

# 가혹온도조건에서 DC/DC 변환기 전력손실모델의 실험적 검증

## Experimental Verification of DC/DC Converter Power Loss Model in Severe Temperature Condition

노명규<sup>1,✉</sup>, 김선영<sup>2</sup>, 박영우<sup>1</sup>, 정두환<sup>3</sup>  
Myounggyu Noh<sup>1,✉</sup>, Sunyoung Kim<sup>2</sup>, Young-Woo Park<sup>1</sup>, and Doo-Hwan Jung<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 충남대학교 메카트로닉스공학과 (Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University)

<sup>2</sup> 충남대학교 차세대기판학과 (Department of Advanced Circuit Substrate Engineering, Chungnam National University)

<sup>3</sup> 한국에너지기술연구원 수소전지연구센터 (Fuel Cell Research Center, Korea Institute of Energy Research)

✉ Corresponding author: mnoh@cnu.ac.kr, Tel: +82-42-821-6877

Manuscript received: 2014.12.26. / Revised: 2015.4.10. / Accepted: 2015.4.14.

*This paper deals with an experimental verification of a temperature-dependent power loss model of a DC/DC converter in severe temperature conditions. The power loss of a DC/DC converter is obtained by summing the losses by the components constituting the converter including switching elements, diodes, inductors, and capacitors. MIL-STD-810F stipulates that any electronic devices must be operable in the temperature ranging from  $-50^{\circ}\text{C}$  to  $70^{\circ}\text{C}$ . We summarized the temperature-dependent loss models for the converter components. A SEPIC-type converter is designed and built as a target. Using a constant-temperature chamber, a test rig is set up to measure the power loss of the converter. The experimental results confirm the validity of the loss model within 4.5% error. The model can be useful to predict the efficiency of the converter at the operating temperature, and to provide guidelines in order to improve the efficiency.*

KEYWORDS: DC/DC converter (DC/DC 변환기), Power loss (전력 손실), Efficiency (효율)

### 기호설명

$P$  = power loss

$I$  = electric current

$V$  = voltage

$T$  = temperature

$Q$  = charge

$C$  = capacitance

$L$  = inductance

$R$  = resistance

$\eta$  = efficiency

rms = root-mean-square

ESR = equivalent series resistance

### 1. 서론

DC/DC 변환기(DC/DC converter)는 일정범위의 DC전원을 사용자가 원하는 DC전원으로 변환해주는 전력변환기로 가정용 기기에서부터 특수목적의 군용장비까지 전력변환이 요구되는 다양한 분야에

활용되고 있다. DC/DC 변환기의 광범위한 활용만큼 변환기의 효율이 중요하다. 변환기에서의 손실은 전체 시스템의 효율에 직접적 영향을 미친다.

DC/DC 변환기의 전력변환 효율에 관한 기존 연구는 변환기가 작동하는 환경의 온도를 고려하지 않는다.<sup>1</sup> 그러나 변환기의 효율은 온도에 따라 영향을 받으며 이는 DC/DC 변환기를 구성하고 있는 소자의 특성이 온도에 따라 달라지기 때문이다. 따라서 DC/DC 변환기의 온도변화에 따른 전력손실 혹은 전력변환 효율은 DC/DC 변환기의 작동하는 환경의 온도를 고려하여 평가되어야 한다.

예를 들어 DC/DC 변환기가 극지방에 사용되는 경우, 작동온도는  $-5^{\circ}\text{C}$ 에서  $-40^{\circ}\text{C}$ 가 되며 DC/DC 변환기의 전력변화 효율은 이러한 환경온도를 고려하여야 한다.<sup>2</sup> 또한 극지 혹은 한랭대에 설치되는 태양전지 시스템의 전력변환성능을 정확하게 예측하려면 DC/DC 변환기의 온도에 따른 효율변화를 고려하여야 한다.<sup>3</sup> 군사장비의 경우, 군 특성상 척박한 기후조건에서의 작동이 필수적이며 이러한 이유로 미국방 환경시험 규격 MIL-STD-810F에서 모든 군용전자장비가  $-50^{\circ}\text{C}$ 에서  $70^{\circ}\text{C}$ 까지 동작성능이 보장되도록 규정하고 있다.<sup>4</sup>

