

열전소자를 이용한 모터사이클용 엔진 배기 폐열 회수 시스템 성능 해석

이무연¹, 김기현^{2*}

¹동아대학교 기계공학과, ²신라대학교 융합기계공학부

Performance Simulation of Motorcycle Engine Exhaust Heat Recovery System using Thermoelectric Element

Moo-Yeon Lee¹, Kihyun Kim^{2*}

¹Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

²Division of Mechanical Convergence Engineering, Silla University

요약 엔진에서 배기폐열을 회수하여 엔진의 열효율을 향상시키고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 연구에서는 모터사이클용 엔진의 배기 폐열 회수용 열전발전 시스템의 성능 해석을 수행하였다. Gamma Tech.의 GT-SUITE 소프트웨어를 사용하여 엔진모사 모델과 열전발전 시스템 모델을 구성하였다. 첫째, 엔진 속도 1000~7000 rpm, 엔진 부하 0~100% 조건에서 엔진의 출력, 연비 등 성능 특성과 배기가스량, 배기가스 온도 등 배기가스 특성을 파악하였다. 연료의 화학에너지 대비 배기가스로 배출되는 에너지의 비율은 엔진 속도 및 부하에 따라 40~60% 수준으로 확인되었다. 둘째, 배기폐열회수용 열전발전 시스템 모델을 구성하였다. 엔진 모델과 열전발전 시스템 모델을 통합 해석하여, 열전소자에서 발생하는 전압, 전류, 회수 전력 특성 등을 분석하였다. 열전소자의 발전 특성은 시스템을 통과하는 배기가스의 온도 분포에 지배적인 영향을 받았다. 현재 구성된 배기폐열회수용 열전발전 시스템의 열전발전량은 배기폐열 에너지 중 최대 2.2% 수준을 회수할 수 있음을 확인하였다. 향후 연구에서는 열전발전 시스템의 설계에 따른 열전발전량 특성을 파악하고, 열전발전 시스템 설계 최적화를 수행할 예정이다.

Abstract Research into exhaust heat recovery has been actively carried out to improve the thermal efficiency of internal combustion engines. In this study, the performance of thermoelectric generation from exhaust heat recovery for motorcycle engines was analyzed by 1-D thermo-fluid simulation. GT-SUITE, which was developed by Gamma Tech., was used for the simulation of the internal combustion engine and thermoelectric generation system. The basic performance of the engine was analyzed in the range of engine speed of 1000~7000 rpm and engine load of 0~100%. The ratio of exhaust heat energy to fuel chemical energy was found to be about 40~60%. A combined simulation of the engine model and thermoelectric generation model was carried out to analyze the voltage, current and power generated by the thermoelectric material. The generation characteristics of the thermoelectric material was dominantly affected by the exhaust gas temperature. The maximum generated power of the current thermoelectric generation system was found to be about 2.2% of the total exhaust heat energy. The design optimization of the thermoelectric generation system will be carried out to maximize its power generation and economic feasibility.

Keywords : Engine, Exhaust heat recovery, Simulation, Thermoelectric element, Thermoelectric generation

본 연구는 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(no. 2017R1C1B5017435)을 받고, 부산과학기술기 획평가원의 지역특화 기술개발확산 개방형 연구실 운영사업 지원을 받아 수행됨.

*Corresponding Author : Kihyun Kim(Silla Univ.)

Tel: +82-51-999-6925 email: khkim3@silla.ac.kr

Received January 8, 2018

Revised February 1, 2018

Accepted February 2, 2018

Published February 28, 2018

1. 서론

엔진은 향후 수 십년간 수송기관의 주요 동력원으로써 적용될 것으로 전망되고 있다. 최근 자원 고갈 문제와 심화되는 환경 규제에 따라 엔진의 열효율 및 수송기관의 연비를 개선하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

최근에는 엔진에서 발생하는 배기 폐열에너지를 회수하여 엔진의 보조 동력원으로 적용하거나 냉난방용 전기로 활용하는 등 전체 시스템 효율을 향상시키고자 하는 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 자동차용 가솔린엔진의 경우 배기가스로 배출되는 배기 폐열에너지가 약 40~60% 수준으로 보고되고 있다.[1,2] 이와 같은 배기 폐열 에너지를 회수하기 위하여, 유기랭킨사이클을 이용한 발전, 열전소자를 이용한 열전발전, 터보컴파운드를 사용한 동력 회수, 난방열회수 등의 방법이 고려되고 있다[10].

