

# 열전소자를 이용한 자동차 엔진 배기 폐열 회수 시스템 해석 모델 개발

김기범<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>충북대학교 기계공학부

## Development of Simulation Model for Waste Heat Recovery from Automotive Engine Exhaust Using Thermoelectric Generator

Ki-Bum Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

**요 약** 최근 엔진 효율 향상을 위하여 열전 소자를 이용한 자동차 엔진 폐열 회수 기술이 주목 받고 있다. 열전소자 해석 모델링은 많이 개발 되었으나, 특정한 시스템 해석 모델과 함께 적용된 사례는 찾아보기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 열전소자를 이용하여 디젤 엔진의 배기 폐열 에너지 회수율을 평가할 수 있는 해석 모델을 1-D 상용 프로그램인 AMESim을 이용하여 개발하였다. 개발한 열전소자 해석 모델은 다양한 소자 종류에 따른 열전 발전 효율 및 폐열 회수율 평가가 가능한 모델이며, 디젤 엔진 해석 모델은 현재 상용화된 모든 디젤 엔진을 모사할 수 있는 모델이다. 여러 운전 조건에서 디젤 엔진의 폐열로부터 하나의 열전소자를 사용하여 회수 가능한 에너지는 약 544.75W 이고, 전기로 변환될 수 있는 동력은 약 40.4W이었다. 본 연구에서 개발한 해석 모델은 같은 해석 프로그램에서 연동하여 해석을 용이하게 수행할 수 있기에 추후 열전소자를 이용한 디젤 엔진의 배기 폐열 회수 시스템 개발 시 회수율을 예상하고 시스템 최적화를 수행할 수 있는 방법을 제공할 것으로 기대된다.

**Abstract** Recently, the waste heat recovery technique using thermoelectric generator (TEG) in automotive engine has emerged to improve thermal efficiency in commercial vehicle. It is not difficult to recognize the numerous attempts that have been made to develop the TEG simulation model, but it is hard to find the model in conjunction with a particular heat engine system. In this study, 1-D commercial software AMESim was used to develop a computational model that can assess waste heat recovery from a diesel engine exhaust using TEG. The developed TEG simulation model can be used for evaluating the TEG performance of various types of TE module, and the diesel engine model can simulate any type of on and off-road diesel engines. The simulation results demonstrated that approximately 544.75W could be recovered from the engine exhaust and 40.4W could be directly converted into electricity using one TE module. The models developed in this study can be easily coupled with each other in the same computational program; thus, the models are expected to provide a viable tool for developing and optimizing a TEG waste heat recovery system in an automotive diesel engine.

**Key Words** : AMESim modeling, Thermoelectric generator (TEG), Waste Heat Recovery (WHR)

### 1. 서론

교토의정서 이후 발리협약 등 지속적인 지구환경에 대한 관심 증대와 CO<sub>2</sub> 저감 및 에너지 절감이 강력히 요구되는 자동차 산업에서는 하이브리드 자동차, 연료전지 자동차 및

기존 내연기관의 연비 향상에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다[1]. 이들 중 기존 내연기관의 엔진 폐열을 회수하여 재생동력으로 활용하는 엔진 폐열 회수 시스템은 상대적으로 기술 투자비 대비 연비개선이 높은 분야로 인식되고 있다 [1,2]. 미국과 유럽 및 일본 등 선진국에서는 엔진 폐열 회수

본 논문은 2011학년도 충북대학교 신진연구비 지원 사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

\*Corresponding Author : Ki-Bum Kim(Chungbuk National Univ.)