MIL-STD-810F에서 제시하는 온도범위에서 DC/DC 변환기의 전력손실에 대해 연구한 결과는 극히 드물다. 우주선에 사용되는 DC/DC 변환기의 성능에 대해 NASA에서 연구한 결과는 보고된 바 있으나, 우주 환경의 온도범위인  $-100^{\circ}\text{C}$ 에서  $-200^{\circ}\text{C}$ 의 극저온 상태에서 DC/DC 변환기의 성능에 대해 다루었다. MIL-STD-810F의 온도범위인  $-50^{\circ}\text{C}$ 에서  $70^{\circ}\text{C}$ 에서는 저항성분의 선형적 변화가 유효하므로, 다양한 기술자료에서 제시하는 전력손실모델을 사용하여 DC/DC 변환기의 전력변환 효율을 예측할 수 있다. 이러한 이유로 영점 이하의 온도 특히  $-32^{\circ}\text{C}$  이하의 온도에서 전력손실모델이 실험적으로 검증된 바가 없다. 그러나 예측만으로는 극도의 신뢰도가 요구되는 군용 장비에 적용할 수 없으며 환경시험 규격을 만족할 수 없으므로 실험을 통한 검증이 반드시 필요하다. 또한 온도에 따른 효율 변화 예측이 유효하려면 온도변화에 강건한 소자들로 DC/DC 변환기를 구성하여야만 가능하다.

본 논문에서는 MIL-STD-810F에서 제시하는 가혹온도조건에 적합한 DC/DC 변환기의 소자를 간략하게 정리하고, 일관된 틀 안에서 작동 온도를 고려한 DC/DC 변환기의 전력손실 모델을 수립하

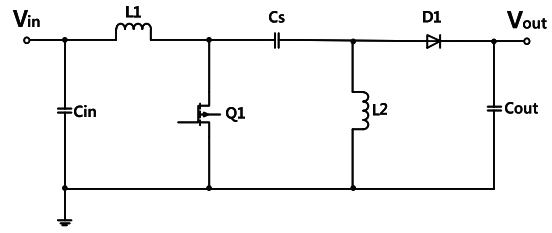


Fig. 1 Circuit schematic of SEPIC

고자 한다. 또한 수립된 전력손실 모델을 가혹 온도 환경에서 실험적으로 검증하고자 한다. 본 논문에서 사용된 DC/DC 변환기 형태는 SEPIC(Single Ended Primary Inductor Converter)이다.

## 2. 온도를 고려한 전력손실모델

### 2.1 SEPIC

SEPIC은 출력전압보다 높거나 낮은 입력전압으로부터 출력전압을 일정하게 조절하여 제공하는 DC/DC 변환기 토폴로지이다. 스위치역할을 하는 MOSFET의 PWM 신호 듀티비를 조절하여 넓은 범위의 입력전압으로부터 일정한 출력전압을 내어 준다. 두 개의 인덕터를 사용하여 실장면적을 많이 차지하는 단점이 있지만, 최근 출시되고 있는 동축구조의 이중결합인덕터(Coupled coaxial inductor)를 사용하면 실장면적을 줄일 수 있으며 인덕턴스 용량도 절반으로 줄일 수 있다. 본 논문에서는 커플링된 인덕터를 사용하여 SEPIC을 설계하였다.<sup>5</sup>

Fig. 1에서는 SEPIC 변환기의 간단한 회로가 나타나 있다. 입력 커패시터  $C_m$ , 출력 커패시터  $C_{out}$ , 커플링 인덕터  $L_1$ 과  $L_2$ , AC 커플링 커패시터  $C_s$ , 전력 MOSFET  $Q_1$ , 다이오드  $D_1$  등으로 구성되어 있다.

