

자동차 냉각수 폐열회수 열전발전 시스템의 성능에 관한 연구

An Experimental Study on Thermoelectric Generator Performance for Waste Coolant Recovery Systems in Vehicles

이 대 웅(Dae-Woong Lee)[†]

한라비스테온공조 연구본부

Research Division, Halla-Visteon Climate Control Corp., 95 Sinil-sero, Daedeok-gu, Daejeon 306-230, Korea

(Received March 10, 2014; revision received May 13, 2014; Accepted: May 14, 2014)

Abstract This study indicated the possibility of energy regeneration from waste coolant heat, by using thermoelectric generation integrated with heat pipe. The internal combustion engine rejects more than 60% wasteful energy to the atmosphere by heat. The thermoelectric generator has recently been studied, to convert the energy from engine waste heat into electricity. For coolant waste heat recovery, a thermoelectric generator was investigated, to find out the possibility of vehicular application. Performance characteristics were conducted with various test conditions of coolant temperature, coolant mass flow rate, air temperature, and air velocity, with the thermoelectric generator installed either horizontally or vertically. Experimental results show that the electric power and conversion efficiency increases according to the temperature difference between the hot and cold side of the thermoelectric generator, and the coolant flow rate of the hot side heat exchanger. Performance improvement can be expected by optimizing the heat pipe design.

Key words Waste heat recovery(폐열회수), Thermoelectric generation(열전발전), Heat pipe(히트파이프), Figure of merit(성능지수), Conversion efficiency(발전효율)

[†] Corresponding author, E-mail: dlee6@hvccglobal.com

기호설명

c_p	: 정압비열 [kJ/kg · K]
G	: 체적유량 [ℓ /min]
I	: 전류 [A]
\dot{m}	: 질량유량 [kg/h]
P	: 전력 [W]
Q	: 열용량 [W]
T	: 온도 [°C]
V	: 전압 [V]

하첨자

a	: 공기
i, o	: 입구, 출구
w	: 냉각수

1. 서 론

자동차의 투입에너지 60% 이상이 열에너지 형태로 버려지고 있기 때문에 버려지는 폐열을 회수하여 자동

차의 구동력으로 활용할 수 있는 방법을 찾는 것은 매우 중요하다. 폐열은 배기가스가 40%, 그리고 엔진을 냉각하기 위한 라디에이터에서 30%의 열에너지가 고온의 형태로 대기에 버려진다. 따라서 자동차에서 이러한 버려지는 폐열을 회수하여 전기에너지 또는 기계에너지로 재생하여 연비를 향상시키고자 하는 연구가 많이 진행되고 있으며, 열전소자를 이용하여 고온의 배기가스로부터 직접 열을 회수하기 위한 연구들이 진행되었다.⁽¹⁾

1900년대 초에 시작된 열전발전의 연구는 Hi-Z사에서 디젤엔진의 폐열을 이용한 1 kW급 열전발전 시스템을 개발하면서 열전발전기의 해석 및 열전발전 시스템의 최적설계 등에 대한 연구가 체계적으로 이루어졌고, 최근에는 미국과 유럽을 중심으로 자동차 열 구동발전시스템에 대한 연구가 진행되고 있다.⁽²⁻³⁾

에너지 회수의 관점에서 보면 고온의 배기가스로부터 에너지를 회수하는 것이 중요하지만 냉각 라디에이터에서 냉각수로 버려지는 폐열도 상당한 양이므로 일부 회수가 가능할 것이다.⁽⁴⁾

Won et al.⁽⁵⁾은 차량에서 엔진 냉각수 폐열로 버려지

는 에너지 회수에 대하여 연구하였다. 열전발전장치의 고온부(hot plate)와 저온부(cold plate)에 각각 0℃와 70℃의 냉각수가 흐르게 하고 각 연결부는 히트파이프로 연결하여 입력전압과 저온부의 온도를 변화하면서 해석을 하였다. 입력전압이 높을수록 온도차가 커져 더 높은 기전력을 얻을 수가 있음을 알았고, 열전소자의 재질을 세라믹과 텔루르에 대하여 연구를 진행하였다.

Kim et al.⁽⁶⁾은 열전발전 시스템에서 저온부의 열원을 외부로 이동하여 냉각하기 위한 기술의 하나로 루프형 열사이폰을 적용한 열교환 냉각장치를 적용하여 가능성을 평가하였다.

