

E-mobility용 고밀도 전원장치의 PCB방열 특성해석에 관한 연구

A study on PCB Heat Dissipation Characteristics of High Density Power Supply for E-mobility

김 종 해*★

Jong-Hae Kim*★

Abstract

This paper presents the PCB heat dissipation characteristics of high density DC-DC converter for electric vehicles. This paper also analyzes the heat dissipation structure of the high density DC-DC converter and optimizes the PCB heat dissipation design of the high density power system through thermal analysis simulation. Based on heat transfer theory, the thermal path of general electronic devices is analyzed and the thermal resistance equivalent circuit is modeled in this paper. Additionally, the thermal resistance equivalent circuit of the 500W synchronous buck converter, which is addressed in this paper, is modeled to present a structural heat dissipation path for better thermal performance. The validity of the proposed scheme is verified through the thermal analysis simulation results and experiments applying multi-surface heat dissipation structure to a 500[W](12[V], 41.67[A]) synchronous buck converter prototype with an input voltage 72[V].

요 약

본 논문은 전기자동차용 고밀도 DC-DC 컨버터의 PCB 방열특성에 대해 나타낸다. 본 논문은 또한 고밀도 DC-DC 컨버터의 방열구조를 분석하고 열해석 시뮬레이션을 통해 고밀도 전원장치의 PCB 방열 설계를 최적화한다. 따라서 본 논문에서는 열전달 이론을 바탕으로 일반적인 전자기기의 방열 경로를 분석하고 열저항 등가 회로를 모델링한다. 또한 본 논문의 연구 대상인 500[W]급 동기식 벡 컨버터의 열저항 등가 회로를 모델링 하여 방열 성능 향상을 위한 구조적인 방열 경로를 제시한다. 입력전압 72[V], 출력전압 12[V]의 500[W]급 동기식 벡 컨버터에 다면 방열 구조를 적용하여 열해석 시뮬레이션결과와 시작품의 실험을 통해 제안 구조의 타당성을 검증한다.

Key words : E-mobility, PCB Heat Dissipation, Thermal Analysis, Icepak, Synchronous DC-DC Converter

* School of Electronic and Electrical Engineering, Daegu
Catholic University

★ Corresponding author

E-mail : kjhassk@cu.ac.kr, Tel : +82-53-850-2781

※ Acknowledgment

This work was supported by the sabbatical research grant from Daegu Catholic University in 2021

Manuscript received Sept. 09, 2021; revised Sept. 25, 2021; accepted Sept. 26, 2021.

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.

1. 서론

최근 거대 도시화 도심지의 교통 혼잡, 주차공간의 문제, 인구의 고령화, 교통약자의 사용 편의성 등의 문제 해결을 위해 도심지에서 새로운 교통수단인 E-mobility가 주목받고 있다. 또한, 승용차 등의 소유개념이 웨어링의 개념으로 바뀌고 있으며 선진 대도시를 중심으로 대중교통의 이용 비중이 높아지고 있다[1].

전기구동 방식의 소형 E-mobility는 충전시스템, OBC, LDC, 인버터, 모터, 배터리 등으로 구성된다.

OBC와 LDC, 인버터와 같은 전력변환장치의 고효율화와 경량화는 적은 탑승 인원과 높은 사용빈도를 가지는 E-mobility에 필수적인 요소이다. 또한, 이는 이동수단의 주행 가능 거리의 증가와도 직결된다[2].

특히, E-mobility의 전력변환시스템은 자동차 내부 공간의 제약으로 인해 소형화 및 경량화가 가능한 고전력밀도 전력변환시스템 개발이 요구됨에 따라 전원으로 중 가장 큰 부피를 차지하는 인덕터, 커패시터와 같은 수동 소자의 크기를 저감하기 위해 동작 주파수를 증가시킬 경우, 주파수에 비례하여 스위칭 손실이 증가하므로 스위칭 소자 발열에 대한 대책이 필수적이다[3][4]. 또한 부피 저감에 용이한 Planar type 인덕터를 적용하기 위해 PCB를 사용 할 경우, PCB 내층의 인덕턴 패턴 발열이 효과적으로 배출되지 못하는 문제점이 존재한다.

