 유로 내부에서 균일하게 분산되지 않고 한쪽으로 편중되어 흐르기 때문이다. 또한 초기 유로는 40 mm



Fig. 2 Initial water cooling channel design and its installation on the vehicle

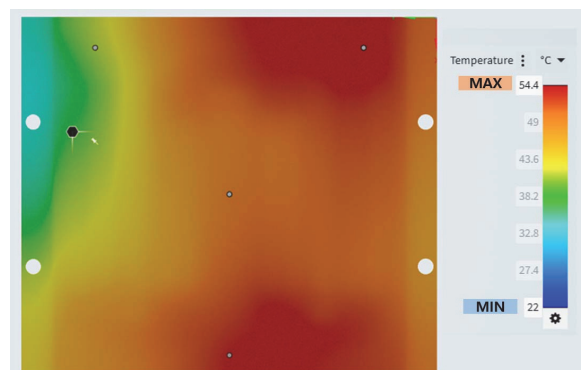


Fig. 3 CFD simulation results showing temperature distribution of the initial cooling channel

의 두께로 설계되어 차량 중량이 불필요하게 증가하는 단점이 있었다. 이러한 문제점들을 종합하면 초기 유로 설계의 주요 한계점은 다음과 같다:

- 1) 방열판 위치별 큰 온도 편차
- 2) 냉각수 유동의 분균일한 분산
- 3) 과도한 유로 두께로 인한 중량 증가

이러한 한계점들을 개선하기 위해 새로운 냉각 유로 설계가 필요하다. 새로운 설계에서는 기존 유로의 냉각 성능은 유지하면서 방열판 전체에 걸친 온도 편차를 최소화하고, 유로 두께를 줄여 경량화를 달성하는 것을 주요 목표로 하였다. 또한 냉각수가 유로 내에서 보다 균일하게 분산되도록 유로 내부 구조를 최적화하였다.

### 3. 개선된 유로 설계 및 해석

#### 3.1 설계 개선 방향

본 연구에서는 냉각 성능을 향상시키기 위해 유로의 폭을 증가시키되, ANSYS 해석 결과를 바탕으로 최적의 핀 길이와 개수를 결정하였다.

선행 연구에 따르면 입수구 근처의 구조물 배치가 유체 분산과 냉각 성능에 큰 영향을 미친다.<sup>7)</sup> 이를 고려하여 유체의 균일한 분산을 위해 Fig. 4와 같이 세 가지 형



Fig. 4 Three different fin cross-section designs for uniform fluid distribution

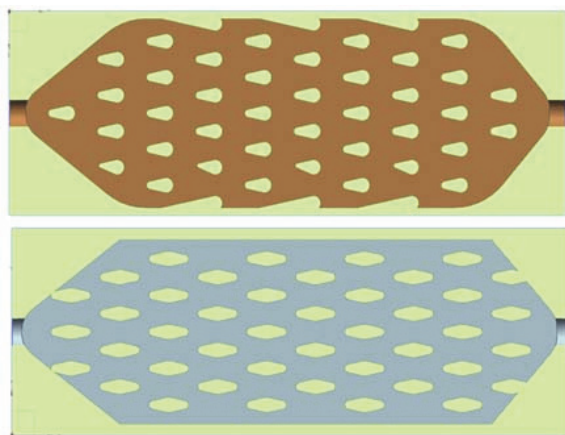


Fig. 5 Cross-arranged structure of triangular and diamond-shaped fins

태의 핀 단면 형상(사각형, 삼각형, 마름모)을 고안하였다. 핀 구조로 유로를 구성하게 되면 단순 평판 형태의 유로 보다 유체와의 접촉 면적이 증가하며, 냉각 성능에 영향을 준다고 판단하였다. 모든 형상에서 와류 발생을 최소화하기 위해 각 모서리는 라운드 처리하였다.

특히 삼각형과 마름모 형상의 경우, Fig. 5와 같이 핀을 교차 배치하여 유체 흐름의 분산을 촉진하고자 하였다. 이후 논의의 편의를 위해 각 형상을 사각 핀, 삼각 핀, 마름모 핀으로 명명하였다. 설계 및 해석은 다음과 같이 두 단계로 체계적으로 진행하였다:

1차 해석: 세 가지 핀 형상에 대한 냉각 성능을 비교 분석하였다. 계산 효율성을 위해 입·출수구가 일직선상에 위치하며, 크기를 201 × 57 mm(기존 유로의 1/3 scale)로 축소된 모델을 사용하였다.

