

자동차 배기폐열 회수용 열전발전 시스템의 성능에 관한 연구

Experimental Study on Thermoelectric Generator Performance for Waste Heat Recovery in Vehicles

이대웅(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 April 14, 2014; Accepted: April 22, 2014)

Abstract Internal combustion engines release 30~40% of the energy from fossil fuels into the atmosphere in the form of exhaust gases. By utilizing this waste heat, plenty of energy can be conserved in the auto industry. Thermoelectric generation is one way of transforming the energy from engine's exhaust gases into electricity in a vehicle. The thermoelectric generators located on the exhaust pipe have been developed for vehicle applications. Different experiments with thermoelectric generators have been conducted under various test conditions as following examples: hot gas temperature, hot gas mass flow rate, coolant temperature, and coolant mass flow rate. The experimental results have shown that the generated electrical power increases significantly with the temperature difference between the hot and the cold side of the thermoelectric generator and the gas flow rate of the hot-side heat exchanger. In addition, the gas temperature of the hot-side heat exchanger decreases with the length of the thermoelectric generator, especially at a low gas flow rate.

Key words Waste heat recovery(폐열회수), Thermoelectric generation(열전발전), Figure of merit(성능지수), Fuel economy(연비), Conversion efficiency(발전효율)

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

기호설명

C_p	: 정압비열 [kJ/kg · K]
G	: 질량유량 [kg/h]
H	: 높이 [mm]
L	: 길이 [mm]
P	: 전력 [W]
Q	: 열전달율 [W]
T	: 온도 [°C]
W	: 폭 [mm]

하첨자

g	: 가스
w	: 냉각수
i, o	: 입구, 출구

1. 서 론

지구 온난화의 주범인 이산화탄소 배출량을 줄이기 위한 세계 각국의 자동차 연비규제는 자국의 산업보호

와 함께 정부 차원에서 추진되고 있다. 자동차에서 연비향상을 위한 노력으로는 엔진의 성능 향상을 위한 직접분사, 가변 밸브 타이밍, 전동식 파워스티어링, 엔진 공회전 제어, 경량화, 공기저항이나 구름저항 개선, 자동 무단변속기, 변속기 록업(lock-up) 영역확대 등 많은 기술들이 검토되고 있으며, 이중 상당수는 이미 차량에 적용되고 있다.

최근에는 자동차의 에너지 손실 중에서 가장 큰 비중을 차지하고 있는 배기가스로 버려지는 폐열을 회수하여 전기에너지 또는 기계에너지로 재생하여 연비를 향상시키고자 하는 연구가 많이 진행되고 있다. 열에너지를 전기에너지로 전환하는 기술로는 랭킨사이클과 같이 효율은 좋지만 시스템이 다소 복잡한 증기사이클 방식과 효율은 다소 떨어지지만 간편한 열전소자를 이용하는 열전발전(TEG : Thermoelectric generator) 방식이 있다. 이 열전발전 기술은 크기가 작고, 구성요소가 간단하여 미국, 독일 등의 자동차 업체를 중심으로 활발히 연구가 진행되고 있다.⁽¹⁾

열전발전은 서로 다른 두 금속을 연결하고 양단의 온도차에 의해 기전력이 발생하는 제백효과(Seebeck effect)

를 이용한 것으로 1940년대 소련에서 실용화하였고, 1956년 미국에서 인공위성에 열전 발전기를 탑재하기 위한 목적으로 본격적인 연구가 시작되었다.^(2, 3)

Lee et al.⁽⁴⁾은 열전발전시스템의 기초연구로 가솔린 차량에서 전력 및 배기 열에너지를 측정하고 분석하여 열전발전시스템의 적용 가능성을 검토하였다. 차대 동력계에서 시가지 주행모드인 CVS-75 모드와 고속주행 모드인 HWFET 모드로 주행하면서 전력부하를 조절 하면서 실험하여 배기가스의 온도가 200°C 이상이 되어야 비교적 양호한 열전발전이 될 수 있음을 제시하였다.

