

## 전기회로 구성 방법에 따른 열전발전 모듈 성능 특성

김 운 호, 김 명 기\*, 김 서 영\*\*, 리 광 훈, 엄 석 기\*

서울시립대학교 기계정보공학과, \*한양대학교 기계공학부, \*\*한국과학기술연구원 에너지메카닉스연구센터

### Performance Characteristics of Thermoelectric Generator Modules For Parallel and Serial Electrical Circuits

Yun Ho Kim, Myungkee Kim\*, Seo Young Kim\*\*, Gwang Hoon Rhee, Sukkee Um\*

Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

\*Division of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

\*\*Energy Mechanics Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 130-650, Korea

(Received January 13, 2010; revision received January 28, 2010)

**ABSTRACT:** An experiment has been performed in order to investigate the characteristics of multiple thermoelectric modules (TEMs) with electrical circuits. The open circuit voltage of TEM connected parallel circuit is equal to the sum of individual TEMs. In contrast, the open circuit voltage is equal to the average of that individual TEM for a series circuit. The power output and conversion efficiency of TEM for both parallel and series circuits increase as the operating temperature conditions for individual TEMs becomes identical. Comparing parallel with series circuits, the power generation performance is more excellent for series circuit than parallel circuit. This result is attributed to the power loss from the TEM with better power generation performance.

**Key words:** Thermoelectric generation(열전발전), Thermoelectric module(열전모듈), Parallel circuit(병렬회로), Series circuit(직렬회로), Operating temperature(작동온도)

#### 기 호 설 명

$A_c$  : 펠렛(Pellet) 단면적 [ $m^2$ ]  
 $E$  : 발전 성능 인자 [%]  
 $I$  : 출력전류 [A]  
 $k$  : 펠렛 열전도도 [W/mK]  
 $l$  : 펠렛 길이 [m]  
 $m$  : 저항비,  $m = R_L/R_I$   
 $N$  : 펠렛 개수  
 $P$  : 출력 전력 [W]  
 $R_I$  : 열전모듈 내부저항 [ $\Omega$ ]  
 $R_L$  : 외부 저항 [ $\Omega$ ]

$T_c$  : 열전모듈 저온부 온도 [ $^{\circ}C$ ]  
 $T_h$  : 열전모듈 고온부 온도 [ $^{\circ}C$ ]  
 $V$  : 출력전압 [V]

#### 그리스 문자

$\alpha$  : 펠렛 지벡 계수 [V/K]  
 $\rho$  : 펠렛 저항률 [ $\Omega m$ ]  
 $\Delta T$  : 열전모듈 양단 온도차,  $\Delta T = T_h - T_c$ , [ $^{\circ}C$ ]  
 $\eta$  : 발전 효율 [%]

#### 하첨자

$max$  : 최대값  
 $1$  : 열전모듈 1  
 $2$  : 열전모듈 2

† Corresponding author

Tel.: +82-2-958-5683; fax: +82-2-958-5689

E-mail address: seoykim@kist.re.kr

$s$  : 단일 열전모듈  
 $p$  : 병렬 연결

1. 서 론

화석연료의 무분별한 사용으로 인한 지구 온난화와 그 과용에 따른 연료 고갈의 화두는 대체 에너지의 개발이라는 새로운 패러다임으로 다가오고 있다. 현 시대에서의 대체에너지 및 신재생 에너지의 개발과 기술 확보는 선택이 아닌 필연으로서 경제, 산업적 측면에서 한 국가의 미래를 좌우할 수 있는 핵심 사안으로 인식되고 있다. 이러한 중요성과 맞물려 각 정부에서도 저 탄소 녹색성장이라는 새로운 정책을 추진하면서 신재생 에너지 연구에 많은 인적, 물적 자원을 투자하고 있다.

신재생 에너지는 주로 자연 상태에서 만들어지는 태양열, 풍력, 지열 에너지 등의 재생 에너지와 새로운 물질을 기반으로 하는 핵융합, 연료 전지 등의 신에너지를 일컫지만, 화석 연료나 핵분열을 이용하지 않는 모든 대체 에너지를 총칭한다. 이러한 신재생 에너지 중 열전 효과(thermoelectric effect)를 이용하여 특정 열원의 열에너지를 전기 에너지로 변화시켜주는 열전 발전(thermoelectric generation) 방식이 있다. 대표적으로 열전 모듈(TEM : thermoelectric module)을 사용하며, 일반적인 열전 모듈은 Fig. 1 과 같이 다수의 P와 N형 반도체를 전기적으로 직렬로, 열적으로는 병렬로 연결시킨 구조이다. 여기서 한 면에 열을 공급하고 다른 반대 면에서는 열을 제거하여 온도차를 만들어주면 제백 효과(Seebeck effect)에 의해 전기가 발생하게 된다.

열전 모듈을 사용한 발전 방식은 특별한 작동 부위가 필요치 않고 고 신뢰성을 바탕으로 폐열을 사

용할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다.<sup>(1)</sup> 특히 폐열을 사용할 수 있는 발전 특징은 열전 발전이 친 환경적인 발전 장치로서 현재의 저 탄소 녹색 성장 정책과 맞물려 신재생 에너지의 한 분야로서 각광 받는 주요인이다. 또한 버려지는 열을 새로운 에너지원으로 활용하여 전기를 생산하기 때문에 기존의 발전 시스템이나 기타 폐열 발생 장치에 열전발전 시스템을 추가함으로써 전체시스템의 에너지 사용 효율을 향상시킬 수 있는 큰 이점을 갖고 있다.

