

차량 적용을 위한 열전 소자 최대 전력 추종 제어 비교

장요한¹, 정승훈², 배성우[†]

Comparisons on Maximum Power Point Tracking Control of a Thermoelectric Generator on Vehicles

Yohan Jang¹, Seunghoon Choung², and Sungwoo Bae[†]

Abstract

This study compares the maximum power point tracking (MPPT) control methods of a thermoelectric generator on vehicles. The researchers conduct comparisons on five different MPPT methods, including a fractional open circuit voltage method, a perturbation and observation (P&O) method, an incremental conductance method, a linear extrapolation-based MPPT (LEMPPT) method, and a LEMPPT/P&O hybrid method. These five MPPT methods are theoretically analyzed in detail, and the comparisons are conducted through MATLAB/Simulink simulation results. The comparison outcomes reveal that linear MPPT methods, including LEMPPT and LEMPPT/P&O hybrid methods, are more suitable for a thermoelectric generator on vehicles than the other MPPT methods examined in this work.

Key words: Thermoelectric generator, Maximum power point tracking, Vehicle applications

1. 서 론

최근 차량의 고출력 전장부하 증가 및 연비 향상 요구와 하이브리드 차량의 주행거리 향상 요구를 만족하기 위해 효율적인 에너지 관리 기술에 대한 관심이 증가하고 있다^[1-4]. 이러한 요구들은 차량에 에너지 하베스팅 기술을 적용시켜 추가 발전된 전력을 활용함으로써 해결할 수 있다. 차량에 적용 가능한 에너지 하베스팅 기술에는 태양광 발전, 열전 발전, 진동 발전 등이 많이 연구되고 있다^[1-4].

그 중에서도 열전 발전은 열전 소자를 활용하여 차량의 배기관, 엔진 등에서 발생하는 폐열의 일부를 직접 전기에너지로 변환한다. 서로 다른 두 금속 또는 반도체 양단의 온도차가 존재할 때 기전력이 발생하는 제백 효과(seebeck effect)를 활용한 것이다. 열전 발전은 계절에 관계없이 열원만 있으면 발전할 수 있으며, 발전 동작 시 소음이 없고, 시스템 수명이 길며, 유지비가 거의 들지 않는다^{[3],[5]}. 그러나 이러한 장점들에도 불구하고 낮은 발전 효율로 인해 maximum power point tracking (MPPT) 제어가 필수적이다.

차량 태양광 발전 기술은 꾸준한 연구가 진행되어 왔으며, 현재 실제 차량 루프에 장착되어 판매되고 있다. 이에 비해 차량의 열전 발전 기술에 관한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 특히 대부분의 열전 발전 시스템에는 태양광 발전에 주로 사용되는 기존 MPPT 제어 방법들이 적용되고 있다^{[6]-[9]}. 그러나 차량 열전 발전 시스템의 경우 주행 환경, 방법 등에 따라 잦은 온도 변화가 발생한다. 따라서 이러한 변화에 대해 빠른 최대 전력 지점 추종 속도, 안정성 및 효율성이 요구된다. 또한 열전 발전은 태양광 발전과 다르게 선형적인 전압-전류 발전 특성을 가지며, 최근 이러한 특성을 활용한 MPPT 제어 방법들의 연구가 활발히 진행되고 있다^{[10],[11]}. 하지만 개별적 제어 방법에 대한 연구 결과는, 실제 차량 적용을 고려할 때, 설계자의 MPPT 방법 선택에 있어 부족한 면이 존재하는 것이 사실이다. 따라서 차량 적용을 위한 열전 소자의 여러 MPPT 제어 방법들에 대해 소자 특성에 기반한 비교 연구가 필요하다.

Paper number: TKPE-2021-26-3-1

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: swbae@hanyang.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea
Tel: +82-2-2220-2309 Fax: +82-2-2220-3119

¹ Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea

² Dept. of Electrical & Electronic Engineering, Yonam Institute of Technology, Korea

Manuscript received Oct. 31, 2020; revised Nov. 29, 2020; accepted Dec. 23, 2020

— 본 논문은 2020년 전력전자학술대회 우수추천논문임

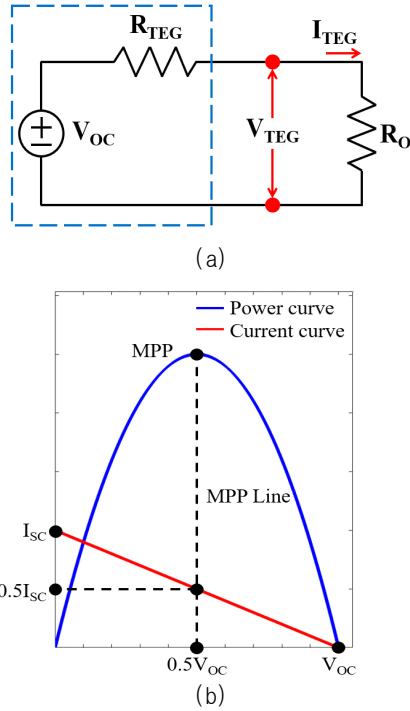


Fig. 1. Electrical equivalent circuit and output characteristics of a thermoelectric generator. (a) Electrical equivalent circuit, (b) Output characteristics.