자동차에서 배기가스로 버려지는 열은 약 35% 수준으로, 열전발전 시스템으로 이 폐열을 회수하기 위한 다양한 시도들이 미국 에너지성(DOE : Department of Energy)을 중심으로 오래전부터 이루어져왔다. 자동차에서 기존의 발전기를 열전발전 시스템으로 대체한다는 목표아래 자동차회사와 부품회사, 여러 연구소들이 컨소시엄을 구성하여 열전소자의 재료에서부터 차량의 적용까지 역할을 분담하여 다양한 연구가 수행되었다.^(5,7)

Han et al.⁽⁸⁾은 열전모듈의 열적조건이 열전발전 성능에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 열전모듈 양단의 온도차, 고온부의 온도를 변화하면서 열전모듈의 제벡계수, 전기저항, 열저항, 성능지수를 살펴보고 열전발전 거동을 분석하고 실험결과와 비교하여 열전모듈 양단의 온도차가 증가할수록 발전성능은 향상되고, 양단온도차가 동일한 경우 고온부의 온도변화는 성능에 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 알았다. 열전모듈 고온부의 흡열량과 출력전압의 비로 정의한 발전효율은 실험값과 해석값이 15% 이내로 일치하였다.

또한 차량에서 배기가스의 온도는 사용영역별로 다르기 때문에 각 온도대별로 사용될 수 있는 열전소자에 대한 연구 역시 중요하다. 성능을 향상하기 위한 다양한 소재의 연구나, 배기가스의 온도영역별로 사용할 수 있도록 서로 다른 소재를 접합하는 연구도 많이 진행되고 있다.^(9, 10)

본 연구에서는 차량에서 배기가스로 버려지는 폐열을 열전모듈을 이용하여 회수하는 열전발전시스템에 대하여 연구를 진행하였다. 실제 차량의 배기계를 분석하여 각 부위별 배기가스 온도를 측정하였고, 이를 바탕으로 제작된 열전발전 시스템에 냉각시스템을 설치하여 연소기에서 연소온도와 유량을 변경하면서, 발전성능을 실험하고 성능에 미치는 영향을 연구하여 열전발전 시스템의 설계 기초를 수립하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

열전발전은 열전소자의 양단간의 온도차에 의하여

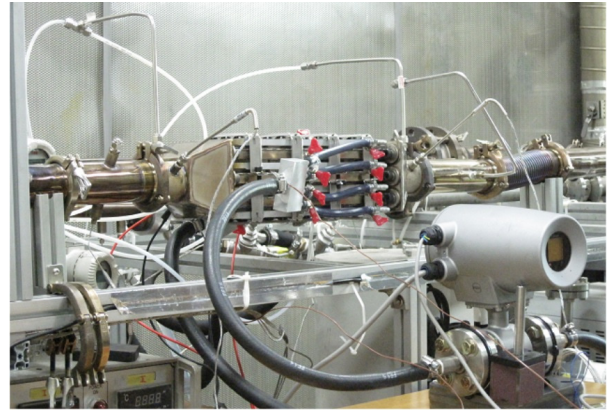


Fig. 1 Photo of the thermoelectric generator test apparatus.

기전력이 발생하는 제벡효과를 이용한 원리로, 열전발전 시스템에서 배기가스로 버려지는 폐열을 회수하기 위해서는 고온가스의 상태와 특성을 확인할 필요가 있다. 실험은 환경제어풍동에 현대자동차에서 생산한 제네시스 차량을 설치하고, 엔진후단부터 최종 배기가스 토출 말단까지 배기계에 각 부위별로 열전대를 설치하고 다양한 차속과 평지주행, 등관주행 등에 대하여 배기가스 온도를 측정하였다.

실차주행 시험으로 구해진 배기가스 온도를 이용하여, 열전발전 시스템의 발전성능 특성을 실험하였다. 실험은 Fig. 1과 같이 버너 시험 장치를 이용하여 진행하였으며, 주요구성은 배기가스의 온도 및 유량을 모사할 수 있는 배기가스 공급장치, 열전발전 시스템의 저온부에 냉각수를 공급하기 위한 냉각수 공급 장치 및 발전된 전력을 제어하기 위한 전력부하기로 구분할 수 있다.

실험 장치에서 열전발전 시스템의 고온측 열교환기 입구와 출구에는 보호관(sheath) 열전대들을 삽입하여 온도를 측정하였으며, 정밀도 $\pm 0.1\%$ F.S의 차압계를 설치하여 배기가스의 압력손실을 측정하였다. 저온측 열교환기 입구와 출구는 T타입의 열전대를 이용하여 냉각수 온도를 측정하였고, 질량유량계를 설치하여 냉각수의 유량을 측정하였다.