열전발전 시스템을 설계하는데 있어 고려되어야 할 가장 큰 요소는 열전 모듈 자체의 열전 성능과 더불어 운전 온도 조건에 따른 열전 모듈의 거동 특성을 이해하는데 있다. 열전 모듈 자체 열전 성능은 P와 N형 반도체의 재료 조성파 제조 방법에 의해 결정되어지며 현재까지 무수히 많은 열전 재료와 그 성능이 공개되어 있다.<sup>(2)</sup> 그러나 현재 일반적으로 상용화되고 있는 열전 모듈은 Bi-Te계로서 열전 반도체 소자의 자체 열전 성능을 대표하는 ZT (Dimensionless Figure of Merit,  $\alpha^2 T/\rho k$ ) 값은 약 0.8 정도이다. 따라서 동일한 열전 모듈을 사용함에 있어 열전발전 시스템 성능은 특정 운전 조건에서 최적의 효율점을 어떻게 선정하느냐에 따라 정해질 것이다. 이는 열전 모듈 양단 온도차, 주변 및 고온 부 온도 그리고 작동 유체의 유량 등 운전 조건에 따른 열전 모듈의 전반적인 발전 특성에 대한 연구부터,<sup>(3-6)</sup> 온도에 따른 소자의 특성 변화에 대한 연구,<sup>(7-9)</sup> 그리고 시스템 운전 알고리즘에 대한 연구까지,<sup>(10,11)</sup> 열전 모듈의 여러 거동 특성을 충분히 이해하는데서 출발한다.

열전 모듈의 거동을 이해해야 하는 또 다른 분야는 발전 시스템을 구성 시 열전 모듈을 복수 개를 사용하는데서 비롯된다. 열전모듈은 상대적으로 낮은 발전 효율로 인해 열전 발전 시스템 구성 시 필연적으로 열전 모듈을 복수로 사용해야 하며 시스템에서 필요로 하는 전압 수요에 맞게 복수의 열전 모듈은 전기적으로 직렬 또는 병렬로 연결되어야 한다. 즉 단일 열전 모듈 시스템에서와 달리 복수 개의 열전 모듈이 전기적으로 직, 병렬로 연결될 때 외부 부하에 따른 발전 특성을 이해하는 것은 시스템의 발전 효율을 상승시키고 동시에 최적화된 열전 발전 시스템을 설계하는데 반드시 필요한 설계 변수가 될 것이다. 따라서 본 연구에서는 단일 열전 모듈에서의 발전 특성을 바탕으로 두 개의 열전 모듈을 직렬, 병렬로 연결하여 운전 온도 조건에 따른 열전 모듈의 발전 특성에 대해 고찰한다.

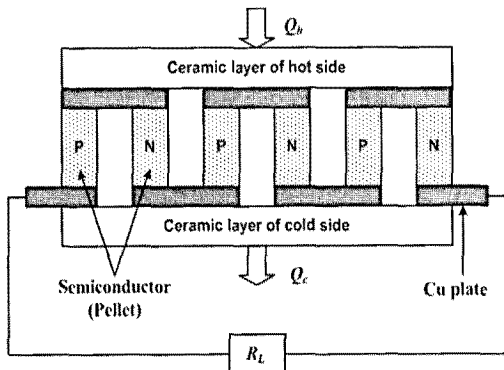


Fig. 1 Typical configuration of TEM.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 2는 본 연구에 사용된 실험장치 개략도로서 각각의 열전 모듈에 대해 독립적으로 구성하였고, 두 시스템 모두 고온부와 저온부의 온도를 제어할 수 있도록 설계되었다. 즉 고온부는 열전모듈의 접촉 면적과 같은 크기로 카트리지 히터(20 V-40 W)를 장착하여 고온부 온도를 제어하였으며, 저온부의 온도를 일정하게 유지시키기 위해서 열전 모듈을 방열판 및 팬과 함께 열전냉각 방식으로 운전하였다. 또한 외부로의 열손실을 막기 위해 방열판과 팬을 제외한 모든 부위를 단열 처리하였다. 카트리지 히터, 냉각팬, 열전모듈의 전원은 각각의 DC 전원공급 장치(Agilent E3232A, E3648A)를 사용하여 각 실험 장치로 개별적으로 전력을 공급하여 모두 제어 가능하도록 구성하였다. 각 열전 모듈에 대한 전력 측정은 전기부하기(KIKUSUI PLZ334W)를 사용하였으며, 각각의 시스템에서의 열전 모듈을 병렬 및 직렬 회로를 구성하고 외부 부하를 변화시키면서 열전 모듈의 발전량을 측정하였다. 열전 모듈의 고온부와 저온부 온도를 측정하기 위해 양단에 알루미늄 블록을 위치시켜 중앙에 열전대(T-type)를 삽입하여 온도를 측정하였으며, 온도 값은 데이터 수집 장치(Yokogawa DA100)와 컴퓨터를 사용하여 기록하였다. 또한 각각의 알루미늄 블록과 열전 모듈 사이에서의 접촉 열저항을 최

소화시키기 위해 TIM (thermal interface material)인 써멀 그리스(MOMENTIVE YG6111)를 사용하였다.

고온부 온도와 양단 온도차에 따른 열전 모듈의 발전 성능을 측정하기 위해 각 조건에서의 초기 개방회로 전압을 측정후 전기부하기의 외부 저항, 즉 발전전류를 순차적으로 증가시키면서 각각의 출력 전압을 측정하였다. 이 때 발전전류가 증가함에 따라 열전 모듈의 흡열량 및 발전량이 변하기 때문에 고온부와 저온부 온도가 변하게 된다. 따라서 각각의 발전전류 조건마다 카트리지 히터와 냉각용 열전 모듈의 인가전압을 조절하여 항상 동일한 설정 온도를 유지하였으며, 그 때의 온도 오차는 설정 온도의  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 로 제어하였다.