본 논문에서는 E-mobility의 고전력밀도 전원으로 적합한 동기식 벽 컨버터를 적용[5]하고, 또한 고전력밀도 전원장치의 발열을 효과적으로 방출하기 위해 메탈플레이트를 적용하여 기기 하우징에 직접적인 방열 경로를 설계하여 PCB에서 발생하는 열이 빠르게 기기 외부로 방열할 수 있는 방열 구조를 제안한다.

II. 본론

1. 전자기기의 방열 경로 및 열 등가회로

그림 1(a)는 전자기기의 방열 경로를 나타내고 있다. 그림 1(a)에서 알 수 있듯이, 반도체의 접합부에서 발생하는 열은 소자의 리드와이어를 따라 PCB로 전도(Conduction)되며, 기기 내부 공기의 대류 현상에 의해 대류(Convection) 열전달, 반도체 패키지에서 기기 외함(Housing)으로 복사(Radiation) 열전달이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 또한, 기기 외함의 통풍구를 통해 내부의 공기가 외부로 통풍이 가능한 구조로 되어 있다.

그림 1 (b)는 그림 1(a)의 전자기기의 방열 경로를 열저항으로 표현한 등가적인 회로를 나타내고 있다. 그림 1(b)에서 T_j , T_c 는 각각 반도체 정선 내부온도, 소자 케이스 온도이며, T_A , T_s , T_∞ 는 기기 내부 온도, 기기 외함 온도, 기기 외부 온도를 나타낸다.

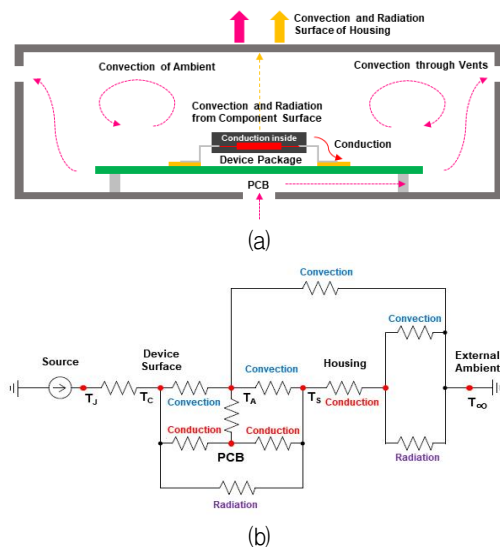


Fig. 1. Heat dissipation paths of electronic device (a) conduction, convection and radiation of electronic device (b) thermal resistance equivalent circuit. 그림 1. 전자기기의 방열경로 : (a) 전자기기의 전도, 대류, 복사, (b) 열저항 등가회로

2. 제안한 고밀도 전원장치의 방열구조

가. 메탈플레이트를 적용한 PCB 방열구조

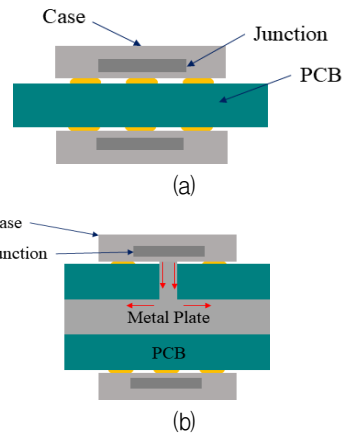


Fig. 2. Heat dissipation structures of conventional and proposed PCBs (a) conventional double sided PCB (b) PCB with metal plates.

그림 2. 기존의 PCB 방열구조와 제안하는 PCB 방열구조 : (a) 기존의 양면 PCB, (b) 메탈플레이트를 고려한 PCB

그림 2는 기존의 양면 PCB 방열 구조와 본 논문에서 제안한 메탈플레이트 삽입형 PCB 방열 구조를 나타낸다. 그림 2(a)의 기존의 양면 PCB 방열구조는 양쪽 면에 반도체 소자가 실장 되어있는 경우 소자에서 발생하는 열의 방열 경로는 소자 케이스를 통한 경로와 PCB 보드를 통하는 2가지 경로로

구성된다. 그림 2(b)는 2개의 PCB 사이에 메탈플레이트가 삽입되어 방열구조로 메탈플레이트의 양각 구조는 PCB를 관통하여 소자의 Thermal pad와 직접 맞는 구조로 되어 있으며 소자 케이스를 통한 경로보다 낮은 열저항을 갖는다.

