

루프형 열사이폰을 이용한 열전발전 시스템

김선국* · 이석호† · 원병철* · 김대현* · 이충구*
(2009년 6월 25일 접수, 2009년 8월 7일 수정, 2009년 8월 13일 심사완료)

Thermoelectric Power Generation System with Loop Thermosyphon

Kim Sun-Kook, Rhi Seok-Ho, Won Byung-Chul, Kim Dae-Hyun and Lee Chung-Gu

Key Words: Thermoelectric Generation(열전발전), Hybrid Car(하이브리드카), Thermosyphon(열사이폰)

Abstract

A new progressive advanced approach (Loop thermosyphon Thermoelectric Power generation System) is suggested to optimize heat recovery ability from vehicle exhaust gas. As an initial look at device feasibility, the present new TE system adopted the loop thermosyphon as a cooling heat exchanger. The TE system with loop thermosyphon was investigated in terms of working fluids, instability of system, amount of working fluid, and so on. Basically, the present experimental works have been focused on finding the optimum working condition of the system to improve thermoelectric power output and to obtain stable power generation to operate hybrid vehicles. The present experimental results with the loop thermosyphon TE module shows possibilities as an improved TE system for future thermoelectric hybrid vehicles.

기호설명

1. 서론

- A_0 : 루프형 열사이폰(Loop Thermosyphon)의 밸브 각도에 따른 면적(mm²)
- A_P : 루프형 열사이폰의 직경에 관한 면적(mm²)
- ΔT : 열전발전소자 양단간의 온도차(°C)
- ΔT_{h-c} : 히터표면과 냉각수 유입온도차(°C)
- ΔT_{TE} : 열전소자 양 측면 온도차(°C)
- T_H : 열전소자 Hot side 단면의 온도(°C)
- T_L : 열전소자 Cool side 단면의 온도(°C)
- T_c : 항온기의 냉각수 온도(°C)
- V_{WF} : 작동유체의 체적(ml)
- V_T : 루프형 열사이폰의 전체체적(ml)
- ZT : 열전성능계수
- η_{max} : 열전발전의 최대 변환 효율

최근 몇 년간 에너지 소비를 줄이기 위한 방법의 하나로 열전발전에 관한 연구 활동이 활발해지고 있다. 열전소자를 이용하여 전기를 얻는 열전발전은 비록 효율은 낮지만 폐열을 재활용함으로써 에너지의 소비 감소와 동시에 전기를 생산하는 독특한 시스템으로 여타의 폐열 활용 방법들과는 차이가 있는 기술이다.

열전변화 효율에 관한 공식은 다음과 같으며, 열전변환의 성능 향상에 영향을 주는 가장 중요한 요소는 저온부의 냉각기술 그리고 열전소자의 ZT(열전성능)계수이다.⁽¹⁻³⁾

$$\eta_{max} = \frac{T_H - T_L}{T_H} \frac{\sqrt{ZT+1} - 1}{\sqrt{ZT+1} + T_L/T_H} \quad (1)$$

[이 논문은 대한기계학회 2009년도 충청지부 춘계학술대회(2009. 5. 15., 대전컨벤션센터) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 충북대학교 공과대학 기계공학부
E-mail : rhi@chungbuk.ac.kr

TEL : (043)261-2444 FAX : (043)263-2441

* 충북대학교 공과대학 기계공학부

이 두 가지 요소 중 저온부의 열원을 제거 하는 냉각기술은 열전소자의 적용부위에 따라 다양하게 설계가 되어야 하는데 주로 단순한 열교환기로 수냉 자켓, 히트싱크가 많이 사용되고 있다. 정재훈