Tel: +82-43-261-2446 email: kimkb11@chungbuk.ac.kr

Received December 31, 2012

Revised (1st February 27, 2013, 2nd March 05, 2013)

Accepted March 7, 2013

시스템 기술개발을 위해 완성차 업체와 부품업체 및 연구기관 등이 컨소시엄 형태로 구성되어 적극적인 연구가 추진되고 있는 실정이다[1,3-5]. 이에 반해 국내에서는 제철소, 공장, 소각로 등의 폐열을 이용한 열전 발전 시스템에 집중되어 있고 자동차의 엔진 폐열 회수 시스템에 대한 연구는 미진한 상태이다. 반면 국내 자동차 업계에서는 하이브리드 및 연료전지 자동차 등과 같은 미래형 자동차에 대한 연구에 보다 집중해 왔으나, 인프라 구축이나 빠른 시일 안에 상용화가 어려운 점을 고려하여 기술 투자비나 연구 기간 대비 연비개선 효과가 큰 엔진 폐열 회수 기술을 기존 자동차에서 미래형 자동차의 중간 단계의 기술로 판단, 최근에는 큰 관심을 가지고 연구에 착수하였다. 폐열 회수 기술 중 열전소자를 이용하는 방식이 자동차와 같은 수송 장비에 적용이 용이하므로 일본의 혼다와 미국의 GM 등에서 연구가 활발히 추진 중이다[5]. 국내의 열전소자 연구 분야의 경우, 저온 냉각용 소재인 BiTe에 집중하고 있으며, 현재 고온용의 경우도 여러 산학기관에서 연구가 진행 중이나, 자동차에 적용할만한 기술은 부족한 실정이다. 따라서 자동차 배기 폐열 회수 시스템의 효율을 극대화하기 위해 배기관 형상과 열전소자(thermoelectric module)의 부착 방법 및 운전조건 등과 같은 폐열 회수 시스템의 최적화 기술을 위한 기초자료를 확보하고 이를 해석할 수 있는 수치해석모델을 개발하는 것이 본 연구의 목적이다.

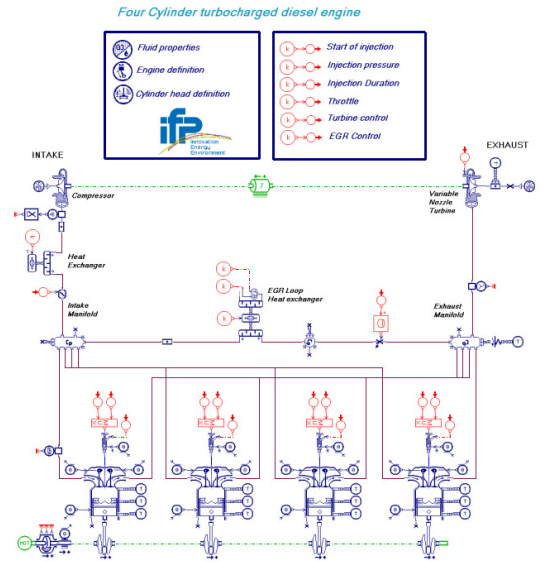
## 2. 해석 모델링 및 방법

### 2.1 디젤엔진 모델링

엔진의 다양한 운전 조건에 따른 배기가스의 온도 변화를 파악하고 폐열 에너지 회수 시스템의 폐열 회수율을 예측하기 위한 디젤 엔진 모델을 국내 디젤 차량에 많이 적용되고 있는 현대자동차 D-엔진 제원을 사용하여 모델링하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 디젤 엔진 모델이며, 엔진의 제원을 Table 1에 정리하였다. 해석을 통하여 배기관의 온도 분포를 평가하고, 최적의 열전발전이 가능한 열전소자 부착 위치 및 적절한 열전소자를 선정하였다. 배기관의 온도는 열전소자 모델에서 소자 고온부 온도 입력 값으로 사용되었다.

