

# 메탈 하이브리드 소재를 활용한 전기자동차 모터의 스마트 설계 및 냉각 성능 향상에 대한 연구

## A Study on the Smart Design and Cooling Performance of Electric Vehicle Motor Using Metal-Hybrid Materials

방성환<sup>1</sup>, 이동렬<sup>1,#</sup>  
Sung-Hwan Bang<sup>1</sup> and Dong-Ryul Lee<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부 (School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu)  
# Corresponding Author / E-mail: [dlee@cu.ac.kr](mailto:dlee@cu.ac.kr), TEL: +82-53-850-2717  
ORCID: 0000-0002-7555-2745

KEYWORDS: Electric vehicle motor (전기자동차 모터), Computational fluid dynamics (전산유체역학), Cooling performance (냉각 성능), Convective cooling (대류 냉각), Composite materials (복합 재료)

*The aim of this study is to numerically investigate the cooling performance of the electric vehicle motor depending on the attachment of the heat sink and materials to the cooling channel. The research focused on the numerical comparison of forced convective heat transfer coefficients with case 1 (Heat Sink-None, Cooling Channel-Al), case 2 (Heat Sink-None, Cooling Channel-Metal Hybrid Material), case 3 (Heat Sink-4EA, Cooling Channel-Al), and case 4 (Heat Sink-6EA, Cooling Channel-Al). To compare the cooling performance for novel design of the smart cooling system, selected local positions for various temperature distributions were marked on the coil surface. Normalized local Nusselt number of the cooling area at the normalized width position indicated that cooling performance of case 1 was on an average 8.05, 0.57, and 5.85% lower than that of cases 2, 3, and 4, respectively.*

Manuscript received: April 22, 2021 / Revised: May 31, 2021 / Accepted: June 22, 2021

### 1. 서론

최근 내연기관 자동차의 유해가스인 CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 등으로 인한 환경문제가 이슈화되어 전기자동차나 하이브리드 자동차와 같은 친환경 자동차에 대한 관심이 증가하면서 그 동력원인 모터에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 모터는 신뢰성이 높은 동력원으로 다양한 요구에 맞게 설계되어 산업 전반에 걸쳐 사용되고 있으며 대용량화, 소형화, 경량화, 고효율, 고출력을 목표로 연구 개발이 이루어지고 있다. 모터가 소형화되면 열원에 대한 방열 면적이 줄어들어 모터의 온도가 높아지고, 출력이 증가하거나 용량이 커지면 손실도 더 커지게 되므로 모터의 온도가 상승한다. 그러므로 모터의 성능을 높이기 위하여 모터의 온도가 보다 낮게 유지되어야 하고, 모터의 스마트설계를

위해 코일의 온도 상승을 파악하고, 냉각 및 방열 효과를 고려하여 열적인 측면에서 모터를 안정적이게 운용하는 것이 필수적이다.<sup>1</sup> 이에 관한 기존 연구들은 히트파이프 부착에 따른 전기자동차용 모터의 최적 작동온도 유지를 위한 모터 냉각 시스템 성능에 관한 연구,<sup>2</sup> 냉각핀 유무에 따른 열 유동해석을 통한 모터 하우징 및 주변 부품들의 냉각 성능에 관한 연구,<sup>3</sup> 하이브리드 자동차용 모터 내부의 오일 냉각 시스템에 대한 연구,<sup>4</sup> 고출력 모터의 여러 냉각 방식인 수냉, 공냉, 유냉에 대한 연구,<sup>5</sup> 냉각 채널의 감긴 횟수와 입-출구의 위치 및 개수를 변수로 적용하였을 때 냉각 성능 연구,<sup>6</sup> 영구자석 모터의 냉각 채널의 냉각수-공기 유량 변화 및 공냉 유로 형상 유한요소법을 이용한 210 kW급 매입형 영구자석 동기전동기의 냉각재킷 적용에 따른 열 특성 연구,<sup>7</sup> 냉각 채널 내벽에 설치한 핀 형상에 따른

이중관 열교환기의 냉각 성능에 대한 수치 해석적 연구,<sup>8</sup> 전기모터 회전자의 냉각 구조에 대한 연구,<sup>9</sup> 냉각판의 두께와 개수, 냉각판의 접촉 형태를 변수로 적용한 냉각 성능 연구,<sup>10</sup> 분리냉각과 전동냉각이 냉각 성능에 미치는 영향에 대한 비교 연구<sup>11</sup> 등이 있지만 냉각판(메탈 하이브리드 소재) 부착에 따른 냉각 성능 연구와 냉각 채널의 소재에 따른 냉각 성능 연구는 거의 수행되지 않았다.

본 연구는 냉각 채널을 이용한 전기자동차 모터의 강제 대류 냉각 시스템에서 냉각판(메탈 하이브리드 소재)의 유무와 냉각 채널의 재질(알루미늄, 메탈 하이브리드 소재)에 따른 4가지 Cases로 설계하고, 대류 및 전도에 의해 냉각된 전기차 모터 내부 시스템의 온도 분포를 정량적으로 해석하고 각각의 Case별 냉각 성능을 비교하여 냉각이 취약한 부분을 찾아내고, 우수한 냉각 성능을 가진 전기차 모터 스마트 냉각 시스템을 설계하는 것이 이번 연구의 목표이다.

2. 설계 및 수치 해석

Fig. 1은 국내 완성차 업체 K사 N모델에 탑재되는 전기자동차 구동 모터의 사진이다. Fig. 2는 해석 시간 및 수렴 효율성을 고려하여 기존 냉각 채널을 단순하게 바꾸어 모델링한 냉각 채널의 형상이고, 입-출구를 각각 청색과 적색 화살표로 표시하였다. CATIA V5 R21을 활용하여 모델링한 하우징, 동력 전달 축, 회전자, 고정자, 냉각판, 영구자석, 코일의 제원을 Table 1에 나타냈다. Figs. 3은 1을 직접 분해 및 실측한 후 CATIA V5 R21로 모델링한 CAD 형상을 ANSYS V20.1 Geometry로 불러온 그림이다. 유동해석을 중점적으로 할 필요가 없는 하우징 외부는 단순화하여 3D 모델링을 하였고, 실제 형상에서 냉각판 부착에 따른 냉각 성능과 냉각 채널의 재질을 메탈 하이브리드 소재로 적용하였을 때의 냉각 성능을 정량적으로 파악하고, 비교하기 위하여 냉각판의 유무, 냉각 채널의 재질(알루미늄, 메탈 하이브리드 소재)에 따라 4가지 Cases로 분류하였다. Figs. 3(a)는 냉각판이 부착되지 않는 Case 1(Heat Sink-None, Cooling Channel-Al), Case 2(Heat Sink-None, Cooling Channel-Metal Hybrid Material)의 형상이고, 3(b)는 고정자의 4방향을 절단하여 4개의 메탈 하이브리드 냉각판을 부착한 Case 3(Heat Sink-4EA, Cooling Channel-Al)의 형상, 3(c)는 고정자의 6방향을 절단하여 6개의 메탈 하이브리드 냉각판을 부착한 Case 4(Heat Sink-6EA, Cooling Channel-Al)의 형상이다.