3. 실험 결과

3.1 단일 열전 모듈

본 연구에서는 복수 개의 열전 모듈에서의 전기적 연결 방법에 따른 발전 특성 분석에 앞서 단일 열전 모듈에 대한 발전 성능 분석을 선행하였다. 본 연구에 적용된 열전 모듈은 Beijing Huimao Cooling Equipment Co., Ltd.<sup>(12)</sup>사의 열전 모듈 중 TEC1-12707T125 모델을 사용하였다. 상기 열전 모듈의 외관 크기는  $40 \times 40 \times 3.6 \text{ mm}$ 이며, 전체 펠렛(Pellet, Thermo-element) 개수(N)는 127쌍이다. 또한 제조사에서 제공하는 전기적 내부 저항 R<sub>i</sub>는 T<sub>h</sub> = 27 °C, ΔT = 0 °C 조건에서 1.7Ω이다.

선정된 모델에 대한 단일 실험 온도 조건은 고온부 온도를 일정하게 유지시키고 저온부의 온도를 변화시켜 양단의 온도차를 조정하면서 진행 하였다. Fig. 3은 세가지 경우의 일정한 고온부 온도 조건에서 각각 양단 온도차를 변화시켰을 때의 열전 모듈의 출력 전류, 전압, 전력에 대한 결과를 나타낸다. 그래프로부터 외부 부하기에서의 출력 전류를 증가시켰을 경우 열전 모듈의 출력 전압은 선형적으로 감소하며, 출력 전력은 증가하면서 감소하여 최대점이 존재하는 2차 곡선 형태를 보여주고 있다. 고온부 온도가 동일한 조건에서 양단 온도차가 증가할 경우에는 열전 모듈의 출력 전압 및 출력 전류가 거의 선형적으로 모두 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 양단 온도차가 증가할수록 상대적으로 고온부에서의 흡열량이 증가하기 때문이다. 또한 양단 온도차가 동일한 조건에서 고온부 온도

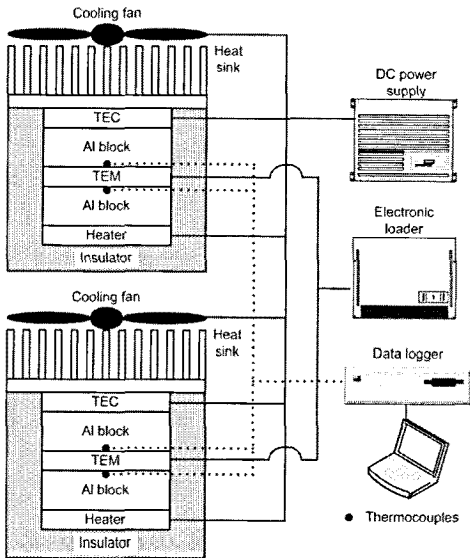


Fig. 2 Schematic diagram of dual TEMs experiment.

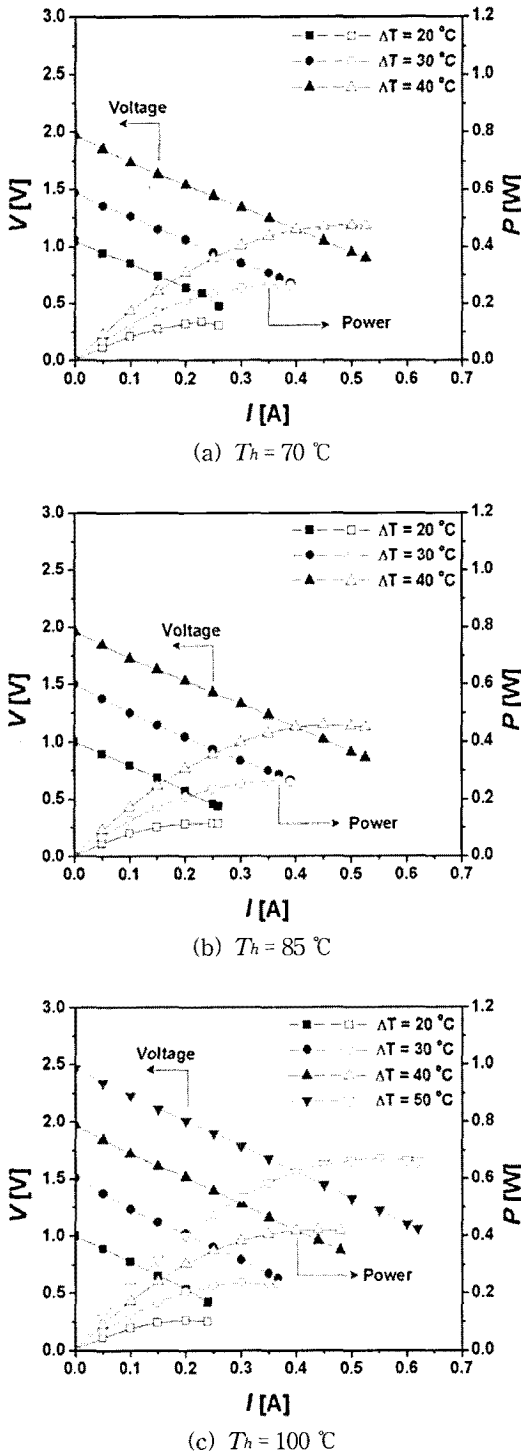


Fig. 3 Experimental results of single TEM performance according to  $T_h$  and  $\Delta T$ .