### 2.2 수동소자 선택

가혹온도조건에서 전자장비들을 사용하기 위해서는 수동소자부품이 가혹온도에 대하여 강건해야 한다. 수동소자는 그 구성소재에 따라 온도에 따른 특성이 달라진다. 따라서 가혹온도에서 가장 강건한 특성을 보이는 수동소자를 선택하여 사용하는 것이 중요하다.

커패시터의 경우, Ceramic 소재의 커패시터가 온도변화에도 커패시턴스 변화가 작고 DF(Dissipation Factor)가 가장 안정적이므로 온도에 강건하다.<sup>6</sup> 인덕터의 경우, 코어를 Moly Permalloy 소

재로 하면 온도변화에도 인덕턴스 변화가 없어 강건하나,<sup>7</sup> 코어 손실로 인해 고주파 회로에서는 ferrite core를 주로 사용한다.

**2.3 전력손실 모델**

DC/DC 변환기의 전력손실은 스위칭소자  $Q$  의 전력손실, 다이오드  $D_1$  의 전력손실, 인덕터 ( $L_1, L_2$ ) 의 전력손실, 캐패시터 ( $C_{in}, C_s, C_{out}$ ) 의 전력손실, 변환기 제어기 입력을 위한 전류측정용 저항에 의한 손실 등을 합하여 구할 수 있다.

**2.3.1 스위칭 소자의 전력 손실**

스위칭소자인 MOSFET의 전력손실은 Conduction loss, Switching loss, Driving power loss, Output capacitance loss로 구분할 수 있다. Conduction loss는 MOSFET의 On상태일 때 도통되어 Drain과 Source 사이의 온저항  $R_{DS(on)}$  과 Drain 전류의 rms값  $I_{Ql(rms)}$  에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{Ql(con)} = R_{DS(on)} I_{Ql(rms)}^2 \quad (1)$$

온저항은 온도의 함수이며, 작동온도 범위 내의 온도에서 다음과 같은 근사식으로 구할 수 있다.

$$R_{DS(on)}(T) = R_{DS(on)}(T_0) \cdot (1 + \alpha)^{T-T_0} \quad (2)$$

식(2)에서  $T_0$  는 기준온도이며 온도계수  $\alpha$  는 MOSFET 제조사의 데이터시트를 통해 얻을 수 있다.<sup>8</sup>

Switching loss는 턴온 천이상태와 턴오프 천이상태에서 발생하는 손실로 MOSFET의 드레인과 소스 양단에 하강(상승)전압과 상승(하강)전류가 교차하면서 에너지 중복이 생겨 발생하는 손실이며 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>9</sup>

$$P_{Ql(sw)} = \frac{1}{2} V_{Ql} I_{Ql(peak)} (t_r + t_f) F_{sw} \quad (3)$$

식(3)에서  $V_{Ql}$  은 MOSFET에 걸리는 전압,  $I_{Ql(peak)}$  는 전류의 피크값,  $t_r$  은 켜지는 시간,  $t_f$  는 꺼지는 시간,  $F_{sw}$  는 스위칭 주파수이다.

Driving power loss는 MOSFET의 게이트를 충전하며 발생하는 손실이며, 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{Ql(dr)} = Q_g V_{gs} F_{sw} \quad (4)$$

여기서  $Q_g$  는 게이트 전하량,  $V_{gs}$  는 게이트 구동 전압이다.

Output Capacitance Loss는 출력 단의 캐패시턴스 충전현상에 의해서 발생하는 손실이며 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{Ql(cap)} = V_{Ql}^2 C_{ds} F_{sw} \quad (5)$$

식(5)에서  $C_{ds}$  는 MOSFET의 드레인과 소스 사이의 전압에 의존하는 비선형적 접합캐패시턴스이나 본 논문에서는 상수로 가정하였다.<sup>10</sup>

**2.3.2 다이오드의 전력 손실**

DC/DC 변환기의 출력 쪽에 위치한 다이오드에 의해서도 손실이 발생한다. 다이오드는 공핍영역을 갖고 있는데, 전류가 공핍영역을 가로질러 흐르면서 장벽전압에 의해  $V_{fwd}$  의 전압강하가 생기면서 손실이 발생한다. 다이오드 손실은 일반적으로 다음과 같다.

