

DC-link Capacitor 필름 형상에 따른 Joule-heat 특성 분석

전용원*·김영신**·전의식***†

*공주대학교 기전공학과, **공주대학교 생산기술연구소, ***†공주대학교 기계자동차공학부

Analysis of Joule-heat Characteristics according to the DC-link Capacitor Film Geometries

Yong Won Jeon*, Young Shin Kim** and Euy Sik Jeon***†

*Department of Mechanics Engineering, **Industrial Technology Research Institute, Kongju National University,
***†Department of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University

ABSTRACT

As global warming accelerates, eco-friendly electric cars are being developed to reduce carbon dioxide emissions, and power conversion inverters are used to drive motors. Among inverter components, DC-link capacitor is heated by high current usage, which causes problems such as performance and life-saving of inverter. Although metal cases with good thermal performance have been used to solve this problem, it is difficult to apply them in practice due to insulation problems with other parts. In this paper, the Heat-Generation influence factor of DC-link capacitor is analyzed. Variables on heat-generation are set at 3 levels for film width, inductance, and film thickness. Box-Behnken to 13 tests using the design and minimal deviations, e.g. through the experiment three times by each level. The surface of the film k type by attaching the sensor current is measured temperature. Capacitance was set to a minimum level of 200 μ F and had a frequency of 16 kHz with Worst case, ambient temperature of 85° C and a ripple current of 50 Ams was applied. The temperature at the measurement point was collected in the data logger after sampling at 1 minute intervals for 2 hours after saturation with the ambient temperature. This experiment confirmed that setup factors are correlated with heat-generation.

Key Words : DC-link Capacitor, ESR, Stray Inductance, Joule-Heat, Film width

NOMENCLATURE

ESL : Equivalent Series Inductance, Stray Inductance
ESR : Equivalent Series Resistance
MPPF : Metallized Polypropylene Film
C : Capacitance, μ F
HEV : Hybrid Electric Vehicle
PHEV : Plug-in Hybrid Electric Vehicle
FCEV : Fuel Cell Electric Vehicle

Hot spot : Maximum temperature of film
 Δt : Maximum temperature – Ambient temperature
 $I_{rms}/\Delta t$: Current density required to raise 1°C
Z(RLC) : Impedance(Capacitance + Inductance + ESR)
 L_s : Stray Inductance
L : Film width
A : Element cross section
Film thickness : Dielectric thickness of MPPF
Film element : Wound element with target capacity in parallel construction
Film width : the width of a dielectric material cut to fit its intended use.

†E-mail: osjun@kongju.ac.kr

1. 서 론

지구 온난화가 가속화됨에 따라 공기 오염이 사회적 문제로 크게 부각되고 있다. 자동차에서 배출되는 이산화탄소는 온난화의 주요 오염물질로 배출감소를 위한 친환경 자동차가 개발되고 있다. 보조의 전기 모터가 탑재된 HEV차량, 모터와 엔진이 주 동력인 PHEV차량, 모터가 주 동력인 EV와 FCEV차량이 있다. 친환경 자동차에는 배터리 전력을 모터로 전달하기 위한 인버터 시스템이 있으며, 커패시터는 전력을 일정하게 공급하는 핵심부품이다 [1-4].

DC-link capacitor의 핵심 재료인 MPPF는 유전체 위에 \AA 단위로 금속증착하여 전극을 만들고, 유전체를 대향하여 커패시터를 형성한다. 유전체는 Polypropylene, Polyethylene Terephthalate, Polyethylene, Polyphenylene Sulphide가 있으며, 특히 Polypropylene은 손실이 작고 자기회복성이 우수하여 가장 많이 사용되는 유전체이다 [5,6]. 유전체의 주요 고장 인자는 온도와 정격전압, 리플 전류이고, 각 인자 수준에 따라 수명이 달라지는데, 유전체는 높은 온도에서 수명이 짧으며 온도를 증가시키는 주요 인자는 ESR이다 [7]. 커패시터는 Cooper과 증착 필름(MPPF)으로 구성된 RLC회로이며 전류가 인가되면 필름 소자(Film element)에서 I^2R 의 Joule-heat가 발생되는데 적정온도 이상에서 연속 사용하면 전압에 의해 유전체가 파괴되고 정전용량이 감소하게 된다 [6]. 정전용량의 감소는 인버터에서 필요로 하는 출력 에너지 감소로 이어져 결국 모터출력이 저하되는 인버터 성능 문제로 이어진다. 이에 커패시터 발열을 최소화하기 위한 인자 분석이 필요하지만 미진한 상태로 문제가 되고 있다. 인버터용 커패시터는 필름과 전해 커패시터가 있으며, 전해의 경우 작은 체적에 큰 정전용량을 얻을 수 있지만, 온도에 따라 정전용량(C)과 등가직렬저항(ESR)의 변화가 큰 단점이 있다. 반면, 필름 커패시터는 작은 체적에 큰 정전용량을 얻을 수는 없지만, 온도에 따라 전기적 특성이 안정적이고, 대 전류 인가가 가능하여 대부분의 인버터는 필름 커패시터를 적용한다 [8,9].