본 논문에서는 차량 적용을 위해 열전 소자에 활용할 수 있는 5가지 MPPT 방법들에 대해 비교 분석하였다. 방법에는 선형특성을 고려하지 않은 fractional open circuit voltage(FOCV), perturbation and observation (P&O), incremental conductance(INC) 방법과 선형특성을 고려한 linear extrapolation based MPPT(LEMPPT), LEMPPT/P&O hybrid 방법을 포함한다. 본 논문은 각 MPPT 방법의 이론적 분석과 MATLAB/Simulink 환경 시뮬레이션 결과에 따라 그 특성을 비교 분석하였다.

2. 열전 소자 발전 특성

열전 소자는 Seebeck effect를 활용해 열에너지를 전기에너지로 직접 변환하는 소자이다. 고온 측과 저온 측의 온도차에 의해 유도되는 기전력은 식 (1)과 같다.

$$V_{OC} = \alpha (T_H - T_C) = \alpha \Delta T \quad (1)$$

여기서, V_{OC} 는 열전 소자의 개방 전압, α 는 Seebeck 계수, T_H 는 고온 측 온도, T_C 는 저온 측 온도, ΔT 는 온도 차이이다.

그림 1(a)는 열전 소자의 전기적 등가회로이고, 개방 전압(V_{OC})과 직렬 연결된 내부저항(R_{TEG})으로 구성된다. 열전 소자의 출력 전류(I_{TEG})는 식 (2)와 같다.

$$I_{TEG} = \frac{V_{OC}}{R_{TEG} + R_O} \quad (2)$$

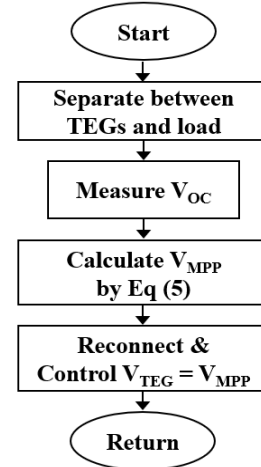


Fig. 2. Fractional open circuit voltage MPPT algorithm flowchart.

여기서, R_O 는 열전 소자의 외부 저항이다. 식 (2)를 활용하여 열전 소자의 출력 전력(P_{TEG})을 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{TEG} = I_{TEG}^2 R_O = \left(\frac{V_{OC}}{R_{TEG} + R_O} \right)^2 R_O \quad (3)$$

식 (3)을 통해 R_{TEG} 와 R_O 가 같을 때, 열전 소자의 출력 전력이 최대가 되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 최대 전력 지점의 전압(V_{MPP}), 전류(I_{MPP})를 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{MPP} &= 0.5 V_{OC} \\ I_{MPP} &= 0.5 I_{SC} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, I_{SC} 는 단락 전류이다. 따라서 열전 소자는 개방 전압 또는 단락 전류의 절반인 지점에서 최대 전력 지점을 갖는다.

그림 1(b)는 열전 소자의 발전 특성이다. 식 (4)와 같이 $0.5 V_{OC}$ 또는 $0.5 I_{SC}$ 에서 최대 전력 지점을 확인할 수 있다.

3. MPPT 제어 방법 분석

3.1 선형특성을 고려하지 않은 방법

3.1.1 Fractional open circuit voltage

FOCV는 열전 소자의 개방 전압을 측정하고, 그 값의 일정 부분으로 열전 소자 출력 전압을 제어하는 방법이다^[6]. 최대 전력 지점의 전압과 개방 전압의 관계는 식 (5)와 같다.

$$V_{MPP} = k V_{OC} \quad (5)$$

여기서, k 는 비례 상수이다.

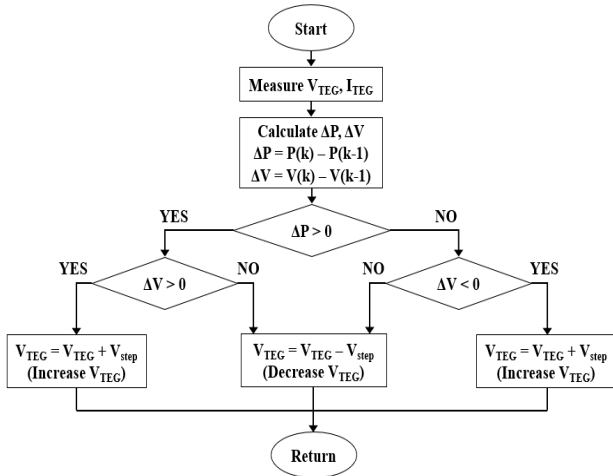


Fig. 3. Perturb and observe MPPT algorithm flowchart.

이 방법이 태양광 발전 시스템에 적용되었을 때, k 는 패널의 조건에 따라 0.71-0.78 사이의 값으로 일정하지 않다. 그러나 열전 발전 시스템에서는 식 (4)에 의해 $k=0.5$ 를 항상 만족한다. 따라서 k 의 조절이 필요 없으며, 추정 정확도가 태양광 발전 시스템에 적용되었을 때 비해 상대적으로 높다.

그림 2는 FOCV 방법의 알고리즘 순서도이다. 먼저 열전 소자와 부하를 분리시켜 V_{OC} 를 측정한다. 다음으로 식 (5)를 활용하여 V_{MPP} 를 계산한 후 열전 소자 출력 전압을 V_{MPP} 로 제어한다.