2.2 실험 시료 및 방법

열전발전 시스템의 기본특성은 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 고온 열교환기에서 얻는 열량으로 정의되고, 열전발전 시스템의 변환효율은 식(3)과 같이 회수된 폐열의 열량에 대한 생산된 전력의 비로 나타낼 수 있다.

$$P = V \cdot I = (\alpha \Delta T - IR)I \quad (1)$$

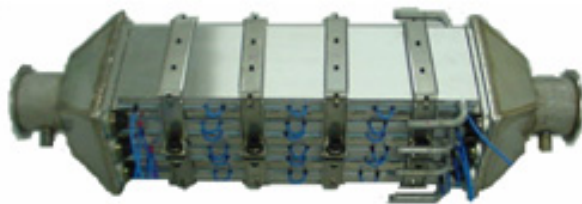
$$Q_h = G_g \cdot C_p (T_{gi} - T_{go}) \quad (2)$$

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

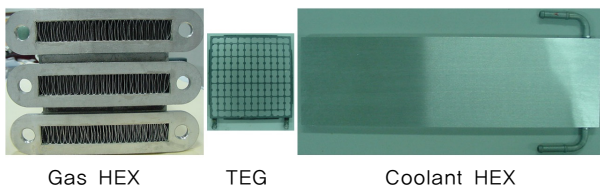
실험에 사용된 열전발전 시스템의 상세 제원을 Table 1과 Fig. 2에 나타내었다. 열전소자는 미국 Hi-Z사 제품으로 Bi-Te소재의 열전소자 24개를 사용하였다. 고온 열교환기는 스테인리스 스틸 소재를 사용하였으며, 열교환 효율을 높이기 위하여 내부에 핀이 부착되어 있다. 저온 열교환기는 알루미늄 소재의 다채널 튜브로 유로는 유턴(U-turn)방식이다. 전체 열전발전 시스템은 3단으로 적층하여 제작하였으며, 한단에 앞뒤로 Hi-Z사 열전소자가 4개씩 8개가 나란히 부착되어 있고, 열전소자와 고온열교환기의 접합에는 배기가스의 온도를 견디기 위하여 얇은 탄소판(carbon sheet)을 사용하였다. 열전발전 시스템의 조립에는 적층 후 적절한 압력으로

Table 1 Specification of thermoelectric generator

Total size	588 L × 152 W × 126 H(mm)	
Material	Stainless steel(STS304)	
Gas	Size	320 L × 100 W × 15 H(mm)
heat-exchanger	Fin density	45 FPDM
	Fin type	Offset fin
Thermoelectric module	Maker	Hi-Z
	Size	75 L × 75 W × 4.5 H(mm)
	Power	12~15 W/Ea
Water	Material	Aluminum
heat-exchanger	Flow pass	2-Pass, U-turn type



(a) Thermoelectric generator



(b) Detail of the thermoelectric generator

Fig. 2 Specification and shape of thermoelectric generator.

Table 2 Test conditions of thermoelectric generator performance

	Fluid	Gas
Hot side	Temperature	150, 300, 400, 500 °C
	Flow rate	150, 200, 300 kg/h
Cold side	Fluid	Water
	Temperature	30, 40, 50, 60, 70, 80 °C
	Flow rate	5, 10, 15 ℓ/min

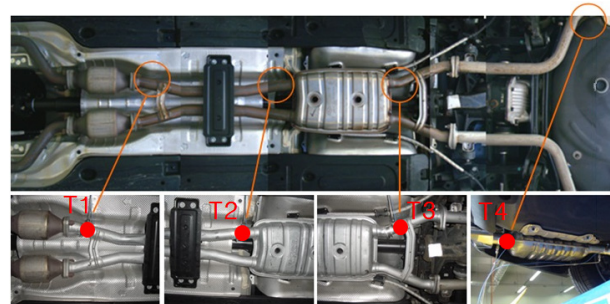
눌러줄 수 있는 조임틀(clamp)을 이용하여 조립하였다.

Table 2는 버너 시험 장치에서 열전발전 시스템의 성능특성을 확인하기 위하여 실험한 실험조건이다. 고온측의 가스온도와 유량, 그리고 저온측의 냉각수 온도와 유량을 변경하면서 성능에 미치는 영향을 연구 하였다.