2차 해석: 1차 해석에서 선정된 최적 형상을 바탕으로 실제 크기(Full scale) 모델에 대한 해석을 수행하고 최종 설계를 확정하였다.

#### 3.2 CFD 해석 조건

새로운 유로 설계를 위한 CFD 해석은 ANSYS를 사용하여 수행하였다. Fig. 6은 모든 해석에 공통적으로 적용된 기본 모델의 모식도를 보여준다. 해석 모델에서 하단의 적색 부분은 컨트롤러의 방열판을 5 mm 두께의 플레이트로 단순화하여 표현하였다.

해석 조건은 다음과 같이 설정하였다. 초기 냉각 유로 설계 시 가정된 10%의 열손실이 모두 발열 플레이트에서 발생한다고 가정하여 가열량을 1,000 W로 설정하였다. 다만, 1차 해석에서는 1/3 축소 모델의 크기에 맞춰 가열량을 333 W로 조정하였다. 냉각수의 초기 입수 온도( $T_0$ )와 유량( $Q$ )은 2023년 KSAE 대회 실제 주행 데이터와 사용 펌프의 사양을 바탕으로 각각 30 °C, 2 LPM (0.034 kg/s)으로 설정하였다. 해석 k-omega 난류 모델을 사용하고 노드 수는 1,214,423개로 구성하여 진행하였다. Table 1은 이러한 해석 조건을 요약한 것이다.

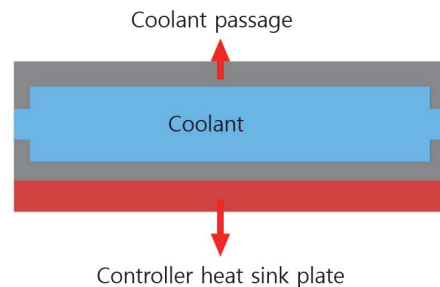


Fig. 6 Schematic diagram of the basic model for CFD simulation

Table 1 CFD simulation conditions

Parameters	Unit	Values
Heating value	W	1,000
$T_{int w}$	°C	30
$\dot{Q}_{flow rate}$	kg/s	0.034
Thermal Conductivity (AL 6061)	W/m-K	170
Solver model	Turbulent k-omega	
Node number	1,214,423	

### 3.3 핀 형상에 따른 1차 해석

#### 3.3.1 설계 변수 설정

세 가지 핀 형상에 대해 각기 다른 설계 변수를 설정하였다. 사각 핀의 경우 두께(t)를 주요 변수로, 삼각 핀과 마름모 핀의 경우 끝단 라운드 반경(R1)과 중간 라운드 반경(R2)을 주요 변수로 선정하였다. Fig. 7은 세 가지 핀 형상의 설계 변수를 시각적으로 나타낸 것이다. Table 2는 각 변수의 범위와 변화 단위를 정리한 것이다. 최적 핀 형상은 각 케이스별 최대 온도와 압력 변화를 기준으로 선정하였다.

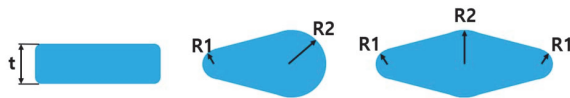


Fig. 7 Design parameter definitions for three different fin geometries

Table 2 The range of the design variables

Design variables	Unit	Range	Step
t	mm	1.5 - 5.0	0.5
R1	mm	0.5 - 2.0	0.5
R2	mm	2 - 4	1

#### 3.3.2 해석 결과

Figs. 8 ~ 10은 각각 삼각 핀, 마름모 핀, 사각 핀에 대한 CFD 해석 결과를 보여준다. 삼각 핀과 마름모 핀의 경우, 중간 라운드 반경(R2) 값이 증가할 때 최대 온도는 감소하나 입·출구 압력차(ΔP)는 증가하는 경향을 보였다. 끝단 라운드 반경(R1)의 경우, 증가에 따른 온도 감소 효과(약 1.9%)가 R2 대비 작은 반면, 압력차 증가(약 1.6%)는 유사한 수준을 나타냈다. 이는 R2가 냉각 성능에 더 큰 영향을 미치는 설계 요소임을 시사한다.