이 중, 열전소자를 이용한 열전발전은 두가지 종류의 금속을 연결하여 끝단에 온도차를 가하면, 양쪽 끝단에 전위차가 형성되는 제백효과를 활용한 방법이다. 일반적인 가솔린 엔진의 배기가스 온도는 최대 약 1000도로써 고온 배기가스를 활용한 열전발전을 통한 자동차 연비향상 사례가 보고되고 있다.[3-6,11]

열전소자를 이용한 열전발전은 구조와 방법이 간단하고 소음이 없어 승용 자동차에서 주로 연구 및 적용되고 있다.[7,8] 본 연구에서는 모터사이클용 엔진의 후단에 열전발전 시스템을 장착하여 배기폐열에너지 회수를 시도하면서, 우선적으로 1-D 열유동 해석 소프트웨어를 사용하여 모터사이클용 엔진과 열전발전 시스템을 모사한 모델을 개발하고, 열전발전 성능특성을 해석하고자 하였다.

2. 본론

2.1 엔진 모델 구성

Table 1은 본 연구에 사용된 모터사이클용 엔진의 제원을 나타낸다. 단기통, 2행정 방식이며 246.9cc의 체적을 가지고 있다. 사용연료는 휘발유이며 엔진속도 7000 rpm에서 1.96 kgfm의 토크를 발생하여 최대 14.4 kW의 출력을 생산한다.

Table 1. Engine specification

Parameter	Value
Engine type	double overhead cam shaft, 4 valve
Cylinder number	1
Displacement [cc]	246.9
Bore × Stroke [mm × mm]	73 X 59
Fuel	Gasoline
Compression ratio	10.7 : 1
Rated Torque @Rated Speed [kgfm@rpm]	1.96@7000
Power [kW]	14.4

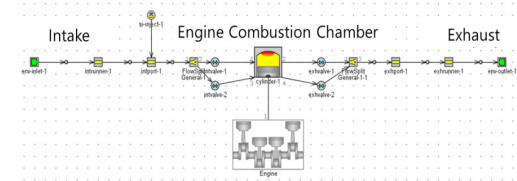


Fig. 1. Engine simulation model

엔진 모델은 Gamma Tech.사에서 개발한 GT-SUITE 소프트웨어를 사용하여 구성되었다. GT-SUITE는 다양한 파워트레인, 차량용 1-D, 0-D의 수학적 모델을 사용하여 모사하고, 성능 특성, 에너지 흐름 특성, 배기 특성 등을 계산할 수 있는 기능을 포함하고 있으며 전 세계적으로 다수의 메이저 자동차 회사 등에서 파워트레인 개발에 적용하고 있다. 엔진 연소실로 연결되는 흡기관, 매니폴드, 연소실 후단 배기관 등은 실제 실험장치 구성과 최대한 유사하게 모델을 구성하였다.

2.2 열전발전 시스템 모델 구성

열전 발전 시스템 또한 GT-SUITE를 이용하여 모사하였다. Fig. 2는 시험용으로 설계된 열전발전 모듈 시스템의 분해도이다. 배기관은 직육면체 모양의 배기관과 앞 뒤를 연결하는 플랜지 및 원형관으로 구성되어 있다.

