

차량 및 산업설비 폐열회수용 열전발전시스템의 최적 열교환 시스템에 관한 실험적 연구

*정 재훈¹⁾, 김 우철²⁾, **이 진호³⁾, 류 태우⁴⁾

Experimental Study on the Optimal Heat Exchanger of Thermoelectric Generation System for Industrial and Automobile Waste Heat Recovery

*Jaehoon Chung, Woochul Kim, **Jinho Lee, Tae U. Yu.

Key words : Thermoelectric Generation(열전발전), Waste Heat Recovery(폐열회수)

Abstract : A large part of the overall industrial energy is dissipated as waste heat despite of much development in the utilization of thermal energy. A mean efficiency is reported to be only around 30 to 35%. The existing waste heat recovery technology has reached its limit and consequently, the development of a new technology is necessary. Improving efficiency using thermoelectric technology has recently come into the spotlight because of its unique way to recover thermal energy. In fact, thermoelectric generator directly converts thermal energy into electric energy by a solid state without any moving parts. Futhermore remarkable improvement in the thermoelectric energy conversion efficiency has been achieved. In this study, a thermoelectric generator was made using commercialized thermoelectric modules. With thermoelectric modules attached on a duct surface, hot air was blown into the duct using a hot air blower. On the other side of the module, a water jacket was attached to cool the module. With different air inlet temperatures and water flowrates, the electrical power of the thermoelectric generator was measured.

Nomenclature

S : Seebeck Coefficient
ZT : Figure of Merit

subscript

TEG : thermoelectric generation system

심각한 환경 문제가 되기도 한다. 이러한 고온 배기가스의 폐열을 재생할 수 있다면 시스템 효율 개선으로 경제적 이득과 함께 사용 연료 감축으로 인한 배출 오염원 저감이라는 이중 효과를 기대할 수 있다. 열전발전시스템은 이러한 문제를 해결할 수 있는 대안으로써 현재 다양한 연구가 진행 중이다. 열전발전의 원리에 대해서 살펴보면 다음과 같다. 열전발전모듈은 Fig. 1과 같이 n형과 p형 소자가 접합된 형태로 되어 있으며 에너지 운반자인 전자와 정공(Positive Hole)

1. 서론

국내의 경우 폐열로 인한 에너지손실량이 2000년대 연평균 4000만 TOE에 달하는 것으로 추정되고 있다. 배증기, 온수 형태의 폐열이 전체 폐열의 20%에 못미치는 반면 배기가스의 형태로 방출되는 폐열은 85% 이상으로 대부분 차량, 발전소, 소각로, 공장 등의 산업 시설에서 고온의 상태로 버려지고 있으며 에너지 낭비뿐 아니라

-
- 1) 연세대학교 기계공학과 대학원
E-mail : cjaehoon13@yonsei.ac.kr
Tel : (02)2123-2810 Fax : (02)312-2159
 - 2) 연세대학교 기계공학과
E-mail : woochulkim@yonsei.ac.kr
Tel : (02)2123-2810 Fax : (02)312-2159
 - 3) 연세대학교 기계공학과
E-mail : jinholee@yonsei.ac.kr
Tel : (02)2123-2816 Fax : (02)312-2159
 - 4) 한국생산기술연구원 산업설비팀
E-mail : jytu@kitech.re.kr
Tel : (041)589-8537

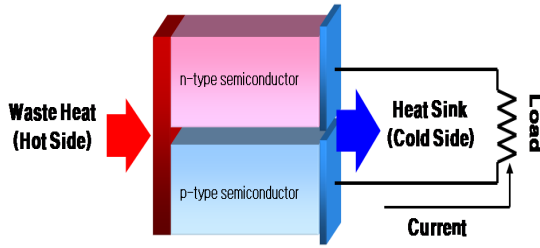


Fig. 1 TEG circuit

이 고온부에서 저온부로 이동하면서 양단에 전위차가 발생하게 된다.^[1] 여기서 발생된 전위차는 식 (1)과 같이 고/저온부의 온도차와 제백계수 S의 곱으로 표현되고 이를 제백 효과(Seebeck Effect)라 한다.

