

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2024.48.3.167>ISSN 1226-4881(Print)
2288-5234(Online)

전기자동차용 50 kW 변압기의 설계를 위한 전자기-열 수치해석 파라미터 연구

김혁규* · 박성현** · 설현수*** · 유준열*** · 박준성*** · 김범석***

* 서울과학기술대학교 기계공학과, ** 서울과학기술대학교 기계자동차공학과, *** 한국자동차연구원

Parametric Study on the Design of 50 kW-Transformer for Electric Vehicles Considering Electromagnetic-Thermal Characteristics

Hyeukgyu Kim*, Sung Hyun Park**, Hyun-Soo Seol***,
Jun-Yeol Ryu***, Junsung Park*** and Beom Seok Kim**†

* Dept. of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology,

** Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology,

*** Korea Automotive Technology Research

(Received October 18, 2023 ; Revised December 14, 2023 ; Accepted December 14, 2023)

Key Words: Electric Vehicle(전기자동차), Electromagnetic Loss(전자기 손실), Multi-Physics Numerical Analysis(다중물리 전산해석), Thermal Management(열관리), Transformer(변압기)

초록: 전력변환기의 구성 부품인 변압기는 전기자동차를 위한 전력변환 회로의 핵심 소자이다. 전기자동차용 변압기는 회로 내 요구되는 인덕턴스와 열적 안정성을 유지하면서 부피를 최소화하여야 한다. 이 연구에서는 전산해석을 통해 50 kW 변압기의 부피 절감에 따른 적정 냉각 설계를 진행하며 변압기의 전자기-열적 특성을 평가해 보고자 하였다. 전자기적 손실에 따른 국소 발열현상을 살펴보고, 몰딩 하우스 및 냉각 수로 설치를 통한 변압기의 냉각시스템 설계 변수를 평가하였다. 전자기-열 다중물리해석 기반 열설계의 신뢰성 평가를 위해 실험적으로 도출된 변압기 성능과 비교하여 해석의 정합성을 평가하였다. 열설계 개선을 통해 변압기 부피를 36.2%까지 절감하며 열적 안정성을 갖춘 냉각설계 방안을 도출하였다. 이 연구의 결과는 향후 변압기의 성능 개선 및 냉각설계의 가이드라인으로 활용될 수 있을 것이다.

Abstract: The transformer is a crucial component in the power conversion circuit of electric vehicles. Given the spatial constraints within electric vehicles, the transformer design must be compact while maintaining the required inductance and thermal stability. In this study, we explore volume reduction strategies for a 50 kW transformer while ensuring an optimal cooling design using an electromagnetic-thermal numerical analysis. The transformer cooling mechanism featured a molding housing that encapsulated the transformer, complemented by convective cooling channels. Our numerical methodologies were validated with experimental results. Through this approach, we achieved a 36.2% volume reduction in the transformer within the desired operating range of inductance. Moreover, our findings revealed that, despite a higher electromagnetic loss, an aluminum housing significantly outperformed bakelite housing in heat dissipation. Based on this investigation, we suggest design guidelines for transformers intended for future electric vehicles.

- 기호설명 -

알파벳

 A : 자기 벡터 포텐셜 B : 자속밀도 B_{max} : 최대 자기장 D : 수력 직경 D_{Coil} : 리츠와이어(Litz wire)의 직경 E : 전계의 세기 E_p : 최대 전기장의 놴(norm) f : 표면거칠기 h_{forced} : 냉각채널 벽의 평균 대류열전달 계수† Corresponding Author, kimmbs@seoultech.ac.kr

© 2024 The Korean Society of Mechanical Engineers

h_{nat}	: 자연대류 벽면의 대류열전달 계수
J_s	: 전류 밀도
K_c	: 와전류(eddy current) 손실 계수
K_e	: 추가 손실 계수
K_h	: 히스테리시스 손실 계수
k_l	: 냉각수 열전도도
k_s	: 고체의 열전도도
L_{Yoke}	: 요크 코어(yoke core)의 가로길이
N	: 코일의 턴 수
Nu	: 누셀 수
P	: 전자기장해석을 통해 구한 국소 열원
P_c	: 동손
P_i	: 철손
Pr	: 프란틀 수
Re	: 레이놀즈 수
T	: 온도
V	: 전압
W_{Yoke}	: 요크 코어(yoke core)의 세로 길이
x	: 스타인메츠(Steinmetz) 식 계수

그리스 문자

μ_0	: 진공투자율
μ_r	: 비투자율
σ	: 도전율
ω	: 입력 주파수

1. 서 론

친환경 자동차의 수요가 세계적으로 증가함에 따라 수소전기차/전기차에 대한 관심이 크게 증대되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 특히 수소전기차는 빠른 충전시간과 높은 주행거리라는 장점들로 인해 차세대 교통수단으로 주목받고 있으나, 연료전지의 낮은 내구성은 문제로 지적받고 있다.⁽⁴⁻⁶⁾ 이러한 문제의 해결을 위한 방안으로써, 수소전기차 내부 전력변환기의 성능 향상 연구를 통해 연료전지 내구성 한계의 극복하려는 노력이 이루어지고 있다.^(4,5) 전력변환기는 자동차 내의 각 부품에 필요한 AC/DC 전력을 원하는 전압크기로 변환시키는 역할을 한다. 전력변환기는 연료전지의 낮은 전압을 승압시키고 연료전지의 리플을 감소시키는 역할을 통해 연료전지 내구성 향상에 기여한다. 이러한 전력변환기 설계에서는 전력 전송 효율이 높아야 한다는 점, 그리고 수소전기차 내부 협소한 공간에 설치되어야 하기에 부피를 최소화할 필요가 있다는 점 등이 설계에 반영되어야 한다.⁽⁷⁾