원형 고정자를 절단하여 비원형 고정자를 사용한 이유는 고정자의 경량화 및 비용절감 효과를 얻고,<sup>12</sup> 기존 냉각 채널 형상을 유지하면서 냉각판을 부착하기 위함이다. 고정자의 절단된 부분과 냉각판의 크기와 형상은 동일하다. 좌표 방향으로서는 Figs. 3(a)부터 3(c) 모두 동일하게 하우징의 축 방향을 Z축, 입구, 출구와 평행한 방향을 Y축, YZ 평면에 수직인 방향을 X축으로 설정하였다.



Fig. 1 Actual configuration of electric vehicle motor

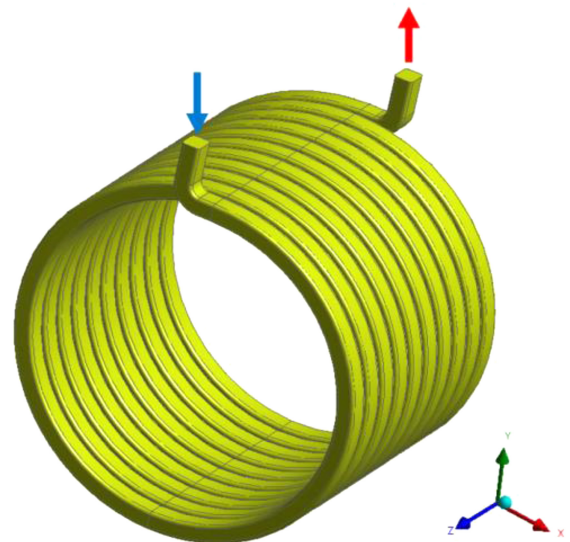
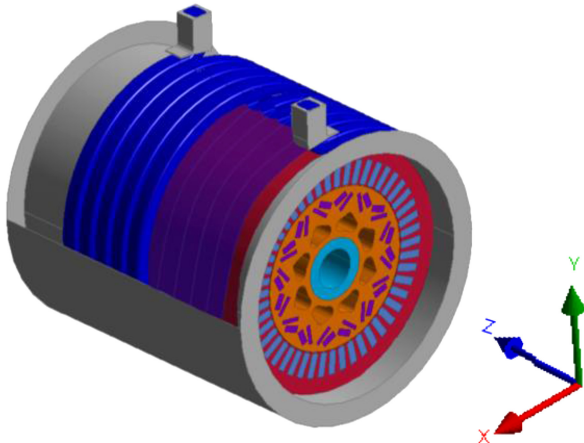
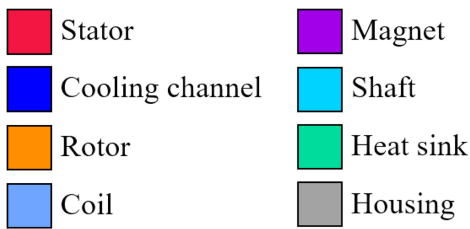


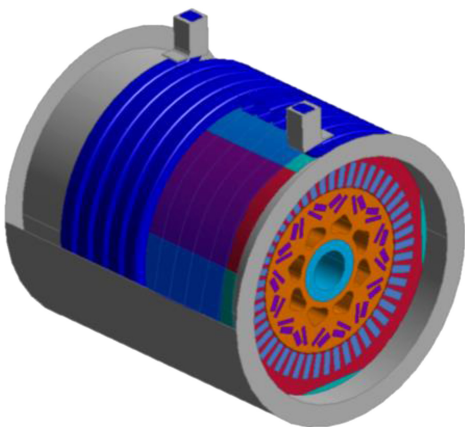
Fig. 2 Geometries of cooling channel at all cases

Table 1 Physical dimensions of electric motor for cases 1, 2, 3, and 4

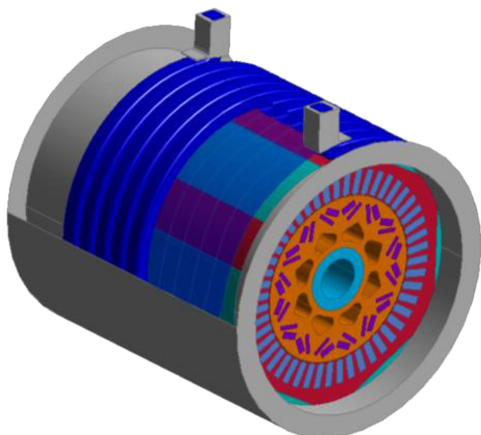
	Diameter internal / external (D) [mm]		Height (H) [mm]	EA
Housing	199.4 / 235.4		260	1
Stator	133.4 / 199.4			1
Rotor	50 / 132		175	1
Shaft	32 / 50			1
	Thickness (T) [mm]	Width (L) [mm]	Height (H) [mm]	EA
Magnet	3	16		16
	5	12	175	
Coil	6	20		48
	Thickness (T) [mm]	Diameter (D) [mm]	Height (H) [mm]	EA
Heat sink	5	199.4	175	4
				6



(a) Cases 1 and 2



(b) Case 3



(c) Case 4

Fig. 3 Geometries of electric vehicle motor at four different cases with/without heat sink

Table 2 Design boundary conditions

Fluid material	Ethylene glycol		Incompressible
	Air		
Coil	Heat generation [W/m <sup>3</sup> ]		1,000,000
Ethylene glycol	Inlet	Mass flow rate [kg/s]	0.106
		Temperature [°C]	65
	Outlet	Pressure [Pa]	0
Air	Inlet	Temperature [°C]	25
		Outlet	Pressure [Pa]