$$P_{D1} = V_{fwd} I_{D1(mean)} \quad (6)$$

여기서  $I_{D1(mean)}$  은 다이오드에 흐르는 평균 전류이며, DC/DC 변환기의 출력 전류와 같다.<sup>11</sup>

**2.3.3 인덕터의 전력 손실**

인덕터에서 일어나는 전력손실은 코어에 관련된 전력손실과 인덕터의 와인딩에 관련된 전력손실의 두 가지 형태로 발생한다.

인덕터의 코어손실은 스위칭 사이클 동안 코어 내의 자기 에너지 변화에 의해 발생하는 에너지 손실이다. 코어손실은 제조사마다 각기 다른 방법으로 제공하므로 데이터시트를 확인하여 코어손실에 대한 적절한 추정이 필요하다.<sup>12</sup>

인덕터의 와인딩손실은 코일 와인딩의 저항 및 인덕터에 흐르는 rms 전류에 의한 것이다.

$$\begin{aligned} P_{L1} &= I_{L1(rms)}^2 R_L \\ P_{L2} &= I_{L2(rms)}^2 R_L \end{aligned} \quad (7)$$

$R_L$  은 인덕터의 와인딩 저항이며, 데이터시트로부터 제공된다. 저항성분이므로 온도변화에 따른 변화를 고려하여야 한다.

**2.3.4 캐패시터의 전력 손실**

캐패시터에서 발생하는 손실은 캐패시터의

ESR(Equivalent Series Resistance)이 고려되어야 한다. 캐패시터의 손실은 대부분 전류의 RMS값에 의해 ESR에서 열로 발생한다.  $C_s$ ,  $C_{out}$ ,  $C_{in}$  3개 캐패시터의 손실은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{Cs} &= I_{Cs(rms)}^2 R_{Cs} \\ P_{Cout} &= I_{Cout(rms)}^2 R_{Cout} \\ P_{Cin} &= I_{Cin(rms)}^2 R_{Cin} \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)에서 각 캐패시터의 ESR은 제조사가 제공하는 데이터로부터 구한다.

### 2.3.5 제어기 전류감지저항에서의 손실

변환기에서 출력전류 제어를 위해 전류감지 저항  $R_{sense}$ 가 사용되며, 이 또한 저항 성분이므로 전력 손실이 발생한다. 전류감지저항의 전력손실은 다음과 같다.<sup>13</sup>

$$P_{R_{sense}} = D \left( \frac{I_{out}}{1-D} \right)^2 R_{sense} \quad (9)$$

여기서  $D$ 는 듀티비이며,  $I_{out}$ 은 출력 전류이다.

## 3. 실험 방법

본 논문에서는 IEC-60068-2-1 환경시험방법 통칙에 의거하여 온도에 따른 성능변화를 측정하였다. 균일한 온도환경 조성을 위하여 항온항습기(PSL-2KPH, ESPEC, Korea)를 사용하였으며, 전력공급기(U8031A, Agilent, USA)로 DC전력을 공급하였다. 전압, 전류 및 저항 측정은 6% 유효숫자의 정확도를 가진 멀티미터(34401A, Agilent, USA)를 사용하였다.

실험을 위하여 정격출력 24W (12V/2A) DC/DC 변환기를 설계 제작하였다. 변환기의 입력 전압 범위는 8V에서 24V까지이며 스위칭 주파수는 620 kHz를 사용하였다. 변환기의 제어기로는 LM5022 (Texas Instrument, USA)를 사용하였으며 전류감지 저항  $R_{sense}$ 는 160ppm/°C의 온도상수를 가진 47mΩ을 사용하였다. 변환기를 이루는 소자의 특성과 파라미터 값은 표 1에 정리되어 있다.