변화에 따른 발전 성능을 비교해보면 출력 전류 증가에 따른 출력 전압의 감소 경향성이 동일하며 그 값 또한 큰 차이를 보이지 않고 있다.

일반적으로 열전 모듈에서의 출력 전력은 해석적으로 산출이 가능하며 아래와 같다.<sup>(5)</sup>

$$P = 2 \frac{m}{\rho l(1+m)^2} \alpha^2 (T_h - T_c)^2 N A_c \quad (1)$$

여기서  $\alpha$ 와  $\rho$ 는 각각 펠렛의 제백 계수와 전기적 저항력을  $l$ ,  $A_c$ 는 각각 펠렛의 길이와 단면적을  $T_h$ ,  $T_c$ 는 열전모듈의 고온부 및 저온부 온도를  $m$ 은 펠렛의 내부 저항  $R_I$ 와 외부 저항  $R_L$ 의 비를 나타낸다. 식으로부터 열전 모듈의 출력 전력은 양단 온도차의 제곱에 비례함을 알 수 있으며 이는 Fig. 3의 실험 결과와 일치한다. 또한 상기 식으로부터 출력 전력과 열전 모듈의 고온부 온도는 상관관계가 없음을 알 수 있다. 그러나 상기 식에는 열전 모듈에서의 전기적 내부 저항이 포함되어 있으며, 전기적 내부 저항이 증가하면 열전 모듈의 출력 전력은 감소하게 된다. 일반적으로 열전 모듈의 전기적 내부 저항은 온도의 함수로서 평균 온도가 증가하게 되면 내부 저항이 증가하게 되고, 결과적으로 열전 모듈의 발전 성능을 저하시킨다. 따라서 열전 모듈의 고온부 온도가 증가하게 되는 것은 양단 온도차가 동일 시 평균 온도의 증가와 같으므로 결과적으로 내부 저항이 증가하게 되어 출력 전력에 영향을 미치게 되므로, 엄밀하게는 그 영향성이 고려되어야 한다.

### 3.2 다중 열전 모듈

개별 열전모듈을 다중으로 연결하여 열전 발전 시스템을 구성할 시, 전기적 연결 방법에 따른 발전

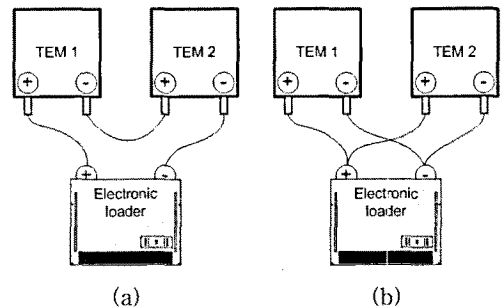


Fig. 4 Electric circuits of dual TEMs : (a) series, (b) parallel.

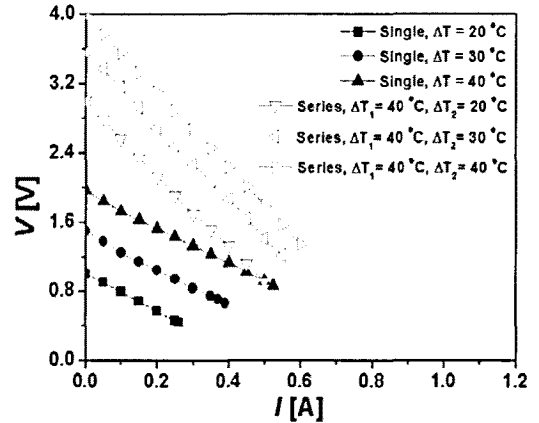
성능 분석을 위한 실험을 수행하였다. 직렬 및 병렬 연결에 대한 개별 열전모듈 및 전기 부하기의 연결 방법을 Fig. 4에 나타내었다. 실험 장치의 열전 모듈 고온부 온도는 전 실험에 걸쳐 모두 85 °C로 고정하였다. 또한 열전 모듈 1의 양단 온도차는 40 °C로 일정하게 유지하고 열전모듈 2의 양단 온도차를 20, 30, 40 °C로 변화시켜 두 열전 모듈의 작동 온도 조건에 차이를 두었다.

3.2.1 직렬연결

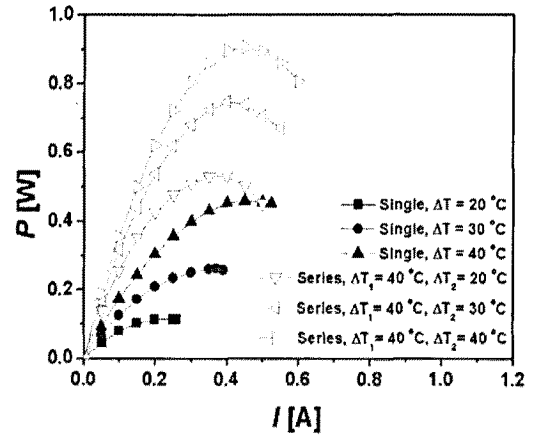
Fig. 5는 두 열전 모듈을 직렬로 연결한 실험 결과로서 출력 전류에 따른, 출력 전압, 전력 및 발전 효율을 단일 열전 모듈 실험 결과와 비교하여 나타내었다. 그래프에서의  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$ 는 각각 열전모듈 1, 2에서의 양단 온도차를 의미한다. 전체적으로 두 열전 모듈을 직렬 연결하게 되면 같은 출력 전류에서 단일 열전 모듈과 비교하여 모두 출력 전압이 높아지며, 두 열전 모듈의 온도차 차이가 적어질수록, 즉 두 열전 모듈의 작동 온도 조건이 같아질수록 출력 전압은 상승함을 알 수 있다. 또한 직렬 연결된 열전 모듈의 출력 전류 증가에 따른 전압 감소 경향은 두 열전 모듈의 온도차 차이에 상관없이 매우 유사한 기울기를 보여주고 있다.