사각 핀의 경우, 두께 증가에 따라 최대 온도는 지속적으로 감소하였으며, 압력차는 상대적으로 작은 변화를

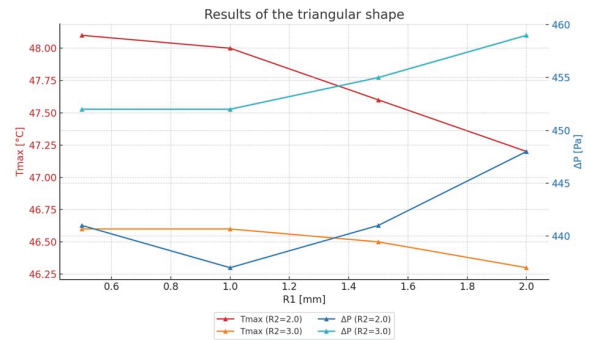


Fig. 8 Simulation results of the triangular shaped fin

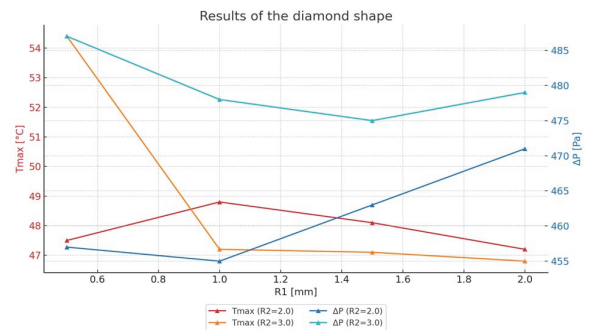


Fig. 9 Simulation results of the diamond shaped fin

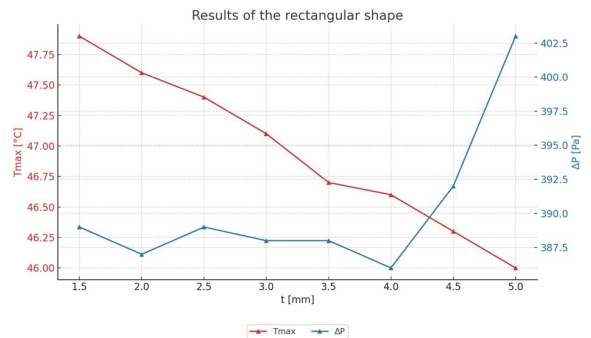


Fig. 10 Simulation results of the rectangular shaped fin

보였다. 특히 세 가지 형상 중 사각 핀이 가장 낮은 압력차를 나타냈는데, 이는 실제 적용 시 펌프 부하 감소 측면에서 유리한 특성이다. 그러나 최고 온도 측면에서는 세 형상 간 큰 차이를 보이지 않았다.

유동 특성 관점에서 분석한 결과, Fig. 11과 같이 삼각 핀의 경우 핀 후면에서 유속이 거의 0 m/s에 가까운 정체 구역이 발생하였다. Fig. 12의 마름모 핀은 상대적으로 와류 발생이 적었으나, 입수구 부근에서의 유체 분산이 불충분한 것으로 나타났다. 두 형상 모두 출수구 부근에서는 사각 핀 대비 양호한 유체 분산을 보였으나, 입수구

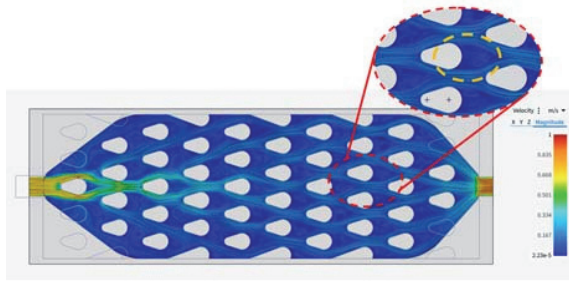


Fig. 11 Fluid velocity distribution and stagnation zones in triangular fin configuration

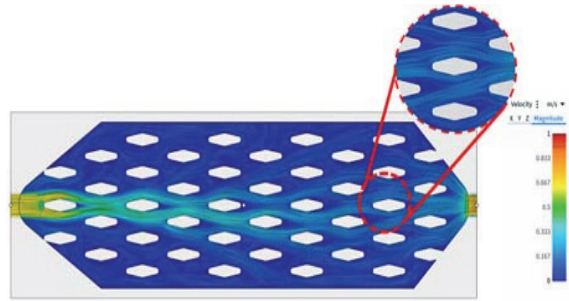


Fig. 12 Fluid dispersion pattern in diamond-shaped fin configuration

부근의 분산 성능은 미흡했다.