등⁽¹⁾은 고온열 폐열회수 열전발전시스템에 관한 연구에서 열교환기 장치로 히트싱크와 방열 핀을 사용하였으며 문채주 등⁽²⁾의 열전발전량에 영향을 미치는 요인에 관한 연구 또한 히트싱크를 사용하였으며, 최병준 등⁽³⁾의 산업폐열회수를 위한 열전발전 연구에서 저온부의 냉각을 위해 수냉 방식의 열교환기를 사용하였다. 이와 같은 열 교환 냉각 장치는 저온부의 열원에 직접적으로 부착되어 열전모듈의 냉각을 유도하는데 직접적인 냉각이 어려운 부위에는 이를 적용하기가 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 저온부의 열원을 외부로 이동하여 냉각시키기 위한 기술의 하나로 루프형 열사이폰을 적용한 열 교환 냉각장치를 고안하고 그 가능성을 평가하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1는 열전발전시스템의 전체 개략도이며 크게 증발부(A), 응축부(B), 수송부(C₁, C₂), 유체주입부(D)로 구성 되었으며, 루프형 열사이폰은 황동(내부직경 4mm)으로 제작되었다. 증발부(A: 50 mm X 50 mm)는 고온의 열을 견딜 수 있는 내열성이 뛰어난 테프론(Teflon)을 사용하여 고정하였으며 발열 부위가 작으면서 높은 열을 낼 수 있는 카트리지히터를 증발부 크기와 동일하게 제작하여 발열부로 사용하였다. 또한 열을 효과적으로 전달하기 위하여 열전소자 양면에 써멀그리스로 접촉시켜 열전도율을 높였다. 응축부는 직경 5.5mm의 120mm길이의 관을 3개 연결하여 수냉으로 냉각이 되도록 만들었다.

내부 작동유체는 각각 증류수, 아세톤을 사용하여 가동하였다. 증발부에서 작동유체를 최대 200℃ 이상 가열이 가능하도록 제작하였고, 가열된 작동유체의 증기가 C₁로 진행할 수 있도록 증발부 내부의 구조를 설계하였다. 시스템의 유동 안정상태를 파악하기 위하여 C₂부분에 오리피스 밸브를 장착하여 오리피스 유동면적에 따른 유동 형태 및 발전 형태를 관찰 할 수 있도록 하였다. 유체주입부(D)는 유체의 주입과 진공펌프(Oil Rotary Pump)를 사용하여 내부 상태를 진공으로 만들기 위하여 제작되었다. 또한 발전 중의 전체 온도 변화특성의 관찰은 T1부터 T12까지의 12개의 K-Type 열전대로서 온도를 측정 하였고, 이를 기록하기 위하여 온도기록계(MX100)를 사용하여

Table 1 Inlet Valve Flow Area with Valve Orientation

밸브각도	0°	30°	45°	60°	90°
내부용적 (5×5×πmm)	78.54 mm ²	52.36 mm ²	39.27 mm ²	23.56 mm ²	0 mm ²

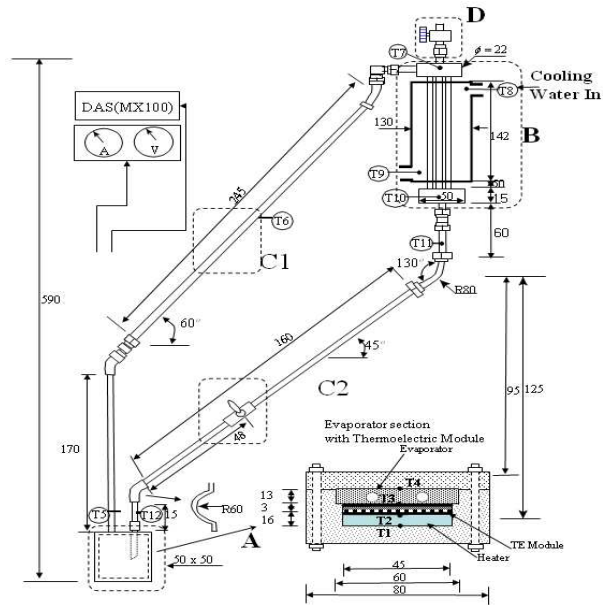


Fig. 1 Experimental Setup

데이터를 저장과 분석을 하였다.