수소전기자동차 내 전력변환기는 AC-DC 컨버

터와 DC-DC 컨버터 회로가 있다. 그 중, 전력변환기의 전송 효율을 높이기 위해 LLC 회로 토폴로지 기반의 DC-DC 컨버터가 주로 연구되고 있다. LLC 회로는 공진형 탱크를 구성하여 전류를 구형파로 만들어 준다. 이는 OBC의 영전압 스위칭(zero voltage switching)을 가능케 함으로써 전력변환 반도체의 손실을 줄이는 역할을 한다.^(8,9) 이러한 LLC 회로를 구성하는 주요한 요소 중 하나가 바로 변압기이다. 변압기는 LLC 회로 내부에서 갈바닉 절연(galvanic isolation), 전압 크기 변환, 그리고 공진형 탱크에 요구되는 인덕턴스 제공 등의 기능을 한다.^(9,10) 변압기 인덕턴스는 LLC 회로 내부에서 전압이득과 공진주파수 등에 영향을 미치기 때문에 인덕턴스 설계는 변압기설계의 핵심 사항이라 할 수 있다.⁽¹¹⁾

전력변환기 전체의 부피저감을 위해 변압기 또한 컴팩트한 설계가 요구된다. 특히 변압기와 같은 자성부품은 전력변환기에서 가장 큰 부피를 차지하기 때문에 변압기 부피 저감은 전력밀도 향상에 결정적인 영향을 미친다. 변압기의 주요 구성요소인 코일과 코어에서는 구동 환경에 따라 각기 동손(copper loss)과 철손(iron loss)의 형태로 전자기 손실이 발생하며, 이 손실은 결국 열의 형태로 변환되어 부품의 온도 상승을 유발한다.^(12,13) 이에, 변압기 부피 저감 설계 과정에서 야기될 수 있는 전력손실 증가, 냉각면적 감소를 감안하여 소형화에 따른 열적 성능 유지를 위한 열관리, 즉 냉각방안 도출이 필수적이라 할 수 있다.^(6,14,15)

변압기의 냉각을 위해서는 발열부와 방열부 간의 열적 접촉을 개선하기 위한 몰딩, 그리고 수냉식 냉각기 적용을 결합한 방식이 주로 사용되어 왔다.^(16,17) 하지만 냉각을 위해 열전도성 금속 몰딩 하우징을 사용했을 때 몰딩 하우징에 오히려 철손이 유발되어 발열이 초래될 수 있음이 보고된 바 있다.^(12,18,19) 이러한 현상의 복잡성은 변압기 설계 시 전자기적인 발열요소의 산정 및 이에 따른 온도예측이 중요하다는 점을 시사한다.⁽²⁰⁾

다수의 선행연구 및 제품개발 과정에서 변압기 성능개선이 이루어져 왔으나, 부피저감 및 적정 열관리에 대해서는 아직 다루지지 않은 부분들이 많이 존재한다. 본 연구에서는 수소전기차에서 사용되는 전력변환기인 연료전지용 DC-DC 컨버터(fuel cell DC-DC converter)의 LLC 공진회로에 사용될 변압기의 열설계를 수행해 보고자 한다. 이 과정에서 전자기-열적 성능을 전산해석을 통해 평가해 보고, 이를 활용하여 변압기 부피를 절감시키

기 위한 열설계 프로세스를 정립해 보고자 한다. 열적 안정성 평가를 위해 변압기 몰딩 하우징의 재질에 따른 전자기-열적 특성 변화를 또한 살펴 보고자 한다. 전자기-열 다중물리해석과 병행하여 실험적 검증을 통해 해석의 신뢰성을 평가하고, 변압기의 열적 안정성을 유지하며 변압기의 부피를 효과적으로 줄이기 위한 설계안을 도출해 보도록 한다.

2. 수치 해석 및 검증 방법론

2.1 변압기의 설계 사양

본 연구에서는 LLC 공진회로에 사용될 50kW급 변압기 모델을 개선 대상으로 하였다. 변압기의 1차측 코일과 2차측 코일의 턴 수 비는 1대 1이며, 180 A_{rms}의 전류크기와 100 kHz의 주파수로 동작하도록 고안된 모델이다. LLC 회로의 공진주파수 설정 및 전류 리플 감소를 위해 200 ~ 227 μH 자화 인덕턴스(magnetizing inductance)와 7.50 ~ 8.50 μH 누설 인덕턴스(leakage inductance)를 변압기의 성능 요구사항으로 설정하였다. 한편, 변압기의 부피 최소화 과정에서 코어의 자성체 특성을 유지하기 위해 허용온도 100°C 이하에서 최대온도가 관리될 수 있도록 열적 운전사항을 설정하였다.⁽²¹⁾