[Table 1] Specification of D-engine used for simulation modeling

|                      |      |
|----------------------|------|
| Number of strokes    | 4    |
| Number of cylinders  | 4    |
| Bore (mm)            | 83   |
| Stroke (mm)          | 92   |
| Compression ratio    | 17.3 |
| Injector hole number | 7    |



[Fig. 1] 4-cyl. diesel engine model

### 2.2 열전소자 모델링

AMESim에서 제공하는 수식연산자를 이용하여 열전소자의 제백효과(Seebeck effect)를 모사하였다. 열전소자 모델에 디젤 엔진 모델 해석 결과 중 배기관의 온도를 소자의 고온부에 입력하고, 저온부의 온도는 냉각이 효율적으로 이루어져 상온 298 K를 유지한다고 가정하여 최대의 온도차를 가지도록 하였다. 일반적으로 열전소자에서 발생하는 기전력은 식 (1)로 정의된다.

$$V = \alpha (T_h - T_c) \quad (1)$$

여기서  $\alpha [\mu V/K]$ 는 제백계수(Seebeck coefficient)이며,  $T_h$  과  $T_c$ 는 열전소자의 고온부와 저온부의 온도이다. 따라서 기전력은 제백계수와 소자의 온도차에 비례한다. 열전소자의 제백계수는 소자의 종류와 소자에 적용되는 온도에 따라 다른 값을 가진다. 본 연구에서는 최고 온도와 최저온도에 적절한 열전소자의 재료를 선정하였다. 열전소자의 P-type에는  $CeFe_4Sb_{12}$ 을 선정하였고, N-type에는  $n-Bi_2Te_3$ 을 선정하였다.

일반적으로 하나의 발전소자는 P-type과 N-type으로 구성된 150~250개의 조그만 열전 모듈로 구성된다. 따라서 발전력은 소자의 개수에 비례한다. 또한 열전소자의 효율은 소자와 열원의 접촉하는 접촉면의 재료와 물질적 성질에도 영향을 받게 된다. 이러한 변수들을 적용시키면 열전소자에서 발생하는 전압(V)와 전류(I)는 식(2)와 식(3)으로 계산된다.

$$V = \frac{N\alpha(T_h - T_c)}{1 + 2rl_c/l} \quad (2)$$

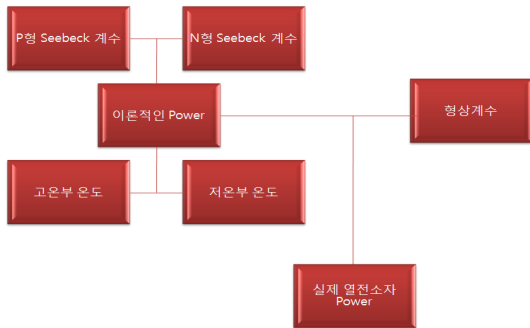
$$I = \frac{A\alpha(T_h - T_c)}{2\rho(n+l)(1 + 2rl_c/l)} \quad (3)$$

식(2)에서  $N$ 은 열전소자 모듈 개수이고,  $A$ 와  $l$ 은 열전소자 모듈의 횡단면의 면적과 열전소자의 길이를 나타내며,  $l_c$ 와  $\lambda_c$ 는 열전소자와 열원부의 접촉면에 해당하는 물질의 두께와 열전도도이다. 식(3)에서  $n = 2\rho_c/\rho$ 이며,  $\rho$ 는 열전소자의 비저항,  $\rho_c$ 는 접촉면의 비저항이고,  $r = \lambda/\lambda_c$ 이다. 일반적으로  $n$ 값은 0.1 mm이며,  $r$ 은 2이다.

마지막으로 식(4)를 이용하여 열전소자의 에너지 변환 효율을 구한다. 여기서  $Z$ 는 열전소자의 성능계수(figure of merit)으로 소자의 재료에 따른 특성을 나타낸다.

$$\eta = \frac{\left(\frac{T_h - T_c}{T_h}\right)}{(1 + 2r\frac{l_c}{l})^2 \left[2 - \frac{1}{2}\left(\frac{T_h - T_c}{T_h}\right) + \left(\frac{4}{ZT_h}\right)\left(\frac{1+n}{1+2rl_c}\right)\right]} \quad (4)$$

Fig. 2는 열전발전을 계산하기 위하여 위에서 언급한 수식들을 사용하여 구성한 해석 알고리즘이다.