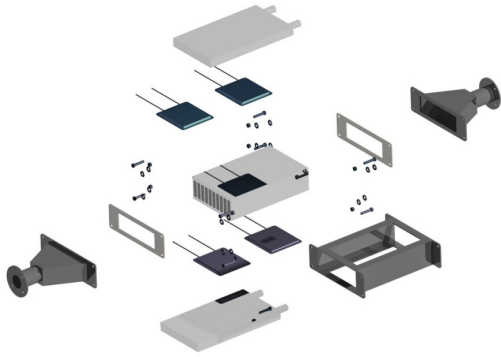


Fig. 2. Exploded view of Thermoelectric generation module

배기관내에 배기가스가 흐르는 부위는 열전도성이 높은 알루미늄 재질의 heat sink 형태로 구성되어 배기가스의 배기열을 최대한 전달이 용이하도록 설계되어 있다. heat sink 위 아래에는 열전소자가 각각 두장씩 붙어있어 위와 아래에서 열을 전달받아 열전발전이 가능하도록 설계되었다. 열전소자는 TEC 사의 TEG1-PB12690 모듈을 사용하였으며, PbSnTe계 소재로써 주로 500~600C 영역에서 많이 사용되고 있다. 열전소자의 반대쪽 면에는 열전소자의 냉각이 용이하도록 30C의 냉각수가 흐르는 유로가 부착되어 있다.

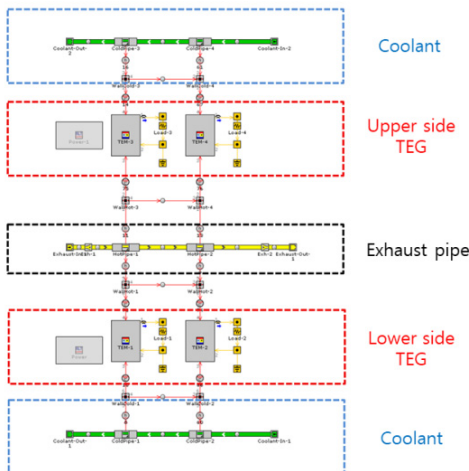


Fig. 3. Simulation model for Thermoelectric generation module

Fig. 3은 열전모듈의 모델 개략도를 나타낸다. 시험에 이용된 재원을 모사하여 모델을 개발하였다. 배기열전발

전 시스템에서 정확한 배기열 회수량을 계산하기 위해서는 배기관으로부터 열전소자로의 열전달량, 즉 배기관 표면의 면적과 열전달계수를 정확히 모사하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 본 연구와 유사하게 구성된 실험장치에서 Kim 등이 수행한 선행연구에서 이용된 colburn's method를 통하여 대류 열전달 계수를 계산하였다.[9]smooth pipe에서 대류 열전달 계수는 아래의 식을 이용하여 계산되었다.

$$h_g = 1/2 * C_f \rho U_{eff} C_p Pr^{(-2/3)}$$

C_f : Fanning friction factor of smooth pipe

ρ : density

U_{eff} : effective velocity outside boundary layer

C_p : specific heat

Pr : prandtl Number

열전소자에서 발생하는 전압, 전류, 전력은 열전소자의 고온부와 저온부의 온도에 따라 결정되는데, 제조사에서 공급받은 열전소자의 성능 규격서를 참조하여 특성을 모델에 입력하였다.

2.3 배기폐열 특성

Figure 4는 엔진 속도와 엔진 부하에 따른 배기폐열 특성에 대해 나타낸다. 배기가스의 유량과 온도는 배기가스의 총 엔탈피를 결정하는 주요 요소이며, 열전발전의 가능성을 판단케 하는 주요 지표이다. 연료의 화학에너지 중, 배기 폐열로 버려지는 에너지의 비율은 Fig. 4(a)에 따르면 엔진 속도와 부하에 따라 약 40~60% 수준으로 파악되었다. 사용된 연료의 화학에너지 대비 배기관을 통해 토출되는 배기가스의 총 엔탈피 비율로 계산되었다. 엔진 속도와 부하가 증가함에 따라 거의 선형적으로 배기 손실이 커지는 것을 확인할 수 있다. 엔진에서의 다른 에너지 손실(마찰손실, 연소실 주위로의 열손실 등)에 비하여 배기폐열로의 손실이 더 급격히 증가하는 것은 다른 손실량에 비해 배기 유량과 배기 온도가 급격하게 증가하기 때문이다. 저속 저부하 영역에서는 약 40% 수준이며, 배기 온도는 500~600C 수준으로 나타났다. 고속 고부하 영역에서는 최대 60% 수준의 배기 에너지 비율과 배기 온도는 최대 800~900C 수준으로 나타났다. 열전발전 시스템 Heat sink의 열저항, 열전달 성능 특성과, 시험용으로 장착된 열전발전 소자의 최적 작

동온도가 500~600 °C 임을 고려하면 본 열전발전 시스템은 저~중부하 조건에서의 운전이 적합한 것으로 판단되었다.