종합적인 분석 결과, 최저 온도는 세 형상 모두 46 ~ 46.8 °C로 유사한 수준을 보였으나, 압력차와 유동 특성을 고려할 때 두께 3.5 mm의 사각 핀이 가장 적합한 것으로 판단되었다. 이를 바탕으로 2차 해석에서는 사각 핀을 적용한 실제 크기 모델에서 유체 분산 개선과 냉각 성능 향상을 도모하고자 한다.

### 3.4 최종 유로 설계를 위한 2차 해석

#### 3.4.1 설계 개선 방향

2차 해석에서는 다음 두 가지 목표를 설정하였다:

- 1) 유로 구조 개선을 통한 유체 분산 효율 향상
- 2) 실제 크기(Full scale) 모델에서 기존 대비 낮은 온도와 압력차 달성

이러한 목표를 달성하기 위해 유체 분산 개선을 위한 두 가지 설계 방식을 Fig. 10과 같이 고안하였다. Fig. 13(a)는 사각 핀의 입수구 부분에 썸기형 구조를 추가하여 냉각수를 양측으로 균등하게 분산시키는 방식이다. Fig. 13(b)는 입수구 위치를 측면에서 상단으로 변경하여 중력 방향으로 자연스러운 유체 분산을 유도하는 방식이다.

두 설계 방식에 대해 동일한 조건에서 열전달 해석을 수행하였으며, Fig. 14는 각 설계에 대한 유체 분산 해석

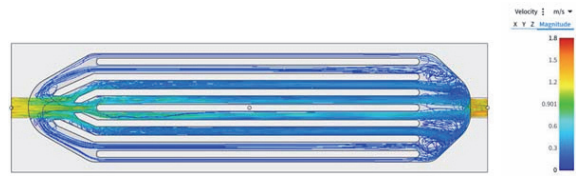


(a)



(b)

Fig. 13 Two design approaches for improved fluid dispersion: (a) additional structure method, (b) inlet position modification method



(a)



(b)

Fig. 14 Comparison of fluid dispersion simulation results between two design approaches

결과를 비교하여 보여준다. 이 결과를 바탕으로 최종 설계 방향을 결정하였다.

#### 3.4.2 해석 결과

두 설계 방식에 대한 해석 결과, 입수구 위치를 상단에 배치한 Fig. 14(b) 방식이 유체 분산 측면에서 더 효과적임을 확인하였다. 그러나 이 방식에서는 입·출구 압력차가 증가하는 문제가 발생하여, 이를 개선하기 위한 추가적인 설계 변경이 필요하였다.

Fig. 15(a), (b)는 1차 해석 결과와 입수구 위치 변경을 반영한 실제 크기(Full scale) 모델 내부 구조와 해석 결과를 보여준다. 유로의 곡선 부분에서 발생하는 유체 편중 현상을 방지하기 위해 중간에 추가 핀을 전략적으로 배치하였다. 해석 결과에서 확인할 수 있듯이, 이 설계의 압력차는 511 Pa로 1차 해석 대비 다소 증가하였다. 또한 유속 분포 분석 결과, 입수구 근처 첫 핀 구간에서 평균 0.2 m/s, 출수구 부근에서 0.15 m/s로 유속이 점진적으로 감소하는 경향을 보였다.

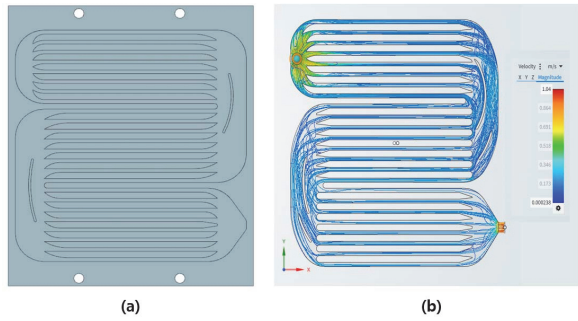


Fig. 15 Full-scale cooling models: (a) Internal fins structure of model, (b) velocity distribution simulation results

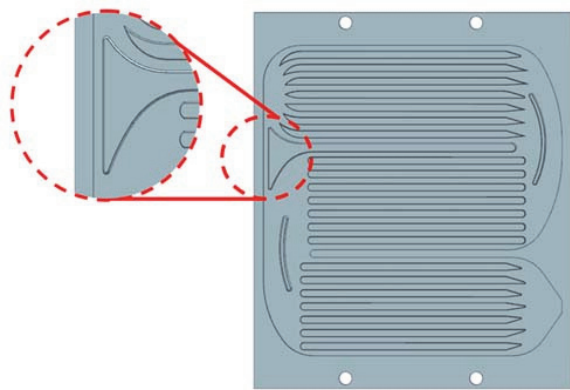


Fig. 16 Improved design model with additional vertical channel

이러한 압력차 증가 문제를 해결하기 위해 입수구 부분에 수직 유로를 추가하는 설계 변경을 시도하였다. Fig. 16은 이러한 모델의 형상 변경을 보여주며, 이 개선된 설계를 모델 A로 명명하였다. 모델 A에 대한 해석 결과, 압력차가 450 Pa로 감소하여 설계 변경의 효과를 확인할 수 있었다.