$$V = S\Delta T \quad (1)$$

열전소재의 성능을 나타내는 척도는 열전성능지수 혹은 ZT계수로 정의되고 식 (2)와 같다.

$$ZT = \frac{S^2 \sigma}{\kappa} \quad (2)$$

여기서 S는 제백 계수, σ 는 전기전도도, κ 는 열전도도, T는 고/저온부의 평균온도이다. 제백 계수와 전기전도도가 크며 열전도도가 적은 소재일수록 높은 ZT계수를 갖는다. 열전변환효율은 고온부에 가해진 열에너지에 대해 열전소재가 생산하는 전기에너지의 비율이며 식 (3)과 같다. 고/저온부의 온도차와 ZT계수가 클수록 열전변환효율은 증가한다.

$$\eta_{TE} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \frac{\sqrt{ZT+1} - 1}{\sqrt{ZT+1} + T_C/T_H} \quad (3)$$

열전발전시스템에 관한 연구는 열전소재기술이 발달한 미국, 러시아, 일본 등을 중심으로 활발히 진행되고 있다. Rowe 등^[4]이 열전발전시스템의 최적 열교환장치에 대하여 연구했으며 실험적 검증을 통해 열교환기의 지그재그형 환 형상을 제안하였다. Nagao 등^[9]은 내연 기관의 배기가스를 이용한 열전발전시스템에 관한 연구를 통해 1kW급 열전발전시스템을 개발하였다. 국내에서는 이희용 등^[1]이 온수와 냉수의 온도차를 이용한 열전발전시스템에 관한 연구에서 시스템 효율 1.04%를 달성하였다.

2. 실험 개요

본 연구에서는 차량 및 산업 설비에 실용화시킬 수 있는 폐열회수 열전발전시스템에 관한 실험적 연구를 진행하였다. 열전발전시스템의 열원은

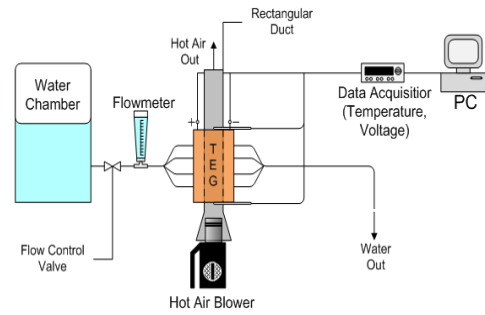


Fig.2 Schematic Diagram of TEG System

열풍기에서 배출되는 고온 공기를 이용하였으며 공기온도를 100-600℃ 가량 조절하였다. 이와 함께 열전발전시스템의 열방출부에서는 수냉자켓을 장착하여 일정한 상온의 냉각수를 통과시켰다. 최종적으로 가스 입구온도와 냉각수 유량 조절을 통하여 열전발전시스템의 최대 출력 성능을 분석하였다. 또한 국내산 열전모듈과 미국산 열전모듈을 이용하여 각 모듈 별 출력 특성을 실험하였으며 각 모듈의 사양은 Table 1과 같다. 여기서 전기저항과 최대출력값은 고온부와 저온부 온도조건이 각각 200℃, 30℃일 때를 나타낸다.

2.1 실험장치

Fig. 2는 실험장치의 개략도를 나타내고 있다. 그림에서 단면이 120*40mm인 SUS304 재질의 사각덕트의 입구부에 공업용 고온 열풍기를 장착하였고 출구부는 대기압 상태로 방출될 수 있도록 하였다. 열풍기로부터 고온공기가 유입되는 덕트 입구부의 외벽에 열전모듈을 장착하였으며 모듈의 반대면에는 구리 재질로 된 냉각자켓을 장착하였다. 그러나 열전모듈은 금속과 닿을 시 누전이 발생하므로 모듈 장착 전 모듈 상하면에 두께 0.5mm의 세라믹 절연판을 부착하였다. 열전발전시스템의 냉각수 공급원으로는 충분히 큰 항온 챔버를 이용하였으며 밸브와 유량계를 이용하여 냉각수의 공급량을 조절하였다. 본 실험에서는 저온부 표면은 일정 온도로 유지하되 고온유입 공기온도를 열풍기를 통하여 조절함으로써 열전모듈의 고온부 표면 온도를 변화시킬 수 있도록 하였다. 이를 위하여 덕트내 고온 공기 유입부와 출구부에 K-Type 온도센서 프로브를 장착하였으며 열전모듈과 열원 그리고 열방출부 사이에 작은 홈을 만들어 테프론(Teflon)으로 밀봉된 K-Type 온도센서를 삽입하였다. 한편, 열전발전시스템의 출력을 측정하기 위하여