인버터 성능향상과 내구 수명 확보를 위해 커패시터의 발열을 줄이기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 특히, 커패시터의 케이스면이나 에폭시면에 열전도성이 높은 패드를 부착하여 발생된 열을 냉각하는 구조가 개발 중이며 일부는 생산에 적용되고 있다. 또한, 열 전도성을 가진 유전체와 유전 상수 관계에 따른 열 저항의 변화에 대한 내용으로, 유전 상수가 증가하면 열 저항도 증가하고, 필름의 열전도가 높을수록 열 저항이 감소하는 연구가 진행되고 있다 [10]. 인버터의 성능 향상을 위해 전해 커패시터와 필름 커패시터의 온도 특성과 ESR, ESL 특성을 분석

하고, 발열을 줄이기 위해 전해보다는 필름 커패시터에 대한 연구가 진행되어왔다 [11]. 인버터에서 커패시터를 냉각하여 사용하고 있지만 전류가 상승하면 한계 온도를 초과하는 문제가 있고, 열전도성이 좋은 유전체를 사용해도 수 W/mK에 불과하기 때문에 근본적인 문제는 해결되지 않고 있다. 또한 냉각 효과를 증가하기 위해 커패시터 케이스를 메탈로 사용하고 생각하면 최적의 조건이 되지만, 커패시터 구조상 타 부품과 절연 문제로 케이스를 Full Metal로 적용하기에는 현실적으로 어려운 상태다. 커패시터는 용량성 리액턴스(X_c)로 전류가 흐르면 열이 발생되는데, 주로 ESR의 크기에 따라서 발열량이 결정된다 [3,5,6]. 필름 형상은 ESR에 많은 영향을 주는데 특히 유전 손실(Dielectric loss)과 커패시턴스는 주요 인자가 된다 [5,7]. ESR을 감소하기 위한 방법으로 유전 손실이 작은 Polypropylene을 사용하고, 커패시터 설계시 필름 단일 소자의 병렬 수를 증가시켜 ESR을 저감한다 [5]. 그러나 필름 소자의 발열은 회로구성보다 물리적인 구성에 의해서 열이 발생되기 때문에 회로를 통한 발열 감소는 한계가 있다. 이와 같이 커패시터의 발열을 줄이기 위한 많은 연구가 진행되고 있지만, 발열에 영향을 미치는 인자에 대한 연구는 미진한 상태로 연구 분석이 필요하다.

본 논문에서는 커패시터의 발열 문제를 분석하기 위해 발열 영향 인자를 설정하고, 실험을 통해 상관관계를 분석하였다. DC-link 커패시터의 전류량은 모터 사양에 의해 결정된 구속된 조건이며 식 (3)과 같이 ESR에 따라 발열하게 되므로 식 (2)에서 필름 폭(Film width) L을 실험 인자로 선정하였다. 또한, 식 (4)와 (5)에서 전하의 거리 r^2 을 필름 두께로 가정할 경우, 유전체의 단면을 통과하는 전하의 양은 필름 두께에 반비례하고, 전계의 세기도 반비례한다. 따라서, 필름 두께는 커패시터 발열에 영향을 미칠 수 있으므로 실험을 통해 검증하고자 인자로 선정하였다. 그리고, 커패시터의 총 저항은 식 (7)과 같이 표현할 수 있는데 이중 L(Inductance)은 전류의 흐름을 방해하여 필름 소자의 발열에 영향을 줄 수 있으므로 본 실험을 통해 증명하고자 인자로 선정하였다. 실험 계획은 Box-Behnken을 이용하여 수립하였다. 주요 인자로는 필름 폭(Film width) 35 mm 42.5 mm 50 mm, 인덕턴스(ESL) 10 nH, 20 nH 30 nH, 필름 두께(Film thickness)는 2.3 μm 2.8 μm 3.2 μm 으로 3인자 3수준으로 설정하였다. 또한, 시료의 온도 측정을 위해 필름 표면에 K type 센서를 부착하였으며, 정전용량 및 ESL 측정 후 온도 특성을 측정하였다. 측정된 데이터 특성은 Max temperature, Δt , $A_{rms}/\Delta t$ 로 구분 분석하였다. Max temperature는 필름 형상 중 가장 높은 온도를 나타내고, Δt 는 Ambient에서 상승된 온도를 나타낸 값으로 Δt 수준에 따라 전기적 기구적 설계에 영향을 주므로 커패