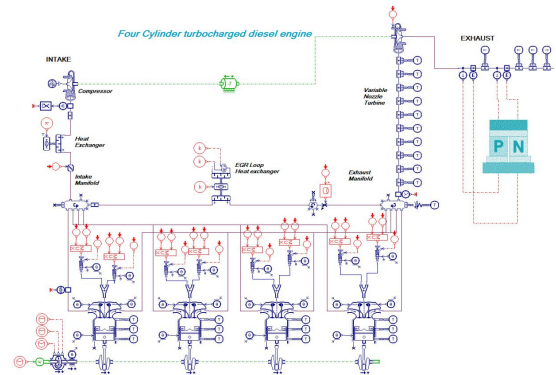


[Fig. 2] Simulation algorithm for Thermoelectric generation

알고리즘의 연산자로 구성된 해석 요소는 다양한 하위 요소들로 이루어져 있으며, 이는 열전소자의 특성을 잘 묘사하고 있지만, 가시적으로 열전소자임을 연출하기 위해 AMESim에서 제공하는 super component기능을 이용하여 Fig. 3과 같이 독립된 요소로 제작하였다. Fig. 4는 모델링된 열전소자를 디젤엔진 모델과 연동한 모습이다.



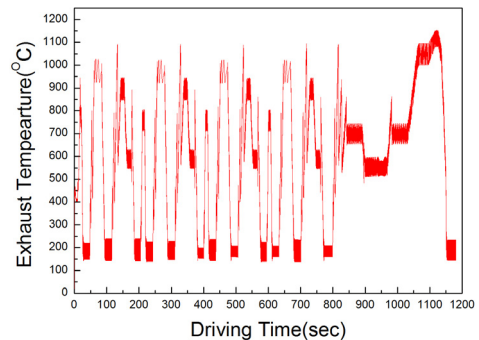
[Fig. 3] Simulation model for thermoelectric module



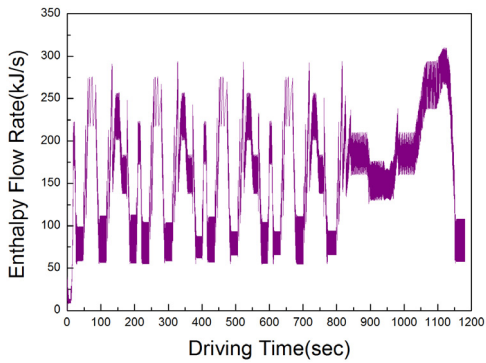
[Fig. 4] Thermoelectric module attached on exhaust pipe

### 3. 해석 결과 및 고찰

Fig. 5와 6은 디젤 엔진 모델을 이용하여 NEDC 운전조건에서 해석한 배기가스온도와 배기가스의 엔탈피를 도시한 그래프이다. NEDC는 유럽에서 사용하는 자동차 주행 시험 조건으로 Table 2에 정리하였다. 해석 결과는 실제 거동을 잘 묘사하고 있으며, 엔진의 RPM과 bmep가 높은 경우 배기가스의 온도도 올라가고, 동시에 배기가스가 가지고 있는 엔탈피도 증가하는 것을 알 수 있다.



[Fig. 5] Exhaust temperature for NEDC driving test mode

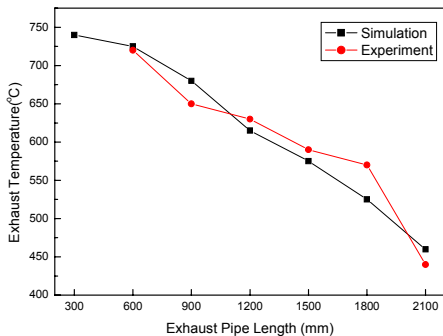


[Fig. 6] Exhaust enthalpy for NEDC driving test mode

[Table 2] NEDC Key Point

| Key Point | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
|-----------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| Speed rpm | 750 | 1100 | 1200 | 1600 | 2000 | 1900 | 2200 | 2600 |
| Torque Nm | 2   | 120  | 34   | 64   | 21   | 172  | 152  | 238  |
| BMEP bar  | 0.1 | 5.6  | 1.6  | 3.0  | 1.0  | 8.0  | 7.1  | 11.1 |