Fig. 5(a)로부터 직렬 연결된 열전 모듈의 전체적인 운전 범위는 가장 높은 발전 성능을 보이는  $\Delta T = 40$  °C 조건에서의 단일 열전 모듈과 비교해서 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 즉 두 열전 모듈의 작동 온도 조건이 상이한 조건에서 두 모듈을 직렬 회로로 구성하면 전체 운전 범위는 개별 모듈의 운전 범위의 산술적인 합이 되지 않고 발전 성능이 우수한 단일 모듈의 운전 범위를 크게 벗어나지 않는다. 이로부터 두 열전 모듈을 직렬 회로로 연결하여 시스템을 구성할 때에는 작동 온도 조건에 큰 상관없이 두 열전 모듈 중 높은 발전 성능을 보이는 모듈의 운전 범위를 기준으로 하여 운전 점을 선정하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

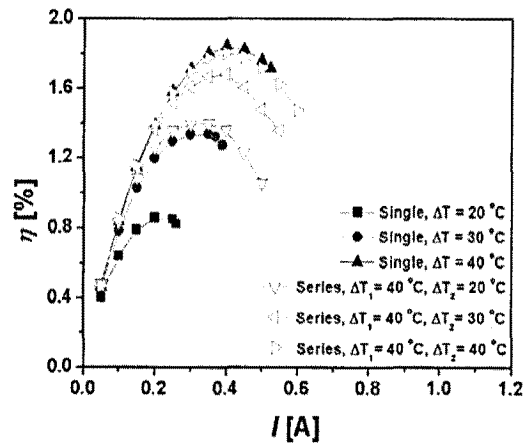
Fig. 5(a)로부터 전기적으로 직렬 연결된 열전 모듈의 개방회로 전압은 단일 열전 모듈에서의 개방회로 전압의 합과 같음을 알 수 있다. 예를 들어, 단일 열전 모듈의 양단 온도차  $\Delta T = 40$  °C에서의 개방회로 전압은 약 2.0 V,  $\Delta T = 30$  °C에서는 약 1.5 V이며 두 모듈을 직렬연결 시 개방회로 전압은 약 3.5 V이다. 또한 직렬 연결된 열전 모듈에서의 출력 전압은 출력 전류 증가에 따라 단일 열전 모듈과 비교하여 매우 급하게 하락하는 것을 알 수 있다. 이



(a) V-I curves



(b) Power output



(c) Efficiency

Fig. 5 Experimental results of dual TEMs performance for a series circuit at  $T_h = 85$  °C.

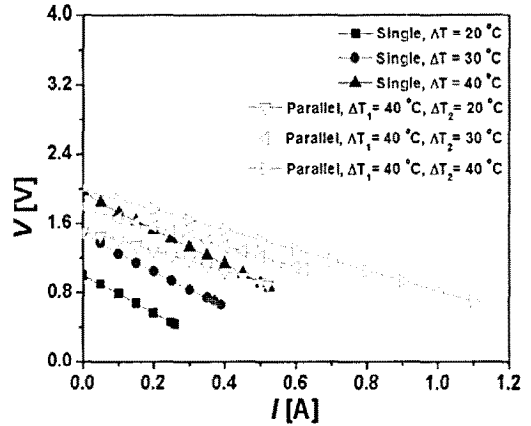
는 두 열전 모듈을 직렬연결 시 전체 내부 저항은 개별 모듈의 합과 같아져 단일 열전 모듈의 내부 저항보다 상승하기 때문이다. 즉, 직렬 연결된 열전 모듈의 개방회로 전압은 두 단일 모듈의 개방회로 전압의 정확한 두 배가 되지만 외부에서 부하가 걸리게 되면 내부 저항의 증가로 인해 출력 전압은 일정한 기울기로 급격하게 하강하게 된다.

Fig. 5(b)는 단일 및 직렬 연결된 열전 모듈의 출력 전압으로서 전류 증가에 따라 증가하다 감소하는 전형적인 2차 포물선 형태를 보여주고 있다. 전체적으로 직렬 연결된 열전 모듈의 출력 전압은 개별 열전 모듈의 출력 전압의 합으로 나타나는 것을 알 수 있으며 두 열전 모듈의 온도차 차이가 같아질수록 발전 성능이 향상됨을 알 수 있다. 또한 두 열전 모듈의 작동 온도 조건에서의 최대 출력 점은 두 열전 모듈의 온도차 차이가 같아질수록 조금씩 높은 출력 전류 방향으로 이동하지만 그 차이는 크지 않은 동시에 발전 성능이 우수한  $\Delta T = 40^\circ\text{C}$  단일 열전 모듈의 발전 특성과 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 직렬연결 모듈에서의 운전 범위는 발전 성능이 우수한 단일 열전 모듈의 운전 범위와 큰 차이가 없기 때문이다.