2.1 유동해석 및 경계 조건

유동해석 조건은 열전달 해석 및 유체 유동해석을 위하여 운동량 보존 법칙, 질량 보존 법칙, 에너지 보존 법칙을 적용하였고, ANSYS FLUENT V20.1을 활용하여 비압축성 정상상태 유동해석을 진행하였다. 전도 및 대류 열전달 해석 커플링을 하여 구조를 가진 고체와 내부 혹은 주변 유체 유동을 상호작용하여 해석하는 FSI (Fluid Structure Interaction)를 활용하여 열변형 해석을 진행하였다. 내부 유동의 최대 Reynold 수는 5,200으로 계산되었고, 이에 따라 난류 유동해석을 진행하였으며 경계층 흐름에 대한 더 많은 계산을 하고, 해석의 정확도를 향상시키기 위해 난류모델 k-omega SST를 사용하였다. 냉각판의 재질은 메탈 하이브리드 소재를 적용하였고, 냉각 채널에는 알루미늄과 메탈 하이브리드 소재를 적용하였다. 초기 조건으로 냉각수의 온도는 차량 운행 중일 때와 유사한 조건으로 해석을 수행하기 위해 65°C로 설정하였고, 주변 공기의 온도를 상온인 25°C로 설정하였다. 냉각판의 유무와 냉각 채널의 재질을 변경해 설계한 4가지 Cases 모두 입구 질량 유량을 0.106 kg/s로 설정하였는데 이는 상용화 되어있는 냉각수의 유량인 6.5 LPM을 채택하여 질량 유량으로 바꾸어 표기한 것이다. 출구는 계기 압력 0 Pa를 부여하였고, 이는 대기압을 가정하였기 때문이다. 모터 내부의 코일에 일정 열유속 조건을 열경계 조건으로 사용하였다. Table 2는 열 및 유동해석을 위한 경계 조건들을 표로 나타낸 것이다. 해석에 사용된 재질은 냉각수는 많은 모델에 사용되는 Ethylene glycol, 하우징은 Aluminum Alloy 195, 메탈 하이브리드 소재는 Ag와 Gr의 혼합비가 5 : 5인 소결체, 코일은 Cooper, 자석은 Nd (Dy) FeB, 축은 Carbon-Silicon Steel, 회전자와 고정자는 No. 30 Steel를 입력하였고, 해석에 필요한 밀도, 비열, 열전도율, 점성계수의 물성치를 Table 3에 나열하였다.

2.2 Grid 생성 및 의존도 테스트

전기차 모터의 열 및 유동해석을 위해 하우징, 냉각 채널, 고정자, 코일, 회전자, 영구자석, 동력 전달 축, 냉각판에 ANSYS MESH를 이용하여 격자를 생성하였고, 격자 의존도 테스트를 통해 최적의 격자를 생성하였다. 578만개, 1,048만개, 1,389만개, 1,668만개, 2,118만개, 2,812만개의 격자를 생성하여 해석 오차를 비교해보았을 때 오차율이 각각 1.03, 0.81, 0.62, 0.52,

Table 3 Thermophysical property of material

	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Thermal conductivity [W/m·°C]	Specific heat [J/kg·°C]
Housing	2,790	168	883
Heat sink	6,128	598.8	2,009.3
Stator and Rotor	7,540	31	557
Coil	8,933	401	385
Shaft	7,817	51.9	446
Magnet	7,500	7.5	410
Ethylene glycol	1,057	0.394	3,410
	Viscosity [kg/m·s]		0.00159

Table 4 Total elements of electric motor assembly for grid dependency

Total elements	T <sub>max</sub> [°C]	Error [%]
0.58 × 10 <sup>7</sup>	136.4	1.03
1.05 × 10 <sup>7</sup>	136.1	0.81
1.39 × 10 <sup>7</sup>	135.8	0.62
1.67 × 10 <sup>7</sup>	135.7	0.52
2.12 × 10 <sup>7</sup>	135.6	0.44
2.81 × 10 <sup>7</sup>	135.5	0.41

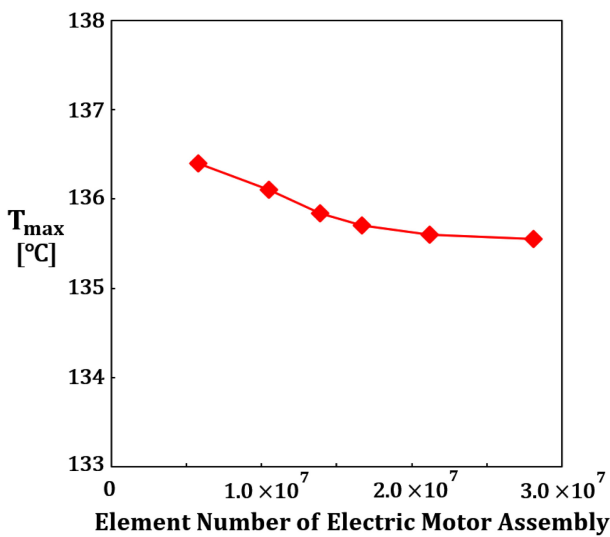


Fig. 4 Grid dependency test

0.44, 0.41%로 나타났고, 이를 Table 4에 정리하였다. 해석의 수렴과 시간을 고려하여 2,118만개의 격자를 선택하였고, Fig. 4에 격자 의존도 검사를 도식화하였다.

원활한 해석과 격자의 품질 향상을 고려하여 하우징, 회전자, 영구자석, 동력 전달 축, 냉각 채널은 Tetra 격자로 설정하였고, 냉각 채널의 내부 벽면에서는 속도구배가 크기 때문에 조밀한 격자형성을 위해 입-출구를 제외한 모든 면에 Inflation을 적용하였다. 최대 두께를 1 mm, 벽면에서의 격자 층수를 4층, 격자의 성장률(Growth Rate)을 1.2로 설정하였다. 냉각 채널의 몸체