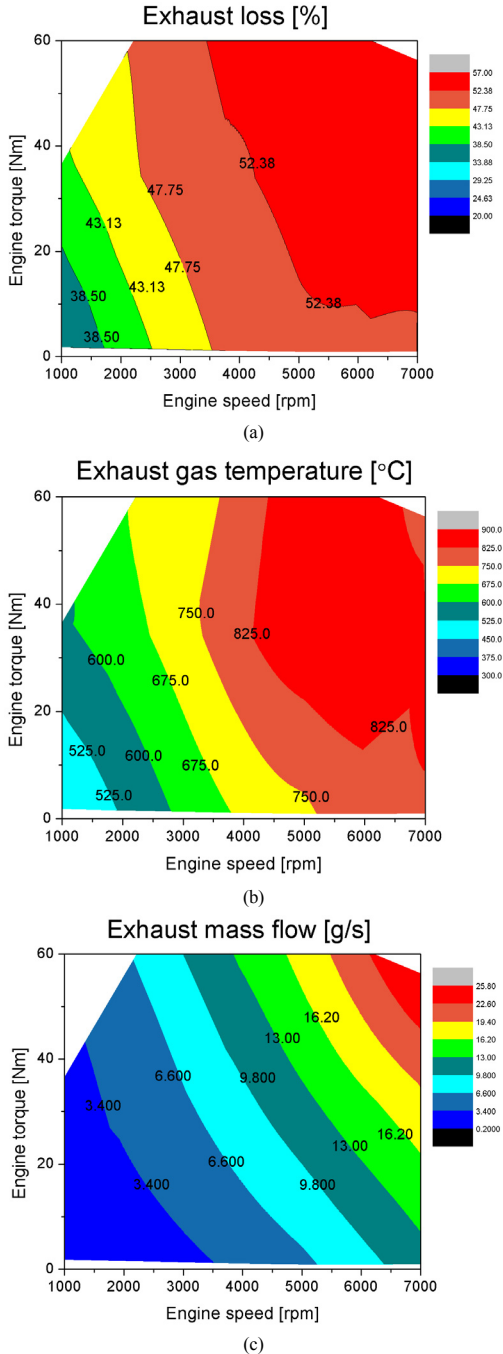


Fig. 4. (a) Exhaust energy percentage (b) Exhaust gas temperature (c) Exhaust mass flow rate

2.4 열전발전 특성

Figure 5는 엔진과 열전발전 시스템의 통합 해석을 통하여 열전발전 시스템의 발전 특성에 대해서 나타낸다. 엔진에서 배출되는 배기가스의 정보를 열전발전 시스템에 입력값으로 주었다. 앞서 2.2절에서 설명한 바와 같이, 열전발전 소자는 총 4장 장착되며 엔진 연소실쪽에 가까운 2장을 TEM1, 연소실에서 먼쪽의 2장을 TEM2로 정의하고 각각의 열전소자에서의 발전 특성에 대해 분석하였다.

고온의 배기가스에 의해 발생하는 열전소자의 전압특성 측면에서 TEM1의 경우 2.4~14 V의 전압이 형성되는 것을 확인할 수 있다. Fig.4에서 나타난 바와 같이 엔진속도와 부하가 증가할수록 배기가스 온도가 증가하면서 발생전압이 증가하는 특성이 나타났다. TEM2의 경우 TEM1 대비 발생전압이 1~2V 정도 더 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 TEM1이 엔진 연소실 쪽에 더 가까이 설치되어 있으므로 접하는 배기가스의 온도가 더 높기 때문이다. 1~2V 전압차이는 열전소자의 성능특성을 고려했을 때, 작동온도 50~100°C 차이를 의미한다. 그러나 TEM1과 TEM2 주변 배기가스 온도차이를 살펴보면 약 100~200°C 가 발생함을 알 수 있었다. 이와 같은 현상이 발생한 이유는 heat sink의 높은 열전도도 때문에 heat sink 내에서 고온부에서 저온부로 열이 빠르게 확산됨에 따라 heat sink 내의 온도기울기가 낮아지기 때문이다. 만약 heat sink의 열전도도가 더 높고, 열전소자가 직렬이 아니라 병렬로 설치된다면 heat sink에 부착되어 있는 열전소자에 전체적으로 거의 유사한 온도가 형성될 것이므로, 동일한 발생전압을 얻을 수 있을 것으로 판단되었다. 엔진의 주 운전 영역에서의 배기가스 온도에 맞추어, 열전 소자를 선정하고 열전도도가 높은 heat sink에서 병렬 구조로 열전소자를 설치하면 최대로 전력을 회수할 수 있음을 예상할 수 있다.

