

엔진 배기 폐열회수로 인한 배기 특성 변화

김기범*

¹충북대학교 기계공학부

Change in Engine Exhaust Characteristics Due to Automotive Waste Heat Recovery

Kibum Kim^{1*}

¹Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University,

요약 본 연구에서는 1-D 해석 프로그램인 AMESim을 활용하여 열전소자와 디젤엔진을 모델링하여 이를 New European Driving Cycle (NEDC) 운전모드에서 구동시킨 자동차에서 나오는 폐열을 이용해 열전소자로 발전을 하고 이에 따른 결과를 분석해보는 연구를 수행하였다. 열전소자 모델링 시 배기폐열 회수율 및 전기 에너지 변환률 뿐만 아니라 재료적 특성을 고려하여 열전달부분에 초점을 맞추었다. 또한, 디젤 산화 촉매(DOC)를 설계하여 열전소자로 인한 폐열회수가 디젤 산화 촉매 활성화에 미치는 영향과, 그 결과 배기가스의 성분별 증감을 조사하였다. 열전소자를 이용한 폐열회수는 자동차 연비개선에 도움이 되지만, 배기가스의 온도를 떨어뜨려 촉매 활성화에 영향을 미치게 되면, CO와 HC 배출이 최대 14% 증가하는 것을 관찰하였다. 따라서, 열전소자를 이용한 배기 폐열 회수 시스템 개발 시에 배기에 미치는 영향을 고려해야 한다.

Abstract In this study, a thermoelectric module (TEM) and a diesel engine were modeled using 1-D commercial software AMESim, and the performance of the TEM was evaluated when the engine was operated under the NEDC driving cycle. The goal of TEM modeling was to investigate not only the waste heat recovery (WHR) rate and energy converting efficiency, but also the heat transfer rate by taking the materials characteristics into account. In addition, a diesel oxidation catalyst (DOC) was designed, and it was found that the waste heat recovery with TEM affects the activation of DOC and alters engine exhaust composition. The simulation indicated that the WHR using TEM is beneficial for decreasing the fuel consumption of vehicles, but the reduction in the exhaust temperature affects the activation of DOC, resulting in an approximately 14% increase in CO and HC emissions. Therefore, the effect of waste heat recovery on the automotive emission characteristics must be considered in the development of automotive engine WHR systems.

Key Words : Waste heat recovery (WHR), Thermoelectric module (TEM), Diesel oxidation catalyst (DOC)

1. 서론

인류의 과도한 화석 연료 소비는 급격한 이산화탄소의 증가를 야기하였고, 그로인한 지구온난화 등의 기후 변화에 대응하기 위하여 최근 세계 각국에서는 태양광, 풍력 및 지열 등의 친환경 에너지 산업 육성에 박차를 가하고 있다. 또한 여러 산업분야에서 발생하는 폐열에너

지를 수확하여 이를 재활용하고자하는 '에너지 하베스팅' 기술이 각광받고 있다. 이 중 온도구배가 존재하는 곳에는 쉽게 적용 가능한 열전발전이 주목 받고 있는데, 이는 열전소자가 가지는 특성 때문이다.

열전소자란 고온부, 저온부라 일컫는 양단에 온도구배를 가해 기전력을 발생시키는 Seebeck 효과를 이용할 때 전 소자와, 전압을 인가하면 양단에 온도차를 만들어 한

본 논문은 2012학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Kibum Kim (Chungbuk National Univ.)

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

Received April 28, 2014

Revised May 26, 2014

Accepted August 7, 2014

쪽은 흡열, 다른 한쪽은 발열을 하는 Peltier 소자를 모두 일컫는다. 다른 에너지 하베스팅 기술, (예를 들어 태양 전지와 비교 하였을 때) 상대적으로 낮은 에너지 변환 효율을 갖고 있어 제한적인 부분이 많았지만, 최근 나노 기술과 접목되어 열전소자에 대한 연구 범위가 크게 확대되면서 효율 개선이 이루어짐에 따라 다양한 분야에 사용되어지고 있다. 특히 열전소자를 이용하여 자동차의 배기가스로부터 나오는 폐열을 회수하여 자동차의 연비를 향상시키고자하는 노력의 일환으로 최근, 국내 자동차 회사 및 해외의 많은 연구 기관에서 활발한 연구가 진행되고 있다[1-3].