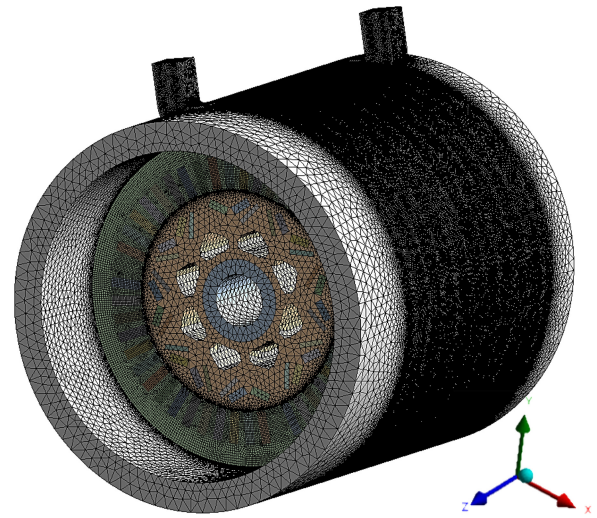


Fig. 5 Total grid generation of electric motor at case 1

크기(Body Sizing)는 1 mm를 주었고, 하우징, 회전자, 영구자석, 동력전달 축의 몸체 크기는 4 mm를 주었다. 고정자와 냉각판은 Hexa 격자를, 코일에는 Multizone-Tetra/Pyramid 격자를 주었고, 고정자와 냉각판의 몸체 크기는 1.5 mm, 코일의 몸체 크기는 1.0 mm로 주었다. 총 격자수는 Cases 1과 2에서 총 2,118만개, 3과 4에서 각각 2,772만개, 2,596만개로 나타났다. Cases 3과 4의 냉각판에서 각각 5만개, 7.4만개로 나타났다. 코일은 4가지 Cases 모두 103만개로 동일하게 나타났다. Y Plus (Y+) 값은 0-6.4로 나타났다. Fig. 5는 Cases 1과 2의 전체 격자 형상이다. Figs. 6(a)는 모든 Cases의 냉각 채널의 격자 형상이고, 6(b)는 6(a)에 적색 사각형으로 표시한 부분을 확대한 모습이다. 4가지 Cases의 총 격자수와 냉각 채널, 냉각판의 격자수를 Table 5에 정리하였다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구는 원활한 해석을 위하여 전기차 모터의 형상을 단순화한 뒤 ANSYS FLUENT V20.1을 활용하였다. 냉각 채널의 재질과 냉각판 유무에 따른 전기차 모터 시스템의 냉각 성능을 정량적으로 비교하기 위해 4가지 Cases로 분류하여 유동해석을 진행하였다. 유동해석의 경향과 신뢰성을 확인하기 위해 코일과 냉각판의 온도 분포를 확인했고, 온도 분포가 가장 큰 코일 표면의 국소적 위치에 대한 무차원 열전달 계수 해석을 진행하고, 냉각 성능을 비교 및 분석하여 새로운 설계 방안을 도출하였다. 정밀한 계산을 통해 해석의 신뢰성을 높이기 위해 KISTI의 Cray CS500 모델 Intel Xeon Phi 7250 1.4 GHz (68 코어 96 GB, 6Ch per CPU)의 슈퍼컴퓨터를 사용하였다.

#### 3.1 온도 분포

Fig. 7은 냉각판 부착 유무와 냉각 채널의 재질에 따른 4가지

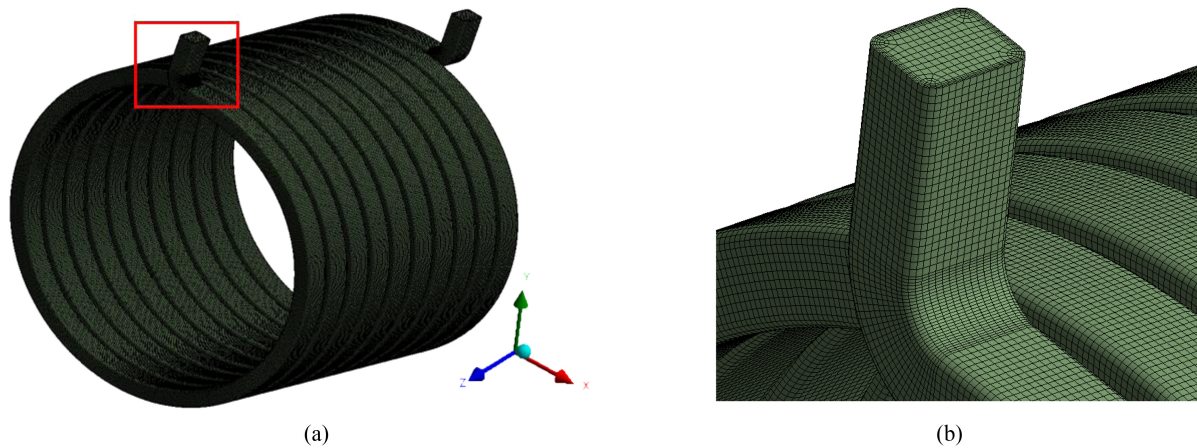


Fig. 6 Generated mesh on colling channel

Table 5 Number of elements in cooling channel and heat sink

	Cases 1 and 2		Case 3		Case 4	
	Cooling channel	Heat sink	Cooling channel	Heat sink	Cooling channel	Heat sink
Elements	2,710,732	None	2,710,732	50,030	2,710,732	74,610
	21,184,432		27,722,244		25,967,746	
Method	Hexa					

Cases의 전기차 모터 코일 표면 온도 분포를 나타낸 그림이다. Figs. 7(a)부터 7(d) 모두 냉각 채널의 입구와 가까운 곳에서 최저 온도가 나타났고, 냉각 채널의 출구와 가까운 곳에서 최고 온도가 나타났다. Figs. 7(a)는 냉각판을 부착하지 않고, 알루미늄 재질의 냉각 채널을 적용하였을 때 온도 분포이며 최저 온도 119.6°C, 최고 온도 135.6°C, 온도 편차 16°C, 평균 온도 130.1°C로 나타났고, 7(b)는 냉각판을 부착하지 않고, 메탈 하이브리드 재질 냉각 채널을 적용하였을 때의 온도 분포이며, 최저 온도 114.5°C, 최고 온도 129.7°C, 온도 편차 15.3°C, 평균 온도 124.4°C로 나타났다. Figs. 7(c)는 메탈 하이브리드 소재의 냉각판을 4개 부착하고, 알루미늄 재질의 냉각판을 적용하였을 때 온도 분포이며, 최저 온도 115.0°C, 최고 온도 134.3°C, 온도 편차 19.3°C, 평균 온도 127.8°C, 7(d)는 메탈 하이브리드 소재의 냉각판을 6개 부착하고, 알루미늄 재질 냉각판을 적용하였을 때 온도 분포이며 최저 온도 114.8°C, 최고 온도 132.3°C, 온도 편차 17.8°C, 평균 온도 126.4°C로 나타났다. Fig. 8은 Cases 3과 4에 적용된 냉각판의 표면 온도 분포이다. Figs. 8(a)에서는 최저 온도 81.18°C, 최고 온도 105.6°C, 온도 편차 24.4°C, 평균 온도 96.6°C로 나타났고, 8(b)에서는 최저 온도 80.8°C, 최고 온도 105.7°C, 온도 편차 24.9°C, 평균 온도 96.4°C로 나타났다.