2.2 실험방법

실험의 전체적인 작동유체의 유동은 히터를 통하여 가열된 증발부(A)에서 작동유체를 가열하여 C₁부분의 수송부로 증기가 유입된 후 냉각부(B)를 거쳐 냉각된 유체가 다시 C₂부분의 수송부를 통하여 증발부로 들어오게 된다. 작동유체는 내부 총 용적(48ml)을 기준으로 30%(14.4ml), 50(24 ml), 70%(33.6ml)로 용량을 달리하여 실험을 수행하였으며, 실험의 변수로 입력전력(30W, 50W, 70W), 항온기 온도(5℃, 10℃, 20℃), Fig. 1-C₂부분의 밸브 각도(0° 30°, 45°, 60°)로 조정하여 작동유체의 원활한 순환과 발전효율에 대한 영향을 실험하였다.

또한 본 논문에서는 다음과 같은 무차원수를 정의하였다.

$$\beta = A_0 / A_P \quad (2)$$

$$V^+ = V_{WF} / V_T \quad (3)$$

β는 증발부 입구에 설치된 밸브에 대하여 밸브

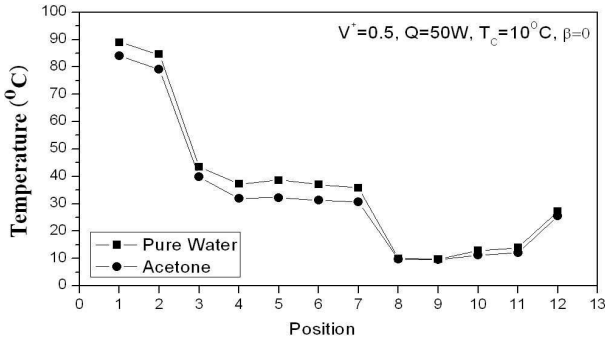


Fig. 2 Temperature profile along the Loop

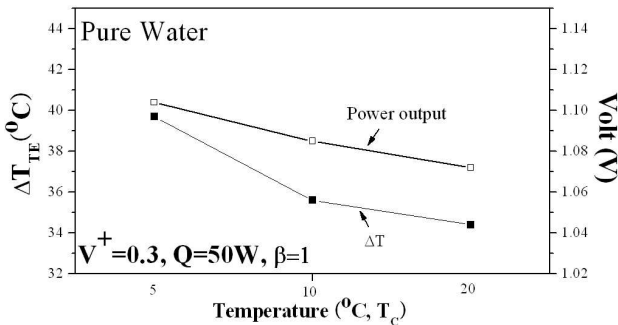


Fig. 3 Effect of T_c on ΔT_{TE} .

각도별 면적(A_0)에 파이프의 직경(A_p)에 관한 면적으로 나눠준 값이다. $\beta=1$ 이면 밸브개방상태이다. V^+ 는 작동유체의 체적(V_{WF})을 파이프 전체체적(V_T)의 비로 나타낸 값으로 작동유체의 충전율이다.

3. 실험결과

3.1 열전대의 위치에 따른 시스템 평균온도

Fig. 2는 열전대에 따라 분포된 온도의 평균값을 그래프로 나타내었다. 실험변수는 $V^+=0.5$, $Q=50W$, $T_c=10^\circ C$, $\beta=1$ 로 고정하였고 증류수, 아세톤의 각기 다른 작동유체를 비교하였다. 열전대의 번호 2번과 3번, 그리고 7번에서 8번 사이에 온도차가 큰 것을 알 수 있는데, 이는 각각, 증발부와 응축 부를 나타낸다. 특히 주목 할 만한 점은 같은 입력전력(50W)를 가한 경우 아세톤이 물보다 전체적으로 낮은 온도 분포를 나타냈는데 아세톤이 증발부의 열원을 효과적으로 응축부로 전달한 것을 의미한다. 하지만 ΔT_{TE} 의 경우 물($\Delta T_{TE}=41.2^\circ C$)이 아세톤($\Delta T_{TE}=39.2^\circ C$)보다 크게 나타났으며 기전력 또한 물(1.096V), 아세톤(1.049V)으로 물이 크게 나타난 것을 확인 할 수 있었다. 즉