나. 하우징(Housing) 구조를 통한 PCB 방열구조

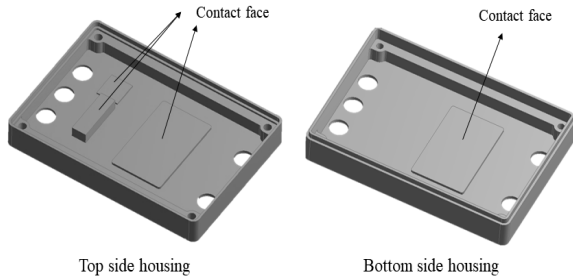
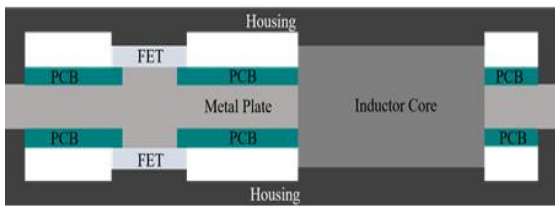
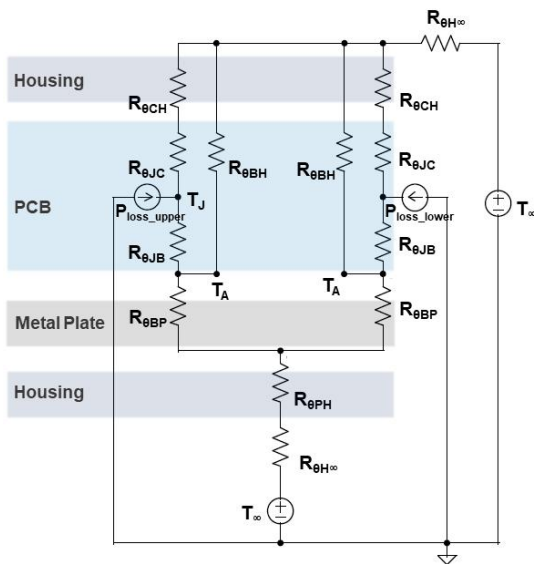


Fig. 3. Housing heat dissipation structures of high density power supply.

그림 3. 고밀도 전원장치의 하우징 방열 구조



(a)



(b)

Fig. 4. Multi-surface heat dissipation structure and thermal resistance equivalent circuit of high density power supply (a) multi-surface heat dissipation structure (b) thermal resistance equivalent circuit.

그림 4. 고밀도 전원장치의 다면 방열 구조 및 열저항 등가 회로 : (a) 다면 방열 구조, (b) 열저항 등가 회로

그림 3은 고밀도 전원장치의 하우징 구조를 나타내고 있다. 고밀도 전원장치의 하우징 방열 구조는 상부 하우징과 하부 하우징으로 구성되어 있으며, 각각 돌출된 접촉면(Contact face)을 가진다. 상부 하우징은 FET, Diode, Inductor와 직접 맞는 구조로 되어 있으며 하부 하우징은 Inductor와 직접 맞는 구조로 되어 있다.

그림 4(a)는 본 논문에서 제안한 고밀도 전원장치의 동기식 벡 컨버터 모듈에 하우징 및 메탈 플레이트를 고려한 다면 방열 구조를 나타내고 있으며, 그림 4(b)는 다면 방열 구조의 열저항 등가회로를 나타내고 있다. 표 1은 다면 방열 구조의 열저항 등가회로의 열저항 파라메타를 나타내고 있다.

Table 1. Thermal resistance parameters of thermal resistance equivalent circuit.