Fig. 5(b)와 Fig.5(c)는 TEM1과 TEM2에서의 전력발전량을 나타낸다. TEM1의 경우 엔진 속도와 부하에 따라 12W~100W에 이르는 발전량을 나타내었다. TEM2의 경우 10~90W 수준의 발전량을 보였으며, 이는 TEM1에 비해 상대적으로 낮은 발생전압 때문인 것으로 판단된다.

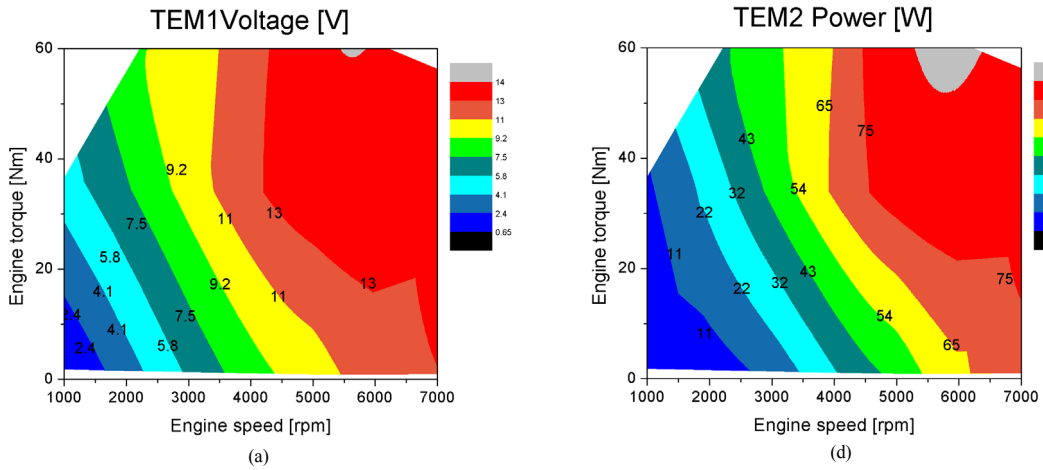


Fig. 5. (a) TEM1 Voltage (b) TEM2 Voltage (c) TEM1 Power (d) TEM2 Power

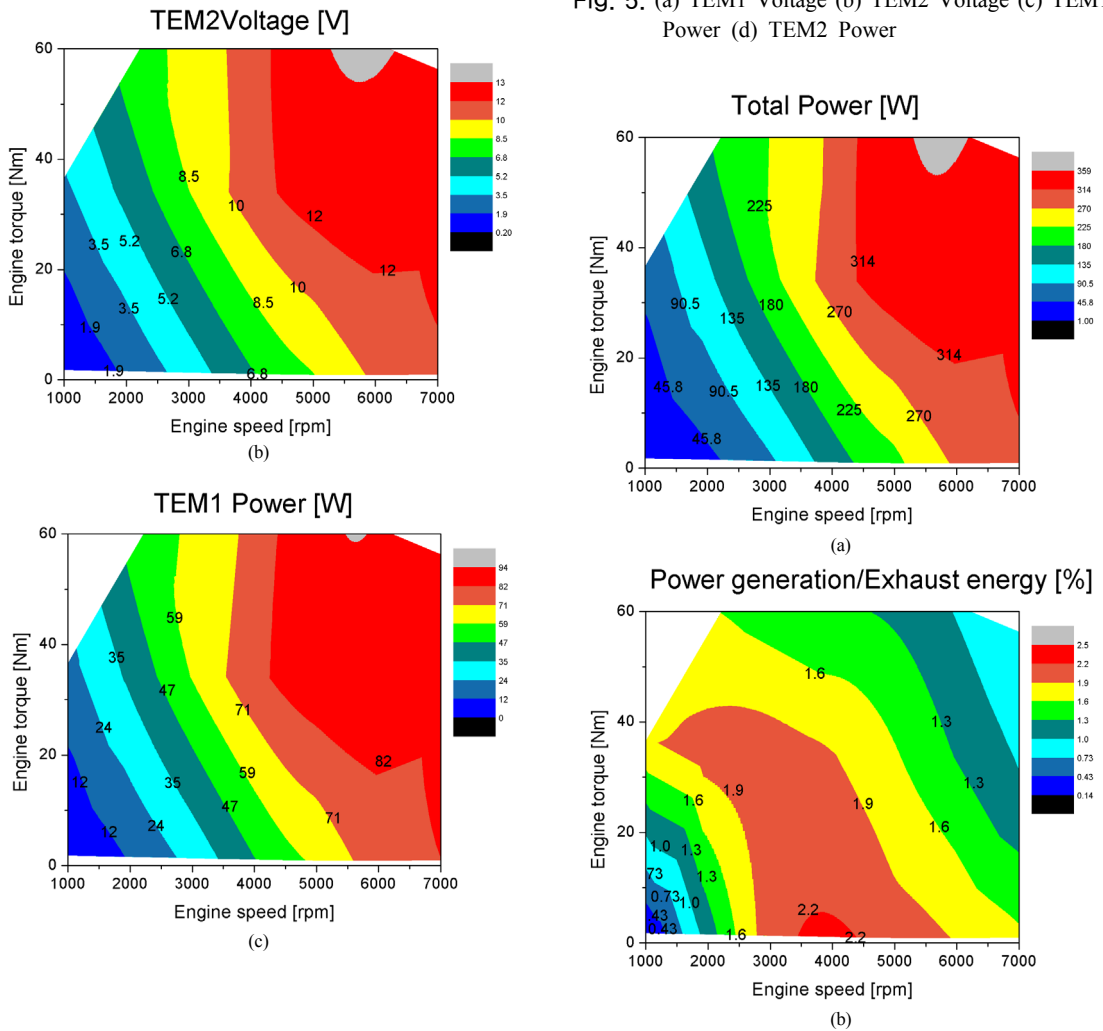


Fig. 6. (a) Total power generation (b) Power generation ratio

Figure 6은 엔진 속도와 부하에 따라 전체 전력 회수량과 배기 에너지중 전력 발전량의 비율을 나타낸다. 아래의 식으로 계산되었다.

$$\text{전력발전량비율}[\%] = \frac{\text{발전된 전력량}}{\text{배기가스의 총 엔탈피}} \times 100$$

전체 전력발전량은 TEM1, TEM2에 대해 위아래로 설치된 열전소자까지 총 4장의 열전소자에서 얻은 전력으로, 엔진 속도와 부하에 따라 30W에서 최대 ~400W까지 전력을 발전할 수 있음을 확인하였다. 본 전력은 배기로 배출되는 에너지 중 비율을 확인 결과, 저속 저부하 영역에서는 약 1%, 중속 영역에서는 약 2%, 고속 영역에서는 약 1.5% 수준으로 나타났다.

3. 결론

본 연구에서는, 모터사이클용 엔진의 후단에 설치된 열전발전 시스템의 성능 특성을 분석할 수 있는 1-D 열유동 해석 모델을 구성하고, 엔진의 속도와 부하 조건에 따른 발전 전력 특성을 해석하였다. 본 연구를 통하여 다음의 결론을 도출하였다.

첫째, 오토바이용 단기통 엔진 모델을 구성하였으며, 엔진 속도와 부하에 따른 배기 특성의 해석 결과, 배기 손실이 전체 연료 에너지 대비 약 40~60% 수준임을 확인하였다. 배기가스의 온도는 500~900°C 수준으로 확인되었다.