### 3.1 MOSFET 온저항 측정 실험

식(2)로 표현되는 MOSFET 온저항(on-state resistance)의 온도 모델은 근사식이며 이를 실험적

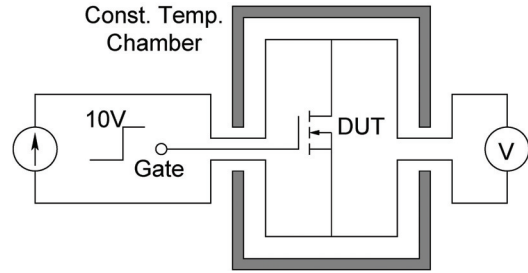


Fig. 2 Test setup for measuring the on-state-resistance

Table 1 Parameters of converter components

MOSFET (BSC340N08NS3, Infineon)	Turn-on time	$t_r$	3 ns
	Turn-off time	$t_f$	2 ns
	Gate charge	$Q_g$	6.8 nC
	Junction capacitance	$C_{ds}$	170 pF
Diode (MBRD5H100, On Semiconductor)	Forward drop	$V_{fwd}$	0.68 V
Inductor (DRQ125-4R7-R, Coiltronics)	Winding resistance	$R_L$	37 mΩ (0.8%/°C)
Capacitor ESR	Input	$R_{Cin}$	100 mΩ
	Coupling	$R_{Cs}$	50 mΩ
	Output	$R_{Cout}$	10 mΩ

으로 검증하기 위해 실험을 진행하였다. Fig. 2는 실험장치의 개략도로서 변환기에 사용한 소자와 동일한 스위칭 소자(BSC340N08NS3, Infineon, Germany)를 사용하였다. 4-Wire 측정방식을 이용하여 연결선의 저항에 따른 전압 강하를 보정하였다. 전력공급기로 100mA의 전류를 인가한 상태에서 MOSFET의 Gate에 10V 신호를 인가하면 MOSFET은 On 상태가 되고, 이 때의 전압강하를 멀티미터로 측정하여 Ohm의 법칙에 따라 저항을 구한다.

### 3.2 변환기의 전력손실 측정 실험

참고 문헌<sup>14</sup>에 제시된 온도에 따른 DC/DC 변환기의 성능시험방법에 따라 최대정격부하상태에서 입력전압을 가변 시키며 변환기의 입력 전류를 측정하였다. Fig. 3은 실험장치의 구성도이며 Fig. 4는 실험 장치의 실제 구현 상황을 사진으로 보여준다. 24W(12V/2A)의 최대정격부하는 전자부하(PLZ164W, Kikusui, Japan)을 이용하여 구현하였다. 항온시험기의 체적을 고려하면 DC/DC 변환기의

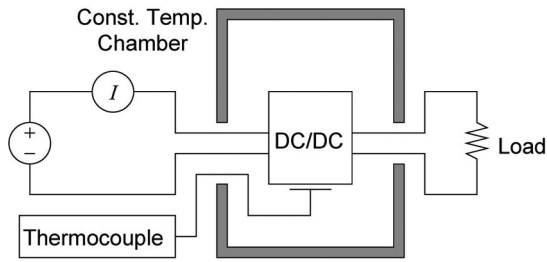


Fig. 3 Test setup for measuring the converter power loss while varying temperature



Fig. 4 Picture of the test setup for power loss measurement

국부적 온도와 챔버의 온도간에 차이가 발생할 수 있으므로, Type-K의 열전쌍(thermocouple)을 이용하여 변환기의 온도를 측정하고, 열평형 상태를 확인하였다. 입력 전압과 입력 전류는 멀티미터를 이용하여 측정하였고, 출력 전압과 출력 전류는 전자부하의 측정 기능을 활용하였다. 전력손실 및 전력변환율은 측정결과를 바탕으로 식(10)과 (11)과 같이 계산할 수 있다.