표 1. 열저항 등가회로의 열저항 파라메타

Parameter	Description
$R_{\theta JC}$	Junction - Case
$R_{\theta CH}$	Case - Housing
$R_{\theta JB}$	Junction - Board
$R_{\theta BP}$	Board - Plate
$R_{\theta BH}$	Board - Housing
$R_{\theta PH}$	Plate - Housing
$R_{\theta H\infty}$	Housing-Ambient (outer)
T_J	Junction temperature
T_A	Ambient temperature (inner)
T_∞	Ambient temperature (outer)
P_{loss_upper}	Upper device power dissipation
P_{loss_lower}	Lower device power dissipation

3. 제안회로의 스위칭 손실 및 인덕터 손실

본 논문에서 제안한 고전력밀도 전원장치는 입력 전압 72[V], 출력전압 12[V]의 500[W]급 동기식 벡 컨버터 모듈을 사용하였다. 고전력밀도 설계에 유리한 동기식 벡 컨버터는 다이오드 대신에 Low-side 스위치를 적용하여, Dead-time구간을 통해 ZVS 동작이 가능하므로 턴-온, 턴-오프 시 스위칭 손실이 발생하지 않는다는 큰 장점을 가진다. 고전력밀도의 컨버터는 소형화를 위해서는 주요 소자의 손실과 방열을 최소화하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 7턴의 평면인덕터를 기반으로 이론적인 분석을 통해 코어가 포화되지 않으며, 최고효율 95.28[%]를

갖는 스위칭 주파수 100[kHz]와 인덕턴스 4.5[uH]를 최적 동작 파라메타로 선정하였다[5].

표 2는 고전력밀도 동기식 벽 컨버터의 스위칭 소자 손실과 인덕터 손실 계산을 위한 계산식을 나타내고 있다.

Table 2. Power loss equations of switching devices and inductor.

표 2. 스위칭 소자 손실 및 인덕터 손실 수식

Device	Power loss equations
High Side Switch	$P_{turn_on_loss} = \frac{1}{2} v_{ds} i_{ds} t_r f_{sw}$
	$P_{turn_off_loss} = \frac{1}{2} v_{ds} i_{ds} t_f f_{sw}$
	$P_{cond_loss} = R_{ds_on} \cdot (i_{ds_rms})^2$
	$P_{cds_loss} = \frac{2}{3} c_{ds} v_{ds}^2 f_{sw}$
Low Side Switch	$P_{turn_on_loss} = 0 (\because ZVS\ Turn-on)$
	$P_{turn_off_loss} = 0 (\because ZVS\ Turn-off)$
	$P_{cond_loss} = R_{ds_on} (i_{ds_rms})^2$
	$P_{cds_loss} = 0 (\because ZVS\ Turn-on)$
	$P_{dead} = v_f < i_{dsL} > (t_{dead(on)} + t_{dead(off)}) f_{sw}$
Gate Driver	$P_{cgs_loss} = c_{gs} v_{gs}^2 f_{sw}$
Inductor	$P_{core_loss} = P_{cv} \times Weight [W]$
	$P_{copper_loss} = (i_{L_dc})^2 R_{dc} + (i_{L_s(@f_s)})^2 R_{ac(@f_s)}$

표 2에서 나타낸 스위칭 소자 손실과 인덕터 손실 계산을 위한 계산식은 다면 방열 구조를 갖는 동기식 벽 컨버터 모듈의 열해석 시뮬레이션을 위한 주요 발열 소자의 이론적인 손실값을 계산하는데 유용하게 사용된다.

그림 5는 본 논문에서 제안한 입력전압 72[V], 출력전압 12[V]의 500[W]급 동기식 벽 컨버터의 PSIM 시뮬레이션 회로도를 나타내고 있다.

그림 6은 입력전압 72[V], 출력전압 12[V]의 500W 급 동기식 벽 컨버터의 스위칭 주파수와 Planar Type의 인덕터를 100[kHz], 4.5[uH]로 하였을 경우의 High-side 게이트 신호(V_{gs,Q1}), Low-side 게이트 신호(V_{gs,Q2}), Planar Type의 인덕터에 흐르는 전류(I_{Lo}) 및 Low-side 스위치 양단 전압(V_{Q2})의 PSIM 시뮬레이션 파형을 나타내고 있다. 그림 6의 PSIM 시뮬레이션 한 결과, 12[V]@500[W] 동기식 벽 컨버터의 인덕터에 흐르는 평균 전류가 41.667[A]임을 확인하였다.