Table 1 열전모듈의 사양

모델명	최대출력	내열온도	전기저항
HZ-20(미국산)	15 W	250℃	0.3Ω
HMG3730(국산)	5.9 W	200℃	3Ω

열전모듈의 접지선을 연장하여 전압을 측정하였다. 온도와 전압 데이터를 측정하기 위하여 동일한 데이터 로거(Agilent 34970A)를 이용하였다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 열풍기의 공기 배출온도를 적당히 조절함으로써 열전모듈 고온부 온도를 40~200℃까지 제어하였다. 냉각수 유량의 경우 1~10LPM으로 조절을 하였으며 저온부의 온도가 30℃가 넘지 않도록 제어하였다. 국내산 열전모듈과 미국산 열전모듈을 따로 장착하여 각 모듈을 열전발전시스템에 적용했을 경우 출력 성능을 비교 분석하였다. 실험 케이스 별로 열전모듈의 고/저온부 간 온도차가 안정화가 된 이후 출력을 측정하였다. 이를 위해 부하가 연결되지 않은 상태에서 개회로 전압을 측정하였으며 부하가 연결되었을 경우 부하에 걸리는 전압을 측정하였다. 부하 범위는 0.1~100Ω 사이로 조절을 하였다. 출력을 측정하기 위하여 Fig.2와 같은 회로도도 구성하였다. 열전모듈의 경우 건전지와 마찬가지로 내부 전기저항이 존재하기 때문에 내부저항과 일치하는 외부 저항값에서 가장 큰 전력값이 도출될 수 있다. 식 (4)는 외부 저항값 R_L 과 개회로 전압 V_1 , 그리고 R_L 을 회로에 연결했을 경우 부하에 걸리는 전압 V_2 에 관한 최대 전력값을 나타낸다.

$$P_{\max} = \frac{V_1^2}{4R_L(V_1/V_2 - 1)} \quad (4)$$

3. 실험 결과

Fig. 3은 열전모듈 HZ-20(미국산) 고온부의 온도를 200℃로 맞추기 위하여 열풍기의 공기 유입온도를 조절하였을 경우 시간에 따른 고온공기 유입온도, 공기출구온도, 열전모듈의 고/저온부 온도, 그리고 열전모듈의 개회로 전압을 나타낸 것이다. 안