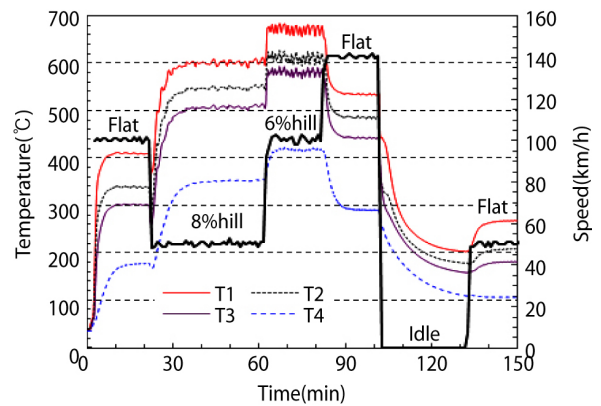
3. 실험결과 및 고찰

3.1 실차 배기가스 실험

Fig. 3은 현대자동차에서 생산한 제네시스의 주행



(a) Measuring point of exhaust gas



(b) Gas temperature

Fig. 3 Experimental results of exhaust gas temperature in vehicle(HMC Genesis).

차속과 경로별로 배기계의 각 부위에서 측정한 배기가스의 온도를 나타내고 있다. 배기가스 온도는 차속이 빠를수록 높아지고, 평지주행보다는 언덕길 주행시 온도가 더 높게 나타났다.

차량에서 버려지는 배기열을 효과적으로 회수하기 위해서는 고온측의 열교환기 설계는 매우 중요하다. 배기가스의 고온에 견딜 수 있어야 하며, 최소의 압력손실로 엔진 출력성능에 영향을 미치지 않아야 한다.

Fig. 4에 고온열교환기의 압력손실 실험결과를 나타내었다. 압력손실은 유량이 많을수록 높아지고, 500℃의 가스온도와 최대 300 kg/h의 가스유량에서 압력손실은 0.06 bar 정도이다.

3.2 실험결과 고찰

Fig. 5는 열전발전 시스템의 발전성능을 나타낸 것이다. 저온부의 냉각수 온도는 30℃로 고정한 상태에서 고온가스의 온도를 변화하면서 열전발전 시스템의 출력특성을 살펴보았다. Fig. 5(a)를 보면 가스유량이 300 kg/h일 때 고온가스의 온도에 따른 출력특성이다. 전류가 증가함에 따라 생산전력은 증가하고 있으며, 최대출력 점을 지난 후 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 반면 출력전압은 전류의 증가에 따라 선형적으로 감소하고 있다. 가스온도가 높을수록 발전량과 전압도 높아지고 있으며, 이는 열전모듈 양단간의 온도차가 발전량에 가장 큰 영향을 미치기 때문이다.

Fig. 5의 (b)는 가스유량이 200 kg/h일 때의 발전전력과 전압을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)와 마찬가지로 고온가스의 온도가 증가함에 따라 열전모듈 양단의 온도차가 커지므로 출력과 전압도 상승하게 된다. 생산전력의 경우 최대전력점이 존재하며 이후에는 다시 감소하고 있다.

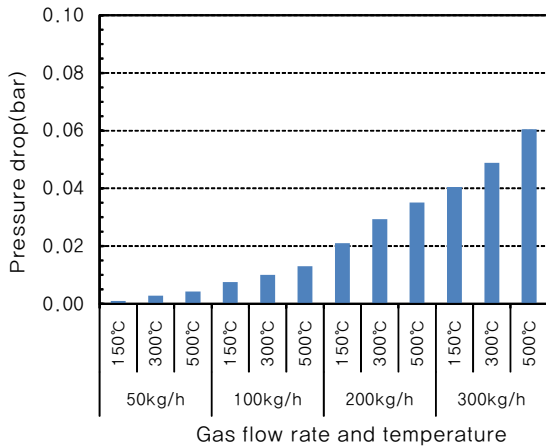
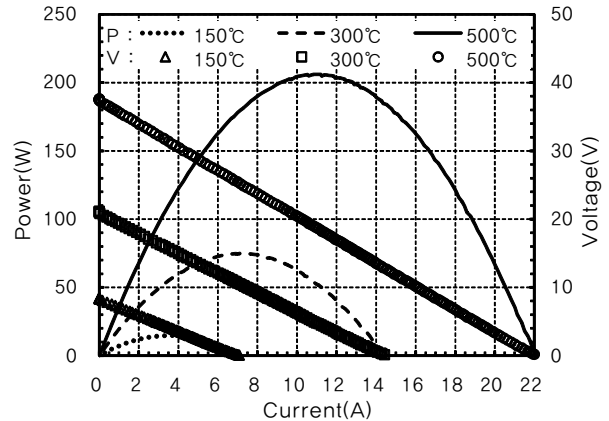
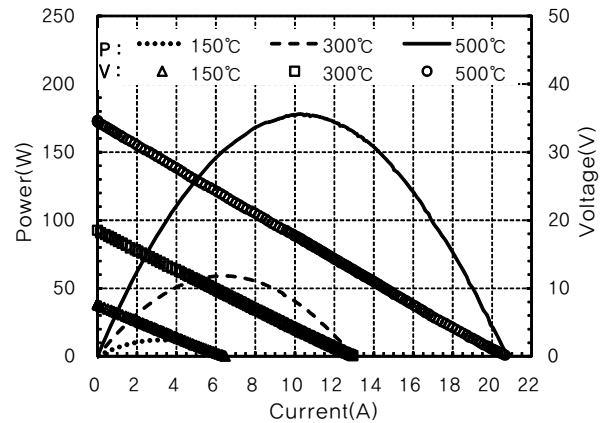