현재 내연기관 자동차는 30% 정도의 열효율을 가지고 있다. 즉, 연료로부터 30% 정도만이 자동차의 구동을 위해 사용되어지고 거의 60% 가량의 에너지가 열에너지 형태로 방출된다. 자동차 폐열회수를 위한 열전 발전 시스템은 버려지는 열에너지를 열전소자로 회수를 하고 이를 전기에너지로 변환하여 자동차에 필요한 전기로 사용하게 되고, 이로 인하여 자동차의 연비를 향상시키는 개념이다.

본 연구에서는 1-D 상용 프로그램인 AMESim을 이용하여 자동차 폐열회수 목적에 사용될 수 있는 열전소자를 모델링하고 자동차 배기가스의 폐열을 회수하여 생산해 낸 발전량과 회수로 인하여 변화된 배기가스 온도의 변화를 New European Driving Cycle (NEDC) 운전 모드에서 평가하였다. 또한 열전발전 시스템이 자동차의 연비향상에 미치는 효과를 평가하였다. 또한 열전소자를 이용한 배기 폐열 회수로 인하여 배기가스의 온도저감이 디젤산화 촉매 활성화에 어떠한 영향을 미치는가에 대해 연구하였다.

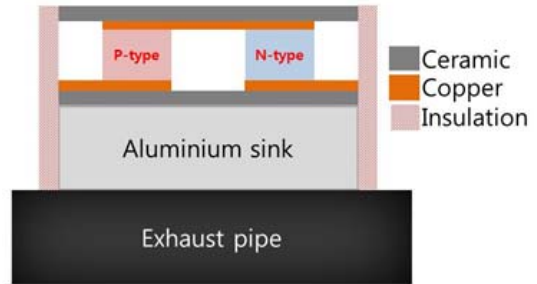
2. 해석 모델링 및 방법

2.1 열전소자 모델링

Fig. 1은 열전소자의 구조를 간략하게 보여준다. 열전소자는 외부로의 방전을 막기 위해 전기 절연체(세라믹)를 양단에 부착하며 전열재 내부는 전기 전도성이 우수한 구리와 열전재료인 P-type, N-type 의 반도체로 구성되어있다.

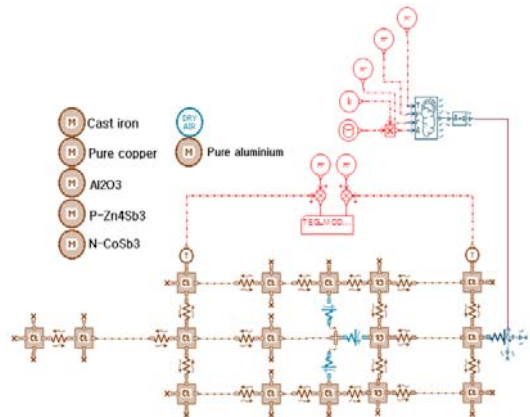
일반적으로 서로 다른 금속의 양끝을 접합시켜 양단의 온도를 달리하거나 기전력을 인가하여도 Seebeck효과나 Peltier효과를 기대할 수 있으나, 실제 열전소자에

사용되는 반도체가 금속보다 Seebeck계수와 Peltier계수가 더 크기 때문에 P, N타입의 반도체를 사용한다. 열전소자는 Seebeck계수에 따라 기전력의세기가 달라지며 즉, Seebeck계수에 따라 열전소자의 열전 능력이 달라진다.



[Fig. 1] Typical proto-type of a thermoelectric module (TEM)

Fig. 2는 열전소자 모델로 배기 파이프와 열전소자 그리고 열전소자로부터 대기로 방출되는 열의 이동을 전도, 대류 시스템으로 나타내었다[4,5].



[Fig. 2] Heat transfer model of a TEM

열전소자는 배기파이프 표면에 부착되어 있는 알루미늄 싱크 위에 부착하였다. 열전소자의 고온부는 알루미늄 싱크에 부착된 면의 온도, 저온부는 외부대기에 접해 있는 세라믹면의 온도로 설정하였다. 그리고 배기파이프 부터 구리, 알루미늄 싱크와 더불어 열전소자 재료의 물성치와 구조상의 열전달 현상을 표현하기 위해 Fig. 2와 같이 시스템을 구성하였다. 즉, 알루미늄 싱크와 절연체인 세라믹, 구리, 열전재료의 통합 전도 시스템이다.