코일의 최고 온도와 평균 온도가 가장 높아 냉각 성능이 가장 좋지 않은 Cases 1을 기준으로 2의 최고 온도가 4.35% (5.9°C), 평균 온도가 4.38% (5.7°C) 낮게 나타났고, 3의 최고 온도가 0.95% (1.3°C), 평균 온도가 1.76% (2.3°C) 낮게 나타났으며, 4의 최고 온도가 2.43% (3.3°C), 평균 온도가 2.84% (3.7°C) 낮게

나타났다. Cases 3과 4에 부착된 냉각판은 온도 차이가 최고 온도 0.09% (0.1°C) 평균 온도 0.2% (0.2°C)로 거의 차이가 나지 않았다. 메탈 하이브리드 냉각판이 부착된 Cases 3과 4의 경우 1에 비해 최고 온도의 변화보다 평균 온도의 변화가 더 큰 것으로 보아 국부적으로 고온 발생을 제어하는 효과가 있다는 것을 알 수 있었다. Case 2의 최고 온도, 평균 온도, 온도 편차가 모두 가장 낮게 나타난 것으로 보아 냉각 성능이 가장 우수한 설계 형태라고 판단된다.

Figs. 9는 7에 나타나 있는 4가지 Cases의 코일에서 냉각 성능이 가장 취약하고, 온도 편차가 가장 큰 코일 표면의 그림이다. 냉각판 및 냉각 채널 재질에 따른 4가지 Cases에 대해 동일한 위치의 코일 표면에서 온도 편차가 뚜렷히 다양한 온도 변화가 존재하는 대각선 방향으로 일정하게 10등분하는 점을 찍어 코일 표면 위 11개 지점을 한눈에 파악할 수 있게 하였다. 각 지점별 온도 분포를 확인하였고 국소적 위치에서 무차원 기준길이 (R<sup>+</sup>)를 식(1)을 통해 계산하였다.

$$R^+ = \frac{R}{L} \tag{1}$$

여기서 R은 코일 표면에 표시된 점 위의 국소적 위치, L은 코일 위 양 끝점 사이의 길이이다. 각각의 Case에서 코일의 온도가 가장 낮은 부분(R<sup>+</sup>=0), 온도가 가장 높은 부분(R<sup>+</sup>=1)을 무차원으로 나타냈다.

Table 6은 4가지 Cases에서 ΔT와 T<sub>max</sub>를 수치적으로 계산하여 정리한 표다. 여기서 ΔT는 코일 표면에서 온도 편차가 가장 큰