Fig. 4 Pressure drop at hot heat-exchanger with various gas flow rate.

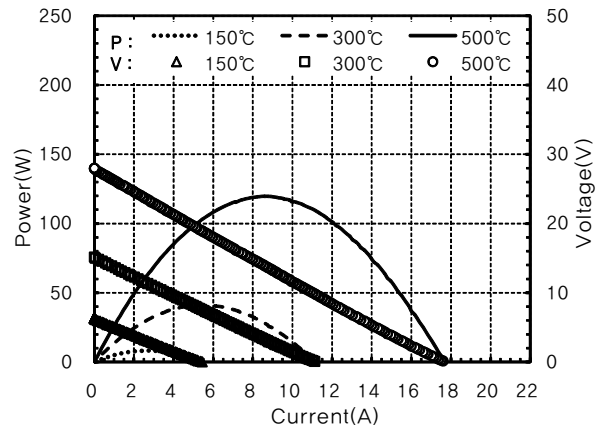
Fig. 5(c)는 가스유량이 150 kg/h일 때 고온가스의 온도별로 열전발전 시스템의 발전량과 전압을 나타낸 것



(a) Power and voltage($G_g = 300$ kg/h)



(b) Power and voltage($G_g = 200$ kg/h)



(c) Power and voltage($G_g = 150$ kg/h)

Fig. 5 Experimental results of thermoelectric generator performance($T_c = 30$ °C, $G_w = 10$ l /min).

이다. 앞서 살펴본바와 같이 고온가스의 온도가 높아질수록 출력과 전압특성도 증가 하고 있으며, 가스온도는 Fig. 5의 (a), (b) 및 (c)가 동일함에도 불구하고, 고온가스의 유량에 따라서 발전량과 출력전압은 상당한 차이를 보이고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에 열전발전 시스템에서 모듈 양단간의 온도차와 고온가스의 유량이 발전 성능에 미치는 영향을 비교하였다. 실험은 냉각수 온도를 30℃로 고정하고, 고온 열교환기를 통과하는 가스온도와 유량을 변경하면서 실험하였다. 실험결과를 보면 가스온도가 증가하면서 발전량도 2차 함수 형태로 증가하였다. 가스유량이 300 kg/h에서 가스온도 150℃와 500℃의 발전량을 비교해 보면 약 10배 정도 차이가 나고, 가스온도가 500℃일 때 가스유량 50 kg/h과 300 kg/h의 발전량을 비교해 보면 약 3배 정도 차이가 발생하여 가스유량도 발전 성능에 상당한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이는 가스유량이 증가할수록 고온 열교환기에서 흡수하는 열량이 많아지기 때문이다.

Fig. 7은 열전발전 시스템에서 저온 열교환기로 흐르는 냉각수 유량이 성능에 미치는 영향을 살펴본 것이다. 유량을 5~15 l/min까지 변경하면서 실험하였다. 냉각수 유량이 증가하면서 발전량은 약간씩 증가하고 있지만, 냉각수 유량이 10 l/min 이상에서는 거의 변화가 없었다.