### 3.4.3 최종 설계 및 성능 평가

Fig. 17(a)는 최종 설계(모델 B)를 보여준다. 이 최종 설계의 주요 특징은 다음과 같다:

- 1) 입수구 상단 배치를 통한 유체 분산 개선
- 2) 전략적 핀 추가를 통한 유체 편중 방지
- 3) 수직 유로 추가를 통한 압력차 감소

해석 결과, Fig. 17(b)와 같이 일부 유체가 입수구에서 수직 유로를 따라 마지막 유로 구역으로 효율적으로 흐르는 패턴을 확인할 수 있었다. Table 3은 모델 B의 평균 온도, 최대 온도, 압력 강하에 대한 해석 결과를 요약하여 보여준다.

Table 3 Comparison of simulation results between the model A and B

Model	$T_{avg}$ [°C]	$T_{max}$ [°C]	$\Delta P$ [Pa]
B	46.0	52.1	435
Initial	48.0	54.4	439

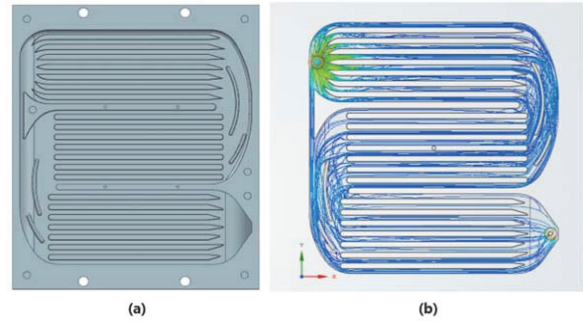


Fig. 17 Final cooling channel design: (a) channel structure and features, (b) fluid flow analysis results

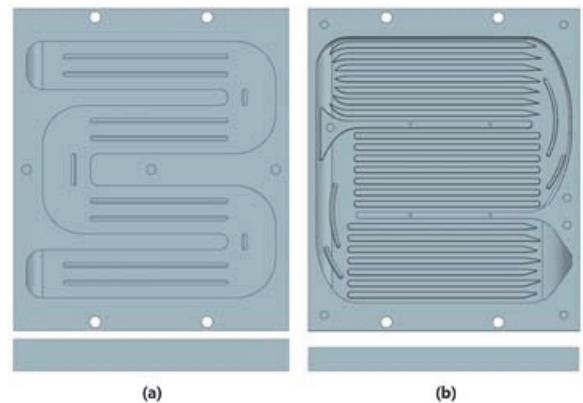


Fig. 18 Comparison of cooling Channel design: (a) Initial version, (b) Final version

또한 최종 설계인 모델 B와 초기 유로의 해석 결과를 비교한 것이다. 모델 B는 초기 모델 대비 최고 온도 4.2% 감소, 압력차 1% 감소라는 성능 향상을 달성하였다. 또한 유로 두께를 40 mm에서 15 mm로 크게 감소시켜 경량화에도 성공하였다. Fig. 18과 Fig. 19는 초기 및 최종 설계 모델과 해석결과를 통해 방열판의 온도 불균형을 해소한 모습을 보여준다.