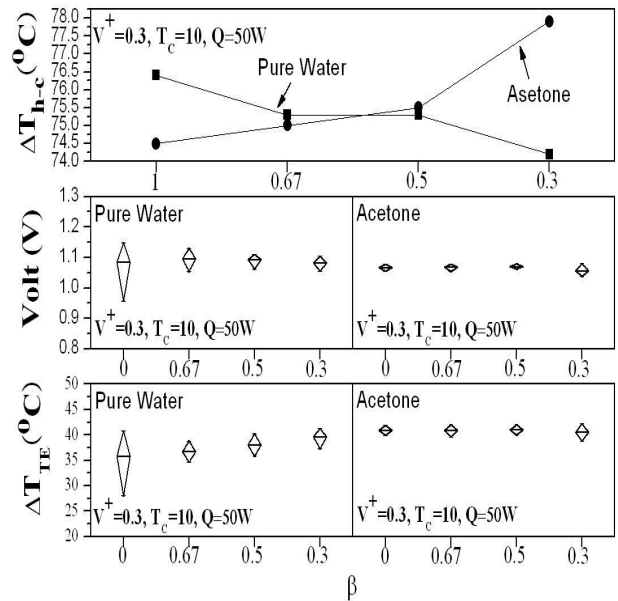


Fig. 4 Effect of Inlet Valve Orientation on ΔT_{TE} .

같은 열원에서는 물을 작동유체로 사용 시 발전성능 및 작동 온도 안정성이 우수한 것을 확인할 수 있었다.

3.2 발전성능에 대한 항온기 온도의 영향

Fig. 3은 루프형 열사이폰의 응축부에서 고온의 열원을 냉각시켜주는 냉각수의 온도(T_c)에 따른 변화를 그래프로 나타내었다. 작동유체는 물의 경우만 나타내었으며 실험변수는 $V^+=0.3$, $Q=50W$, $\beta=1$ 로 고정하였다. 실험 결과 데이터는 $T_c=5^\circ C$ ($\Delta T_{TE}=39.7^\circ C$, $V=1.101V$), $T_c=10^\circ C$ ($\Delta T_{TE}=35.6^\circ C$, $V=1.085V$), $T_c=20^\circ C$ ($\Delta T_{TE}=34.4^\circ C$, $V=1.072V$)으로 응축부의 냉각수 온도가 낮을수록 높은 온도차와 기전력을 나타내었다.

3.3 시스템 작동안정화에 오리피스 영향

Fig. 4는 Fig. 1-C2의 밸브각도를 조정함으로써 내부면적의 변화에 따른 내부유동의 변화를 그래프로 나타내었다. 실험변수는 $V^+=0.3$, $T_c=10^\circ C$, $Q=50W$ 로 고정하였다. 각각의 그래프는 위에서부터 V , ΔT_{TE} 의 최대값, 평균값, 최소값을 나타낸 것으로 그래프의 크기가 작을수록 내부의 유동이 안정적으로 순환한다고 할 수 있다. 물의 경우의 내부면적이 작을수록 유동의 안정화가 이루어지는 경향을 나타낸 반면, 아세톤의 경우 $\beta=0.3$ 의 경우를 제외하고는 유동의 변화가 거의 없음을 확인 할 수 있었다.

Fig. 5는 작동유체를 물($V^+=0.3$)로 실험하였을 시 오리피스 밸브의 내부 유동 면적의 비율에 따

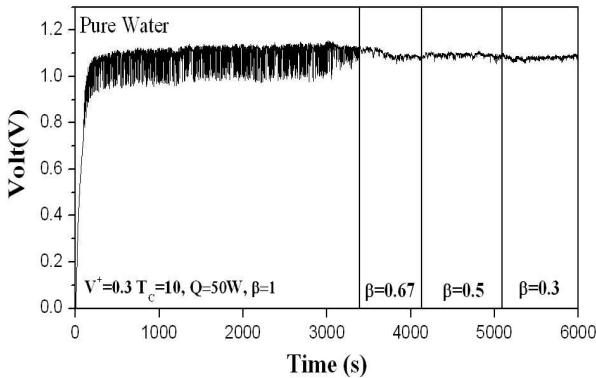


Fig. 5 Transient Power Output Variation.