Fig. 8은 열전발전 시스템에서 저온 열교환기로 공급되는 냉각수 온도가 발전 성능에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 냉각 재킷으로 공급되는 냉각수온이 높아질수록 열전모듈 양단간의 온도차가 줄어들게 되므로 발전량과 변환효율은 약간씩 감소한다. 냉각수온이 약 80℃일 경우에 냉각수온이 40℃일 때보다 발전량은 약 12% 정도 감소하였다.

Fig. 9는 열전발전 시스템의 변환효율을 보여주고 있다. 실험은 고온열교환기를 통과하는 가스의 온도변화에 따라 전력변환효율을 나타낸 것이다. Fig. 9의 (a)는 가스유량이 300 kg/h일 때 고온가스의 온도별로 회수된 폐열량에 대하여 생산된 전력의 비를 효율로 나타내었다. 전류가 증가함에 따라 변환효율은 점차로 높아지다가, 최대변환효율 점을 지난 후 다시 감소하고 있다. 가스온도가 높아지면 변환효율은 증가하고 있으며, 최대 효율은 약 2.2 정도로 열전발전 모듈의 낮은 변환효율과 고온 열교환기의 열저항, 탄소판 등 여러 가지 저항 때문에 낮아진 것으로 생각된다.

Fig. 9의 (b)는 가스유량이 200 kg/h일 때 변환효율을 나타낸 것이다. Fig. 9(a)와 동일한 경향을 보이고 있으며, 가스의 온도가 증가함에 따라 열전모듈 양단의 온도차가 크게 되어 변환효율도 증가하게 된다.

Fig. 9(c)는 가스유량이 150 kg/h일 때 고온가스의 온도별로 열전발전 시스템의 변환효율을 비교한 것이다. Fig. 9의 (a)나 (b)와 마찬가지로 열전발전 시스템 양단의 온

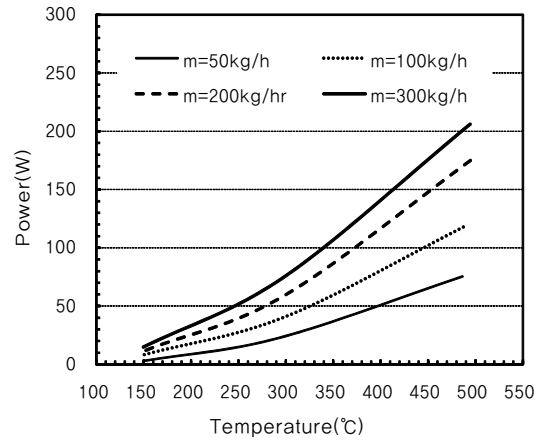


Fig. 6 Performance effect with various gas temperature and flow rate($T_c = 30^\circ\text{C}$, $G_w = 10 \text{ l/min}$).

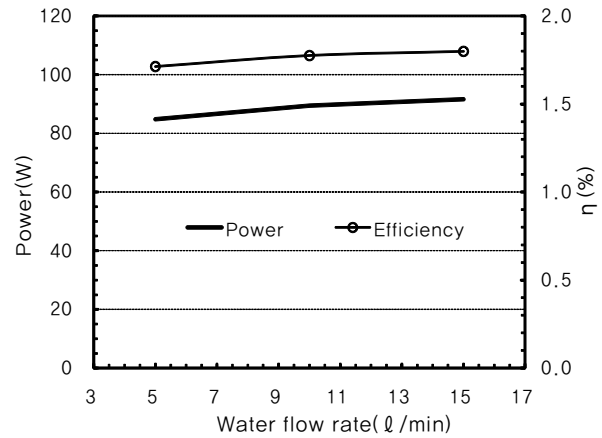


Fig. 7 Performance effect with various water flow rate($T_h = 400^\circ\text{C}$, $G_g = 100 \text{ kg/h}$, $T_c = 40^\circ\text{C}$).