시터 특성에서 중요한 분석 요소이다. 또한, $A_{rms}/\Delta t$ 는 커패시터에 인가된 전류량을 Δt 로 나눈 값으로 1°C 상승되는데 필요한 전류량으로 비교하였다. 실험 데이터를 기반으로 Minitab을 이용하여 최대전류밀도의 최적화를 도출하였고, 시료를 제작하여 실험을 실시하였으며, 이를 근거로 필름 폭, 인덕턴스, 필름 두께와 발열과의 상관관계를 분석하였다.

2. 실험설정

2.1 변수설정

일반적으로 필름 커패시터의 ESR구성은 식(1)과 같이 나타낸다. 여기서, C는 유전체Capacitance, $\tan\delta$ 는 유전체 손실, $2\pi f$ 는 각속도, R_{CuP} 는 Cooper Positive, R_{ZnP} 는 Zinc Positive, R_{ZnN} 는 Zinc Negative, R_{CuN} 은 Cooper Negative를 나타낸다.

$$ESR = R_{CuP} + R_{ZnP} + \left(\frac{\tan\delta}{2\pi fC}\right) + R_{ZnN} + R_{CuN} \quad (1)$$

식 (1)의 ESR 공식에서 R_{Cu} 와 R_{Zn} 은 순도99%의 아연과 구리를 적용하기 때문에 총ESR에 미치는 영향은 작지만 선로의 길이가 길어지면 영향을 주기도 한다. ESR의 주요 인자는 유전손실과 커패시턴스이지만 아래의 식 (2)와 같이 필름 폭은 ESR에 영향이 많은 주요 인자이다. 필름 폭과 관련된 ESR을 수식으로 나타내면 아래 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$ESR = (\tan\delta/2\pi fC) \times (L/A) \quad (2)$$

또한, 전력 손실은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P=I \times I \times ESR(\Omega) \quad (3)$$

유전체 단면 1 m^2 를 통과하는 전속수는 전하의 양과 같다. 전속 밀도(Dielectric flux density) D와 전계의 세기 E는 점 전하의 거리에 반비례하고, 전속밀도는 유전율과 전계 세기의 곱과 같다. Q는 전하, ϵ 은 비유전율 8.855×10^{12} 와 유전체의 유전 상수의 곱이며, r^2 은 점 전하의 거리로 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$D = Q/(4\pi r^2) \quad (4)$$

$$E = Q/(4\pi\epsilon r^2) \quad (5)$$

$$D = \epsilon E \quad (6)$$

커패시터의 총 저항 임피던스(Z_{total})는 용량성 리액턴

스(X_C)와 유도성 리액턴스(X_L), 등가직렬저항(ESR)의 총합과 같다. 인덕턴스(L_S)는 총 임피던스에 영향을 주며 식 (5)와 같이 표기한다.

$$Z_{total} = X_L(2\pi f L_S) + X_C\left(-\frac{1}{2\pi f C}\right) + R \quad (7)$$

2.2 실험방법

2.1.1 Box-Behnken 법 설계

박스-벤켄법은 반응표면법의 실험설계 방법 중의 또 다른 방법으로 1차항과 2차항을 효율적으로 추정하고자 할 때, 실험요인 수와 비용이 많이 들 경우, 실험시간이 많이 소요될 경우 사용할 수 있다[12]. 본 논문은 설정된 인자 필름 폭, 필름 두께, 인덕턴스가 온도에 미치는 관계를 규명하고 최적화 도출을 위해 반응 표면법 (Response Surface)을 사용하였으며 실험 횟수를 줄이기 위해 박스-벤켄법으로 설계 및 실험하였다. 본 실험에서 요인점은 3개, 중앙점은 9, 전체 블록수는 1, 반복 실험 3회로하여 Table 1과 같이 실험을 하였고, Minitab을 이용하여 수준별 결과를 분석하였다.

필름 폭과 필름 두께 선정은 생산 규격을 고려하여 최소 35 mm와 최대 50 mm, 2.3 μm 과 3.2 μm 로 설정하였으며 실험 설계에 의해 42.5 mm와 2.8 μm 을 설정하였다. 인덕턴스는 버스바의 구조에 의해 결정되며 양산품 평균 데이터를 고려하여 10 nH를 선정하였고, 수준별 온도 비교를 위해 20 nH와 30 nH를 선정하였다.