Kim et al.⁽⁷⁾은 열전발전 시스템에서 자동차에서 나오는 배기열을 효율적으로 회수하기 위하여 열전달 효과가 큰 히트파이프를 전열면적의 극대화를 위한 열전달 수단으로 설치하고, 열전발전 모델에 대하여 성능을 모사하였고 시스템 해석을 수행하였다.

Ko et al.⁽⁸⁾은 연료전지자동차에서 극한 운전 상황에서 연료전지 스택의 효율적인 냉각을 위하여 열전소자와 히트파이프가 결합된 냉각모듈에 대하여 연구를 하였다. 실험은 외기온도와 냉각 풍량을 변경하면서 실험하였고, 냉각 풍량이 감소할수록, 냉각온도가 상승할수록 열전소자의 방열온도는 상승하였고, 냉각 풍량이 1 m³/min일 때 최대의 방열량을 가지며 이후에는 냉각 풍량을 증가하여도 방열량의 변화는 없고 오히려 소비동력만 증가하는 것을 알았다.

Gu et al.⁽⁹⁾은 진동형 히트파이프의 형태에 따라 배기 폐열의 회수 성능에 대하여 연구를 진행하였고, Lee et al.⁽¹⁰⁾은 전자기기의 냉각을 위하여 소형 진동형 히트파이프를 이용하여 열전특성과 성능을 고찰하여 냉각장치로서의 적용가능성을 살펴보았다.

본 연구에서는 차량의 라디에이터에서 냉각수 폐열로 버려지는 열에너지를 회수하기 위하여 열전발전 모듈에 히트파이프를 적용하여 냉각수 폐열회수 열전발전 시스템을 제작하였다. 제작된 열전발전 시스템은 냉각수 온도와 유량, 히트파이프에 설치된 냉각핀으로 붙어오는 공기온도와 속도를 변경하면서, 성능에 미치는 영향을 살펴보았고, 적용 타당성에 대하여 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험은 크게 다음과 같이 진행되었다. 먼저 한국세라믹기술연구원에서 보유하고 있는 단위 열전모듈 실험 장치로 모듈양단의 온도 차이에 따른 기전력을 실험하였고, 다음으로 제작된 냉각수 폐열회수 열전발전 시스템으로, 인가 전류별 발전 성능에 대하여 리그시

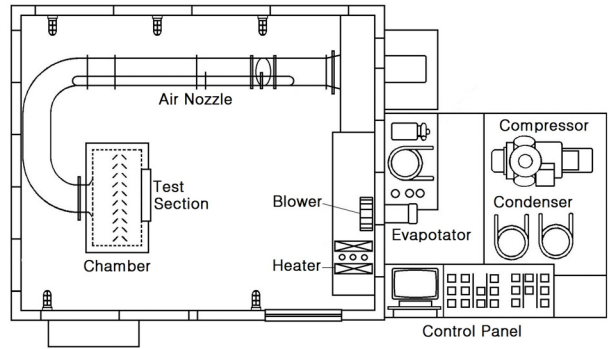


Fig. 1 Schematic of thermoelectric generation system performance calorimeter.

험을 진행하였다. 마지막으로 열전발전 시스템을 열량계에 장착하여 각종 환경조건을 변경하면서 성능에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다.

냉각수 폐열회수 열전발전 실험에 사용된 열량계(calorimeter)의 개략도가 Fig. 1에 나타나 있다. 열량계는 전면에 풍량이 균일하게 유입되도록 안내 길이 부착되어 있으며, 주위 공기와의 열손실이 발생하지 않도록 단열이 되어 정확한 실험이 되도록 구성되어 있다. 공기가열 장치는 밀폐된 연관형 전기히터에 의해 가열하며, 밀폐된 구조(closed-loop)는 개방형 구조보다 낮은 열밀도를 가지므로 낮은 표면온도로 전체공기를 고르게 데울 수 있는 장점이 있다. 반대로 공기냉각을 위해서는 30마력의 압축기와 팽창밸브, 증발압력 조절기에 의하여 제어된다. 또한 냉각수측은 별도의 히터와 냉각기가 설치되어 온도조절이 가능하도록 구성되어 있다.