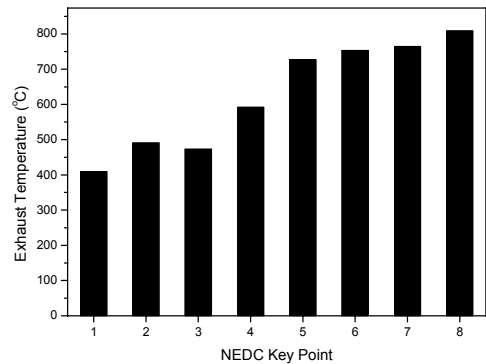
Fig. 7은 Fig. 1의 디젤 엔진 모델을 이용하여 가장 일반적인 운전 조건(1500 rpm, BMEP 4 bar)에서 디젤 엔진 배기관의 온도분포를 해석한 결과이다. 해석 결과를 검증하기 위하여 BMW에서 수행한 실험 결과를 사용하였다[6]. Fig. 7에서 보여주듯이 두 결과는 잘 일치한다. 배기가스의 온도가 배기 다기관과 터보차저를 통과하면서 급격히 떨어지며, 머플러쪽으로 가면서 점점 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 엔진 실린더에서 연소로 인하여 발생된 배기가스의 열원이 배기관을 지나가면서 배기관 외부로 열손실이 발생하기 때문에 온도가 떨어지게 되는 것이다. 열전소자는 소자 특성에 따라 적용할 수 있는 최적 온도가 정해져 있기에 이 데이터는 추후에 열전소자를 부착하기 위한 최적 위치를 선정할 때 유용하게 사용될 수 있다.



[Fig. 7] Exhaust temperature along the exhaust pipe

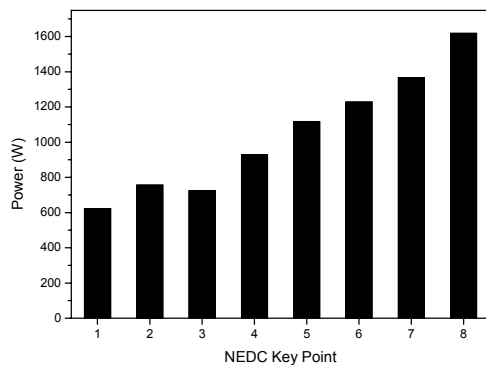
소자의 온도차이가 열전발전에 큰 영향을 미치지 때문에 본 연구에서는 가장 고온에 적합한 소자를 선택하여 터보차저 후단(Fig. 7의 약 300mm지점)에 부착하는 것으로 결정하였다.

Fig. 8은 Table 2의 NEDC Key point에 대한 배기가스의 온도이다. 앞서 논한 것과 같이 엔진의 회전수가 증가하고, bmep가 증가함에 따라 배기가스의 온도가 증가하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 저온부의 온도는 상온 293.15K(25℃)로 가정하여 고정된 값이므로 열전발전을 최적화하기 위해서는 고온부의 온도가 높은 것이 유리하다. 또한 고정된 위치에 설치되더라도 운전조건에 따라서 배기가스의 온도가 다르기 때문에 동등한 효율을 기대하기는 쉽지 않다.