Table 1. Box-Behnken design for experiment

Film wide	Ls 10nH	Ls 20nH	Ls 30nH
35 mm	-	2.3 μm	-
	2.8 μm	-	2.8 μm
	-	3.2 μm	-
42.5 mm	2.3 μm	-	2.3 μm
	-	2.8 μm	-
	3.2 μm	-	3.2 μm
50 mm	-	2.3 μm	-
	2.8 μm	-	2.8 μm
	-	3.2 μm	-

2.2.2 실험 및 측정

설계된 실험 조건으로 시편을 제작하였으며 유전체는 Polypropylene으로 필름 소자를 제작하였고, 전도도가 높은 구리 버스바를 소자에 납땜 조립하였다. 그리고, 온도 측정을 위해 필름 표면에 K type센서를 부착하였고, 케이스 내측과 필름 간격을 2.5 mm이격하여 Hard type에폭시를 주

형 하였다. 제작된 시료를 Fig. 1과 같이 챔버내 장착하고 주위 온도를 85°C로 설정하여 포화 하였으며 전류시험기를 통해 주파수와 전류 전압을 인가 하였다. 커패시터에 삽입된 센서를 레코더에 연결하여 측정된 데이터를 저장 하였으며 각 시료별 2시간씩 3회 반복 실험하였다. Table 2에 실험에 적용된 고정 조건을 제시하였다. Capacitance는 실험 가능한 최소 수준, Frequency는 Worst case, Current는 인덕턴스 수준에 따라 50 Arms를 적용하였다. 실험 전류 설정을 위해 40 Arms, 50 Arms, 60 Arms에 대하여 기초 온도 실험을 실시한 결과, 40 Arms는 전류가 낮아 인덕턴스에 따른 온도 분포가 미미하였으며, 60 Arms는 온도가 높아 소손 위험이 있어 제외하였다. Voltage는 배터리 최소 전압, Ambient temperature는 가속 실험 온도를 적용하였다. Fig. 2는 Table 2의 조건으로 실험하기 위한 실험 장치 사진을 나타낸 것이다. 실험한 사진이다. 온도 챔버 내에 시편을 설치하고 조건을 설정하여 온도 결과를 측정하였다.

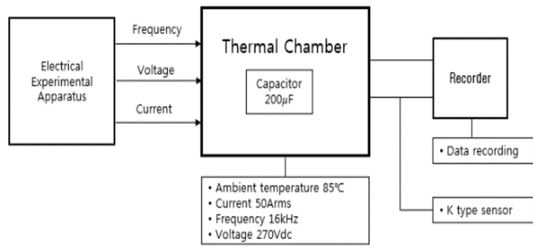


Fig. 1. Schematic diagram of capacitor temperature experiment.

Table 2. Parameter for temperature experiment

Factor	Level	Unit
Capacitance	200	µF, kHz
Frequency	16	kHz
Current	50	Ams
Voltage	270	Vdc
Ambient temp'	85	°C

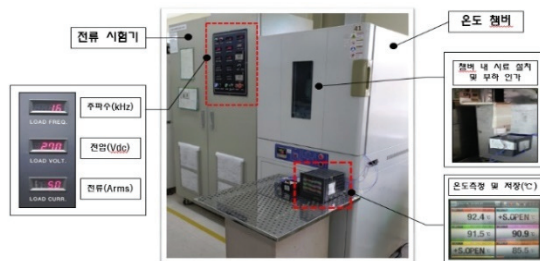


Fig. 2. The Temperature experiment of DC-link capacitor.

3. 실험 결과

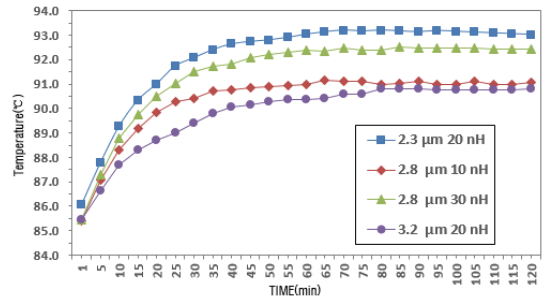


Fig. 3. Film thickness and inductance results for film width 35mm

Table 3. Experimental results of film width 35mm

Item	Max temp'	Δt	Ams/Δt
2.3 µm 20nH	93.0°C	8.0°C	6.3
2.8 µm 10nH	91.1°C	6.1°C	8.2
2.8 µm 30nH	92.4°C	7.4°C	6.8
3.2 µm 20nH	90.8°C	5.8°C	8.6