온도는 실험부 입출구에 RTD센서를 설치하여 측정하였으며, 풍량은 Brandt B-NZP1000 계열의 노즐로 고풍량과 저풍량이 따로 측정된다. 습도는 전기히터의 가열에 의해 약 180℃의 증기로 공급되며, 습도센서는 공기의 엔탈피차를 계산하는 밀러형태를 사용하였다. 순환하는 냉각수량은 질량유량계에 의하여 측정된다. RTD센서의 경우 측정오차는 ±0.01℃이고, 풍량은 ±0.3%, 냉각수량은 ±0.1%이다.

2.2 실험시료 및 조건

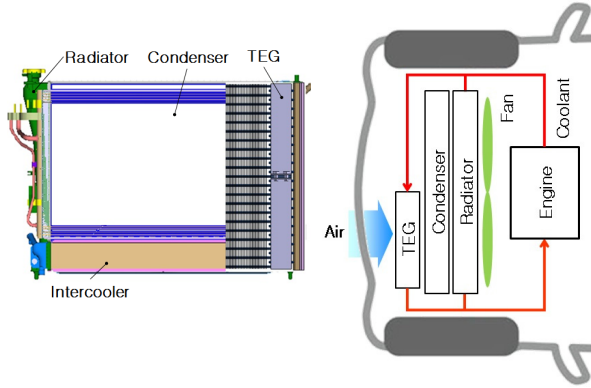
열전발전 시스템은 고온부(hot side)와 저온부(cold side)의 온도차에 의해 기전되는 전류와 전압에 대한 함수로 식(1)과 같이 표현될 수 있다.

식(2)는 열전발전 시스템의 냉각수로부터 얻는 열량으로 정의되고, 열전발전 시스템의 변환효율은 식(3)과 같이 회수된 냉각수 폐열의 열량에 대한 생산된 전력의 비로 나타난다.

$$P_i = V \cdot I \quad (1)$$

$$Q_h = \dot{m} \cdot c_p (T_{wi} - T_{wo}) \quad (2)$$

$$\eta = \frac{P}{Q_h} \quad (3)$$



(a) TEG position (b) Schematic diagram

Fig. 2 Vehicle application of coolant thermoelectric generation system.

Total size			300×420×65 mm
Hot side	HEX	Material	Copper
		Size	65×420×65 mm
Cold side	Heat pipe	Size	φ6×235 mm, 20 pieces
		Fluid	Water
	Fin	Size	23×0.3 mm, 34 FPDM
		Material	Aluminum
Thermoelectric module		Size	40×40×4 mm, 40 pieces
		Material	BiTe

(a) Specification of thermoelectric generator



(b) Photo of thermoelectric generator

Fig. 3 Specification and photo of coolant waste heat recovery thermoelectric generator.

Table 1 Test conditions of thermoelectric generator performance

Coolant	Temperature	40, 60, 80 °C
	Flow rate	5, 10, 15 l/min
Air	Temperature	10, 20 °C
	Velocity	0.5, 2.5, 4.5 m/s

Fig. 2에 냉각수 폐열회수 열전발전 시스템의 차량 장착 예시를 나타내었다. 차량이 고속으로 주행시 냉각수온은 최대 110°C이고, 여름철 공기온도가 30°C라면 열전발전 모듈의 고온면과 저온면의 온도차는 최대 80°C가 발생한다. 엔진냉각수 폐열회수 열전발전 시스템의 상세 사양이 Fig. 3에 나타나 있다. 고온측 열교환기는 구리블록을 가공하여 냉각수가 유로 내를 U-flow로 흐를 수 있도록 구성하였으며, 저온측 열교환기는 가운데 히트파이프를 두고 4mm의 구리블록을 2개 접합하여 제작하였다. 히트파이프는 총 20개가 적용되었으며, 열전달 면적을 증대하기 위하여 알루미늄 재질의 열교환 핀이 80개 설치되었다. 열전소자는 크리스탈사(Crystal Co.) 제품으로 BiTe소재의 열전소자 40개를 사용하였다. 각 열전모듈은 5개씩 직렬로 연결하고, 다시 8개로 병렬 연결하였다. 열전모듈과 열교환기 사이에는 써멀컴파운드를 이용하여 조립하였으며, 전체 열교환기의 조립에는 볼트를 이용하여 각 구리 블록을 고정하였다.

고온측으로 공급되는 냉각수의 온도측정을 위하여 열전발전 시스템의 입구와 출구에서 T형 열전대를 사용하여 온도를 측정하였으며, 저온측은 공급되는 공기의 입구와 출구에서의 온도를 측정하였다. 또한 열전 모듈의 고온측과 저온측의 온도측정은 구리블록에 열전대를 심어서 직접 온도를 측정하였다. 냉각수의 유량과 공기의 풍속은 열량계 장비에서 측정된다. 열전대의 오차는 ±0.3°C이다.