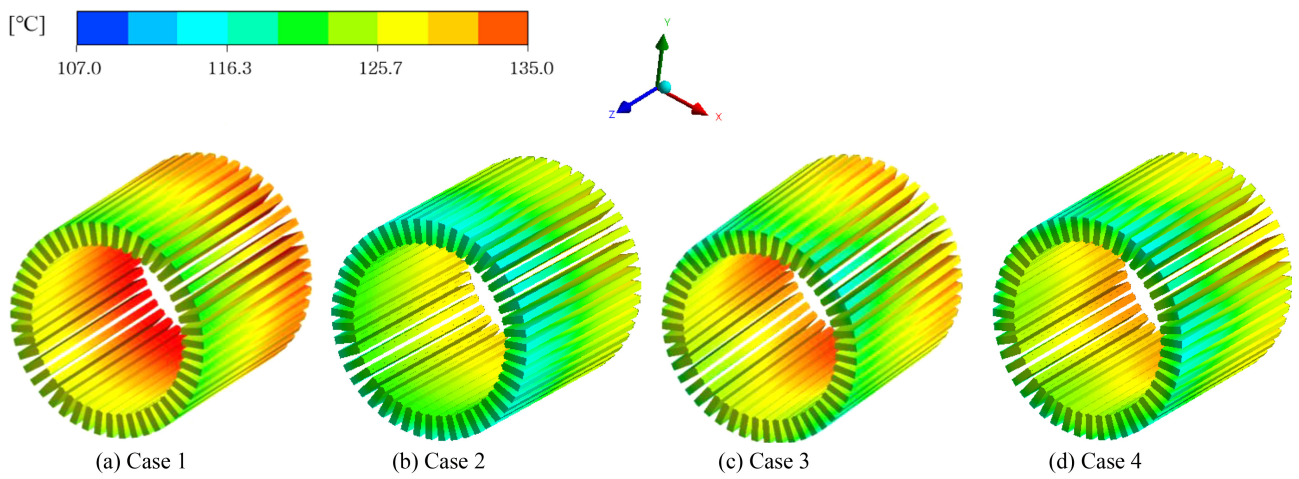


Fig. 7 Temperature contours at four different cases of coil surface

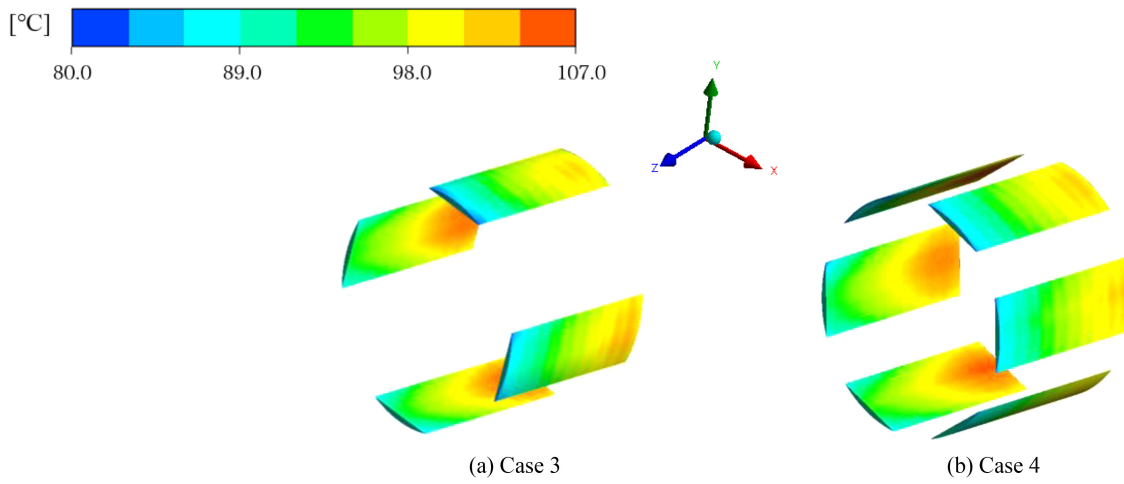


Fig. 8 Temperature contours at case 3 and case 4 of heat sink surface

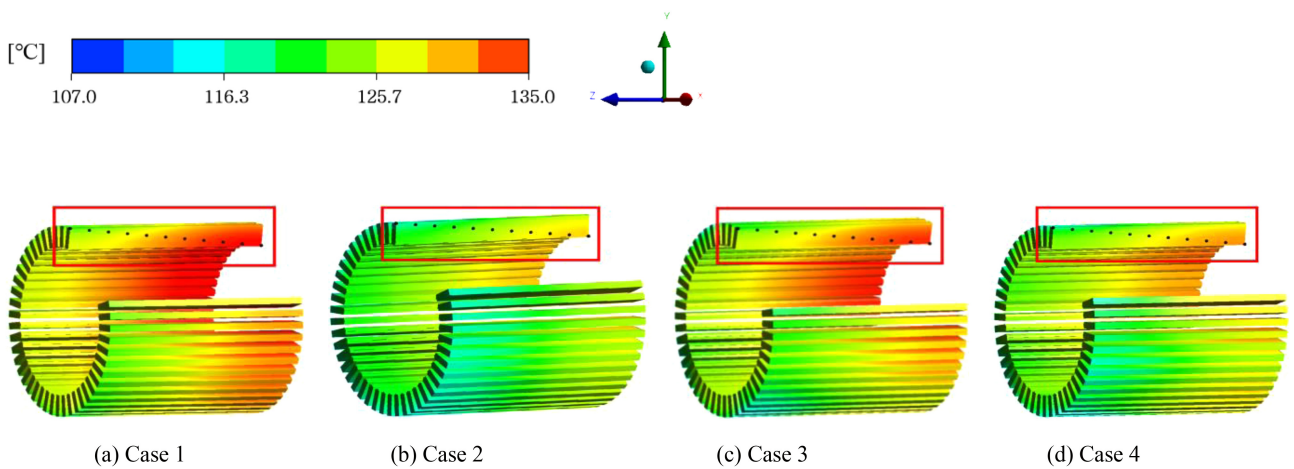


Fig. 9 Temperature contours of diagonal position ( $R^+$ ) on the coil surface with maximum temperature deviation at four different cases of coil surface

Table 6 Numerical data of temperature difference and maximum temperature for horizontal position (R) on the coil surface

Type	Case 1		Case 2		Case 3		Case 4	
Cooling channel	Aluminum		Metal hybrid material		Aluminum		Aluminum	
Heat sink	None		None		4EA		6EA	
$R^+$	$T_{max}$ [°C]	$\Delta T$ [°C]	$T_{max}$ [°C]	$\Delta T$ [°C]	$T_{max}$ [°C]	$\Delta T$ [°C]	$T_{max}$ [°C]	$\Delta T$ [°C]
0	121.4	56.4	117.0	52.0	120.9	55.9	119.0	54.0
0.1	123.5	59.5	119.7	54.7	123.9	58.9	121.9	56.3
0.2	126.5	61.5	120.6	55.6	125.9	60.9	123.8	58.8
0.3	127.6	62.6	122.5	57.5	127.1	62.1	125.2	60.2
0.4	129.6	64.6	123.6	58.6	128.1	63.1	126.2	61.2
0.5	131.6	66.6	125.8	60.8	130.2	65.2	128.2	63.2
0.6	132.5	67.5	127.6	62.6	132.0	67.0	129.8	64.8
0.7	134.4	69.4	129.1	64.1	133.9	68.9	131.8	66.8
0.8	135.4	70.4	130.0	65.0	134.8	69.8	132.8	68.8
0.9	135.4	70.4	130.2	68.2	134.8	69.8	132.8	68.8
1.0	135.4	70.4	130.2	68.2	134.8	69.8	132.8	68.8

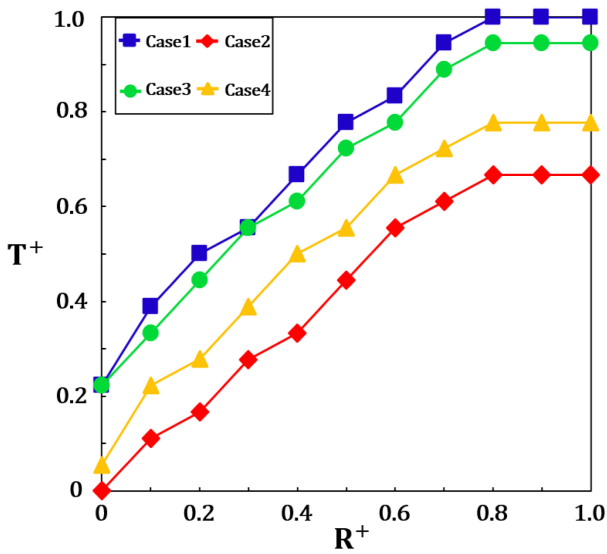


Fig. 10 Dimensionless temperature of coil surface vs. dimensionless local positions of coil surface at four different cases of coil

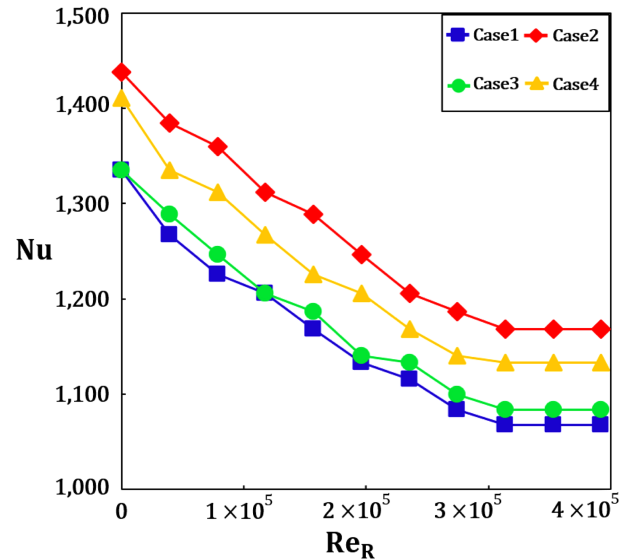


Fig. 11 Nusselt number vs. Reynold number ( $Re_R$ ) at four different cases of coil

부분을 대각선 방향으로 10등분한 국소적 위치의 무차원 기준 길이( $R^+$ )에서 코일 표면의 온도( $T_s$ )와 자유 흐름상태의 유체 온도( $T_\infty$ )차이고,  $T_{max}$ 는 온도 분포가 다양한 코일의 대각선 방향에 냉각이 가장 취약한 부분을 찾기 위하여 코일의 두께와 상관없이 무차원 기준 길이( $R^+$ )에서 나타난 가장 높은 온도이다.  $T_{max}$ 는 4가지 Cases 모두 냉각 채널의 출구와 가장 가까운 곳 ( $R^+ = 1$ )에서 나타났고, Case 1에서의  $T_{max}$ 가 가장 높았다.