Fig 3과 Table 3은 필름 폭 35 mm에 대한 온도 실험 결과이다. 필름 폭 35 mm에서는 2.3 µm 20 nH와 2.8 µm 10 nH & 30 nH, 3.2 µm 20 nH를 실험하였다. 최저 온도는 3.2 µm, 20 nH로 Max temperature 90.8°C Δt 5.8°C 전류밀도 8.6 Arms이며, 최대 온도는 2.3 µm 20 nH이고 Max temperature 93.0°C, Δt 8.0°C, 전류밀도 6.3 Arms로 확인되었다. 필름 두께가 증가할수록 Δt는 감소하였으며 전류 밀도는 상승되었다. 동일 조건에서 필름 두께에 따라 온도가 다르게 측정되었는데, 이는 식4에 부합한다고 할 수 있다. 또한, 2.8 µm 10 nH와 30 nH는 인덕턴스에 의한 온도차이를 보였다. 2.8 µm 10 nH는 Max temperature 91.1°C, Δt 6.1°C로 전류밀도 8.2 Arms를 나타냈고, 2.8 µm 30 nH는 Max temperature 92.4°C Δt 7.4°C 전류밀도 3.8 Arms를 나타냈으며, 2.8 µm 30 nH가 1.3°C 높게 확인되었다. 동일 전류 조건에서 발생된 온도 차이므로 기생 인덕턴스에 의한 영향으로 분석된다.

Fig 4와 Table 4는 필름 폭 42.5 mm에 대한 실험 결과이다. 필름 폭 42.5 mm 실험은 2.3 µm 10 nH 2.3 µm 30 nH, 2.8 µm 20 nH, 3.2 µm 10 nH, 3.2 µm 30 nH의 5수준으로 실시하였다. 실험결과 최대 온도는 2.3 µm 30 nH이며 Max temperature 97.1°C, Δt 12.1°C, 전류밀도 4.1 Arms로 확인되었고, 최저 온도는 3.2 µm 10 nH이며 Max temperature 92.1°C, Δt 7.1°C, 전류밀도 7.0 Arms로 확인되었다. 본 실험에서도 35

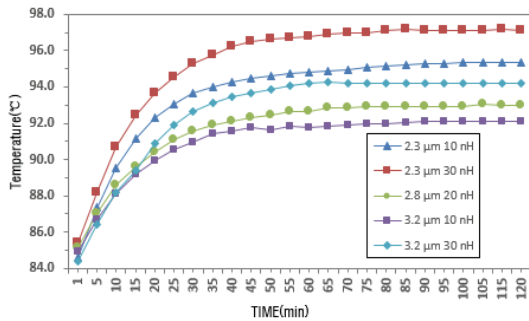


Fig. 4. Film thickness and inductance results for film width 42.5mm.

Table 4. Experimental results of film width 42.5mm

Item	Max temp'	Δt	Arms/Δt
2.3 μm 10nH	95.3°C	10.3°C	4.9
2.3 μm 30nH	97.1°C	12.1°C	4.1
2.8 μm 20nH	93.0°C	8.0°C	6.3
3.2 μm 10nH	92.3°C	7.1°C	7.0
3.2 μm 30nH	94.4°C	9.4°C	5.3

mm와 같이 필름 두께에 따른 온도차이가 발생했으며, 인덕턴스 수준에 따른 온도 차이도 확인할 수 있었다. 특히, 3.2 μm 10 nH와 30 nH 비교 시 10 nH가 23°C 낮았으며, 2.3 μm 10 nH와 30 nH 비교 시 10 nH가 1.8°C 낮았다. 이는 식5를 인용할 수 있는데, 인가되는 전류는 일정하고 인덕턴스의 변화는 임피던스의 크기를 변화시킨다. 버스바의 기생인덕턴스는 임피던스를 증가시켜 발열을 증가시킨다. 또한, 필름 폭 35 mm 결과 대비하여 Max temperature, Δt가 상승 되었으며 전류밀도 (Arms)는 감소하였다. 이는 식2를 인용할 수 있는데, 필름 폭의 증가는 ESR 증가로 이어져 식3과 같이 전력손실이 높아진다는 것을 확인할 수 있다.

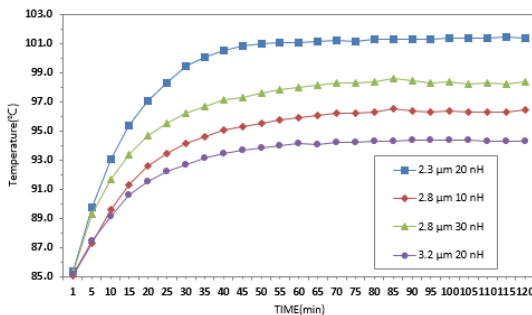


Fig. 5. Film thickness and inductance results for film width 50mm.