Table 1은 냉각수 폐열회수 열전발전 시스템의 성능 실험을 위한 조건을 보여주고 있다. 실험은 냉각수의 온도와 유량, 공기온도와 속도를 변경하면서 발전성을 실험하였다. 전압의 측정오차는 최대 ±0.1 V이고, 소모전류는 ±0.1 A이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험 시료

Fig. 4는 한국세라믹기술연구원에서 실험한 열전소자 단위 모듈의 성능실험 결과이다. 저온측과 고온측의 온도를 변경하면서 기전되는 전압과 전류를 측정하였다. 저온부의 온도차에 따른 성능의 영향은 거의 없고, 고온부와 저온부의 온도차가 커짐에 따라 발전량은 거의

이 대응

선형적으로 급격히 증가하고 있다. 열전모듈 제조사에서 제공하는 열전모듈의 발전성능은 고온부와 저온부의 온도차가 60℃에서 1.3 W이나, 히트싱크의 열저항 및 써멀컨파운드 등 여러 가지 저항 때문에 약 0.9 W 정도로 나타났다.

Fig. 5는 냉각수의 온도 변화에 따른 열전발전 시스템의 성능을 시험한 결과이다. 전류가 증가하면 열전발전 모듈의 흡열량과 발전량이 변하게 된다. 실험은 공기온도는 상온이고, 풍속은 2.5 m/s, 냉각수 유량은 10 l/min에서 열전발전 모듈에 인가되는 전압을 조절하면서 발전량을 측정하였다. 전류가 증가함에 따라 전압은 점차로 감소하고 있으며, 발전량은 점차 증가하다가, 최고점을 보인 후 다시 감소하는 경향을 보인다. 냉각수의 온도가 높을수록 열전모듈 양단간의 온도차가 커지게 되므로 발전성능은 증가하고 있다.

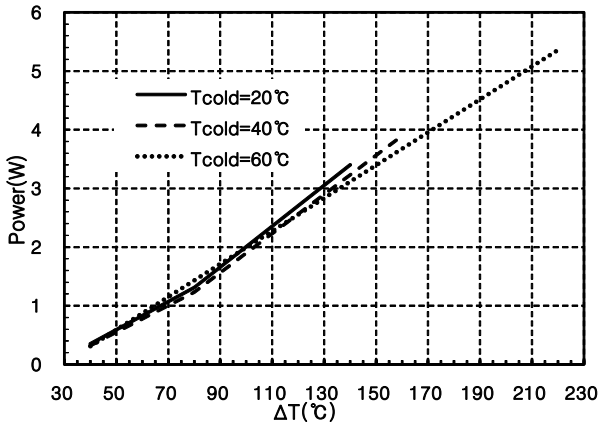


Fig. 4 Experimental results of thermoelectric generator unit performance.

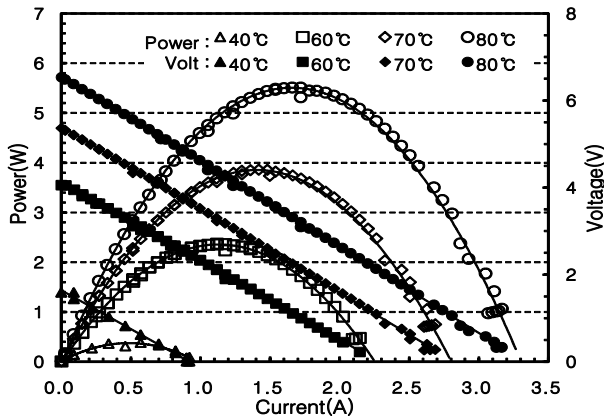


Fig. 5 Experimental results of thermoelectric generator performance ($T_a = 27^\circ\text{C}$, $V_a = 2.5\text{ m/s}$, $G_w = 10\text{ l/min}$).



Horizontal position Vertical position
Fig. 6 Photo of performance experiment as a position of thermoelectric generator at calorimeter.