둘째, 열전발전 시스템 모사 모델을 구성하고, 엔진 모델과 통합 해석한 결과 열전발전모듈의 발생 전압은 배기가스 온도에 영향을 받으며, 열전도도가 높은 heat sink를 사용할 경우 열전소자간 발생 전압 차이가 줄어들음을 확인하였다. 열전발전소자의 발생전력은 발생전압에 따라 비례하였다.

셋째, 열전발전 시스템으로부터 최종 발생 전력은 엔진 속도와 부하에 따라 50~400W 수준이며, 이는 총 배기폐열 에너지 중 약 1~2% 수준을 회수할 수 있음을 확인하였다.

넷째, 향후연구로써, 실제 시험 결과와 검증 절차를 거쳐 모델을 검증 및 보완하고 열전발전시스템

의 설계 방법 (열전소자의 종류, 개수, 장착 구조, Heat sink 재질 및 구조)에 따른 발생전력특성을 해석하고 열전발전 시스템의 경제성과 발생전력을 고려한 최적설계를 진행할 계획이다.

References

- [1] M. Hamid Elsheikh, D.A. Shnawah, M.F.M. Sabri, S.B.M. Said, M. Haji Hassan, M. B. Ali Bashir, M. Mohamad, A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 30, pp. 337-355, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.027>
- [2] R. He, S. Gahlawat, C. Guo, S. Chen, T. Dahal, H. Zhang, W. Liu, Q. Zhang, E. Chere, K. White, Z. Ren, Studies on mechanical properties of thermoelectric materials by nanoindentation, *Physica Status Solidi (a)*, 212, pp. 2191-2195, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1002/pssa.201532045>
- [3] Y.-H. Cheng, W.-K. Lin, Geometric optimization of thermoelectric coolers in a confined volume using genetic algorithms, *Appl. Therm. Eng.* 25, pp. 2983-2997, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.03.007>
- [4] H.-C. Chien, E.-T. Chu, H.-L. Hsieh, J.-Y. Huang, S.-T. Wu, M.-J. Dai, C.-K. Liu, D.-J. Yao, Evaluation of temperature-dependent effective material properties and performance of a thermoelectric module, *J. Electron. Mater.* 42, pp. 2362-2370, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11664-012-2456-0>
- [5] J.-H. Meng, X.-D. Wang, W.-H. Chen, Performance investigation and design optimization of a thermoelectric generator applied in automobile exhaust waste heat recovery, *Energy Convers. Manage.* 120, pp. 71-80, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.080>
- [6] Y.Y. Hsiao, W.C. Chang, S.L. Chen, A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine, *Energy* 35, pp. 1447-1454, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.11.030>
- [7] S.B. Riffat, X. Ma, Thermoelectrics: a review of present and potential applications, *Appl. Therm. Eng.* 23, pp. 913-935, 2003.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00012-7)
- [8] L.E. Bell, Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems, *Science* 321, pp. 1457-1461, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1158899>
- [9] T.Y Kim, J.H. Kim, Assessment of the energy recovery potential of a thermoelectric generator system for passenger vehicles under various drive cycles, *Energy*, vol. 143, pp. 363-371, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.137>

이 무 연(Moo-Yeon Lee)

[정회원]



- 2010년 2월 : 고려대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2011년 1월 : 고려대학교 기계공학과 (연구교수)
- 2011년 2월 ~ 2012년 8월 : 자동차부품연구원 선임연구원
- 2012년 9월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

친환경 자동차 열관리, 전동식 히트펌프, 신재생에너지 변환 시스템, 열/물질전달, 연료전지, 나노유체, 자성유체

김 기 현(Ki-hyun Kim)

[정회원]



- 2004년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (기계공학 학사)
- 2014년 8월 : 한국과학기술원 기계공학과 (기계공학 박사)
- 2014년 7월 ~ 2016년 1월 : 현대중공업 선임연구원
- 2016년 1월 ~ 2016년 8월 : 자동차부품연구원 선임연구원

- 2016년 9월 ~ 현재 : 신라대학교 융합기계공학부 교수

<관심분야>

열유체공학, 열전달, 연소공학, 내연기관