Table 5. Experimental results of film width 50mm

Item	Max temp'	Δt	Arms/Δt
2.3 μm 20nH	101.4°C	16.5°C	3.0
2.8 μm 10nH	96.4°C	11.0°C	4.5
2.8 μm 30nH	98.4°C	13.4°C	3.7
3.2 μm 20nH	94.3°C	9.4°C	5.3

Fig 5는 필름 폭 50 mm에 대한 실험 결과이다. 필름 폭 50 mm 실험은 2.3 μm 20 nH, 2.8 μm 10 nH, 2.8 μm 30 nH, 3.2 μm 20 nH 4수준으로 실시하였다. 본 실험은 필름 폭 35 mm와 42.5 mm 실험 결과 대비 온도가 높게 측정되는데, 필름 폭 증가로 인한 ESR상승으로 발열량이 증가한 것으로 분석된다. 최대 온도 조건은 2.3 μm 20 nH로 Max temperature 101.4°C를 기록하였으며, Δt는 16.5°C로 매우 높았다. 또한, 전류 밀도는 3.0 Arms로 가장 낮았다. 최저온도 3.2 μm 20 nH이며 Max temperature 은 94.3°C, Δt 9.4°C, 전류밀도 5.3 Arms로 측정되었다. 그러나 필름 폭 50 mm에서 최적 조건은 필름 폭 35 mm의 Worst 조건인 2.3 μm 20 nH보다 높다. 이는 3가지 인자 중 필름폭이 발열에 가장 많은 영향을 미친다고 할 수 있다. 또한, 2.8 μm 10 nH와 30 nH는 인덕턴스에 대한 결과를 보이고 있는데, 10 nH는 Max temperature 96.4°C, Δt 11.0°C, 전류밀도 4.5 Arms이고, 2.8 μm 30 nH는 Max temperature 98.4°C, Δt 13.4°C, 전류밀도 3.7Arms를 나타냈다. 인덕턴스가 높은 30 nH수준이 약 2°C 높았다. 50 mm 실험 결과에서도 식 3을 인용할 수 있는데 필름 폭 증가에 따른 ESR 증가를 온도 결과로 확인할 수 있었다. 또한, 식5를 인용할 수 있으며, 인덕턴스 증가와 임피던스 증가에 따른 온도 변화를 실험 결과로 확인할 수 있었다

4. 결과 분석

4.1 ANOVA 분석

설계 변수에 따른 온도특성분석을 위해 실험결과와의 분산분석을 수행하였다. Table 6의 분산분석결과 선형 3인자의 F-값이 다른 요인들에 비해 매우 큰 결과를 나타내었는데, 특히 필름 폭은 1101.65, 필름 두께는 451.64로 매우 높게 분석되었고, 설계변수 3인자와 제곱 항의 P-값이 모두 0.000으로 유의 수준을 나타내었다. 또한, 2차 교호작용에서 필름 폭과 필름 두께의 P-값이 0.05이하로 유의한 결과를 보였으나, 필름 폭과 인덕턴스, 필름 두께와 인덕턴스의 교호작용은 P-값이 0.114와 0.592로 0.05보다 높아 유의하지 않은 결과를 보인다. 모형과 데이터의 적합 정도를 나타내는 S는 매우 낮았고, R제곱98.17%, R제곱(수정)97.69%, R제곱(예측) 96.74%로 높게 분석되어 실험의 높은 적합도를 나타내었다.

Table 6. Response surface analysis results for three factors

Source	DF ₁	Adj SS ₂	Adj MS ₃	F-Value ₄	P-Value ₅
Model	9	342.338	38.038	208.21	0.000
Linear	3	301.797	100.599	550.65	0.000
Width	1	201.260	201.260	1101.65	0.000
Thick.	1	82.510	82.510	451.64	0.000
Induc.	1	18.027	18.027	98.67	0.000
Square	3	23.440	7.813	42.77	0.000
width*width	1	8.240	8.240	45.10	0.000
Thick.*Thick.	1	12.116	12.116	66.32	0.000
Induc.*Induc.	1	6.582	6.582	36.03	0.000
2-Way Interaction	3	17.101	5.700	31.20	0.000
width*thick.	1	16.567	16.567	90.69	0.000
width*Induc.	1	0.480	0.480	2.63	0.114
Thick.*Induc.	1	0.053	0.053	0.29	0.592
Error	35	6.394	0.183		
Lack-of-Fit	3	5.421	1.807	59.41	0.000
Pure Error	32	0.973	0.030		
Total	44	348.732			