열전소자의 절연체는 세라믹인 산화알루미나 (Al_2O_3)를 사용하였으며 전기전도체는 구리를 사용하였다. P-type, N-type의 열전소자는 각각 $P-Zn_4Sb_3$, $N-CoSb_3$ 가 사용되었다. 열전소자 재료는 온도가 변함에 따라 열전소자의 물성치도 달라지나 열전소자에 가해지는 열에너지에 의해 온도차이가 크게 발생하지 않으므로 사용온도 범위의 평균값이라 할 수 있는 350K, 400K에서의 물성치를 사용하였다. 배기가스가 파이프를 통과하면 파이프와 열전소자로의 열전달이 이루어진다. 열전소자는 세라믹부분으로 산화알루미나, 산화알루미나에서 구리, 구리에서 열전재료 그리고 다시 구리, 산화알루미나로 전도열전달이 이루어지며 최종적으로는 외기의 대류열전달에 의해 냉각이 된다. 각 재료의 컴포넌트는 각 재료가 차지하는 부피와 밀도로 질량을 계산하였다.

열전소자는 배기 파이프에 부착되어 자동차가 주행함에 따라서 주행 풍에 의해 냉각이 된다. Fig.2의 열전소자 모델 저온부에 강제대류열전달 모델을 이용하여 모사하였다. 외부대기의 상태 중 온도, 대기압, 상대습도는 종속 값으로 두었고 질량유량 값은 가변 값으로 두었다. 질량유량 값은 자동차의 속도에 따라 비례하게 된다. 따라서 위와 같이 구성된 시뮬레이션 모델은 배기가스로부터 배기파이프로의 열전달 배기파이프에서 열전소자의 저온부로 열전도가 일어나게 되고 열전소자는 자동차가 주행함에 따라 냉각이 된다. 이와 동시에 열전소자 내에 고온부와 저온부의 온도를 측정하여 전압, 전류, 전력을 계산하는 연산 시그널을 통해 열전소자의 발전량을 파악할 수 있다. 평판형 열전소자 모델링의 이론식은 다음과 같다.

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

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

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

열전소자의 기전력을 구하는 식(1)에서 N은 열전소자 N-P 모듈 개수이고, α [$\mu V/K$]는 Seebeck계수이며, T_h 과 T_c 는 열전소자의 고온부와 저온부의 온도이다. l 은 열전소자 모듈의 두께, l_c 는 절연체의 두께이다. r 은 열전소자의 열전도(k)와 접촉면의 열전도(k_c)의 비로 정의

된다. 열전소자로부터 발생하는 전류는 식(2)로 계산되는데, A는 열전소자 모듈의 횡단면의 면적이고, n 은 재료의 비저항(ρ)과 접촉면에 의한 비저항(ρ_c)의 비이다. 전위차에 의해 발생하는 전류의 크기는 열전소자의 단면적에 비례하며, 비저항, 열전도도, 접촉변수에 의해 영향을 받는다. 열전소자가 생산해내는 전력의 양은 식(3)과 같이 기전력과 전류의 곱으로 나타내어진다. 마지막으로 식(4)를 이용하여 열전소자의 에너지 변환 효율을 구한다. 여기서 Z는 열전소자의 성능계수(figure of merit)로 소자의 재료에 따른 특성을 나타낸다[1,2].

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

열전소자의 형상이란 P-N 반도체 각각의 단면적과 P-N 반도체 쌍의 개수 그리고 열전소자의 길이를 말한다. Table 1은 모델링에 사용된 열전소자의 재원이다.