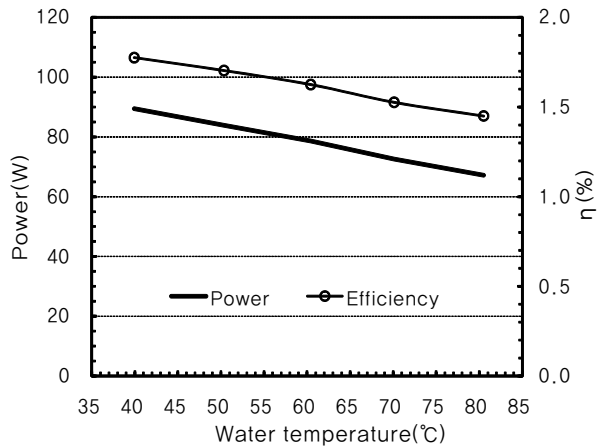
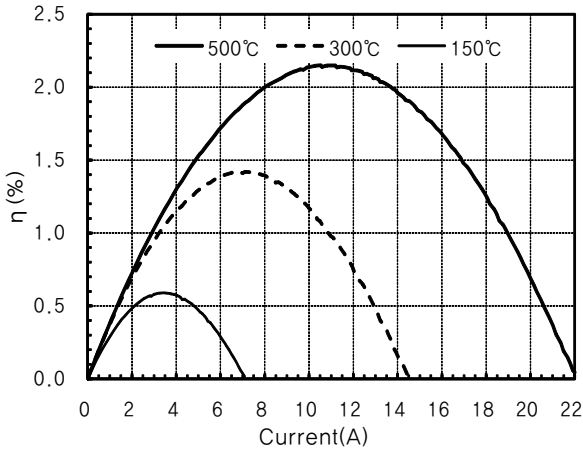
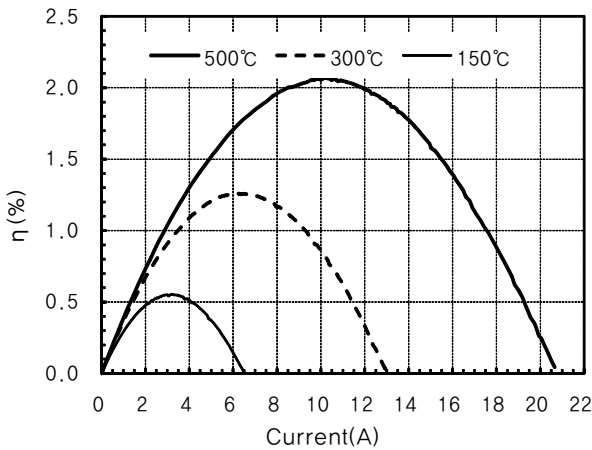


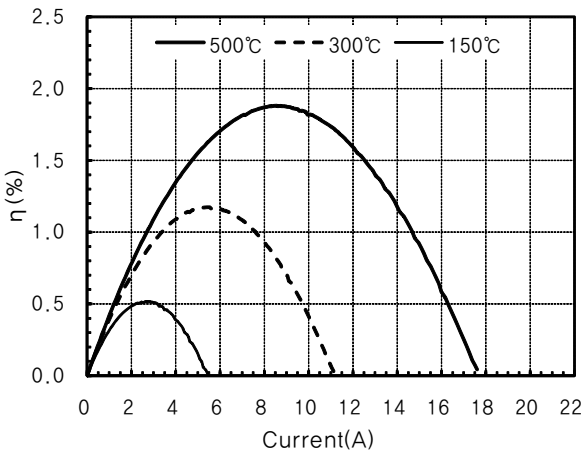
Fig. 8 Performance effect with various water temperature ($T_h = 400^\circ\text{C}$, $G_g = 100 \text{ kg/h}$, $G_w = 10 \text{ l/min}$).



(a) Efficiency($G_g = 300 \text{ kg/h}$, $G_w = 10 \text{ l/min}$)



(b) Efficiency($G_g = 200 \text{ kg/h}$, $G_w = 10 \text{ l/min}$)



(c) Efficiency($G_g = 150 \text{ kg/h}$)

Fig. 9 Experimental results of thermoelectric generator energy conversion efficiency ($T_c = 30^\circ\text{C}$, $G_w = 10 \text{ l/min}$).

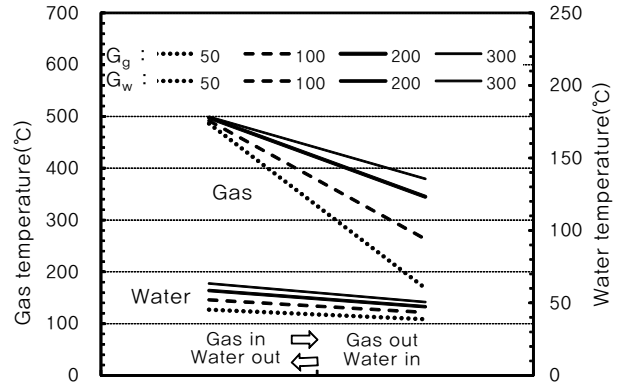


Fig. 10 Temperature gradient along the thermoelectric generator ($T_c = 30^\circ\text{C}$, $G_w = 10 \text{ l/min}$).