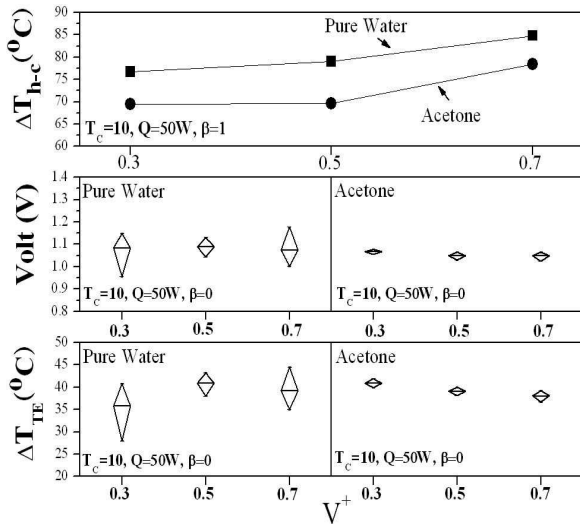


Fig. 6 Effect of Working Fluid Amount

른 출력전압의 발전 안정성 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 각각의 내부면적의 비율에 따라 최대전압과 최소전압의 차는 $\beta=1(0.192V)$, $\beta=0.67(0.076V)$, $\beta=0.5(0.048V)$, $\beta=0.3(0.049V)$ 를 나타내었는데 내부면적이 작을 경우 시스템 작동을 통한 발전성능도 안정화가 이루어진 것을 확인할 수 있었다.

3.4 발전성능에 대한 작동유체의 용량의 영향

Fig. 6은 작동유체의 용량에 따른 ΔT_{h-c} , V , ΔT_{TE} 를 그래프에 나타내었다. 실험변수는 $T_c=10^\circ C$, $Q=50W$, $\beta=0$ 으로 고정하였다. ΔT_{h-c} 값이 작을수록 열전달 성능이 좋은 것이며, 작동유체는 아세톤일 경우 낮은 온도차를 보였으며 작동유체의 용량에 따라서는 용량이 작을수록 높은 열전달 성능을 보였다. 또한 가장 주목 할 만한 점은 아세톤이 물보다 내부유동이 안정적으로 순환함을 알 수 있었다. 아세톤은 용량에 따른 변화가 크

게 나타나지 않았으나 물의 경우 V^+ 가 0.5일 때 가장 안정적인 유동의 흐름을 확인 할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 차세대 하이브리드카의 열전발전을 위한 냉각용 열교환기 설계에 관한 구조적 또는 공간적의 제한을 극복하기 위한 루프형 열사이폰을 이용한 열전변환발전시스템을 구성하고 그 가능성에 대한 기초 실험을 수행 하였다. 물 보다는 아세톤의 발전 안정도가 우수하였으며, 실험결과 최고 1.11V의 기전력이 측정되었고, 기전력의 안정적인 출력을 위해서는 내부유동의 안정화가 이루어져야 할 것이며, 가동유체 주입량, 증발부 입구의 오리피스의 유입면적을 줄임으로서 발전시스템의 발전 안정도는 증가하는 것으로 알 수 있었다. 자동차 배열회수 목적으로 배기로의 좁은 면적에서 발생하는 폐열을 회수하는 방법의 하나로 가능성을 확인 할 수 있었다.

후기

본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행 되었음" (IITA-2009-C1090-0904-0007)

참고문헌

- (1) Chung, J. C., Kim, W. C., Lee, J. H. and Yu, T. U., 2007, "Experimental Study of a High Temperature Thermoelectric Generation System using Waste Heat Recovery," *Transactions of the KSME(B)*, 2007. 5 pp. 178~183.
- (2) Moon, C. J., Cheang, E. h., Lim, J. M., Park, S. J., Kim, T. G. and Kim, Y. G., 2008, "A Study for Thermoelectric Generator System and Caused Low Thermoelectric Power," Korean Solar Energy Society, 2008 Spring Conference Proceeding, pp. 68~74.
- (3) Choi, B. J., Choi, Y. C., Hong, J. C., Park, T. J., Park, J. S. and Rowe, D. M., 2000, "Research on the Development of Thermoelectric Generation System for Industrial Waste Heat Recovery," *Journal of Energy Engineering*, Vol. 9, No. 1, p. 19~27.