$$P_{loss} = V_{in} I_{in} - V_{out} I_{out} \quad (10)$$

$$\eta = \frac{V_{out} I_{out}}{V_{in} I_{in}} \quad (11)$$

오차분석을 통해 전력손실 및 효율 계산의 정확성을 확인하였다. 예를 들어, 식(11)로부터 측정 오차에 따른 효율 계산의 오차는

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = \sqrt{\left(\frac{\Delta V_{out}}{V_{out}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_{out}}{I_{out}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_{in}}{V_{in}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_{in}}{I_{in}}\right)^2} \quad (12)$$

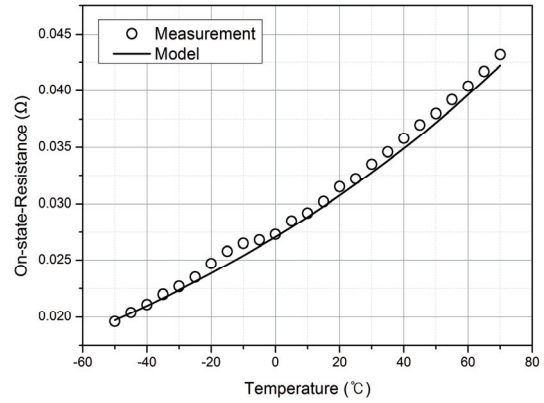


Fig. 5 Comparison between the approximate model and the measurements of MOSFET on-state-resistance

와 같이 구할 수 있다. 계측기의 전압과 전류 오차를 이용하여 효율 계산의 오차를 계산하면 0.22%로서 측정 방법이 적절함을 확인하였다.

#### 4. 결과 및 토의

##### 4.1 MOSFET 온저항 측정 결과

Fig. 5는 온저항 온도모델과 실제 측정된 온저항을 비교한 그래프이다. 모델과 측정 결과 간의 최대 오차는 2% 이내로서 근사 모델 (2)의 유효성을 확인하였다.

##### 4.2 변환기의 전력손실 측정 결과

앞서 기술한 측정 방법에 따라 측정된 결과를 전력 손실과 전력변환율 형태로 표현하면 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다.

온도가 올라 갈수록 저항이 증가하고 이에 따라 전력손실은 증가하고, 전력변환율은 감소할 것으로 예상할 수 있으며, 측정 결과 또한 예상과 일치한다. 입력전압이 올라 갈수록 입력 전류가 감소하게 되므로 전력 손실은 줄어들어 변환율은 상승한다. 최대 전력손실은 8V 입력전압, 70°C에서 4.92W가 손실되었다. 최저 전력손실은 24V 입력전압, -50°C에서 2.57W가 손실되었다.

Fig. 8, 9, 10은 앞서 기술한 변환기 전력손실 모델과 측정 결과를 비교한 그래프이다. Fig. 8은 입력전압이 8V인 경우, Fig. 9는 16V, Fig. 10은 24V 경우이다. 전체적으로 측정결과는 전력손실 모델과 일치하며, 온도에 따른 변화의 경향도 매우 유