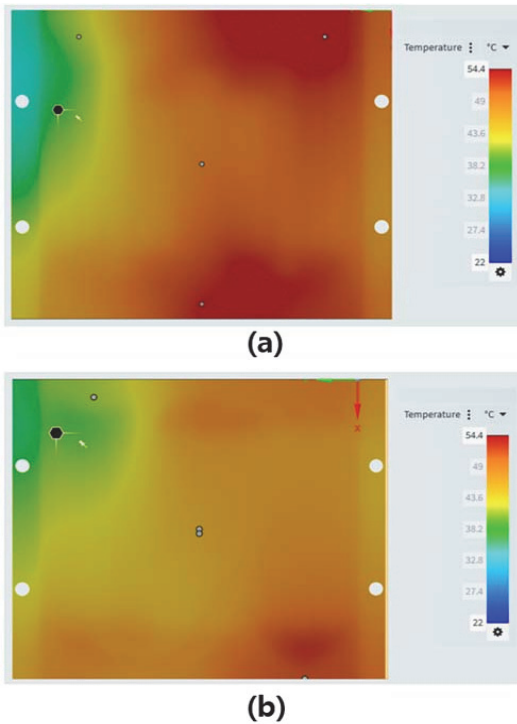


Fig. 19 Fluid flow analysis results: (a) Initial version, (b) Final version

#### 4. 결론

본 연구에서는 1인용 오프로드 전기차량용 모터 컨트롤러의 냉각 성능 향상을 위한 새로운 수냉식 냉각 유로를 설계하였다. 기존 냉각 유로의 온도 편차와 유체 분산 문제를 해결하고자 단계적인 설계 개선을 진행하였으며, 주요 연구 결과는 다음과 같다.

초기 설계된 냉각 유로의 문제점을 CFD 해석을 통해 분석한 결과, 냉각수의 불균일한 분산, 방열판 위치별 큰 온도 편차, 그리고 40 mm의 과도한 유로 두께로 인한 중량 증가가 주요 한계점으로 확인되었다.

냉각 성능 개선을 위해 사각형, 삼각형, 마름모 형태의 세 가지 핀 단면 형상을 고안하고, 1/3 축소 모델에서의 체계적인 비교 분석을 통해 최적 형상을 도출하였다. 그 결과, 두께 3.5 mm의 사각 핀이 압력차와 유동 특성 측면에서 가장 우수한 성능을 나타냈다.

실제 크기(Full scale) 모델 설계 시 입수구 위치를 측면에서 상단으로 변경하고 쉘기형 구조를 추가하여 유체 분산을 크게 개선하였다. 또한 유로의 곡선 부분에 전략적으로 핀을 배치하고 수직 유로를 추가함으로써 압력차를 효과적으로 저감하였다.

최종 설계된 냉각 유로는 초기 설계 대비 최고 온도 4.2% 감소, 압력차 1% 감소를 달성하였으며, 유로 두께

를 40 mm에서 15 mm로 대폭 감소시켜 경량화에도 성공하였다.

이러한 성능 개선을 통해 냉각 시스템 구성에 필요한 부품의 요구 사양을 완화하고 제작 비용을 절감할 수 있을 것으로 기대된다. 후속 연구에서는 컨트롤러 방열판과 일체형인 냉각 유로를 설계하여 추가적인 냉각 성능 향상과 경량화, 그리고 정비성 개선을 도모할 계획이다.

#### 후 기

본 연구는 한성대학교 학술연구비 지원과제 임.

#### References

- 1) S. C. Kim, "Analytical Assessment on the Cooling Structure of In-Wheel Driving Inverter," Transactions of KSAE, Vol.22, No.2, pp.1-6, 2014.
- 2) S. Chowdhury, L. Leitzel, M. Zima, M. Santacesaria, G. Titov, J. Lustbader, J. Rugh, J. Winkler, A. Khawaja and M. Govindarajalu, "Total Thermal Management of Battery Electric Vehicles (BEVs)," SAE CO2 Reduction for Transportation Systems Conference, NREL/CP-5400-71288, 2019.
- 3) M. S. Kim, "The Importance of Integrated Thermal Management System for Electric Vehicle," Auto Journal, Journal of the Korean Society of Automotive Engineering, Vol.41, No.6, pp.62-64, 2019.
- 4) G. M. Kim, B. G. Woo, C. H. Kang, S. J. Cho, Y. D. Yun and T. W. Chun, "A Study of the Cooling Effect for a Water-cooled Heat Structure of the Electric Vehicle Inverter System," Transactions of Korean Institute of Power Electronics, pp.343-344, 2010.
- 5) S. Y. Jung, "Technical Trend and Perspective on EV and Electric Propulsion Parts," IT Industry Forecasting Conference, pp.78-85, 2010.
- 6) K. Z. Zhang and S. M. Chang, "Thermal and Hydraulic Performance of the Offset Strip Fins Installed in Water Channel of a Cooling Plate for Batteries of Electric Vehicles," Journal of Computational Fluids Engineering, Vol.27, No.3, pp.35-42, 2022.
- 7) H. S. Lee, J. W. Kim, U. K. Han and H. S. Lee, "Analysis of Cooling Effect with Various Channel Design in Indirect Battery Cooling System," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.45, No.12, pp.847-855, 2021.