Fig. 6은 열전발전 시스템의 장착위치에 따라 발전성능을 시험하였다. 수평장착의 경우 수직 장착보다 고온부와 저온부의 온도차도 적게 나타났고, 따라서 발전량과 변환효율도 수직방향보다 작다. 이는 히트파이프를 수직방향으로 장착하였을 때가 히트파이프내의 작동유체에 미치는 중력의 영향으로 열전달이 더욱 활발하기 때문이다.

실험측정 결과에 대한 불확실성 해석은 Klines and McClintock⁽¹¹⁾이 제안한 방법을 사용하였다. 전력량의 측정오차는 4.0%로 나타났고, 열전달량의 측정오차는 5.2%로 나타났다. 발전효율은 6.8%로 나타났다.

3.2 실험결과 고찰

Fig. 7에 열전발전 시스템의 장착위치별 발전성능을 비교하였다. 수평장착의 경우 수직장착의 경우보다 고온부와 저온부의 온도차도 적게 나타났고, 따라서 발전량과 변환효율도 수직방향보다 작다. 이는 히트파이프

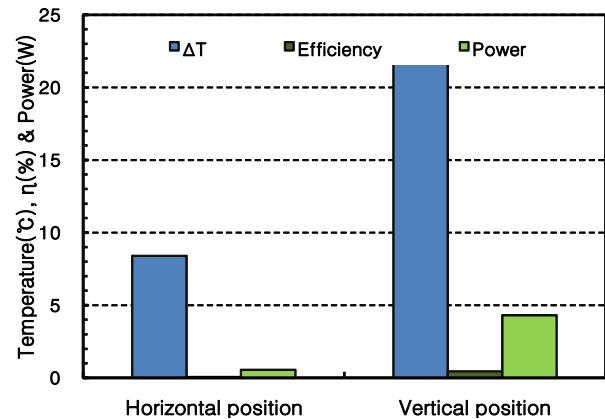


Fig. 7 Performance comparison as a thermoelectric generator position ($T_a = 20^\circ\text{C}$, $V_a = 2.5\text{ m/s}$, $T_w = 80^\circ\text{C}$, $G_w = 10\text{ l/min}$).

프의 작동특성의 차이로, 수직방향으로 장착하였을 때 히트파이프를 통한 열전달성능이 더 우수하기 때문으로 판단된다.

Fig. 8은 외기가 10°C로 2.5 m/s로 공급될 때 냉각수 온도의 변화에 따른 발전성능을 비교하였다. 이때 냉각수 유량은 10 l/min이다. 냉각수 온도가 높을수록 열전모듈 양단간의 온도차가 커지게 되므로 발전성능과 변환효율은 증가하게 된다. 냉각수 온도가 60°C 이후에는 증가폭이 둔화되는 경향을 보이고 있다.

Fig. 9는 저온부로부터 들어오는 공기온도 변화에 따른 발전성능 실험결과이다. 풍속은 2.5m/s이고, 냉각수온은 80°C 유량은 10 l/min이다. 공기온도가 높아짐에 따라 히트파이프 끝단에 설치된 핀의 온도도 약간씩 높아지고, 발전모듈 양단간의 온도차는 줄어들게 되므로 발전량과 변환효율도 약간씩 낮아지고 있다. 하지만 공기의 온도변화에 따른 발전성능의 영향은 크지 않았다.

Fig. 10은 고온열교환기로 유입되는 냉각수 유량의

변화에 따른 발전 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 공기는 10°C, 2.5 m/s이고, 냉각수 온도는 80°C이다. 냉각수의 유량이 증가함에 따라 발전성능과 변환효율도 함께 상승하고 있는 것을 볼 수 있다. 하지만 유량이 10 l/min 이상에서 유량의 증가에도 불구하고 발전성능은 크게 향상되지 않았다. 이는 냉각수 폐열회수 열전발전 모듈의 고온측 열교환기의 유로가 제한적이기 때문으로 판단된다.