[Table 1] Specification of TEM

N	127	ρ ($\Omega \cdot m$)	0.001
α_P (V/K)	0.0002	ρ_c ($\Omega \cdot m$)	2E-8
α_N (V/K)	-0.000175	l (m)	0.01235
k (W/m·k)	2.2	l_c (m)	0.00153
k_c (W/m·k)	118	Area (m^2)	4.63E4

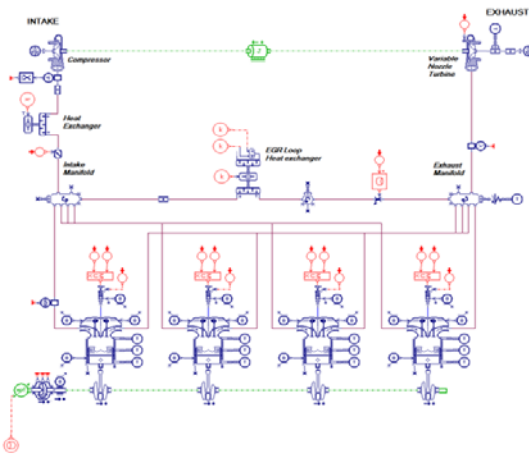
추가적으로 열전소자의 폐열 회수량을 확인하기 위해 알루미늄싱크로부터 열전소자로 전달된 열량을 파악할 수 있으며, 배기파이프를 통과 전후를 비교하여 배기가스의 온도변화에 대해 알 수가 있다. 열전소자와 배기파이프가 대류열전달에 의해 외기로 열을 방출하면서 배기가스 온도가 감소하게 되는데, 배기파이프 후단에 가스의 성분을 분석할 수 있는 컴포넌트와 디젤산화촉매장치를 장착하여 온도감소에 따라 CO, HC, NOx의 양이 어떻게 변하는지 분석하였다[5].

2.2 디젤엔진 해석 모델

Fig. 3는 AMESim을 이용하여 개발한 디젤엔진 해석 모델이며, NEDC 운전모드에서 구동 시 디젤엔진의 배기

가스 온도 및 배기배출량을 예측하기 위하여 사용하였다.

디젤엔진 해석 모델은 4개의 실린더 디젤엔진으로 1.6L의 배기량을 갖는 디젤엔진이다. 위의 디젤 모델로부터 열전달전에 필요한 배기가스의 온도데이터와 NEDC 모드에서 구동 시 발생하는 배기배출물의 생성량을 구하였다. NEDC 운전모드는 자동차의 연료경제성과 엔진의 배기가스를 평가하기 위하여 사용하는 대표적인 운전 사이클이다. NEDC 운전모드는 4번의 시가 주행이라 일컫는 Urban Driving Cycle (UDC)과 한 번의 고속주행이라 일컫는 Extra-Urban Driving Cycle (EUDC)로 이루어져 있다. UDC는 0에서 760초까지 진행되며 EUDC는 760초부터 1180초 까지 진행된다.



[Fig. 3] Four cylinders turbocharged diesel engine simulation model used in this study

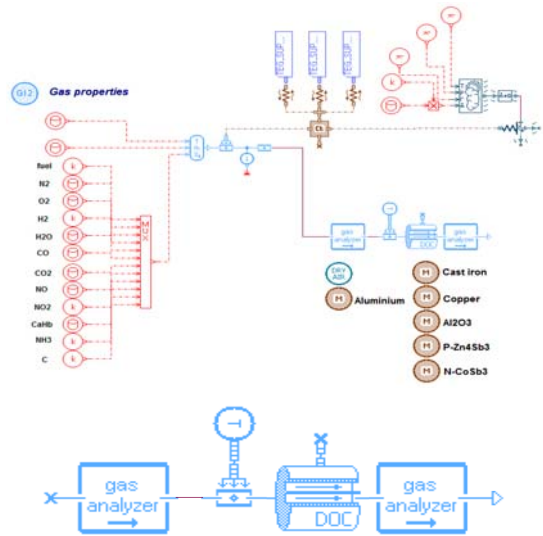
Fig. 4는 배기파이프에 연결된 디젤산화촉매(DOC)모델을 보여준다. 해석 시간을 단축하기 위해 Fig. 3의 엔진 모델에서 도출한 데이터를 입력 값으로 하여 디젤산화촉매에 초점을 맞춘 시스템을 구성하였다. 그리고 열전소자의 발전량 및 폐열 회수량, 열전소자의 개수에 따른 배기온도의 변화, DOC의 배기 저감 효율 변화 등을 조사하기 위하여 Fig.2의 열전소자 모델을 하나의 요소로 바꿔 배기파이프에 3개의 열전소자를 부착하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