이 방법은 구현이 쉽고, 최대 전력 지점에서의 진동으로 인한 전력 손실이 없으며, 개방 전압 측정을 위한 하나의 전압 센서만 필요하다는 장점이 있다. 그러나 개방 전압 측정을 위해 열전 소자를 부하와 분리시켜야 하고, 이 기간에 발전이 되지 않아 전력 공급의 연속성 및 그에 따른 손실이 존재한다는 문제점이 있다. 또한 회로 개방을 위해 스위치와 같은 추가적인 소자가 필요하다는 단점이 있다.

3.1.2 Perturbation and observation

P&O는 전압과 전력의 변화량에 따라 열전 소자의 출력 전압을 제어해 최대 전력 지점을 찾는 방법이다^[8]. 그림 3은 P&O 방법의 알고리즘 순서도이다. 먼저 열전 소자의 출력 전압, 전류 측정 통해 전력의 변화량(ΔP)과 출력 전압의 변화량(ΔV)을 계산한다. 다음으로 ΔP 와 ΔV 의 부호가 같으면 열전 소자 출력 전압을 step size(V_{Step})만큼 증가하도록 제어하고, 반대로 ΔP 와 ΔV 의 부호가 반대이면 출력 전압을 V_{Step} 만큼 감소하도록 제어한다.

이 방법은 태양광 발전 시스템에서 가장 널리 사용되는 MPPT 방법으로 구현이 쉽고, 개방 전압 측정을 위한 분리가 추가적인 소자가 필요 없다는 장점이 있다. 그러나 최대 전력 지점을 step size에 의존하여 점진적으로 찾아가기 때문에 FOCV 방법에 비해 추종 속도가

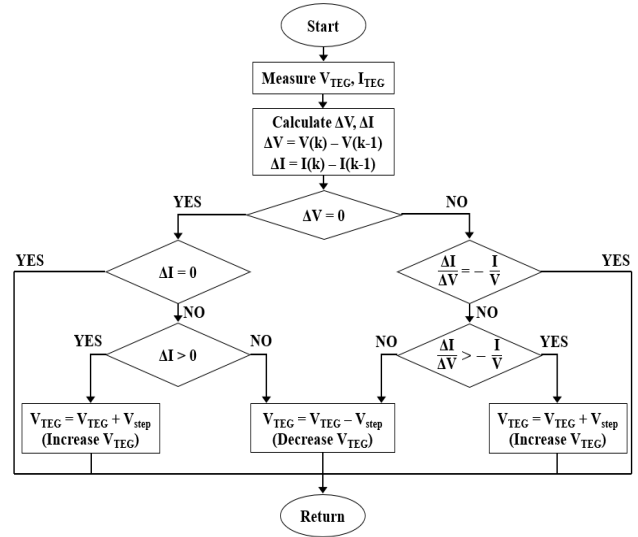


Fig. 4. Incremental conductance MPPT algorithm flowchart.

느리다. 또한 최대 전력 추종 중단에 대한 기준이 없기 때문에 최대 전력 지점에서 진동이 발생하고, 이로 인해 전력 손실이 발생하는 문제점이 있다.

3.1.3 Incremental conductance

INC는 전압-전력 출력 특성 곡선의 기울기 변화에 따라 열전 소자의 출력 전압을 제어하는 방법이다^[9]. 전압-전력 출력 특성 곡선의 기울기는 식 (6)과 같다.

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{\Delta(VI)}{\Delta V} = I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (6)$$

식 (6)을 기울기 $\Delta P/\Delta V$ 의 부호에 따라 식 (7)과 같이 세 가지 경우로 표현할 수 있다.

$$\text{if } \Delta P/\Delta V = 0, \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \quad \text{at MPP} \quad (7)$$

$$\text{if } \Delta P/\Delta V > 0, \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \quad \text{left of MPP}$$

$$\text{if } \Delta P/\Delta V < 0, \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \quad \text{right of MPP}$$

그림 4는 INC 방법의 알고리즘 순서도이다. 먼저 열전 소자의 출력 전압, 전류 측정을 통해 ΔV 와 ΔI 계산한다. 다음으로 식 (7)을 활용하여 기울기가 양수이면 열전 소자 출력 전압을 V_{Step} 만큼 증가시키고, 음수이면 V_{Step} 만큼 감소시킨다. 기울기가 0이면 최대 전력 지점이기 때문에 출력 전압을 유지시킨다.

이 방법은 기울기의 변화에 의존하여 동작하기 때문에 P&O 방법에 비해 추종 속도가 상대적으로 빠르며, 최대 전력 지점에서 진동이 작기 때문에 전력손실도 낮은 장점이 있다. 또한 개방 전압 측정을 위한 분리가 추가 소자가 필요 없다. 그러나 정상상태의 진동이 발생하는 근본적인 문제점은 여전히 존재한다.

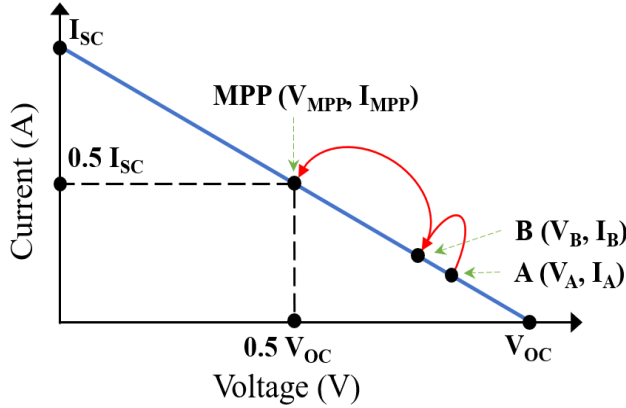


Fig. 5. Linear extrapolation based MPPT method process.