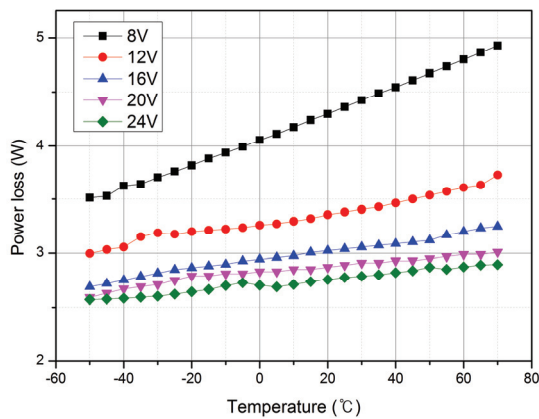


Fig. 6 Converter power loss at several input voltages while varying temperatures

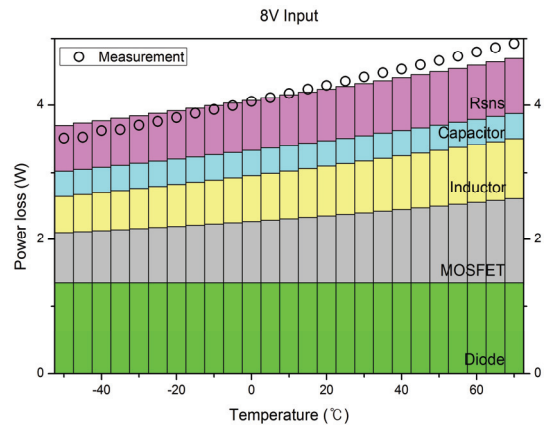


Fig. 8 Power loss comparisons between the model and the measurements at 8V input

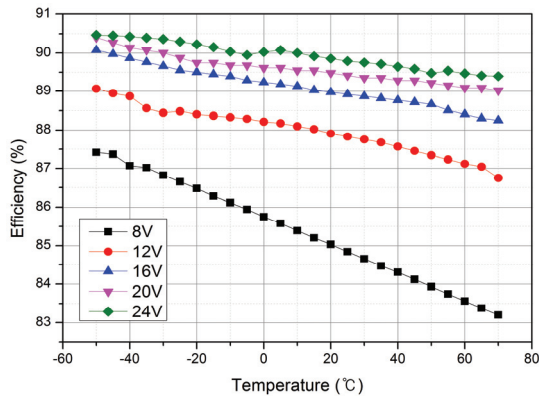


Fig. 7 Converter efficiency at several input voltages while varying temperatures

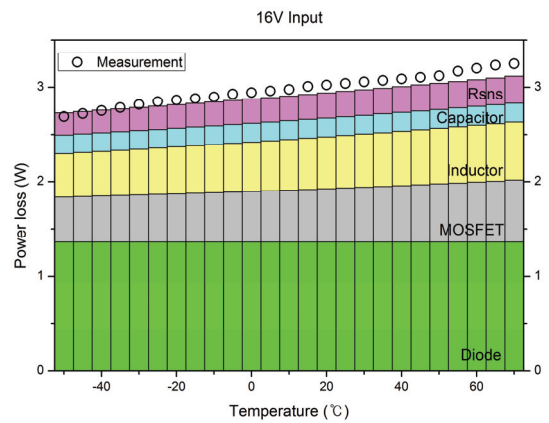


Fig. 9 Power loss comparisons between the model and the measurement at 16V input

사하다. 측정결과와 모델 간의 오차는 온도에 따라 증가하는 경향을 보이며, 이는 전류감지저항과 연결선의 저항이 온도에 따라 변하나 이를 모델에 반영하지 않아 발생한 것으로 보여진다. 최대 오차는 4.5% 이내이다.

전력손실모델의 유효함이 실험적으로 검증되었으므로, 변환기의 각 부분이 전체 전력 손실에서 차지하는 비중 분석과, 변환기의 효율 향상을 위한 설계에 전력손실 모델을 활용할 수 있다. 전체 전력손실에서 식(1), (3), (4), (5)에 의한 MOSFET이 차지하는 부분, 식(6)에 의한 DIODE 손실, 식(7)에 의한 인덕터 손실, 식(8)에 의한 캐패시터 손실, 식(9)에 의한 전류감지저항 손실 등이 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10에 표시되어 있는데, 다이오드에 의한 손실이 모든 경우에 가장 큰 부분을 차지한다. 다이오

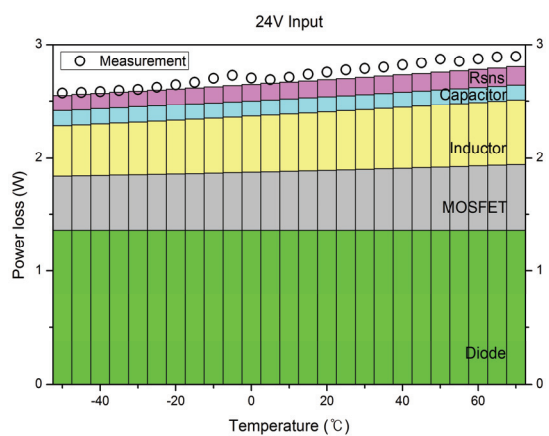


Fig. 10 Power loss comparisons between the model and the measurements at 24V input