2.2 변압기 및 냉각모델의 형상

Fig. 1은 본 연구에서 다룬 변압기의 형상을 보여주고 있다. 변압기 코어는 4분할된 2개의 요크 코어(yoke core)와 4분할된 2개의 레그 코어(leg core)를 접착한 형태이다. 요크 코어는 직육면체 형태로 가로, 세로는 각각 L_{Yoke} , W_{Yoke} 이다. 레그 코어는 원기둥 형태로 제작되었고 각 코어 사이에는 접착제가 약 0.09 mm 두께로 도포되어 있다고 가정하였다. 코일은 각 레그 코어의 상부에 1차측 코일, 하부에 2차측 코일이 1대 1의 비율로 N 의 회전수로 감겨져 있다. AC 동선의 저감을 위하여 코일

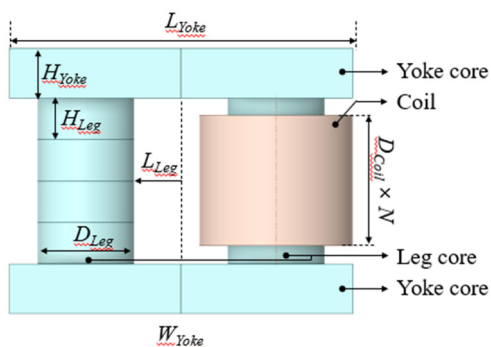


Fig. 1 Geometry of the transformer examined in this study

에는 리츠와이어(Litz wire)가 사용되며, 각 리츠와이어의 직경은 D_{Coil} 이다. 우리는 전자기장 해석을 이용한 선형 해석을 통해 인덕턴스 성능에 부합하는 변압기 설계안을 도출해 보고자 하였다. 본 연구에 사용된 기초 모델(case 1), 체적 감소를 위해 형상 변경된 모델(case 2)의 변압기 제원을 Table 1, 2에 나타내었다. 코어의 부피를 최소화하는 모델이 도출되었으며, 인덕턴스 값이 설계 사양에 부합하도록 하기 위하여 코일의 회전수(N)이 12에서 14로 증가되었다.

변압기의 냉각 모식도는 Fig. 2에 나타낸 바와 같다. 변압기는 몰딩 하우징 내부에 놓여 몰딩액(열전도도 3 W/m·K)으로 덮혀 있다. 부피 저감된 모델에 기초하여, 몰딩 하우징의 재료로는 부도체인 bakelite와 금속성 aluminum이 적용된 경우로 구분하여, 하우징 재료에 따른 전자기-열적 성능을 비교해 보고자 하였다. 몰딩 하우징 하부에는 알루미늄(aluminum) 재질의 냉각 수로를 설치하여 방열이 되도록 하였다. 냉각 수로는 직사각형 단면

Table 1 Materials of transformer

Component	Material
Core	Ferrite
Coil	Litz wire
Frame	Aluminum
Molding housing	Bakelite, aluminum

Table 2 Specifications of case 1 and case 2

	Case 1	Case 2
L_{Yoke} (mm)	146	124
W_{Yoke} (mm)	60.0	51.0
D_{Coil} (mm)	4.60	3.70
N	12	14

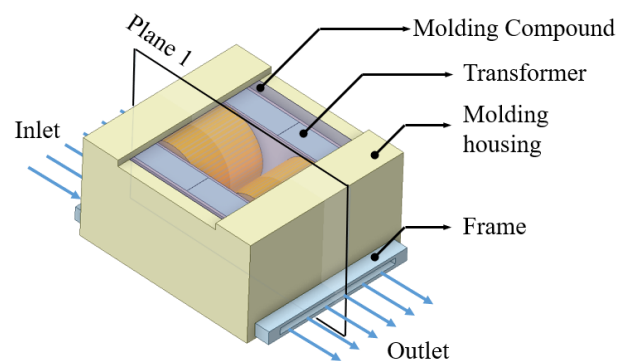


Fig. 2 Schematic diagram of cooling system of the transformer

의 직선 유로 형태로써, 유로의 높이와 폭은 각각 5 mm와 100 mm이다. 몰딩 하우징과 냉각 수로 사이의 접촉저항을 감소시키기 위해 0.1 mm 두께의 열전도성 그리스(2 W/m·K)를 도포하였다.

2.3 변압기 비교모델 선정

전산해석을 통한 전자기-열특성 평가 과정을 Fig. 3에 나타내었다. 전력변환기 내부에서 변압기가 성능을 보여줄 수 있는지 검증은 위한 기초 모델(case 1) 설계를 우선 수행하였다. 전산해석의 신뢰성 검증을 위해, LCR 미터를 통해 측정된 변압기 기초 모델의 인덕턴스 값을 ANSYS Maxwell 2021 R2를 활용하여 도출된 인덕턴스 해석결과와 비교하였다. 뒤 이은 열해석에는 ANSYS Fluent 2021 R2 프로그램을 활용하였으며, 전자기장 해석에서 도출된 국소 손실 값이 열해석의 발열 경계조건으로 반영하도록 하였다. 열해석은 격자 독립성 평가를 통해 최소 약 500만 개의 노드(node)가 사용되었다. IR 카메라를 활용한 기초 모델의 발열 측정 결과를 열해석 온도 결과와 비교하여 해석의 정합성을 평가하였다. 전자기장 해석을 통해 회로

에서 요구사항을 충족하는 조건 하에서, 변압기의 형상변경을 통해 코어의 부피가 감소된 모델(case 2)을 도출하도록 하였다. 그리고 베이클라이트(bakelite) 하우징이 사용된 case 2 모델과 대비하여, 알루미늄 하우징이 사용된 모델을 case 3 모델로 선정하여 각기 전자기-열 특성을 비교 평가하였다. 베이클라이트와 알루미늄의 전자기-열 물성은 Table 3에 나타낸 바와 같다.