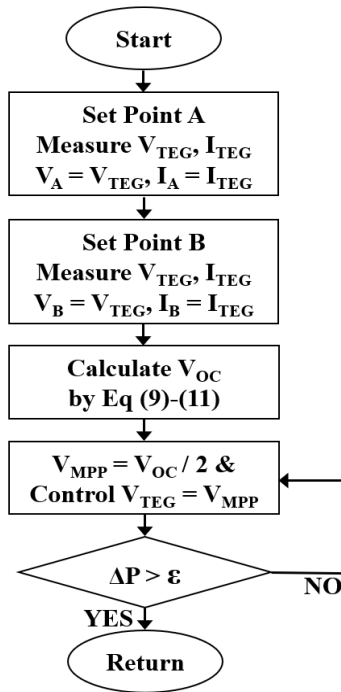


Fig. 6. LEMPPT algorithm flowchart.

3.2 선형특성을 고려한 방법

3.2.1 Linear extrapolation based MPPT

LEMPPT는 열전 소자의 선형적인 발전 특성을 활용하여 개방 전압과 단락 전류를 직접 측정하지 않고, 간접적으로 계산하는 방법이다^[10]. 개방 전압과 단락 전류는 특정 두 지점의 전압, 전류 데이터와 선형 외삽법을 기반으로 계산된다.

그림 5는 열전 소자의 전압-전류 출력 특성 그래프에서 LEMPPT가 수행되는 과정을 나타낸다. 그림 5에서 전압-전류 관계는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{TEG} = m V_{TEG} + I_{SC} \quad (8)$$

여기서, m 은 기울기이다. A 지점의 전압, 전류는 V_A, I_A

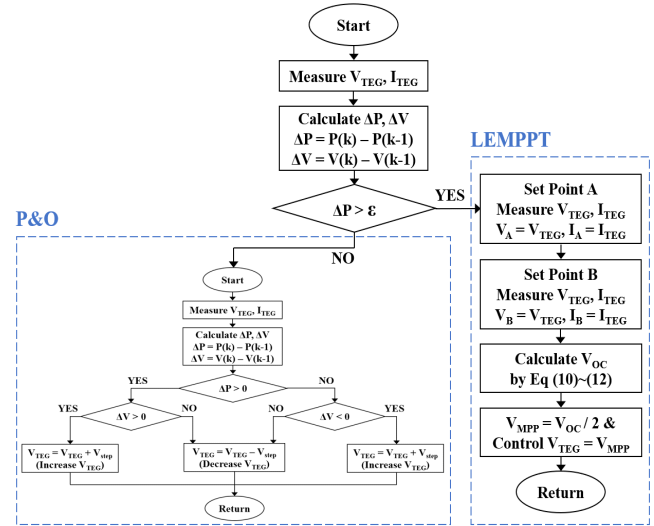


Fig. 7. LEMPPT/P&O hybrid algorithm flowchart.

이고, B 지점의 전압, 전류는 V_B, I_B 이다. 따라서 m 은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$m = \frac{I_B - I_A}{V_B - V_A} \quad (9)$$

식 (8)과 A 지점의 전압, 전류를 활용하여 식 (10)과 같이 I_{SC} 에 관한 식으로 나타낼 수 있다.

$$I_{SC} = I_A - m V_A \quad (10)$$

식 (10)에서 개방 전압 조건일 때, 즉 $I_A = I_{TEG} = 0$ 을 통해 식 (11)와 같이 V_{OC} 에 관한 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_{OC} = -\frac{I_{SC}}{m} \quad (11)$$

따라서 식 (10), (11)을 활용하여 I_{SC} 와 V_{OC} 를 직접 측정하지 않고 계산할 수 있다.

그림 6은 LEMPPT 방법의 알고리즘 순서도이다. 먼저 두 지점(A, B)의 전압, 전류를 측정하고, 식 (9)-(11)를 활용하여 V_{OC} 를 계산한다. 다음으로 계산된 V_{OC} 를 활용하여 FOCV 방법과 같이 열전 소자 출력 전압을 $V_{OC}/2$ 로 제한한다. 마지막으로 전력의 변화량 ΔP 가 아주 작은 양의 값(ϵ)보다 크면 위 과정을 반복한다.

이 방법은 두 지점에서의 전압, 전류 측정 기간과 최대 전력 지점으로 이동하는 3단계의 샘플링 주기 만에 MPPT를 수행할 수 있다. 따라서 P&O, INC 방법에 비해 추종 속도가 빠르며, 최대 전력 지점에서의 진동도 없다. 또한 개방 전압이나 단락 전류 측정을 위한 전력 손실이 없는 장점이 있다. 그러나 MPPT 수행을 위해 두 지점의 측정이 반드시 필요하기 때문에 온도 변화로 인해 ΔP 가 지속적으로 ϵ 보다 크게 변화하는 조건에서 효율이 낮을 수 있는 단점이 있다.