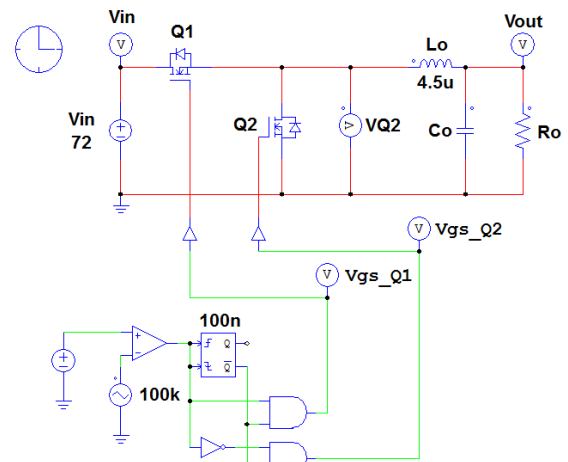


Fig. 5. PSIM simulation circuit diagram of Synchronous Buck Converter.

그림 5. 동기식 벽 컨버터의 PSIM 시뮬레이션 회로도

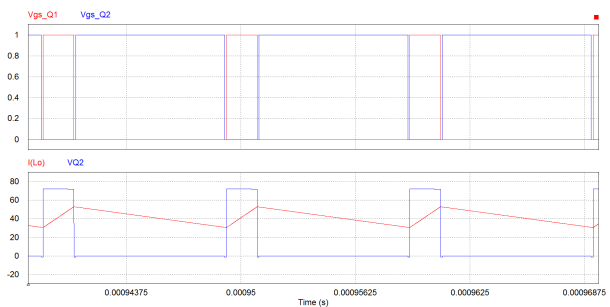


Fig. 6. PSIM simulation waveforms of 12[V]@500[W] Synchronous Buck Converter.

그림 6. 12[V]@500[W] 동기식 벽 컨버터의 PSIM 시뮬레이션 파형

4. 다면 방열 구조를 적용한 열해석 시뮬레이션

가. 시뮬레이션 환경

본 논문에서 제안한 다면 방열 구조를 적용한 고밀도 전원장치의 냉각 성능을 검증하기 위해 Ansys(사)의 Icepak를 사용하여 열해석 시뮬레이션을 수행한다. 열해석의 해석 시간을 줄이고 해석의 수렴성을 높이기 위해 형상은 최대한 단순화하였으며, 자연 대류 조건에서 외부 온도와 Cabinet size는 각각 상온 25[°C], 30×30×30[cm]의 개방된 영역으로 설정하였다. 열해석을 위한 주요 발열 소자의 손실값은 3절에서 기술한 손실 계산식을 이용하여 계산한 이론적인 손실값을 Full load 기준으로 총 10.55[W]의 손실을 입력하여, 표 3에서 나타낸 바와 같이 하우징 및 메탈플레이트 적용 유무, 하우징 및 메탈플레이트 재질 변경, 스위칭 소자 변경을 통해 총 6가지 Case에 대해서 열해석 시뮬레이션을 수행하

였다.

표 3에서 Case 1~Case 4는 동기식 벽 컨버터 하우징 및 메탈플레이트 유무에 따른 방열 특성을 나타내며, Case 5는 하우징과 메탈플레이트 방열 재질의 열전도가 방열특성에 미치는 영향을 나타내며, Case 6은 기존의 실리콘 스위칭 소자 대비 저손실의 와이드 밴드갭 전력반도체인 GaN-FET을 적용하였을 경우 확보할 수 있는 온도 마진 특성에 대해서 나타낸다. 표 3의 하우징과 메탈플레이트에 사용된 방열 재질 AlN(질화알루미늄)과 Al₂O₃(알루미나)의 열전도는 각각 250[W/mK], 30[W/mK]이다.

Table 3. Thermal analysis simulation conditions for each case.
표 3. Case별 열해석 시뮬레이션 조건

Cases	Housing	Metal plate	Material	Switching device
Case 1	○	○	AlN	MOSFET
Case 2	○	×	AlN	MOSFET
Case 3	×	○	AlN	MOSFET
Case 4	×	×	AlN	MOSFET
Case 5	○	○	Al ₂ O ₃	MOSFET
Case 6	○	○	AlN	GaN-FET

나. 열해석 시뮬레이션 결과

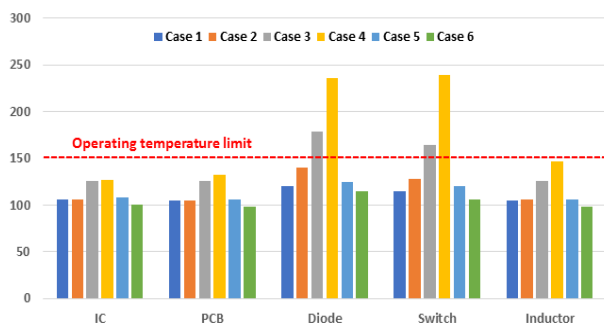


Fig. 7. Temperature distribution of main components for each case.