본 해석 모델의 정합성 검증 결과로써 실험과 해석에서 측정된 case 1 모델의 인덕턴스와 최대온도 값을 Table 4에 제시하였다. 실험과 해석에서 측정된 자화 인덕턴스는 각 8.50 μ H와 7.50 μ H로 2.50%의 오차를 보였고, 누설 인덕턴스는 각 227 μ H와 211 μ H로 7.05%의 오차를 보였다. 자화 인덕턴스와 누설 인덕턴스 모두 해석에서 실험보다 약간 낮은 값을 보였지만 해석이 실험현상을 잘 묘사함을 보여주었다. 전자기장 해석을 통해 얻은 변압기의 발열량을 바탕으로 열해석을 진행한 결과, 변압기의 최대온도는 모두 코일에서 나타났고, 실험과 해석에서 각 101°C와 102°C를 나타내어 약 0.6 %의 오차를 보였다. 이러한 전자기 및 열특성의 비교 검증을 통해, 본 연구에 사용된 해석모델이 충분히 신뢰할 만하다고 평가할 수 있다.

Table 3 Electromagnetic and thermal properties of bakelite and aluminum for molding housing

	Bakelite	Aluminum
Conductivity (S/m)	1.00×10^{-9}	3.80×10^7
Permeability (H/m)	1.00	1.00021
Thermal conductivity (W/m·K)	0.200	167
Density (kg/m ³)	1,300	2,700
Specific heat (J/kg·K)	920	896

2.4 전산해석 모델링 및 전자기-열 경계조건

Fig. 4는 변압기 기초 모델(case 1)에 적용된 전자기, 열해석의 경계조건을 보여주고 있다. 실험에서

Table 4 Comparison between experimental and simulated results for magnetizing and leakage inductance, and maximum temperature

	Experiment	Simulation
L_m (μ H)	227	211
L_{lk} (μ H)	8.50	7.50
Max temp. (°C)	101	102

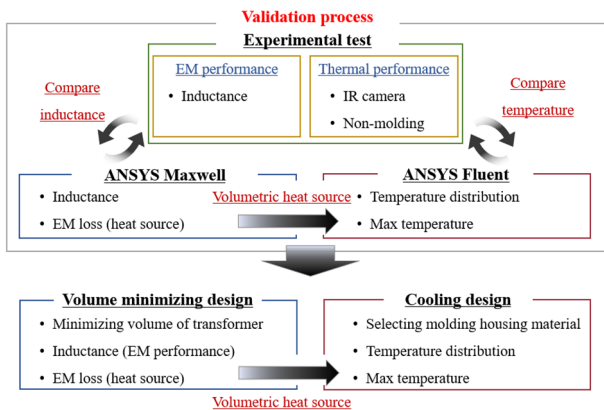


Fig. 3 Flow chart of the electromagnetic and thermal design for the transformer

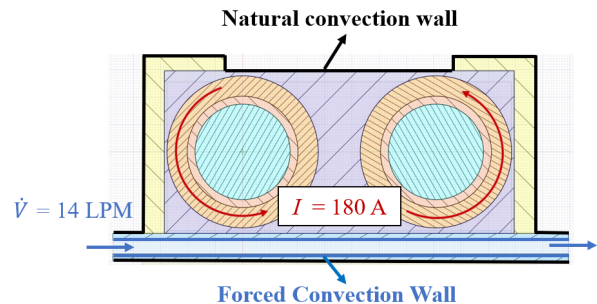


Fig. 4 Cross-sectional view of the highlighted transformer model, illustrating boundary conditions for electromagnetic and thermal analyses

측정된 전류 특성 결과를 바탕으로 각 코일에는 180 A, 100 kHz의 정현파 전류가 동일한 방향으로 흐른다고 가정하였다. 전류 인가로 인해 코일에는 동손으로 인한 발열이 발생되며, 이뿐만 아니라, 코일에 의해 생성된 자기장으로 인하여 코어 및 몰딩 하우징에는 와전류 손실으로 인한 발열이 발생된다. 변압기 구동에 의해 유도되는 전자기 특성은 아래와 같은 맥스웰(Maxwell) 방정식을 기반으로 계산하였다.⁽¹²⁾

$$\nabla \times \left(\frac{B}{\mu_0 \mu_r} \right) + \sigma j \omega A = J_s \quad (1)$$

$$B = \nabla \times A \quad (2)$$

$$E = -j \omega A - \nabla V \quad (3)$$

맥스웰 방정식을 통해 구한 전자기 분포를 바탕으로 코일에서 발생하는 동손 P_c 는 아래 식 (4)를 통해 계산한다.⁽⁹⁾

$$P_c = \frac{\sigma E_p^2}{2} \quad (4)$$

한편, 코어와 몰딩 하우징에 인가되는 철손 P_i 는 아래 식 (5)를 통해 계산된다.⁽⁹⁾

$$P_i = K_h B_{max} \omega^x + K_c (B_{max} \omega)^2 + K_e (B_{max} \omega)^{1.5} \quad (5)$$