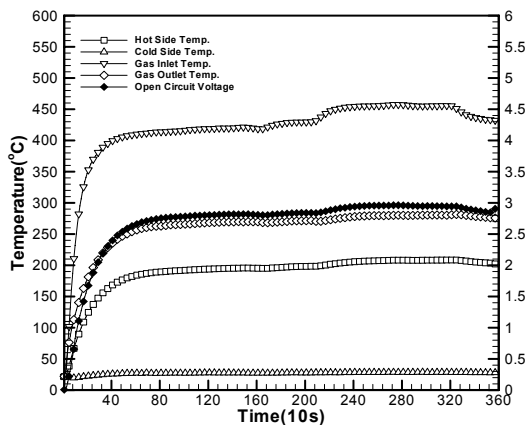


Fig.3 Transient Response of TEG System using HZ-20

정화 시간은 1시간으로 설정하였으며 이때 모듈의 고/저온부 온도차는 약 170℃, 개회로 전압은 2.9V

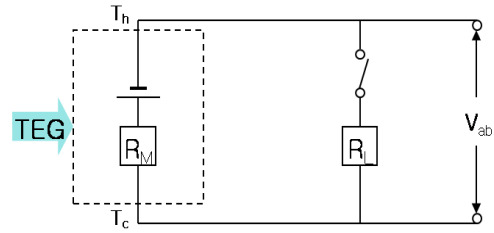


Fig.2 Thermoelectric Circuit Measurement

로 측정이 되었다. 마찬가지로 Fig. 4는 열전모듈 HMG3730(국산) 고온부의 온도를 200℃로 맞추었을 경우 1시간에 걸친 열전발전시스템 내 온도와 전압 변화를 나타낸 것이다. 온도차는 이전 HZ-20 모듈과 마찬가지로 약 170℃이지만 개회로 전압은 이보다 훨씬 높은 5.1V로 측정이 되었다. 다음으로 Fig. 5와 Fig. 6은 저온부의 온도를 30℃로 고정하였을 경우 온도차에 따라서 개회로 전압과 전력을 나타낸 것으로서 Fig. 5는 HZ-20, Fig. 6은 HMG3730을 이용하였을 경우를 나타낸다. Table 1에 명기되었듯이 HZ-20의 경우 내부 저항이 0.3Ω, HMG3730의 경우 3Ω이므로 내부저항값과 일치하는 외부저항을 달아 최대 출력값을 달성하고자 하였다. 온도차와 개회로 전압은 거의 선형적인 관계를 가지며 온도차와 전력은 지수 함수적으로 증가함을 볼 수 있다. 또한 HMG3730의 경우 HZ-20보다 개회로 전압값은 월등히 높으나 출력값은 현저히 낮음을 볼 수 있다. 이는 HMG3730이 내부 저항이 HZ-20에 비하여 상대적으로 매우 크므로 회로 내 전류량이 매우 적은 반면, HZ-20의 경우 전류량이 매우 커진 데에서 기인한다. 또한 Table 1의 실제 사양에 비하여 출력값이 25~50% 정도로 다소 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이에 대한 원인으로 첫째, 공기의 흐름 방향으로 열손실이 발생하고 온도가 감소함에 따라 모듈 표면 온도가 균일하지 않는 데에서 발생한 손실로 볼 수 있다. 둘째, 열전모듈과 열원, 열방출부 사이의 접촉부에서 공극이 발생함에 따라 열저항이 실제로는 매우 크며 따라서 실제 고/저온부 간 온도차는 측정치

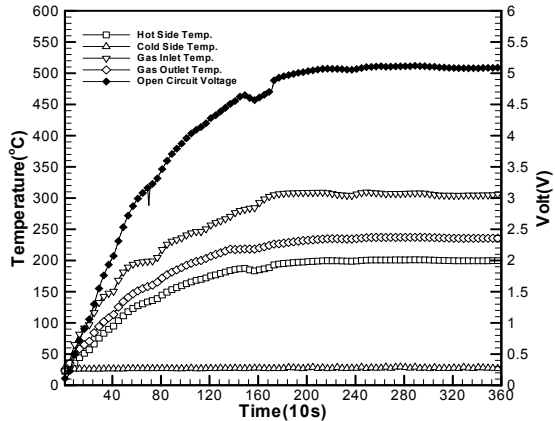


Fig.4 Transient Response of TEG System using HMG3730

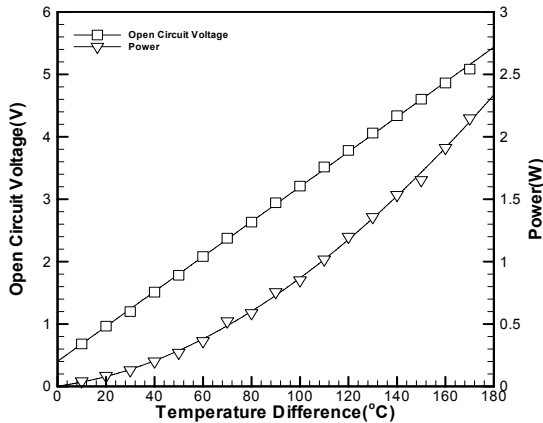


Fig.5 Open Circuit Voltage and Electric Power Depending on the Temp. Difference(HZ-20)