- 1) DF : Degree of freedom
- 2) Adj SS : Sum of squares
- 3) Adj MS : Mean of square
- 4) F-Value : MSTR/MSE
- 5) P-Value : The criterion for determining the significance level and the reference value is less than 0.05

4.2 표면도 분석

실험결과에 대한 각 인자들에 따른 온도 변화를 확인하기 위해 표면도 분석을 수행하였다. Fig. 6은 필름 폭과 두께 변화에 따른 온도 분포를 나타낸 것이다. 표면도 분석결과, 필름 폭이 증가하고 필름 두께가 감소할 경우 온도는 상승하는 것을 확인할 수 있다. 필름 폭과 두께는 온도 상승과 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있다. Fig. 7과 같이 커패시터의 전류밀도에 대한 표면도분석을 실시하였다. 필름 폭이 감소하고 필름 두께가 증가되면 커패시터에 인가할 수 있는 전류 밀도는 상승되는 것으로 나타났다. 반면, 필름 폭 증가와 필름 두께 감소의 경우는 전류 밀도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

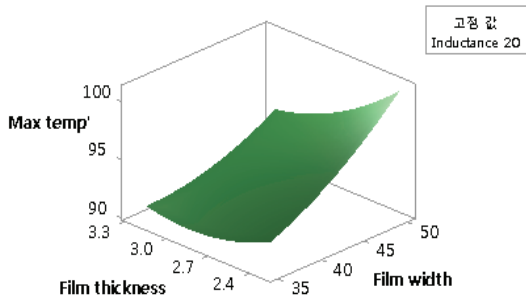


Fig. 6. Response surface analysis results for max temperature versus film thickness and film width.

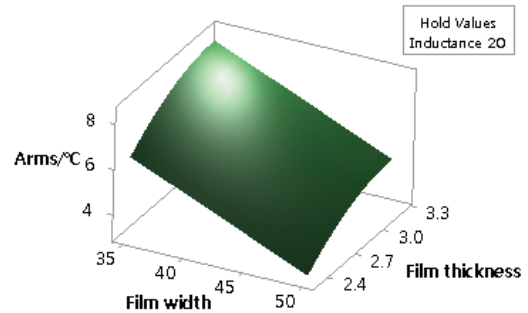


Fig. 7. Response surface analysis results for Arms / Δt versus film thickness and film width.

4.3 최적화 조건 도출

발열 최소화를 위한 설계변수들의 최적조건을 도출하였다. 설계 변수는 필름 폭 35 mm, 필름 두께 3.2 μm 인덕턴스 10.2 nH전류밀도 8.9375Ams/Δt의 조건을 도출하였으며 예측된 최대 반응 값은 y=8.9376이다. 이는 표면도 Max temperature와 Δt, Arms/Δt 동일한 결과이다. 95% 신뢰구간(CI: Confidence interval)은 최저 8.7467, 최대 9.1284이고, 95% 예측구간(PI: Predict interval)은 최소 8.5958, 최대 9.2793으로 예측되었다. 또한, 도출된 최적화 조건의 시료를 제작하여 동일조건으로 온도 실험을 실시하였으며 Fig. 8과 Table 6과 같은 결과를 나타냈다. 실험 결과 대비 도출된 최적화 조건의 정확도를 비교하면 HOT SPOT은 99.45%, Δt는 91.07%, 전류밀도(Ams/Δt)는 91.12%를 나타냈다.

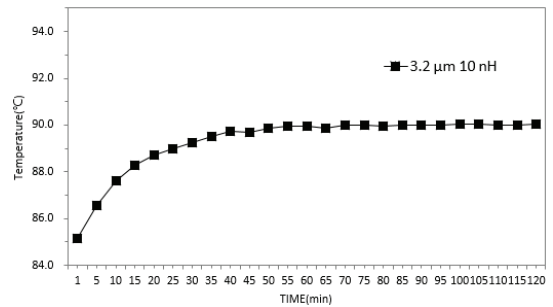


Fig. 8. Temperature test results for optimization conditions

Table 6. Experimental results of film width 50mm

Item	Max temp'	Δt	Ams/Δt
Optimization results (Est)	90.6°C	5.6°C	8.93
Test results	90.1°C	5.1°C	9.80
Accuracy	99.45%	91.07%	91.12%