변압기 모델에 적용된 냉각 방법으로는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 1) 냉각 수로에 의한 강제대류 냉각 및 2) 몰딩 하우징과 냉각 수로 외부의 자연대류 효과를 고려하였다. 냉각 수로에는 14 LPM의 냉각수(물, 70°C, $Re = 23,200$)가 유입된다 설정하였다. 충분한 체적유량 공급에 따라 냉각수 온도가 변하지 않는다고 가정, 냉각 수로 내부의 대류 열 전달 효과를 아래의 Gnielinski 상관식을 통해 단순화하였다.⁽²²⁾

$$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)/Pr}{1+12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)} \quad (6)$$

(for $3000 < Re < 5 \times 10^6$, $0.5 < Pr < 2000$)

식 (6)을 통해 난류조건에서 내부관 냉각의 열전달 효과를 쉽게 추정해 볼 수 있다. 냉각 수로 내부의 대류열전달 계수는 $h_{forced} = k_f Nu/D$ 의 관계를 통해 도출하였다.⁽²²⁾ 한편, 변압기의 외부 열경계 조건으로는 공기와 접촉하는 면들에 미약한 자연대류를 가정($h_{nat} = 5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, $T_{nat} = 70^\circ\text{C}$)하여 열해석에 반영하였다.

냉각 수로 내부의 유동에 의한 냉각 효과는 Gnielinski 상관식으로 단순화하였기에 변압기 모델에 대한 온도분포 특성은 아래의 에너지보존방정식을 통해 계산하였다.⁽²²⁾

$$\nabla \cdot (k_s \nabla T) = P(x, y, z) \quad (7)$$

모든 변압기 모델에 대해서 최대 온도를 살펴보고자 하였기에 정상상태 조건에서 열해석이 진행되었다.

3. 연구 결과

3.1 전산해석을 통한 변압기 부피 저감설계

변압기 모델에 따른 자화 인덕턴스와 누설 인덕턴스 평가 결과를 Table 5에 나타내었다. 전자기장 해석을 통한 변압기 설계 결과, case 2 모델에서 case 1에 비해 코어의 부피가 감소되었음에도 불구하고 case 1과 2 모두 설계 사양인 $200 \mu\text{H} < L_m < 227 \mu\text{H}$, $7.50 \mu\text{H} < L_{lk} < 8.50 \mu\text{H}$ 을 만족함을 알 수 있다. 다만, 추가적으로 case 2 모델에 알루미늄 몰딩 하우징을 장착한 case 3의 경우, 자화 인덕턴스와 누설 인덕턴스 모두 약간 감소함을 확인할 수 있다. 이는 베이클라이트와 같은 절연체가 아닌 전도성 알루미늄 몰딩 하우징에서 와전류가 발생함에 따라 추가로 발생한 자속이 주자속을 감소시키기 때문에 인덕턴스가 감소된다고 이해할 수 있다.

Fig. 5는 각 해석 모델에서 코어의 부피 변화에 따른 동손, 철손의 변화를 보여주고 있다. 전자기

Table 5 Magnetizing inductance and leakage inductance of case 1, 2, 3

	Case 1	Case 2	Case 3
L_m (μH)	202	204	202
L_{lk} (μH)	7.50	8.50	7.30

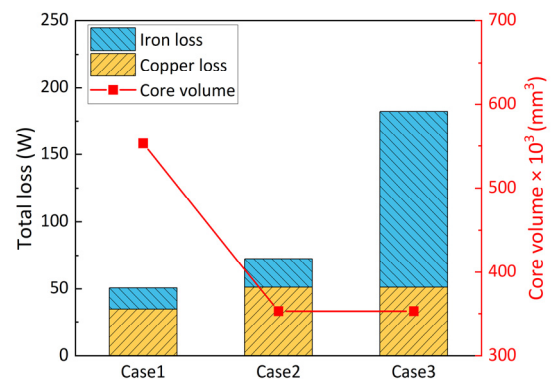


Fig. 5 Iron loss, copper loss and core volume of case 1, case 2 and case 3

적인 성능 사양을 충족시키는 범주 내에서 case 1에 비해 case 2의 부피는 552,755 mm³에서 352,752 mm³로 36.2% 부피가 저감되었다. 하지만 case 1에 비해 case 2의 D_{Coil} 이 4.60 mm에서 3.70 mm로 감소, 그리고 회전수(N)가 12에서 14로 증가함에 따른 길이 증가로 인해 wire의 저항이 증가하여 동손이 34.7 W에서 51.2 W로 33.8% 증가하는 것을 확인할 수 있다. 철손 또한 16 W에서 21.4 W로 33.8%가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 코일의 회전수 증가에 따라 최대 자기장의 세기가 강해지며 발생하는 결과라는 점을 식 (5)를 통해 설명할 수 있다.