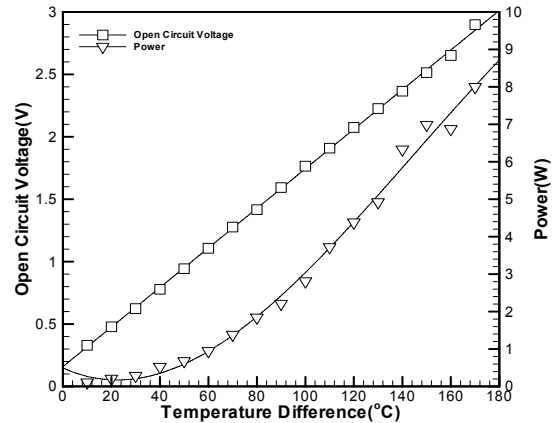


Fig.6 Open Circuit Voltage and Electric Power Depending on the Temp. Difference(HMG3730)

보다 최대 10~20°C 떨어진 것으로 분석할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 비록 열전모듈의 실제 사양에 비하여 50~70%의 성능 밖에 달성을 못하였지만 이는 모듈의 소재 자체의 결함이기보다 접촉부에서 열전달이 원활히 이루어지지 않기 때문임을 확인할 수 있었다. 따라서 모듈과 접촉지점 간 열저항을 줄이기 위하여 공극 내에 열전달재를 삽입함과 더불어 어느 정도의 가압 조건을 부과할 경우 최대 출력 성능이 발생하는지 향후 연구하고자 한다. 또한 이와 더불어 열전모듈의 표면 온도 균일도를 조성하기 위한 최적의 열교환 시스템을 찾아보고자 한다.

References

[1] Woo, B. C., Lee, H. W., and Suh, C. M., 2002, "Characteristic of Electric Generation for the Water Flow Rate in Thermoelectric Generator Using Hot Water," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 26, No. 10, pp. 1333~1340

[2] Choi, B. J., Choi, Y. C., Chang, H. J., Park, T. J., Park, J. S., and Rowe, D. M., 2000, "Research on the Development of Thermoelectric Generation System for Industrial Waste Heat Recovery," *Energy Engg. J*, Vol. 9, No. 1, pp. 19~27

[3] Cho, Y. S., Joo, M. C., and Yang, Y. S., 1998, "An Experimental Study of the Solar Thermoelectric Generation System using CPC.", *1998 Fall Meeting : Energy Engg. J*, pp. 256~262

[4] Rowe, D. M., Min, G., 1998, "Evaluation of Thermoelectric Modules for Power Generation", *J. Power Sources*, Vol. 73, pp. 193~198

[5] Esarte, J., Min, G., and Rowe, D. M., 2001, "Modeling Heat Exchangers for Thermoelectric Generators", *J. Power Sources*, Vol. 93, pp. 72~76

[6] Crane, D. T., and Jackson, G. S., 2004, "Optimization of Cross Flow Heat Exchangers for Thermoelectric Waste Heat Recovery", *Energy Conversion Management*, Vol. 45, pp. 1565~1582

[7] Nuwayhid, R. Y., Shihadeh, A., Ghaddar, N., 2005, "Development and testing of a domestic woodstove thermoelectric generator with natural convection cooling", *Energy Conversion Management*, Vol. 46, pp. 1631~1643

[8] Ikoma, K., Munekiyo, M., Furuya, K., Kobayashi, M., Izumi, T., and Shinohara, K., 1998, "Thermoelectric Module and Generator for Gasoline Engine Vehicles", *17th Int. Conf. on Thermoelectrics*, pp. 464~467

[9] Nagao, K., Nagai, A., Fujii, T., Sakurai, T., Fujimoto, M., and Furue, T., Hayashida, T., Imaizumi, Y., Inoue, T., 1998, "Design of Thermoelectric Generation System Utilizing the Exhaust Gas of Internal-Combustion Power Plant", *17th Int. Conf. on Thermoelectrics*, pp. 468~472

[10] Ota, T., Tokunaga, C., Fujita, K., 2005, "Development of Thermoelectric Power Generation System for Industrial Furnaces", *24th Int. Conf. on Thermoelectrics*, pp. 323~326