Fig. 10은 코일 표면에서 온도 분포가 큰 대각선 방향의 무차원 기준길이( $R^+$ )에서 코일 표면의 온도를 한눈에 파악할 수 있도록 식(2)를 통해 4가지 Cases에서 코일 표면의 최대 온도를

$T^+ = 1$ , 최소 온도를  $T^+ = 0$ 으로 무차원화하여 코일 표면의 국소적 위치( $R^+$ )에서의 온도 차이를 하나의 그래프로 비교한 것이다.

$$T^+ = \frac{T_s - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \tag{2}$$

여기서  $T_{max}$ 는 전체 Cases에서 코일의 최대 온도를 나타내고,  $T_{min}$ 은 전체 Cases에서 코일의 최소 온도,  $T_s$ 는 국소적 위치( $R^+$ )에서 코일의 표면 온도를 나타낸다. 4가지 Cases에서 냉각 성능이 취약하고, 온도 편차가 큰 코일 표면의 국소적 위치( $R^+$ )에 따른 냉각 성능을 정량적으로 비교하기 위해 열전달 계수를 계산

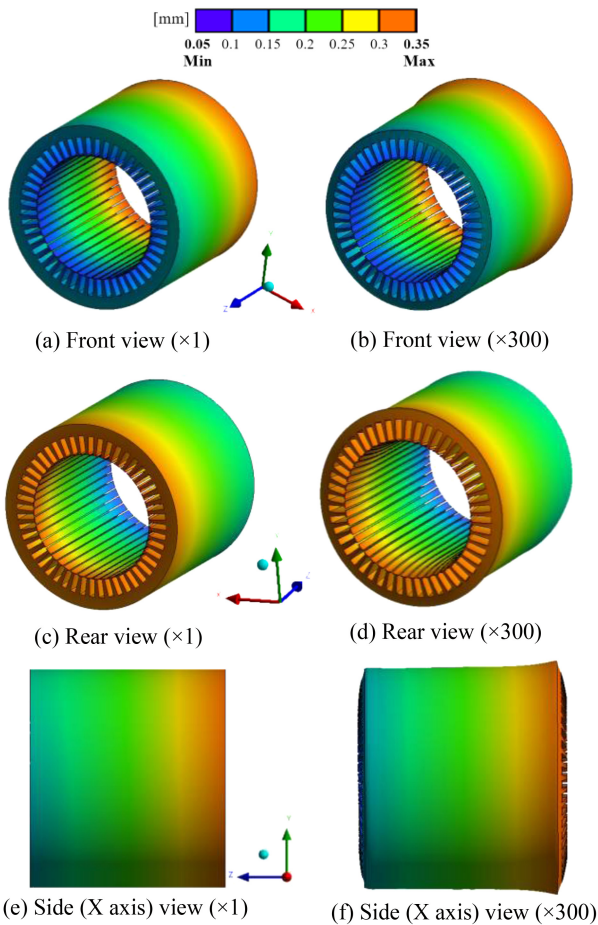


Fig. 12 Thermal deformation contour of stator at case 2

하고, Nusselt 수로 무차원화하여 냉각 성능을 비교하였다. Nusselt 수는 대류 열전달에 대한 유체 내 전도 열전달의 상대적인 비를 나타내는 열전달 계수 무차원 파라미터이다.

Fig. 11은 4가지 Cases 코일의 국소적 위치인  $R^+$ 에 따라 Nusselt 수와 Reynold 수에 대한 냉각 성능 비교를 한눈에 나타낸 그래프이다. 4가지 Cases의 성능을 수치적으로 비교해보면 코일의 온도가 가장 낮은 부분( $R^+=0$ )에서의 냉각 성능은 Case 1에 비해 Cases 2가 0%, 3이 5.4%, 4가 7.1% 높게 나타났다. 코일의 온도가 가장 높은 부분( $R^+=1$ )에서는 Case 1에 비해 Cases 2가 1.5%, 3이 6.1%, 4가 9.4% 높게 나타났다.

3.2 FSI (Fluid-Structure Interaction) 열변형 해석

ANSYS FLUENT V20.2로 해석하여 얻은 Data를 ANSYS MECHANICAL V20.2와 연동시켜 FSI기법을 활용하여 열변형 해석을 진행하였다. Fig. 12는 냉각 성능이 가장 좋은 것으로 판단되는 Case 2의 고정자의 열변형을 정면(냉각 채널의 입구 쪽), 후면(냉각 채널의 출구쪽), 측면에서 본 모습을 그림으로 나타낸 것이다. Figs. 12(a), 12(c), 12(e)는 고정자의 실제 열변형을 나타낸 것이고, 12(b), 12(d), 12(f)는 열변형 정도를 한눈에 파악하기 위하여 열변형을 300배로 증가시킨 그림이다. 고정자의 최

대 열변형은 냉각 채널의 출구와 가까운 쪽인 129°C에서 0.33 mm 발생하였고, 최소 열변형은 냉각 채널의 입구와 가까운 쪽인 81°C에서 0.051 mm 발생하였다. 고정자의 경우 온도가 높아지면 열변형으로 인해 전류 불평등, 자속 밀도 포화, 진동 및 소음과 같은 현상이 나타나 모터의 동작에 악영향을 미치게 된다.<sup>12</sup> 고정자를 포함한 모터 내부 시스템은 온도가 높아지면 온도의 불균일 분포로 발생한 열응력으로 인해 열변형이 일어나고, 가열 속도가 빠를수록 변형이 커지게 된다. 이를 줄이기 위해 모터의 냉각 성능을 향상시키고 균일한 온도 분포를 형성하는 것이 중요하다.

4. 결론

본 연구는 냉각판 부착 유무와 냉각 채널의 재질에 따른 4가지 설계 형태(냉각판을 부착하지 않고, 알루미늄 재질의 냉각 채널을 적용한 Case 1, 냉각판을 부착하지 않고 메탈 하이브리드 재질 냉각 채널을 적용한 Case 2, 냉각판을 4개 부착하고 알루미늄 재질의 냉각판을 적용한 Case 3, 냉각판을 6개 부착하고 알루미늄 재질 냉각판을 적용한 Case 4)로 분류하여 온도 분포를 수치적으로 비교분석하고, 그에 대한 정량적인 냉각 성능을 파악하였다. 코일의 냉각이 우수한 부분과 취약한 부분의 온도 편차가 가장 큰 위치인 대각선 방향을 10등분하는 점을 설정하여 코일 표면 위 11개 지점을 한눈에 파악할 수 있게 하였고, 국소적 위치에서 무차원 기준길이( $R^+$ )를 계산하였다. 이후 무차원 기준 길이를 Reynold 수로 나타내고, 국소적 위치에 따라 나타난 코일 표면 온도를 기반으로 냉각 성능을 나타내는 열전달 계수를 계산하고 Nusselt 수로 무차원화하여 Nusselt 수와 Reynold 수에 대한 냉각 성능을 비교하였다. 이에 따른 결과를 아래에 정리하였다.