알루미늄 몰딩 하우징이 적용된 case 3의 전자기장 해석 결과에서는 총 손실(동손+철손) 값이 182 W로, case 2 대비 151% 만큼 크게 증가하였다. 이러한 손실 증가는 높은 전기전도도(3.8×10^7 S/m)를 갖는 알루미늄 하우징 구조물에 와전류 손실이 유도된 결과로써, 115 W의 철손이 발생되었기 때문이라 살펴볼 수 있다. 열전도성 재료인 알루미늄 몰딩 하우징을 변압기의 냉각을 위해 적용 고려해볼 수 있겠으나, 상당한 와전류 손실로 인해 오히려 추가 열원이 될 수 있음을 확인하였다.

3.2 변압기의 방열특성 분석 및 냉각설계
베이클라이트 몰딩(case 2)과 알루미늄 몰딩(case

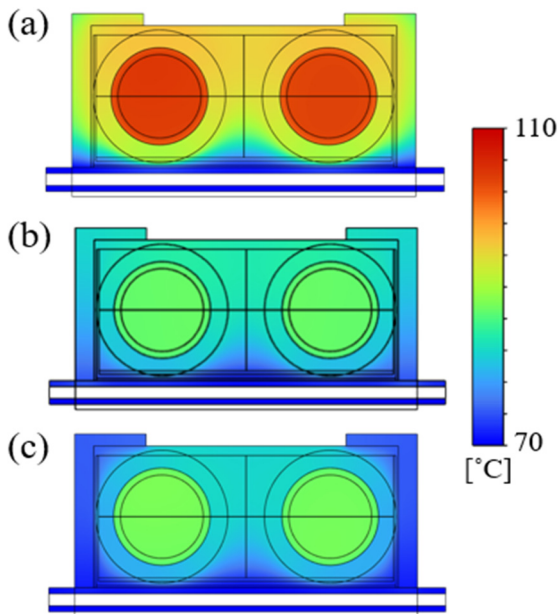


Fig. 6 Temperature distribution on plane 1 for (a) bakelite housing (case 2); (b) aluminum housing considering electromagnetic loss at the housing (case 3); (c) aluminum housing without accounting for the electromagnetic loss at the housing

3) 하우징에 대해서, 전자기적 손실을 반영한 열 해석 결과를 Fig. 6(a)와 6(b)에 각각 나타내었다. 발열에 의한 온도 상승이 가장 크게 보이는 변압기 중앙 단면(plane 1)의 온도 분포를 보여주고 있으며, 두 case에서 공통적으로 발열이 집중되어 있는 코어의 중앙부에서 최대 온도가 관측된다는 것을 확인할 수 있다. 한편, 공간적으로는 냉각 수로에서 가까이 위치할수록 냉각수 입구 온도인 70°C에 가깝게 온도가 유지될 수 있음을 보이며, 멀리 떨어진 상부로 갈수록 높은 온도를 보이는 결과를 보여준다. 몰딩 하우징의 재질에 따른 온도특성을 살펴보면, 베이클라이트의 열전도율(0.2 W/m·K)은 알루미늄의 열전도율(167 W/m·K)에 비해 매우 낮기 때문에, 알루미늄 하우징에서 더 큰 발열이 발생함에도 불구하고 베이클라이트 하우징에 비해 코어 중앙부를 비롯하여 변압기 구조물 전반에 걸쳐 낮은 온도를 띄는 것을 알 수 있다. 한편 Fig. 6(c)는 case 3의 알루미늄 하우징 모델에 대해서, 알루미늄 하우징에 인가되어지는 와전류 손실이 없는 조건을 가정하여 하우징 재료에 따른 순수 냉각 효과가 어떠한 지를 살펴본 결과이다. Fig. 6(b)와 비교하였을 때, Fig. 6(c)의 알루미늄 하우징이 냉각 수로의 방열 효과를 전체 변압기 모델 주변으로 크게 확장시켜 줄 수 있음을 온도 분포 결과를 통해 확인할 수 있다. 알루미늄 하우징에 발열이 존재하지 않는다면, 하우징의 평균온도는 78.8°C에서 72.8°C로 낮아지고 변압기의 평균온도도 87.3°C에서 80.5°C로 낮아지는 결과를 확인할 수 있었다. 이러한 비교를 통해, 부도체 성격을 띠며 열전도도가 높은 재질을 추후 하우징 설계 과정에서 적용할 수 있다면, 냉각 성능 개선이 크게 이루어질 수 있음을 제안해 볼 수 있다.