Fig. 11은 히트파이프에 설치된 핀으로 들어오는 풍속의 변화에 따라 발전 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 일반적으로 풍속이 증가하면 핀에서의 대류 열교환이 활발해져 발전성능도 높게 나타나야 하나, 풍속이 증가함에 따라 발전량과 변환효율은 미미하게 증가하였다. 이는 히트파이프가 설치된 평판핀이 충분한 방열을 해 주어야 하지만 히트파이프가 설계된 열전발전 시스템에서 충분히 방열을 하지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

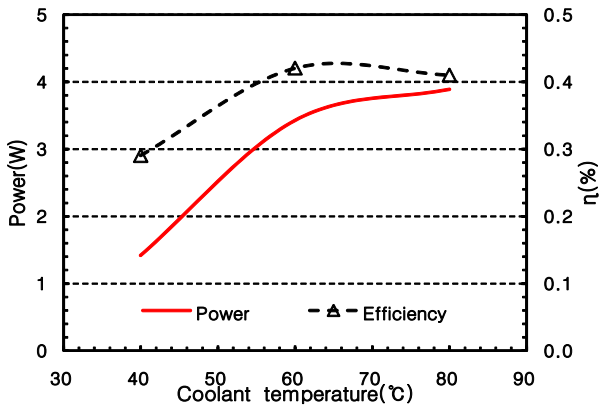


Fig. 8 Test results with various coolant temperature ($T_a = 10^\circ\text{C}$, $V_a = 2.5\text{ m/s}$, $G_w = 10\text{ l/min}$).

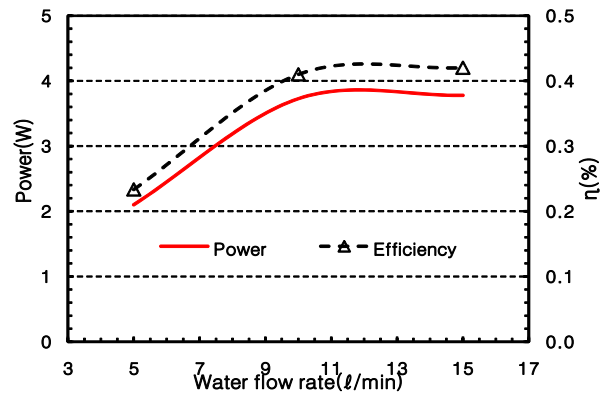


Fig. 10 Test results with various water temperature ($T_a = 10^\circ\text{C}$, $V_a = 2.5\text{ m/s}$, $T_w = 80^\circ\text{C}$).

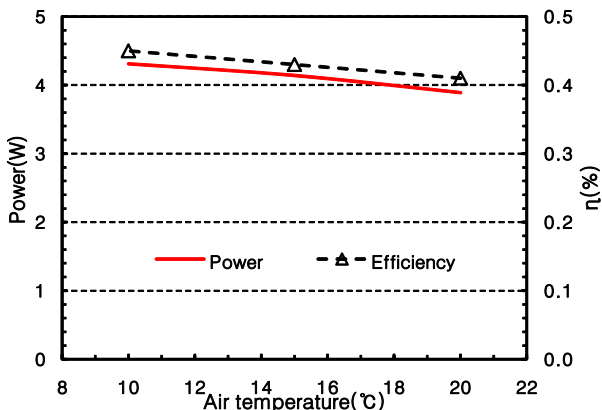


Fig. 9 Test results with various air temperature ($V_a = 2.5\text{ m/s}$, $T_w = 80^\circ\text{C}$, $G_w = 10\text{ l/min}$).

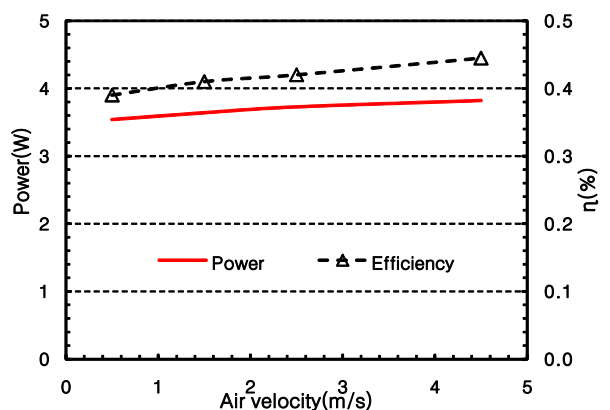


Fig. 11 Test results with various air velocity ($T_a = 10^\circ\text{C}$, $T_w = 80^\circ\text{C}$, $G_w = 10\text{ l/min}$).