그림 7. Case별 주요 부품들의 온도 분포

그림 7은 표 3에서 나타난 하우징 및 메탈플레이트 적용 유무, 하우징 및 메탈플레이트 재질 변경, 스위칭 소자 변경을 통해 총 6가지의 Case에 대한 열해석 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다.

그림 7에서 나타낸바와 같이 Case 1의 하우징 방열 구조 및 AlN 메탈플레이트 방열 재질을 적용한 경우를 기준으로 한 방열 해석 결과, Case 1의 5개

부품의 평균 온도 대비 Case 2는 +6[%], Case 3는 +30[%], Case 4는 +60[%], Case 5는 +2[%]로 온도가 상승하고 있는데 반해 저 손실의 와이드 밴드갭 전력반도체인 GaN-FET을 적용한 Case 6의 경우는 약 -6[%]로 평균 온도가 감소하고 있음을 알 수 있다.

이상의 열해석 시뮬레이션결과로부터 Case 4의 하우징 방열구조 및 메탈플레이트를 적용하지 않았을 경우 대비 Case1과 Case 6의 부품 평균 온도가 각각 60[%], 66[%] 저감됨을 알 수 있었다. 또한 그림 7에서 나타난 바와 같이 Case 3, Case 4의 경우 스위칭 소자와 Diode 온도가 반도체 소자의 정상 동작 온도 범위인 150[°C]를 넘어서는 결과를 나타내고 있다. 실제 기기의 주요소자 동작 온도가 150[°C]를 넘어서는 경우 소자가 소손 및 과열로 인한 화재가 발생할 수 있으므로 설계 시 주의 할 필요가 있다. 표 4는 열해석 시뮬레이션에 의해 계산된 총 6가지의 Case별 각 부품 온도를 나타내고 있다.

Table 4. Temperature of each component for each case calculated by thermal analysis simulation.

표 4. 열해석 시뮬레이션에 의해 계산된 case별 각 부품 온도.

Cases	IC	PCB	Diode	Switching device	Inductor
Case 1	106.1	104.4	120.3	114.3	104.5
Case 2	105.9	104.3	140.2	127.8	105.6
Case 3	125.6	125.2	178.2	164.7	126
Case 4	126.6	132.2	235.3	239.3	147.1
Case 5	107.8	106.4	124.6	119.7	106.2
Case 6	100	98.37	114.3	106.1	98.59

5. 실험결과

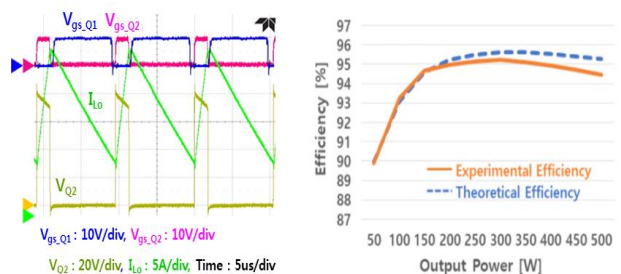


Fig. 8. Efficiency comparison of theoretical and experimental results, experimental waveforms.

그림 8. 실험 파형, 이론 및 실험 결과의 효율 비교

본 논문에서 제안한 다면 방열 구조를 적용한 컨버터의 타당성을 검증하기 위하여 입력 전압(V_{in})을 72[V], 출력전압(V_{out})을 12[V], Planar Type 인덕터의 인덕턴스(L_o)의 용량을 4.5[uH], 스위칭 주파수(f_{sw})을 100[kHz], Infineon(사) BSC040N10NS를 적용한 MOSFET 스위칭 소자를 사용하여 제작된 시작품을 통해 실험 결과를 나타내었다. 그림 8은 최대 출력 500[W]에서 측정된 주요 실험 파형과 효율을 비교한 그래프를 나타내고 있다. 그림 8의 실험 파형은 그림 6의 동기식 벽 컨버터의 PSIM 시뮬레이션 결과와 일치함을 알 수 있다.