몰딩 하우징의 재질에 따른 열적 특성 분석을

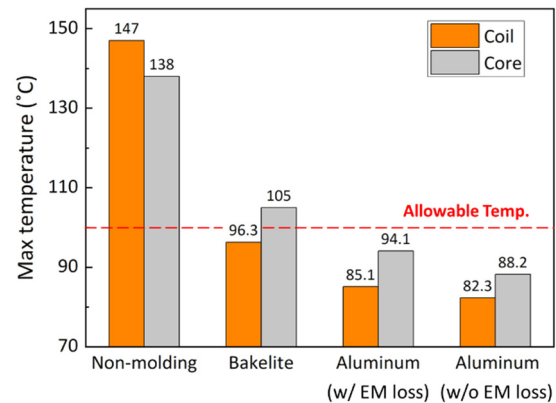


Fig. 7 Maximum temperature at coil and core as varying the molding housing

위해 각 해석 모델에서 관측된 최대 온도 값을 Fig. 7에 나타내었다. 또 다른 비교를 위하여 변압기에 몰딩을 적용하지 않은 경우에 대한 추가적인 해석을 진행하였고, 이 경우 코일과 코어의 최대 온도가 각각 147°C와 138°C로 매우 높게 상승할 수 있음을 확인할 수 있다. 앞서 Fig. 6에 제시한 결과에서 살펴볼 수 있듯이, 몰딩을 적용한 경우에는 베이클라이트 몰딩 하우징(case 2)이 고려된 모델에서 다른 모델 대비 최대 온도가 높다는 점을 확인할 수 있다. 베이클라이트 몰딩 하우징의 경우 알루미늄과 달리 몰딩 하우징에서 발열이 발생하지 않음에도 불구하고 코어의 최대 온도는 허용온도인 100°C를 초과함을 알 수 있다. 또한 앞서 살펴본 결과와 같이, 알루미늄 몰딩 하우징의 경우 베이클라이트 몰딩 하우징보다 115 W 가량 큰 손실 증가가 있음에도 불구하고, 코일과 코어의 최대온도가 각 85.1°C와 94.1°C로 감소되어 허용온도 이하를 유지할 수 있음을 보였다. 나아가서 알루미늄과 같은 열전도성 몰딩 하우징에서 전자기적 손실이 발생하지 않았다고 가정할 경우, 최대온도는 코일과 코어가 각각 82.3°C와 88.2°C로 case 3 대비 5.9°C 정도의 추가적인 최대온도 저하를 예측해 볼 수 있었다. 이를 통해 알루미늄 몰딩 하우징에서 발생하는 와전류손을 줄이거나, 방지할 수 있다면 더 좋은 성능의 변압기 냉각설계가 가능할 것이라고 기대해 볼 수 있는 부분이다.

4. 결 론

본 연구에서는 전자기-열 다중물리 전산해석을 통해 50 kW급 변압기의 부피저감 설계를 수행해 보고, 이 과정에 수반되어야 하는 냉각 특성을 평가해 보았다. 변압기 모델에 대한 실험을 병행, 해석을 통해 도출된 전자기 특성(인덕턴스)과 열특성(최대온도) 결과가 잘 부합한다는 점을 확인함으로써 변압기 설계 전산모델의 신뢰성을 확보하였다. 본 연구의 주요 결과는 아래 나타낸 바와 같다.

- 1) 전자기장 해석을 통해 코어의 부피를 36.2% 저감하는 모델을 도출하였고, 이 과정에서 코일 등의 저항 증가에 따라 발열량 증가가 수반된다는 점을 확인하였다.
- 2) 전도성 몰딩 하우징을 사용한 경우 몰딩 하우징에 인가되는 추가 발열과 변압기 인덕턴스의 변화를 확인하였다.
- 3) 열전도성 알루미늄 하우징이 적용되는 경우,

와전류 손실에 따른 발열량은 증가하지만 냉각 수로와의 열전도에 기반한 좋은 방열 특성으로 인해 주요 부품이 허용온도 내에서 구동될 수 있음을 보여주었다.

- 4) 추가 와전류 손실이 전혀 유발되지 않는 베이클라이트 하우징의 경우, 오히려 낮은 열전도도로 인해 방열효과가 저하되어 코어의 최대온도가 허용온도를 초과할 수 있음을 확인할 수 있었다.

이 결과를 바탕으로, 향후 보다 컴팩트한 변압기 설계 과정에서 전도성 몰딩 하우징에 생기는 발열을 저감시키며 방열 특성을 향상시킬 수 있다면 차세대 전력변환 전장부품의 개발이 가능할 것이라 사료된다. 이러한 부분에서 후속 연구에서 더욱 다양한 소재를 적용하여 몰딩 하우징 소재의 절연성능과 열전도도에 관한 폭넓은 이해와 몰딩 하우징의 형상에 따른 전자기-열적 영향을 살펴볼 계획이다. 본 연구에서 다룬 연구 방법론, 도출 결과들은 현재 전기자동차 전장부품 개발의 핵심 사안이라 할 수 있는 변압기 설계의 가이드라인으로써 활용될 수 있을 것이라 기대한다.

후 기

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술 평가관리원(KEIT) 연구비 지원(과제번호: 20018945, 20024348), 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2021R1F1A1062420), 그리고 서울과학기술대학교의 지원을 받아 수행된 연구성과임.