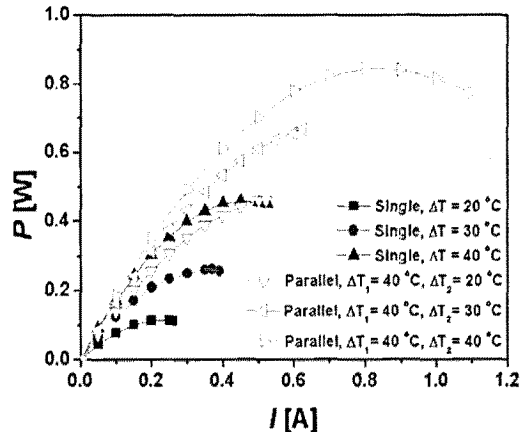
Fig. 5(c)는 단일 열전 모듈과 직렬 연결된 열전 모듈의 발전 효율을 나타내며 발전 효율은 입력 전압 대비 출력 전압으로 산정하였다. 그래프로부터 열전 모듈을 직렬연결 시 두 열전 모듈의 작동 온도 조건이 동일할 경우 효율이 가장 좋았다. 이는 열전 모듈을 직렬연결 시 두 열전 모듈의 작동 온도가 같아질수록 발전 성능이 향상되는 특성과 같은 이유이다. 또한 직렬 연결된 열전 모듈의 발전 효율은 두 열전 모듈의 온도차 차이가 커질수록 점점 감소하는 경향성을 보이고 있다. 전체적으로 최대 발전 효율 점은 최대 출력 전압 점과 일치하였으며, 본 연구에서의 작동 온도 조건에서는 직렬연결 열전 모듈의 발전 효율이 단일 모듈보다 낮은 현상은 관찰되지 않았다.

3.2.2 병렬연결

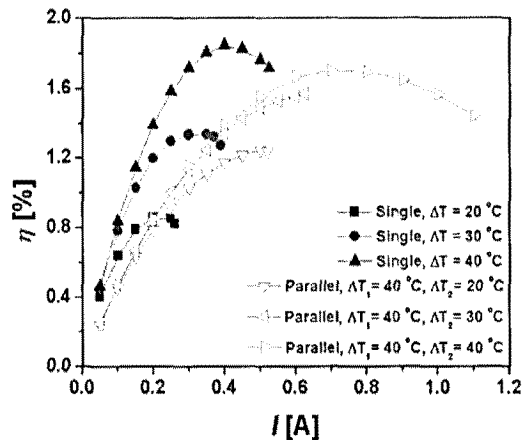
Fig. 6(a)는 두 열전 모듈을 병렬로 연결한 상태에서의 출력 전류에 따른 출력 전압으로서 단일 열전 모듈과 비교하여 나타내었다. 그래프로부터 병렬 연결된 열전 모듈에서의 출력 전압은 단일 열전 모듈과 비교해서 작동 온도 조건에 따라 높은 현상과 낮은 현상이 모두 관찰됨을 알 수 있다. 즉 두 열전 모듈의 작동 온도 조건 차이가 커질수록



(a) V-I curves



(b) Power output



(c) Efficiency

Fig. 6 Experimental results of dual TEMs performance for a parallel circuit at  $T_h = 85^\circ\text{C}$ .

단일 열전 모듈에 비해 같은 출력 전류에서 낮은 출력 전압이 나타나며, 두 열전 모듈의 작동 온도 조건이 같아질수록 단일 열전 모듈에 비해 출력 전압이 높게 나타나게 된다. 또한 병렬 연결에서도 직렬 연결에서처럼 두 열전 모듈의 작동 온도 조건이 같아질수록 출력 전압은 상승하는 것을 알 수 있다.

그래프로부터 열전 모듈을 병렬 연결하게 되면 전체적으로 출력 전류 증가에 따른 출력 전압 감소 기울기가 단일 열전 모듈에 비해 완만해지는 것을 알 수 있다. 즉, 직렬 연결에서는 전체 저항이 개별 열전 모듈의 합으로서 증가하여 출력 전압 감소 기울기가 증가하지만, 병렬 연결에서는 개별 열전 모듈의 역수의 합으로 정해져 전체 저항이 감소하여 결과적으로 출력 전압 감소 기울기도 완만해지게 된다. 두 열전 모듈을 병렬 연결 할 때 발생하는 내부 저항의 감소는 전체 운전 범위에도 변화를 가져오게 된다. 그래프로부터 두 열전 모듈의 작동 온도 조건이 동일할 경우 출력 전류의 범위가 매우 확장되는 것을 알 수 있다. 본 실험에서는 출력 전류 범위가 약 2배 가까이 증가하는 것으로 관찰되었으며 이는 직렬 연결에서와 비교할 때 매우 상이한 결과이기도 하다. 즉 직렬 연결에서는 발전 성능이 우수한 특정 모듈의 특성을 따라 운전 범위가 정해지지만, 병렬 연결에서는 두 열전 모듈의 작동 온도 범위가 같아질수록 출력 전류 범위가 확장되는 특성을 보이고 있다. 또한 Fig. 6(a)로부터 전기적으로 병렬 연결된 열전 모듈의 개방회로 전압은 개별 열전 모듈의 개방회로 전압의 평균값으로 정해짐을 알 수 있다. 예를 들어,  $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ 에서의 개방회로 전압은 약 2.0 V,  $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ 에서는 약 1.5 V이며 두 모듈을 병렬 연결 시 개방회로 전압은 약 1.75 V이다. 같은 작동 온도 조건에서 직렬 연결에서는 개방회로 전압이 약 3.5 V임을 고려하면 직렬과 병렬 연결에 의한 개방회로 전압은 2배 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이상에서 두 열전 모듈이 같은 동작 온도 조건에서 운전되더라도 전기적인 연결 방법에 따라 개방회로 전압, 내부 저항, 운전 범위 등의 특성이 매우 상이함이 확인되었다. 따라서 열전 발전 시스템의 운전 점 선정 등, 최적 시스템 설계 시에는 각 모듈의 직, 병렬 조건 및 각 모듈의 작동 온도 조건이 종합적으로 고려되어 결정되어야 할 것이다.