TABLE I
THERMOELECTRIC GENERATOR PARAMETERS

Parameters	Value
Temperature difference (ΔT)	270 [°C]
Open circuit voltage (V_{OC})	8.4 [V]
Internal resistance (R_{TEG})	1.2 [Ω]
Seebeck coefficient (a)	0.0155 [V/K]
Maximum power point voltage (V_{MPP})	4.2 [V]
Maximum power point current (I_{MPP})	3.4 [A]
Maximum power point power (P_{MPP})	14.6 [W]

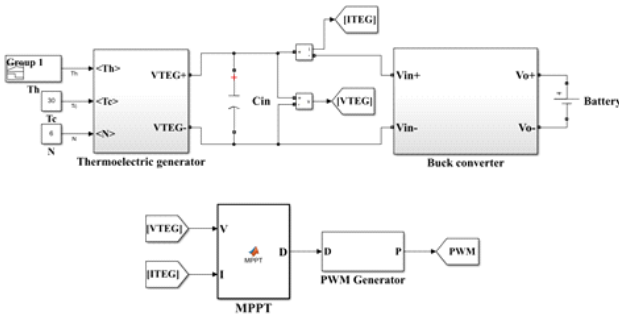


Fig. 8. Thermoelectric power generation system simulation diagram.

3.2.2 LEMPPT/P&O hybrid

LEMPPT/P&O hybrid는 LEMPPT와 P&O를 결합한 방법이다^{[11],[12]}. 그림 7은 LEMPPT/P&O hybrid 방법의 알고리즘 순서도이다. 먼저 열전 소자의 출력 전압, 전류 측정 통해 ΔP 와 ΔV 를 계산한다. 다음으로 ΔP 가 ϵ 보다 크면 LEMPPT 알고리즘이 동작을 하고, ΔP 가 ϵ 보다 작으면 P&O 알고리즘이 동작을 한다.

이 방법은 큰 온도 변화 조건에서 LEMPPT 방법을 통해 빠르게 MPPT를 수행하고, 작은 온도 변화 조건에서 P&O 방법을 사용하여 미세 MPPT를 수행한다. 또한 사용된 P&O는 기존의 방법보다 작은 step size를 사용함으로써 기존 방법의 단점인 최대 전력 지점에서의 진동 문제를 해결할 수 있다. 따라서 두 제어 방법을 결합해 각 방법이 개별적으로 사용되었을 때의 단점을 보완할 수 있다.

4. 비교 분석 시뮬레이션

열전 소자의 차량 적용을 위해 앞 장에서 조사한 MPPT 제어 방법들의 시뮬레이션을 통한 비교 연구를 진행한다. 그림 8은 MATLAB/Simulink 환경에 구현한 열전 발전 시스템 구성도이고, 열전 소자, MPPT 제어기, MPPT 알고리즘 및 배터리로 구성된다.

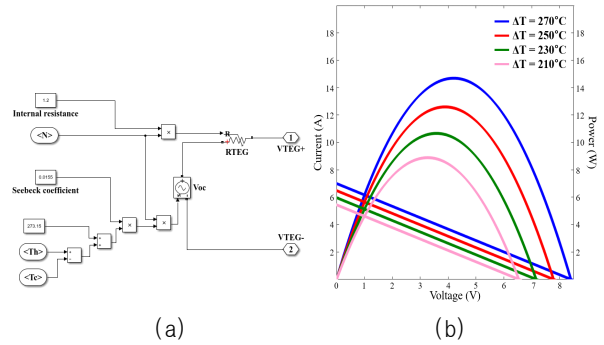


Fig. 9. Thermoelectric generator model. (a) Simulation model, (b) Simulation result.

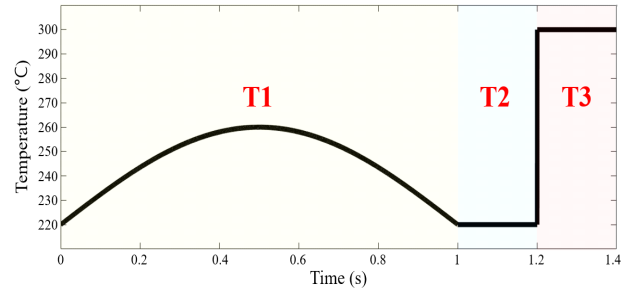


Fig. 10. Hot side temperature data.

4.1 열전 소자

열전 소자 모델링에 사용된 TEG1-12611-6.0의 사양은 표 1과 같고, Seebeck 계수는 식 (1)로 계산되었다. 그림 9(a)와 (b)는 표 1의 파라미터 기반 열전 소자 시뮬레이션 모델, 온도 변화에 따른 시뮬레이션 결과이다. 열전 소자 모델에는 저온 측 온도(T_C), 고온 측 온도(T_H), 직렬로 연결된 열전 소자 개수(N)가 입력된다. T_C 는 30°C의 일정한 값으로 설계했다. T_H 의 온도 변화 데이터는 그림 10과 같고, 차량 배기관의 온도 변화 데이터^[13]를 참고해 설계했으며, 완만한 변화 구간($T1$), 안정 구간($T2$), 급격한 변화 구간($T3$)으로 구성된다. N 은 앞서 설계한 단일 열전소자 6개를 직렬 연결하여 6으로 설계했다.