도차가 변환효율에 가장 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 고온가스의 유량이 감소함에 따라 변환효율도 감소하지만, 발전 성능만큼 크게 감소하지는 않았다.

Fig. 10은 열전발전 시스템에서 고온열교환기를 지나는 가스의 입구와 출구온도, 저온열교환기를 지나는 냉각수의 입구와 출구온도를 비교한 것이다. 저온열교환기를 통과하는 냉각수의 온도는 유량의 변화에 따라 온도변화가 크지는 않았지만, 고온열교환기를 지나는 가스온도는 유량의 변화에 따라 많은 차이를 보이고 있다. 유량이 많을 때는 입출구의 온도감소 폭이 적지만, 유량이 작아질수록 고온의 가스온도는 출구로 갈수록 급격하게 떨어지며, 이는 열전발전 시스템에서 성능저하로 나타날 수 있다. 따라서 열전발전 시스템에서 고온열교환기를 통과하는 가스온도를 유량에 관계없이 일정하게 유지하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

4. 결 론

차량에서 배기가스로 버려지는 폐열을 회수하는 열전발전 시스템에 대하여 연구를 하였다. 차량의 배기가스와 가스유량, 냉각수의 온도와 유량을 변경하면서 열전발전 시스템의 발전성능 특성을 실험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 발전 성능에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 열전발전 시스템의 양단 온도차이며, 온도차가 클수록, 가스유량이 많을수록 고온열교환기에서 회수하는 열량이 많아져 발전성능은 높게 나타났다.
- (2) 전류가 증가함에 따라 발전전압은 점차로 선형적으로 감소하였으며, 발전량은 점차로 증가하다가 최고점을 보인 이후 점차로 감소하였다.
- (3) 변환효율도 전류가 증가함에 따라 점차로 증가하다가, 최고점을 보인 이후 점차로 감소하였으

며, 모듈 양단온도차가 클수록, 가스유량이 증가할수록 변환효율도 증가하였다.

- (4) 저온열교환기에서 냉각수 유량은 10 l/min 이상에서는 성능에 영향이 거의 없었으며, 냉각수의 온도는 높을수록 발전성능은 감소하였지만, 영향은 크지 않았다.

지금까지 열전발전 시스템의 성능실험으로 성능에 영향을 미치는 주요 인자들을 밝혔고, 배기가스로부터 일정량 폐열회수가 가능하다는 것을 확인하였다. 하지만 향후 적용을 위해서는 많은 부분에서의 보완연구가 필요할 것으로 보인다.

References

1. Lee, T. S. and Oh, S. S., 2010, Technology trends of thermo-electric generator system for the waste heat recovery, *Journal of the Korea Society of Automotive Engineers*, Vol. 32, No. 5, pp. 43-51.
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. Lee, Y. J., Pyo, Y. D., and Kim, G. C., 2002, Analysis of the electric energy and exhaust heat energy for the application of thermo-electric generation in a gasoline vehicle, *Transactions of Korea Society of Automotive Engineers*, Vol. 10, No. 1, pp. 99-105.
5. Crane, D., 2003, Potential thermoelectric applications in diesel vehicles, *Proceedings, 9th Diesel Engine Emissions Reduction Conference*, Newport, Rhode Island, pp. 1-6.
6. 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.
7. Smith, K. and Thornton, M., 2009, Feasibility of thermoelectrics for waste heat recovery in conventional vehicles, *National Renewable Energy Laboratory Technical Report NREL/TP-540-44247*.
8. Han, H. S., Kim, M. G., Um, S. K., and Kim, S. Y., 2010, Performance of thermoelectric power generator with various thermal conditions, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 165-170.
9. Chung, J. H., Kim, W. C., Lee, J. H., and Yu, T. W., 2010, Experimental study of power generation performance of small-scale thermoelectric system, *Transaction of the Korean Society Mechanical Engineers(B)*, Vol. 34, No. 4, pp. 383-390.
10. Mori, M., Yamagami, T., Sorazawa, M., Miyabe, T., Takahashi, S., and Haraguchi, T., 2011, Simulation of fuel economy effectiveness of exhaust heat recovery system using thermoelectric generator in a series hybrid, *SAE Technical Paper 2011-01-1335*.