참고문헌

(References)

- (1) Khalid, M. R., Alam, M. S., Sarwar, A. and Jamil, A. M. S., 2019, "A Comprehensive Review on Electric Vehicles Charging Infrastructures and Their Impacts on Power-Quality of the Utility Grid," *eTransportation*, Vol. 1, Article 100006.
- (2) Park, S. H., Gu, K. H., Lee, K. H. and Nam, K. W., 2023, "Evaluation of Harmless Crack Size of A6061-T6 for EV Battery Pack Case," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 47, No. 5, pp. 417~425.
- (3) Han, J. Y., Lee, K. H. and Yu, S. S., 2012, "Dynamic Modeling of Cooling System Thermal Management for Automotive PEMFC Application," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 36, No. 12, pp. 1185~1192.
- (4) Wang, H., Gaillard, A. and Hissel, D., 2019, "A

- Review of DC/DC Converter-Based Electrochemical Impedance Spectroscopy for Fuel Cell Electric Vehicles,” *Renewable Energy*, Vol. 141, pp. 124~138.
- (5) Kolli, A., Gaillard, A., Bernardinis, A. D., Bethoux, O., Hissel, D. and Khatir, Z., 2015, “A Review on DC/DC Converter Architectures for Power Fuel Cell Applications,” *Energy Conversion and Management*, Vol. 105, pp. 716~730.
- (6) Han, J. S., Han, J. Y. and Yu, S. S., 2020, “Effects of Relative Humidity on PEMFC Durability Characteristics in a Vehicle Driving Environment,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 44, No. 2, pp. 87~94.
- (7) Tran, H. N., Le, T. T., Jeong, H. J., Kim, S. J. and Choi, S. W., 2022, “A 300 kHz, 63 kW/L ZVT DC-DC Converter for 800 V Fuel Cell Electric Vehicles,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 37, No. 3, pp. 2993~3006.
- (8) Deshmukh, S., Iqbal, A., Islam, S., Khan, I., Marzband, M., Rahman, S. and Al-Wahedi, A. M. A. B., 2022, “Review on Classification of Resonant Converters for Electric Vehicle Application,” *Energy Reports*, Vol. 8, pp. 1091~1113.
- (9) Aslan, B., Balci, S., Kayabasi, A. and Yildiz, B., 2021, “The Core Loss Estimation of a Single Phase Inverter Transformer by Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System,” *Measurement*, Vol. 179, Article 109427.
- (10) Battal, F., Balci, S. and Sefa, I., 2021, “Power Electronic Transformers: A Review,” *Measurement*, Vol. 171, Article 108848.
- (11) Mortazavizadeh, S. A., Palazzo, S., Amendola, A., De Santis, E., Ruzza, D. D., Panariello, G., Sanseverino, A., Velardi, F. and Busatto, G., 2021, “High Frequency, High Efficiency, and High Power Density GaN-Based LLC Resonant Converter: State-of-the-Art and Perspectives,” *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 23, Article 11350.
- (12) Amirpour, M., Kim, S. H., Battley, M. P., Kelly, P., Bickerton, S. and Covic, G., 2021, “Coupled Electromagnetic-Thermal Analysis of Roadway Inductive Power Transfer Pads within a Model Pavement,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 189, Article 116710.
- (13) Wrobel, R., Mlot, A. and Mellor, P. H., 2012, “Contribution of End-Winding Proximity Losses to Temperature Variation in Electromagnetic Devices,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 2, pp. 848~857.
- (14) Wrobel, R. and Mellor, P. H., 2011, “Thermal Design of High-Energy-Density Wound Components,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 9, pp. 4096~4104.
- (15) Kushwaha, B. K., Rajkumar, R., Jadhav, S. and Srikant, S., 2023, “Thermal Analysis of 2.2 kW Transformer of On-Board Charger for Electric Vehicles,” *2023 Second International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS)*, Tuticorin, India, pp. 311~314.
- (16) Tayyara, O., Silva, C. D., Nasr, M., Assadi, A., Gupta, K., Trescases, O. and Amon, C. H., 2020, “Electro-Thermal Codesign Methodology of an On-Board Electric Vehicle Charger,” *Journal of Electronic Packaging*, Vol. 142, No. 4, pp. 10~20.
- (17) Assadi, S. A., Matsumoto, H., Moshirvaziri, M., Nasr, M., Zaman, M. S. and Trescases, O., 2020, “Active Saturation Mitigation in High-Density Dual-Active-Bridge DC-DC Converter for On-Board EV Charger Applications,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 35, No. 4, pp. 4376~4387.
- (18) Wang, H., Guo, Z., Tayebi, S. M., Zhao, X., Huang, Q., Yu, R., Yang, Q., Li, Y. and Huang, A. Q., 2020, “Thermal Design Consideration of Medium Voltage High Frequency Transformers,” *2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, New Orleans, USA, pp. 2721~2726.
- (19) Leibl, M., Ortiz, G. and Kolar, J. W., 2017, “Design and Experimental Analysis of a Medium-Frequency Transformer for Solid-State Transformer Applications,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 5, No. 1, pp. 110~123.
- (20) Guo, Z., Rajendran, S., Tangudu, J., Khakpour, Y., Taylor, S., Xing, L., Xu, Y., Feng, X. and Huang, A. Q., 2023, “A Novel High Insulation 100 kW Medium Frequency Transformer,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 38, No. 1, pp. 112~127.
- (21) Ngo, M., Cao, Y., Nguyen, K., Dong, D. and Burgos, R., 2021, “Computational Fluid Dynamic Analysis and Design of an Air Duct Cooling System for 18 kW, 500 kHz Planar Transformers,” *2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Phoenix, USA, pp. 1496~1504.
- (22) Bergman, T. L. and Lavine, A. S., 2017, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Wiley, New York, USA, pp. 77~497.