4.2 MPPT 알고리즘

MPPT 제어 방법들은 MATLAB function을 통해 코드로 구현하였다. MPPT 알고리즘은 열전 소자 모델에서 출력되는 전압, 전류 값을 활용하여 제어기의 스위칭 듀티비(D)를 결정하고, PWM 제어를 통해 스위치를 동작시킨다.

구현된 모든 알고리즘의 초기 D 는 0.5로 설계하였다. FOCV 방법은 열전 소자 출력 단에 추가 스위치를 사용해 0.1s 주기마다 회로를 개방시켜 V_{OC} 를 측정한다. P&O, INC, LEMPPT/P&O hybrid 방법의 듀티비 step size(ΔD)는 시뮬레이션을 통해 MPPT 효율이 가장 높은 값으로 설계했으며, P&O와 INC 방법의 ΔD 는 0.03, LEMPPT/P&O hybrid 방법의 ΔD 는 0.01이다. 또한

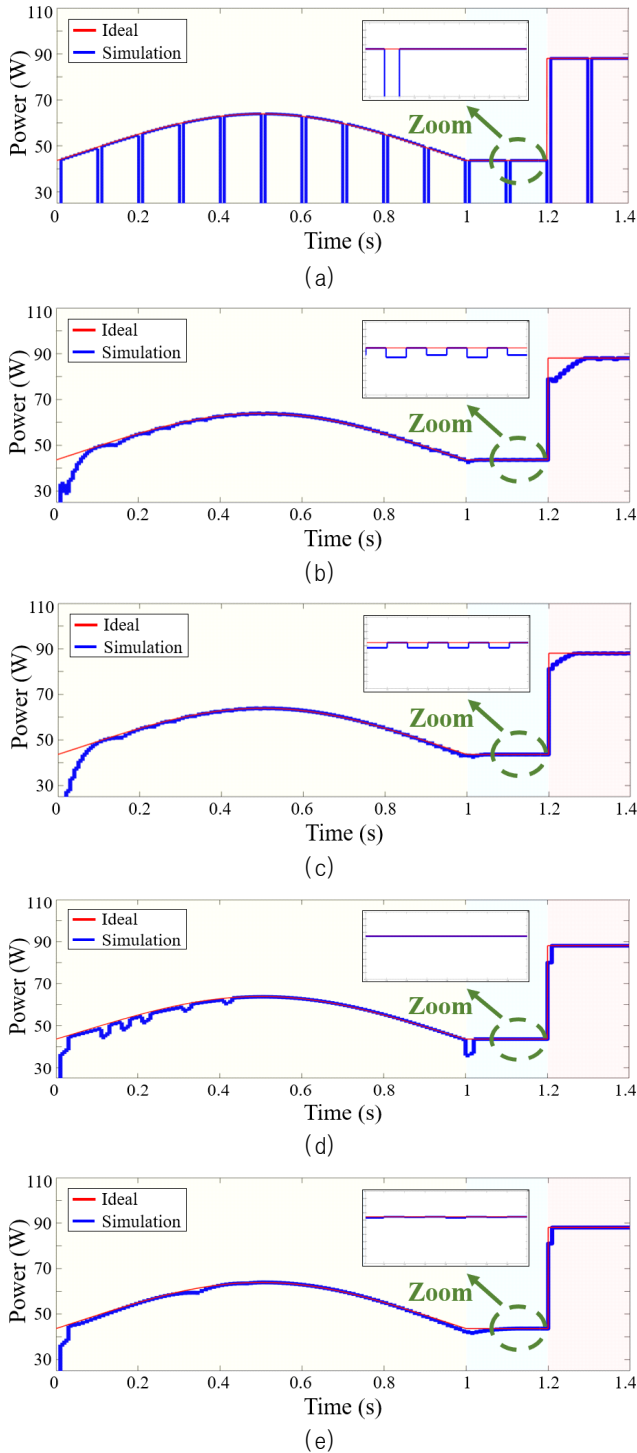


Fig. 11. Simulation results. (a) FOCV, (b) P&O, (c) INC, (d) LEMPPT, (e) LEMPPT/P&O hybrid.

LEMPPT와 LEMPPT/P&O hybrid 방법에 사용된 A, B 지점의 D 는 각각 0.5, 0.51로 설계하였다.

4.3 MPPT 제어기

열전 발전 시스템의 목표 어플리케이션은 차량의 12V 보조 배터리이다. 따라서 6개의 직렬 연결된 열전 소자 출력 전압과 배터리 전압을 고려하여 MPPT 제어기는

TABLE II
TRACKING TIME OF $T3$ AND MPPT EFFICIENCY OF $T1-T3$

Methods	Tracking time of $T3$ [s]	MPPT Efficiency of $T1-T3$ [%]
FOCV	0.01	89.98
P&O	0.10	97.56
INC	0.08	97.58
LEMPPT	0.02	98.20
LEMPPT/P&O hybrid	0.02	98.71

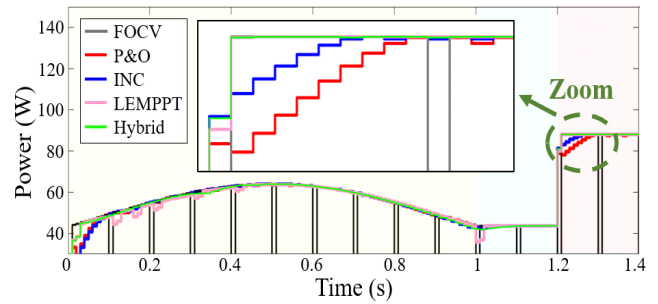


Fig. 12. Expanded simulation results of $T3$

Buck 컨버터 토폴로지를 선정하였다. 설계된 제어기 사양은 스위칭 주파수 20kHz, 인덕터 430 μ H, 입·출력커패시터 100 μ F이다. 시뮬레이션 시간은 1.4s, 샘플링 시간은 0.01s이다.