(1) 냉각판 부착 유무와 냉각판의 개수, 냉각 채널의 재질(알루미늄, 메탈 하이브리드 소재)에 따른 4가지 Cases에서 코일 표면에 대한 평균 냉각 성능을 알아보기 위해 온도 분포가 가장 높은 코일의 대각선 방향을 무차원 기준 길이( $R^+$ )로 설정하고, 무차원 기준 길이에 냉각 성능이 우수한 지점( $R^+=0$ )과 냉각 성능이 낮은 지점( $R^+=1$ )의 위치에 대한 Nusselt 수와 Reynold 수로 나타낸 통해 비교해본 결과 Cases 1에 비해 2가 7.7-9.4%, 3이 0-1.14%, 4가 5.6-6.1% 높게 나타났다.

(2) 4가지 Cases 모두 코일 표면의 최고 온도는 코일과 냉각 채널의 출구가 가장 가까운 부분( $R^+=1$ )에서 나타났으며 Cases 1이 135°C, 2가 129°C, 3이 134°C, 4가 131°C로 Case 1에 비해 Cases 2부터 4가 각각 4.4, 0.7, 3.0% 낮게 나타났다. 온도 편차는 Cases 1이 14°C, 2가 12°C, 3이 13°C, 4가 13°C로 Case 1에 비해 Cases 2부터 4가 각각 14.3, 7.1, 7.1% 낮게 나타났다.

(3) 코일의 온도가 상승함에 따라 코일을 포함한 주변 부품들에 열변형이 일어나게 되는데 고정자의 경우 최대 열변형은 129°C에서 0.33 mm 발생했고, 최소 열변형은 81°C에서 0.051 mm

발생하였다. 고정자의 열변형은 모터의 동작에 악영향을 미치므로 열변형을 최소화하기 위해 냉각 성능을 향상시키는 것이 중요하다.

(4) 결과 내용을 분석한 최종적인 연구 결과는 Case 2의 설계 형태가 코일의 최고 온도와 온도 편차가 가장 낮고, 냉각 성능이 가장 우수하였다. Cases 3의 최고 온도는 1에 비해 아주 미세하게 낮아 냉각 성능에 큰 효과가 없었다. Cases 4는 3보다 좋은 냉각 성능을 보여주어 냉각판의 개수가 냉각 성능에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

(5) 냉각판의 개수가 적을 경우 최고 온도의 변화는 미미하지만 최저 온도와 평균 온도가 낮아진 것을 보아 국부적으로 고온 발생을 제어하는 효과를 지니는 것을 알 수 있었고, 냉각판의 개수가 많을 경우 최고 온도와 평균 온도 모두 감소한 것을 확인하였고, 우수한 열전도 효과를 얻을 수 있었다. 냉각 채널 재질을 알루미늄이 아닌 메탈 하이브리드 소재를 적용함으로써 최고 온도, 평균 온도, 온도 편차가 모두 감소한 것을 확인하였고, 균일하고 우수한 열전도 효과를 얻을 수 있었다.

(6) 상대적으로 높은 온도를 가지는 냉각 채널의 출구에 가까운 부분( $R^+ = 1$ )에 냉각판을 활용하여 국부적으로 냉각시키면 균일한 온도 분포를 형성할 수 있기 때문에 냉각판의 다양한 활용이 가능하다고 판단된다.

(7) 본 연구를 기반으로 추후 연구에서는 냉각판의 위치 및 형태를 변수로 적용한 냉각 성능 연구를 통해 본 연구에서 확인한 냉각이 취약한 위치를 보완하고 냉각 성능을 향상시켜 전기차 모터의 효율을 향상시킬 것이다.

**REFERENCES**

1. Lee, J. H., Ha, M. J., Seo, K., and Park, Y. J., "Thermal Analysis of Electric Vehicle Motor Using CFD," Proc. of the KSME Fall Annual Conference, pp. 2711-2714, 2010.
2. Lee, D. R., "Investigation of Cooling Performance of the Driving Motor Utilizing Heat Pipe," Journal of the Korea Society for Power System Engineering, Vol. 10, No. 4, pp. 11-16, 2006.
3. Seo, J. W. and Cho, C. D., "Study on the Change of Cooling Performance of Motor Housing for Automobile," Proc. of the KSME Annual Conference, pp. 2170-2174, 2012.
4. Kim, J. S., Moon, J. W., Kwak, T. H., and Kang, T. G., "Numerical Investigation on an Oil Cooling System in the Motor for a Hybrid Vehicle," Journal of Computational Fluids Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 86-94, 2017.
5. Kang, Y. and Kim, D. K., "Comparative Study of Cooling Methods of Motor for Electric Vehicles," Proc. of the KSME Annual Conference, p. 1646, 2019.
6. Choi, H. J., "A Study on the Design Factor Analysis of Water Jacket for Improving the Cooling Performance of Motor," M.S. Thesis, Konkuk University, 2021.

7. Yoo, Y. B., "The Thermal Characteristics of 210 kW IPMSM during the Water Cooling Jacket based on Finite Element Method," Proc. of the Spring and Fall Conference on the Korean Society of Mechanical Engineers, pp.117-118, 2014.
8. Park, C. D., "A Numerical Study on Heat Transfer and Flow Characteristics of a Finned Downhole Coaxial Heat Exchanger," Proc. of the Spring and Fall Conference on the Korean Society of Mechanical Engineers, pp.79-86, 2017.
9. Lee, N. K., "Electric Motor Rotor Design to Improve Cooling Effect," Proc. of the Spring Conference on the Korean Society of Automotive Engineers, pp.1157-1158, 2017.
10. Beak, S. K., "Thermal Analysis of a Battery Cooling System with Aluminum Cooling Plates for Hybrid Electric Vehicles and Electric Vehicles," Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 22, No. 3, pp. 60- 67, 2014.
11. Chae, D. S., "Experimental Investigations on Effect of Conventional and Split Cooling Type on Engine Cooling Performance," Proc. of the Spring and Fall Conference on the Korean Society of Automotive Engineers, pp.124-130, 2002.
12. Kim, J. H., "A Study of the Stator Design for High Efficiency in the Induction Motor," M.S. Thesis, Hanyang University, 2021.



**Seong-Hwan Bang**  
 B.S. candidate in the School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu. His research interest is electric vehicle and future alternative energy.  
 E-mail: tjdgkhs7413@cu.ac.kr



**Dong-Ryul Lee**  
 Professor in the School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu. His research interest is heat transfer, fluid engineering, and electric vehicle.  
 E-mail: dlee@cu.ac.kr