Fig. 6(b)는 병렬 연결된 두 열전 모듈의 출력 전력으로서 단일 열전 모듈과 비교하여 나타내었다. 두 열전 모듈의 작동 온도 조건이 가장 상이한 상태인  $\Delta T_1 = 20^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_2 = 40^\circ\text{C}$ 인 경우, 병렬 연결된

모듈의 최대 출력 전력은  $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ 인 단일 열전 모듈의 최대 출력 전력과 거의 차이가 없었다. 또한 모든 출력 전류 구간에서 병렬 연결된 열전 모듈의 출력 전력이 단일 열전 모듈보다 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 같은 작동 온도 조건에서 직렬 연결 결과와 비교해서 병렬 연결 시 어느 정도의 발전 성능 저하가 발생했음을 알 수 있다. 발전 성능 저하는  $\Delta T_1 = 30^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_2 = 40^\circ\text{C}$ 인 조건에서도 계속 나타났으며 전 구간에서 모두 직렬 연결보다 낮은 출력 전력 값을 보였다.

병렬 연결 시 발생하는 발전 성능 저하를 개별 단일 모듈의 발전 성능과 비교하기 위해 다음과 같은 발전 성능 인자를 정의하며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

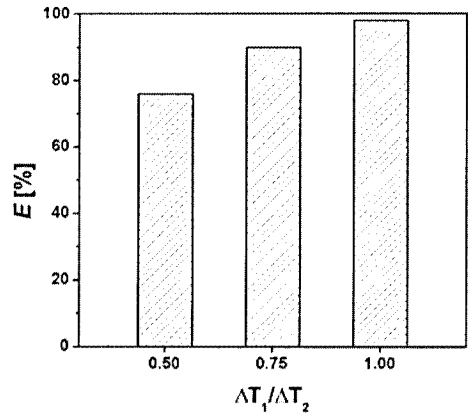


Fig. 7 Reduction rate of power output for a parallel circuit according to the ratio between  $\Delta T_1$  and  $\Delta T_2$ .

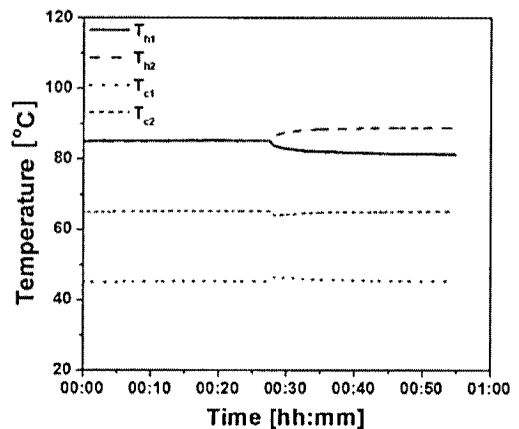


Fig. 8 Temperature trace of dual TEMs for a parallel circuit.

$$E = 100 - \frac{(P_{\max,1} + P_{\max,2}) - P_{\max,p}}{(P_{\max,1} + P_{\max,2})} \times 100 \quad (2)$$

여기서 하첨자 1과 2는 각각의 개별 열전모듈을, p는 병렬연결을 의미한다. 상기 식에서  $E = 100\%$ 이면 개별 열전모듈과 비교하여 병렬연결에 의한 발전 성능 저하가 없음을 의미한다. Fig. 7로부터, 개별 열전모듈의 운전 온도가 동일할 때( $\Delta T_1/\Delta T_2 = 1$ )의 병렬연결 모듈의 발전 성능은 개별 열전모듈의 발전 성능 합 대비 약 95%로, 병렬연결에 의한 발전 성능 저하는 약 5% 정도임을 알 수 있다. 그러나 개별 열전모듈의 작동 운전 온도차가 커질수록 발전 성능 저하 경향이 뚜렷해지는 것을 확인 할 수 있으며,  $\Delta T_1/\Delta T_2 = 0.5$ 일 때 개별 열전모듈의 발전 성능 대비 약 75%의 발전 성능을 보였다. 이러한 발전 성능 저하는 발전 효율에 직접적인 영향을 끼치게 된다. Fig. 6(c)로부터 출력 전력이 매우 낮은 초기 전류 구간의 발전 효율을 비교해보면, 병렬 연결된 모듈의 효율이 단일 모듈의 효율보다 상대적으로 낮은 값을 보이는 것을 알 수 있다. 즉 직렬 연결 모듈에서는 초기 전류 구간의 발전 효율이 단일 모듈과 비교하여 큰 차이를 보이지 않는 것과 매우 대조되는 결과이다. 또한 두 열전 모듈의 작동 운전 조건이 동일할 때, 즉 최대 발전 효율을 보이는 조건에서도 단일 열전 모듈 및 직렬 연결된 모듈에서의 발전 효율보다 그 값이 상대적으로 낮게 측정되었다. 더욱이 두 열전 모듈의 작동 온도 조건이 가장 상이할 경우에는 병렬 연결된 열전 모듈의 최대 효율이 단일열전 모듈보다 낮았다. 이러한 발전 효율이 저하된 이유는 앞서 설명한대로 두 열전 모듈을 병렬 연결할 때 발전 성능 저하가 발생했기 때문이다.