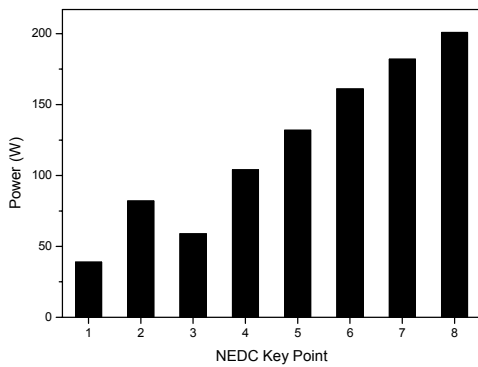


[Fig. 8] Exhaust temperature for rpm and BMEP

Fig. 9와 10은 운전조건별로 배기관에서 열전소자를 이용해 생성된 Power와 배기폐열을 회수한 엔탈피의 양을 보여준다. 높은 RPM과 BMEP에서 고온의 열원이 생성되는 것을 알 수 있으며, 폐열 회수량 및 재생동력이 증가하는 것을 알 수 있다. 하나의 열전소자가 배기 폐열로부터 회수한 에너지는 평균 544.75 W이고, 에너지 변환율을 고려했을 경우, 전기로 변환된 동력은 평균 40.50W이다.



[Fig. 9] Recovered power from exhaust gas using a thermoelectric device



[Fig. 10] Regenerated power using a thermoelectric device

### 3. 결론

본 연구에서는 최근 많은 주목을 받고 있는 자동차 배기폐열을 열전소자를 이용하여 회수하고 자동차 구동에 필요한 동력으로 변환시킬 수 있는 시스템을 해석할 수 있는 모델링을 개발하였으며, 해석을 통하여 엔진의 운전 조건에 따른 배기 온도, 배기 폐열 회수량 및 열전 발전을 통한 에너지 변화량을 파악할 수 있는 데이터를 제시하였다. 해석 결과 하나의 열전소자가 배기 폐열로부터 회수할 수 있는 에너지는 평균 544.47 W이고, 실제 전기로 변환되는 동력은 약 40.5 W이었다. 보통 10개 남짓의 열전 소자가 배기관에 부착되는데, 이 경우 회수하여 실동력으로 사용할 수 있는 에너지의 양은 높지 않다. 따라서 향후 열전소자의 에너지 변환율을 향상시켜야 실용성이 있을 것으로 판단된다. 하지만, 본 연구에서 개발한 배기 폐열 회수 해석 모델은 자동차뿐만 아니라, 선박, 발전플랜트, 제철 플랜트 등 다양한 폐열 회수 시스템의 해석 평가를 위해 응용할 수 있을 것으로 사료되며, 폐열 회수율을 평가하는데, 용이하게 사용될 것으로 기대된다.

### References

[1] J. Ringler et al., "Rankine Cycle for Waste Heat Recovery of IC Engines", SAE int. J. Engines, Vol(2), No(1), pp.67-76, 2009.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2009-01-0174>

[2] K. Kim et al., "Viable Combined Cycle Design for Automotive Applications", International Journal of Automotive, Vol(13), No(3), pp. 401-407, 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12239-012-0037-0>

[3] C. R. Nelson., "Heavy Duty Truck Egnien: High

Engine Efficiency at 2010 Emissions", DEER Conference, pp. 1-19, August, 2005.

[4] T. Endo et al., "Study on Maximizing Exergy in Automotive Engines", SAE 2007-01-0257, pp. 1-12, 2007.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2007-01-0257>

[5] J. Fairbanks., "Vehicular Applications of Thermoelectrics", DEER Conference, pp. 1-54, 2008.

[6] R. Freymann et al., "The Turbosteamer: A System Introducing the Principle of Cogeneration in Automotive Applications", MIZ 0512008 Vol.69, pp.20-27, 2008

김기범(Ki-Bum Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 충남대학교 선박해양공학과 (공학사)
- 2003년 8월 : University of Florida, 기계공학과 (공학석사)
- 2006년 8월 : University of Florida, 기계공학과 (공학박사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 충북대학교, 기계공학부, 조교수

<관심분야>  
친환경 에너지 시스템