4. 결 론

차량에서 라디에이터에서 버려지는 냉각수 폐열을 회수하는 열전발전 시스템에 대하여 연구를 하였다. 고온부는 차량 엔진의 뜨거운 물이 통과하고, 저온부는 히트파이프에 핀을 부착하여 공랭식으로 제작하여 냉각수온과 유량, 공기측의 온도와 풍속을 변경하면서 열전발전 시스템의 발전량과 효율을 실험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 열전발전 시스템 단품성능 시험에서 전류가 증가할수록 전압은 감소하였으며, 발전량은 점차로 증가하다가 최고점 이후 다시 감소하였다.
- (2) 냉각수 폐열회수 열전발전 시스템에서 성능에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 모듈 양단의 온도차로 온도차가 클수록 발전성능과 변환효율은 높게 나타났다.
- (3) 냉각수 유량이 증가할수록 발전성능과 변환효율도 높아졌으며, 이는 열전발전 시스템에 전달되는 고온 열량이 발전 성능에 영향을 크게 미치는 것을 알 수 있었다. 하지만 10 l/min 이상에서는 유량을 증가하여도 성능변화는 크지 않았다.
- (4) 공기온도는 높아질수록 열전발전 시스템의 발전 성능은 약간씩 감소하는 경향을 보였으며, 풍속의 변화에 따른 발전성능의 차이는 큰 영향이 없었다.

차량에서 냉각수로 버려지는 폐열을 회수하기 위하여 히트파이프를 이용한 열전발전 시스템을 제작하여 성능에 영향을 미치는 인자들을 살펴보았다. 열전달 향상을 위하여 사용한 히트파이프는 충분한 열량을 제거하기 위해서는 용량과 수량 등에 대하여 향후 냉각수 폐열회수 열전발전 시스템 설계 시 재검토가 필요할 것이다.

References

1. Bass, J. C., Elsner, N. B., and Leavitt, F. A., 1994, Performance of the 1kW thermoelectric generator for diesel engines, Proceedings, 13th International Conference on Thermoelectrics, Kansas City, pp. 295-298.
2. Furue, T., Hayashida, T., Imaizumi, Y., Inoue, T., Nagao, K., Fujii, I., and Sakurai, T., 1998, Case study on thermoelectric generation system utilizing the exhaust gas of internal combustion power plant, Proceedings, 17th International Conference on Thermoelectrics, Nagoya, pp. 473-478.
3. Rowe, D. M. and Min, G., 1998, Evaluation of thermoelectric modules for power generation, Journal of Power Sources, Vol. 73, No. 2, pp. 193-198.
4. Saqr, K. M., Mansour, M. K., and Musa, M. N., 2008, Thermal design of automobile exhaust based thermoelectric generator; Objectives and challenges, International Journal of Automotive Technology, Vol. 9, No. 2, pp. 155-160.
5. Won, B. C., Rhi, S. H., Kim, S. K., Lee, K. W., Kim, S. H., and Yoo, J. H., 2009, Heatpipe exhaust heat recovery equipment development of hybrid vehicle, Proceedings of the SAREK 2009 Winter Annual Conference, Vol. 2009, pp. 706-710.
6. Kim, S. K., Rhi, S. H., Won, B. C., Kim, D. H., and Lee, C. G., 2009, Thermoelectric power generation system with loop thermosyphon, Transaction of the Korean Society Mechanical Engineers (B), Vol. 33, No. 9, pp. 718-721.
7. Kim, S. K., Won, B. C., Lee, S. H., Kim, S. H., and Yoo, J. H., 2010, Thermoelectric power generation system with heat pipe in hybrid vehicles, Proceedings of the KSME 2010 Spring Annual Conference, Vol. 2010, No. 5, pp. 241-243.
8. Ko, G. S., Park, Y. C., Ko, W. B., and Kim, T. H., 2013, A study on the development of integrated cooling module combined with heat pipe and thermoelectric devices, Proceedings of the SAREK 2013 Summer Annual Conference, Vol. 2013, No. 6, pp. 791-794.
9. Gu, Y. U., Lee, S. I., Kwon, Y. H., and Kim, J. S., 2013, Research of exhaust heat recovery system according to the shape of the pulsating heat pipe, Proceedings of the SAREK 2013 Summer Annual Conference, Vol. 2013, No. 6, pp. 96-99.
10. Lee, E. J., Jang, D. S., Kim, Y. C., and Ahn, W. K., 2013, Performance characteristics of a micro pulsation heat pipe for electric device cooling, Proceedings of the SAREK 2013 Winter Annual Conference, Vol. 2013, No. 11, pp. 69-72.
11. Klines, S. J. and McClintock, F. A., 1953, Describing uncertainties in single-sample experiments, Mechanical Engineering, Vol. 75, pp. 3-8.