열전 모듈을 병렬 연결할 때 발생하는 발전 성능 저하의 원인을 분석하기 위해 두 열전 모듈의 고온부 및 저온부 온도를 실시간으로 측정하였다. 이 때 열전모듈 1의 고온부 온도는 85 °C, 양단 온도차는 40 °C, 열전모듈 2의 고온부 온도는 85 °C, 양단 온도차는 20 °C로 설정하였고 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 두 열전 모듈의 고온부 및 저온부 온도가 각각 정상상태에 도달 후 두 모듈을 병렬로 연결하게 되면 발전 성능이 상대적으로 우수한 열전모듈 1의 고온부 온도는 하강하고 저온부 온도는 상승하게 된다. 반대로 발전 성능이 상대적으로 떨어지는 열전모듈 2의 고온부 온도는 상승하고 저온부 온도는 하강하게 된다. 이러한 고온부 및 저온부 온도 변화는 직렬연결에서는 관찰되지 않는 현상으로서

병렬연결에서의 발전 성능 저하 원인을 설명할 수 있다. 즉, 두 열전모듈에서 작동 온도 조건에 따라 발전 성능이 차이가 나는 상태에서 전기적으로 두 모듈이 병렬 연결되면, 발전 성능이 우수한 모듈에서 발생하는 DC 전력이 상대적으로 발전 성능이 떨어지는 열전 모듈의 전원 역할로 작용되게 된다. 따라서 열전 모듈 2에서는 DC 전력을 공급 받는 입장이 되어 펠티어(Peltier) 효과에 의해 순간적으로 고온부 온도는 상승하게 되고 저온부 온도는 하강하게 된다. 마찬가지로 전원을 공급하게 되는 열전 모듈 1에서는 그 만큼의 전력이 손실되므로 고온부 온도는 하락하게 되고 저온부 온도는 상승하는 결과를 초래하게 된다. 이러한 현상은 두 열전 모듈의 작동 온도 조건이 차이가 클수록 더욱 현저히 나타나며, 앞서 병렬연결 실험 결과에서 관측되었던 출력 전력 및 전체 발전 효율 저감의 원인인 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 다중 열전 발전 시스템에서의 열전 모듈의 성능을 이해하기 위한 실험을 수행하였다. 우선적으로 작동 온도에 따른 단일 모듈에서의 성능 특성을 고찰하였고, 개별 열전 모듈을 각각 직렬 및 병렬로 연결하여 발전 특성을 분석하였다.

- 1) 단일 열전 모듈은 출력 전류가 증가함에 따라 출력 전압은 감소하고 출력전력은 최대 출력 전력 점이 존재하는 2차 포물선 형태로써 열전 모듈의 양단 온도차가 증가할수록 발전 성능은 상승하였다.
- 2) 열전 모듈은 직렬연결 시 개방회로 전압이 개별 열전 모듈의 개방회로 전압의 합으로 결정되며 전체 내부 저항의 증가로 인해 출력 전압의 감소 기울기가 증가하였다. 또한 두 열전 모듈의 운전 온도 조건이 같아질수록 전체 발전 성능은 향상되었다.
- 3) 열전 모듈은 병렬연결 시 개방회로 전압이 개별 열전 모듈의 개방회로 전압의 평균값으로 결정되었으며, 내부 저항의 감소로 인해 출력 전압의 감소 기울기가 감소하였다. 직렬연결과 마찬가지로 작동 온도 조건이 같아질수록 전체 발전 성능은 향상되었으나 전체적으로 직렬연결보다 발전 성능이 좋지 않았다.
- 4) 두 열전 모듈의 작동 온도 조건이 상이한 조건에서 두 모듈을 병렬연결하게 되면 상대적으로 발전 성능이 우수한 열전 모듈이 발전



성능이 떨어지는 열전 모듈의 전원 역할을 하게 되어 결과적으로 직렬연결과 비교해 발전 성능이 저해되었다.

### 참고문헌

1. Niu, X., Yu, J. and Wang, S., 2009, Experimental study on low-temperature waste heat thermoelectric generator, *Journal of Power Sources*, Vol. 188, pp. 621-626.
2. Rowe, D. M. and Min. G., 1998, Evaluation of thermoelectric modules for power generation, *Journal of Power Sources*, Vol. 73, pp. 193-198.
3. Qiu, K. and Hayden, A. C. S., 2008, Develops of thermoelectric self-powered residential heating system, *Journal of Power Sources*, Vol. 180, pp. 884-889.
4. Champier, D., Bedecarrats, J. P., Rivaletto, M. and Strub, F., 2009, Thermoelectric power generation from biomass cook stoves, *Energy*, In Press.
5. Nuwayhid, R. Y., Shihadeh, A., and Ghaddar, B., 2005, Development and testing of a domestic woodstove thermoelectric generator with natural convection cooling, *Energy Conversion and Management*, Vol. 46, pp. 1631-1643.
6. Rodriguez, A., Vian, J. G., Astrain, D. and Martinez, A., 2009, Study of thermoelectric systems applied to electric power generation, *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, pp. 1236-1243.
7. Yamashita, O., 2009, Effect of linear and non-linear components in the temperature dependences of thermoelectric properties on the cooling performance, *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 1746-1756.
8. Yamashita, O., 2008, Effect of temperature dependence of electrical resistivity on the cooling performance of a single thermoelectric element, *Applied Energy*, Vol. 85, pp. 1002-1014.
9. Min, G., Rowe, D. M. and Kontostavlakis, K., 2004, Thermoelectric figure-of-merit under large temperature differences, *Journal of Physics D : Applied Physics*, Vol. 37, pp. 1301-1304.
10. Eakburanawat, J. and Boonyaroonate, I., 2006, Development of a thermoelectric battery-charger with microcontroller-based maximum power point tracking technique, *Applied Energy*, Vol. 83, pp. 687-704.
11. Yu, C. and Chau, K. T., 2009, Thermoelectric automotive waste heat energy recovery using maximum power point tracking, *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, pp. 1506-1512.
12. <http://www.huimao.com/series1.htm>.