4.4 시뮬레이션 결과 분석

그림 11은 (a) FOCV, (b) P&O, (c) INC, (d) LEMPPT, (e) LEMPPT/P&O hybrid 방법의 시뮬레이션 결과이다. 각 제어 방법들은 정상상태 동작 확인을 위해 $T2$ 구간을 같은 스케일로 확대한 결과를 포함한다. 그림 12는 급격한 온도 변화 조건에서 각 방법들의 정상상태까지의 동작 확인을 위해 $T3$ 구간을 확대한 결과이다.

FOCV 방법은 개방 전압 측정 기간을 제외한 전 구간에서 우수한 MPPT 성능을 보여준다. 또한 $T2$ 구간에서 안정된 정상상태를 확인할 수 있다. 그러나 주기적으로 개방 전압이 측정되고, 이 기간 동안 발전되는 전력이 0이 되는 것을 확인할 수 있다.

P&O와 INC 방법은 전 구간에서 지속적으로 MPPT를 수행하지만 $T3$ 구간과 같이 급격한 온도 변화에 대해 느린 추종 속도를 보여준다. 또한 $T2$ 구간에서 정상상태의 진동도 확인할 수 있다.

LEMPPT 방법은 $T3$ 구간의 급격한 온도 변화에 대해 빠른 추종 속도를 보여주며, $T2$ 구간에서 FOCV 방법과 같이 안정된 정상상태를 보여준다. 그러나 P&O, INC 방법과 같이 지속적으로 MPPT를 수행하는 것이

TABLE III
COMPARISON OF MPPT METHODS

Methods	Sensor	Speed	Stability	Efficiency
FOCV	V	Fast	Stable	Low
P&O	V & C	Slow	Unstable	Medium
INC	V & C	Slow	Unstable	Medium
LEMPPT	V & C	Fast	Stable	Medium
LEMPPT/ P&O hybrid	V & C	Fast	Stable	High

* V : Voltage sensor, C : Current sensor

아니기 때문에 $T1$ 구간의 지속적인 온도 변화에 대해 상대적으로 낮은 MPPT 성능을 보여준다.

LEMPPT/P&O hybrid 방법은 전 구간에서 우수한 MPPT 성능을 보여 주며, 특히 $T2$ 구간에서 작은 step size로 인해 정상상태의 진동도 무시할 수 있을 만큼 작았다. 또한 $T3$ 구간에서도 LEMPPT 방법과 같이 빠른 추종이 가능했다.

$T3$ 구간의 정상상태까지 걸리는 시간과 $T1$ - $T3$ 전 구간의 MPPT 효율을 표 2에 정리하였다. 효율은 전체 시물레이션 시간 동안 온도 변화에 따라 발전될 수 있는 최대 발전량과 각 MPPT 방법에 의해 발전되는 발전량의 비를 백분율로 나타냈다^[14]. FOCV 방법은 급격한 온도 변화에 대해 0.01s로 가장 빠른 추종 속도를 보였지만, 주기적인 개방 전압 측정으로 인해 MPPT 효율이 88.98%로 가장 낮았다. 또한 LEMPPT, LEMPPT/P&O hybrid 방법은 P&O, INC 방법에 비해 급격한 온도 변화에 대해 더 빠른 추종 속도와 전 구간 동안 높은 MPPT 효율을 보였다. 특히 LEMPPT/P&O hybrid 방법은 $T3$ 구간에서 LEMPPT 방법을 활용한 빠른 추종과 $T1$ - $T2$ 구간에서 작은 step size의 P&O 방법을 활용한 미세 추종을 통해 98.71%의 가장 높은 MPPT 효율을 보였다. 이는 선형특성을 고려하지 않은 방법 중 가장 효율이 높은 INC 방법과 비교하여 약 1.1% 높았으며, 설계한 시스템 조건을 기준으로 약 246Wh의 발전량 차이에 해당한다. 낮은 온도 변화 조건을 갖는 실제 차량 조건을 고려할 때, 효율 및 발전량의 차이는 더욱 클 것으로 사료된다.

MPPT 제어 방법들의 비교 분석 결과를 표 3에 요약 정리하였다. Sensor는 MPPT 수행을 위해 필요한 센서로 V 는 전압 센서, C 는 전류 센서이다. Speed는 온도 변화에 대한 추종 속도, stability는 정상상태의 진동, efficiency는 MPPT 효율이다. 분석 결과 선형특성을 고려하지 않은 FOCV, P&O, INC 방법보다 선형특성을 고려한 LEMPPT, LEMPPT/P&O hybrid 방법의 성능이 더 우수하였다. 특히 LEMPPT/P&O hybrid 방법의 경우 두 방법의 장점들을 활용하여 speed, stability, efficiency 모든 측면에서 가장 우수한 성능을 보였다.