5. 결 론

본 논문에서는 DC-link capacitor의 필름 형상에 따른 Joule-heat를 분석하였다. ESR과 밀접한 관련이 있는 필름 폭은 증가하고 필름 두께는 낮을수록 발열량이 증가됨을 실험을 통해 확인하였다. 인덕턴스는 수준에 따라 총 임피던스가 증가되고 전류의 흐름을 방해하여 온도의 변화가 발생하는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 또한, Box-Behnken법을 통해 인자들의 분산분석을 실시한 결과 선형인자들의 유의 수준이 매우 높았다. 특히, 필름 폭과 필름 두께의 인자가 발열에 많은 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었고, 인자별 효과분석을 통해 타당성을 검증하였다. 커패시터는 적정온도 이내에서 사용할 수 있는 최대의 전류밀도(Arms/△t)를 필요로 하는데 표면도 분석을 통해 방향성을 확인할 수 있었다. 변수로 설정된 필름 폭, 필름 두께, 인덕턴스에 대하여 실험 및 분산 분석한 결과 모든 인자가 온도에 영향을 미치는 것을 확인하였으며 필름 두께와 필름 폭의 교호작용이 발생함을 확인하였다. 최대전류밀도(Arms/△t)의 최적 조건 도출 결과 필름 폭35 mm 필름 두께 3.2 μm 인덕턴스 10.2 nH 도출되었고 실험결과 91.12%의 높은 정확도를 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2019년 중소벤처기업부의 기업연계형 연구개발 인력양성사업(S2755803)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

1. Seoksan Shin, Hyeongjin Ham, Hyeongcheol Lee, "Lifetime prediction of DC-Link film capacitors using stochastic methods", Journal of the Korean Society Automotive Engineers, pp.792-798, 2013.
2. Jun-su, Kim, Kil-sang Jang, Kyung-seok Cho, "Induction Coolant Heater for EV", Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, pp.1516-1521, 2017.
3. Dongyoon Noh, Seokjeong Yoo, Jaecun Kang, Hyungtae Moon, "A Link Capacitor Design for On-Board Charger Considering Life-time and Heat-dissipation in Electric vehicles", Journal of the Korean Society Automotive Engineers, pp.2378-2381, 2012.
4. KyoHyeon Kim, TW Kim, MG Woo, BJ Jeon, HG Choi, "A Numerical Study on the Effect of Battery-pack Shape of Electric Vehicle on the Forced Convection Around Battery Cells", Journal of the Semiconductor and Display Technology, Vol.16, No.1, 2017.
5. SY. Won, KJ.Lee, HS.Kim, "Analysis of Parameter Characteristic of Parallel Electrodes Conduction-cooled Film Capacitor for HF-LC Resonance", Journal of the Institute of Electronics Engineers, Vol.53, No.6, pp.155-166, 2016.
6. JH.Kim, KR.Kim, CY.Oh, JP.Lee, TJ.Kim, "Review of Failure Mechanism of Film capacitor for DC-Link Applications in Power Electronic Converters", Journal of the Power Electronics, pp.364-365, 2019.
7. SJ.Lee, S.Lee, PS.Kim, CH.Yang, HY.Park, NK.Min, "Self-Healing Characteristics of Polypropylene Films Capacitor", Journal of the Electrical Engineering & Technology, pp.2049-2051, 2005.
8. C.Yang, D.Park, Y.Jeon, G.Kang, D.Han, "DC Link Capacitor development for HEV Inverter", Journal of the Korean Society Automotive Engineers, pp.2066-2070, 2008.
9. Hyun-Soo Park, "The study on DC-Link Film Capacitor in 3 Phase Inverter System for the Consideration of Frequency Response", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol.19, No.4, pp.117-122, 2018.
10. Janet Ho, "Effects of Dielectric Material Properties on Metalized Film Capacitor Performance", Institute of Electrical and Electronics Engineers, 10.1109/ICD, 7547770, 2016.
11. Shumei Cui, Lei Hu, Chao Zhang, Shouliang Han, Wei Zhang, "Research on Temperature Characteristic of DC-Link Capacitor Applied in Electric Vehicles", Institute of Electrical and Electronics Engineers, 10.1109/ITEC-AP, 6940992, 2014.
12. Il-Hyoung Cho, Nae-Hyun Lee, Soon-Woong Chang, "Analysis of Characteristics and Optimization of Photo-degradation Condition of Reactive Orange 16 Using a Box-Behnken Method", Journal of Korean Society of Environmental Engineers, Vol 28, No.9, pp.917-925, 2006

접수일: 2020년 3월 5일, 심사일: 2020년 3월 11일,
게재확정일: 2020년 3월 18일