제작된 다면 방열구조가 적용된 동기식 벽 컨버터는 500[W] 부하에서 93.8[%]의 효율을 가지며, 측정된 효율과 이론적으로 계산된 효율이 전부하 영역에서 약 1[%]의 오차 범위 내에 있으므로 이론적인 분석이 타당함을 확인하였으며 또한 제작된 컨버터는 64.72[W/in³]의 고전력밀도를 가지므로 본 논문에서 제안한 동기식 벽 컨버터가 고전력밀도 구현에 적합함을 알 수 있었다.

III. 결론

본 논문은 고전력밀도 전원장치에 적합한 동기식 벽 컨버터에 Planar type의 인덕터를 적용하여 PCB를 사용할 경우에 발생하는 패턴 발열을 효과적으로 방출하기 위해 PCB 방열 경로를 분석하고 저열저항을 가지는 방열 경로를 설계하였다. 고전력밀도 동기식 벽 컨버터의 PCB 방열 최적 설계를 위해 주요 소자의 손실계산을 통해 계산된 손실을 바탕으로 열해석 시뮬레이션을 수행하였다. 하우징 및 메탈플레이트 적용 유무, 하우징 및 메탈플레이트 재질 변경, 스위칭 소자 변경을 통해 총 6가지 Case에 대한 열해석 시뮬레이션한 결과, Case 1과 Case 6은 방열 구조를 적용하지 않았을 경우 대비 부품의 평균 온도를 60[%], 66[%]저감할 수 있었다.

500[W] 동기식 벽 컨버터를 PSIM 시뮬레이션을 통해 이론적인 해석결과와 실험 결과가 일치함을 확인 할 수 있었다. 또한 제작한 동기식 벽 컨버터는 64.72[W/in³]의 고전력밀도를 가지므로 본 논문에서 제안한 동기식 벽 컨버터가 고전력밀도 구현에 적합함을 알 수 있었다.

향후 Ansys(사) Siwave를 이용한 PCB의 트레이스에서 발생하는 손실(IR Drop)을 고려하여 연성

해석한다면 더욱 실제와 가까운 모델링을 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] W. H. Kim, Y. S. Son, "Trend of Micro e-Mobility," *The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol.68, No.4, pp.25-29, 2019.
- [2] Di Han, Silong Li, Woongkul Lee, Bulent Sarlioglu, "Adoption of Wide Bandgap Technology in Hybrid/Electric Vehicles-Opportunities and Challenges," *IEEE ITEC*, 2017. DOI: 10.1109/ITEC.2017.7993332
- [3] J. M. Shin, C. W. Park, S. K. Han, "Non-Dissipative Snubber for High Switching Frequency and High Power Density Step-Down Converters," *The Transactions of KIPE*, Vol.22, No.4, pp.345-352, 2017. DOI: 10.6113/TKPE.2017.22.4.345
- [4] J. W. Shin, S. K. Chae and B. H. Cho, "A New Zero-Current Transition boost converter using split inductor," in *Proc. IPEMC*, pp.534-539, 2009. DOI: 10.1109/IPEMC.2009.5157445
- [5] S. K. Kim, K. Y. Kim, J. W. Kim, J. H. Lee, J. S. Won, J. H. Bae, J. H. Kim, "Structural design of 500W ultra high density DC-DC Converter," *The 51th KIEE Summer Conference 2020*, pp. 1305-1306, 2020. DOI: 10.6113/TKPE.2021.26.3.199

BIOGRAPHY

Jong-Hae Kim (Member)



1996 : MS degree in Electrical Engineering, Yeungnam University
 1999 : PhD degree in Electrical Engineering, Yeungnam University
 2005 : PhD degree in Electrical Engineering, Nagoya University

2005~2012 : Principal Engineer (Group leader), Samsung Electro-Mechanics, Co., Ltd.

2012~Present : Associate Professor, School of Electronic and Electrical Engineering, Daegu Catholic University