5. 결 론

본 논문은 차량 적용을 위한 열전 소자의 최대 전력 추종 제어 방법들을 비교 분석하였다. 각 방법들에 대해 상세한 이론적 분석을 하였으며, 분석에 대한 검증 및 방법들의 비교를 위해 MATLAB/Simulink 환경에서 시물레이션을 진행하였다. 완만한 온도 변화 구간, 안정 구간, 급격한 온도 변화 구간으로 나누어 각 구간별 분석을 했으며, 방법별 MPPT 추종 속도 및 효율에 대해서도 분석하였다. 또한 제어 방법들의 특징 및 비교 분석 결과를 하나의 표로 정리하였다. 비교 분석 결과 열전 소자의 선형특성을 고려하지 않은 기존의 방법들보다 선형특성을 고려한 방법들이 우수한 MPPT 성능을 보였다. 특히 LEMPPT/P&O hybrid 방법은 LEMPPT와 P&O 방법의 장점들을 활용하여 가장 우수한 성능을 보였다. 따라서 낮은 온도 변화 조건을 갖는 차량 열전 발전 시스템에 열전 소자를 적용함에 있어 선형특성을 고려한 MPPT 방법들이 적합한 것으로 사료된다.

이 연구는 2021년도 산업통상자원부 및 산업기술 평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임.
(20002777)

References

- [1] X. D. Xie and Q. Wang, "Energy harvesting from a vehicle suspension system," *Energy*, Vol. 86, pp. 385-392, 2015.
- [2] T. Y. Kim, J. Kwak, and B. Kim, "Energy harvesting performance of hexagonal shaped thermoelectric generator for passenger vehicle applications: An experimental approach," *Energy Conversion and Management*, Vol. 160, pp. 14-21, 2018.
- [3] B. Orr, A. Akbarzadeh, M. Mochizuki, and R. Singh, "A review of car waste heat recovery systems utilising thermoelectric generators and heat pipes," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 101, pp. 490-495, 2016.
- [4] I. Nakir, A. Durusu, E. Ugur, and M. Tanriöven, "Performance assessment of MPPT algorithms for vehicle integrated solar systems," in *2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON)*, pp. 1034-1038, 2012.
- [5] A. Montecucco and A. R. Knox, "maximum power point tracking converter based on the open-circuit voltage method for thermoelectric generators," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 30, No. 2, pp. 828-839, Feb. 2015.
- [6] M. Guan, K. Wang, D. Xu, and W. H. Liao, "Design and experimental investigation of a low-voltage thermoelectric energy harvesting system for wireless sensor nodes,"

- Energy Conversion and Management*, Vol. 138, pp. 30-37, 2017.
- [7] C. Yu and K. T. Chau, "Thermoelectric automotive waste heat energy recovery using maximum power point tracking," *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, pp. 1506-1512, 2009.
- [8] H. Mamur and R. Ahiska, "Application of a DC-DC boost converter with maximum power point tracking for low power thermoelectric generators," *Energy Conversion and Management*, Vol. 97, pp. 265-272, 2015.
- [9] R. Kim, J. Lai, B. York, and A. Koran, "Analysis and design of maximum power point tracking scheme for thermoelectric battery energy storage system," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 9, pp. 3709-3716, Sep. 2009.
- [10] B. Bijukumar, A. G. K. Raam, S. I. Ganesan, and C. Nagamani, "A linear extrapolation-based MPPT algorithm for thermoelectric generators under dynamically varying temperature conditions," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 33, No. 4, pp. 1641-1649, Dec. 2018.
- [11] Z. Dalala, O. Saadeh, M. Bdour, and Z. Zahid, "A new maximum power point tracking (MPPT) algorithm for thermoelectric generators with reduced voltage sensors count control," *Energies*, Vol. 11, No. 7, pp. 1826, 2018.
- [12] Y. H. Liu, Y. H. Chiu, J. W. Huang, and S. C. Wang, "A novel maximum power point tracker for thermoelectric generation system," *Renewable Energy*, Vol. 97, pp. 306-318, 2016.
- [13] E. S. Mohamed, "Development and performance analysis of a TEG system using exhaust recovery for a light diesel vehicle with assessment of fuel economy and emissions," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 147, pp. 661-674, 2019.
- [14] R. Rodriguez, J. Guo, M. Preindl, J. S. Cotton, and A. Emadi, "High frequency injection maximum power point tracking for thermoelectric generators," *Energy Conversion and Management*, Vol. 198, pp. 111832, 2019.



장요한(張요한)

2019년 대구대 전자전기공학부 전자공학전공 졸업. 2019년~현재 한양대 전기공학과 석사과정.



정승훈(鄭勝勳)

2000년 국민대 전자공학과 졸업. 2002년 동대학원 전자공학과 졸업(석사). 2011년 미국 Univ. of Texas at Austin 전기공학과 졸업(공학박). 2011년~2016년 삼성전자 책임연구원. 2016년~현재 연암공과대 전기전자공학과 조교수.



배성우(裵晟佑)

2006년 한양대 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 2009년 미국 Univ. of Texas at Austin 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2012~2013년 삼성전자 종합기술원 책임연구원. 2017년~현재 한양대 전기공학과 부교수. 당 학회 학술위원.