드에 의한 손실은 입력 전압이 높아질수록 전체 손실에서 차지하는 비중이 커진다. 이에 비해 MOSFET의 온저항에 따른 손실은 입력 전압이 높아질수록 그 비중이 낮아지지만, 온도가 올라갈수록 비중이 높아진다. 변환기 제어기의 전류제어를 위한 감지 저항에 의한 손실은 입력 전압이 낮을수록 비중이 커지며 온도에 따른 변화 폭은 크지 않다.

## 5. 결론

본 논문에서는 SEPIC 토폴로지의 DC/DC변환기의 전력손실모델을 구하고 -50℃에서 70℃까지 가혹조건을 포함하는 온도변화에 따른 전력손실모델의 유효성을 실험을 통해 검증하였다. 모델과 실험 간의 최대 오차는 4.5% 이내로서 넓은 온도 범위에서 변환기의 전력손실 혹은 효율을 예측하는데 효과적임을 확인하였다. 작동온도에 따른 효율을 예측하고 효율 향상을 위한 변환기 소자 선택에 전력손실모델이 활용될 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소 지원으로 수행되는 차세대 군용전원 특화연구센터사업의 일환으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

1. Eberle, W., Zhang, Z., Liu, Y.-F., and Sen, P. C., "A Practical Switching Loss Model for Buck Voltage Regulators," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, No. 3, pp. 700-713, 2009.
2. Datta, B., Velayutham, G., and Goud, A. P., "Fuel Cell Power Source for a Cold Region," Journal of Power Sources, Vol. 106, No. 1, pp. 370-376, 2002.
3. Pasonen, R., Mäki, K., Alanen, R., and Sipilä, K., "Arctic Solar Energy Solutions," VTT Technology, Vol. 15, 2012.
4. MIL-STD-810F, "Department of Defense Test Method Standard: Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests," 2000.
5. Falin, J., "Designing DC/DC Converters based on SEPIC Topology," Analog Applications, pp. 19-20, 2008.
6. Hammoud, A., Gerber, S., Patterson, R., and MacDonald, T., "Performance of Surface-Mount Ceramic and Solid Tantalum Capacitors for Cryogenic Applications," Proc. of the IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Vol. 2, pp. 572-576, 1998.
7. Elbuluk, M., Hammoud, A., and Patterson, R., "Power Electronic Components, Circuits and Systems for Deep Space Missions," Proc. of the 36<sup>th</sup> IEEE Conference on Power Electronics Specialists, pp. 1156-1162, 2005.
8. Graovac, D., Purschel, M., and Kiep, A., "MOSFET Power Losses Calculation using the Data-Sheet Parameters," Infineon Application Note, Vol. 1, 2006.
9. Chowdhury, N., "Switching Losses in Semiconductor Devices," [http://www.engr.usask.ca/classes/EE/443/notes/switching\\_losses.pdf](http://www.engr.usask.ca/classes/EE/443/notes/switching_losses.pdf) (Accessed 25 November 2014)
10. Yu, X. and Yeaman, P., "Temperature-Related MOSFET Power Loss Modeling and Optimization for DC-DC Converter," Proc. of the IEEE on Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp. 2788-2792, 2013.
11. Kim, J.-H., Jung, Y.-C., Lee, S.-W., Lee, T.-W., and Won, C.-Y., "Power Loss Analysis of Interleaved Soft Switching Boost Converter for Single-Phase PV-PCS," Journal of Power Electronics, Vol. 10, No. 4, pp. 335-341, 2010.
12. Elchhorn, T., "Estimate Inductor Losses Easily in Power Supply Designs," Power Electronics Technology, 2005.
13. Texas Instrument, "LM5022 60V Low Side Controller for Boost and SEPIC," 2007.
14. Leon, R., "Failure Modes and Low Temperature Performance of DC/DC Converters," JPL Publication, 2009.