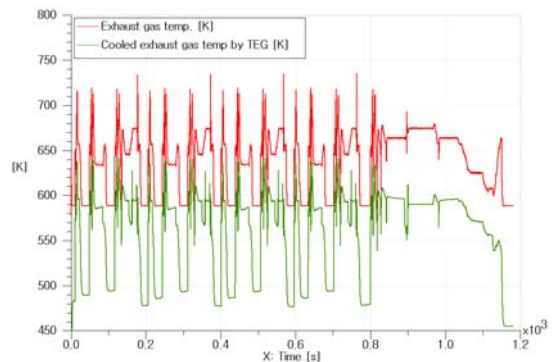
3.1 배기가스 온도의 변화

Fig. 5는 해석에 사용된 디젤 엔진 배기가스의 온도를

보여준다. NEDC 운전모드에서 엔진 배기 매니폴드에서의 배기가스의 평균 온도는 648°C이고, 이 고온의 배기가스는 배기관을 통한 열전달로 인하여 냉각되어 열전소자를 부착하는 위치에서는 평균 573°C로 냉각이 된다. 열전소자 3개를 배기파이프에 부착했을 때 온도는 559°C로 약 14°C 낮아지는데, 열전소자의 폐열 회수량은 배기가스가 가지고 있는 열에너지에 비해 매우 작으므로 배기가스 온도의 변화가 크지 않다. 배기파이프로부터 열전소자로의 열전달이 병렬구조라고 한다면 열전소자 한 개를 부착할 시에 감소하는 배기가스의 온도는 약 5.4°C이다.



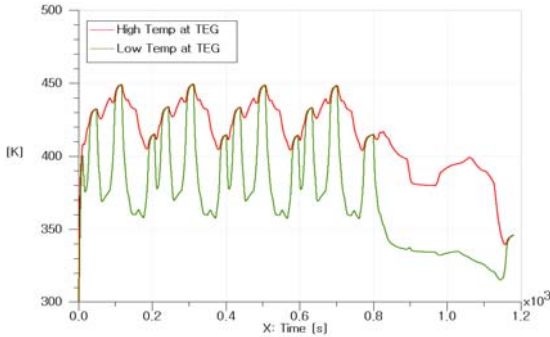
[Fig. 4] A simplified model of TEMs and DOC attached in exhaust pipe



[Fig. 5] Exhaust temperature at exhaust manifold and pipe where 3 TEMs were attached

Fig. 6은 열전소자의 고온부, 저온부 온도를 보여준다.

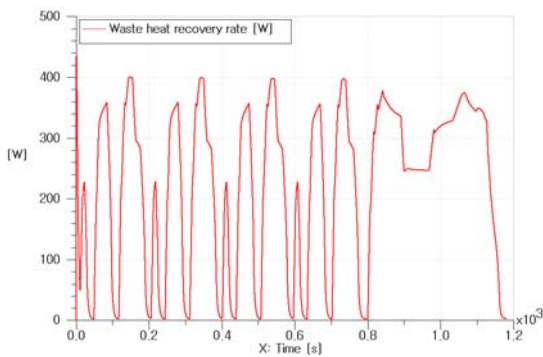
앞서 얘기했듯이, 열전소자에서 발생하는 기전력은 열전소자 쌍의 개수와 Seeback계수 그리고 열전소자의 고온부, 저온부의 온도차에 비례하므로, 높은 온도차이가 발생할 때 열전소자의 발전량이 증가하게 된다.



[Fig. 6] Temperatures on the surface of hot and cold sides of TEM

3.2 열전소자의 폐열회수량 및 발전량

열전소자와 배기파이프는 차량에 속도에 따라서 냉각 정도가 달라진다. Fig. 7은 열전소자에 의해 회수된 열량을 보여준다. 열전발전을 위한 폐열 회수량은 알루미늄 싱크로부터 열전소자 고온부에 전달되는 열량으로 계산하였다. 열전소자 1개가 평균 146 W의 열을 회수하였으며, 1180초 동안 회수한 열에너지의 총량은 약 172 kW이었다.



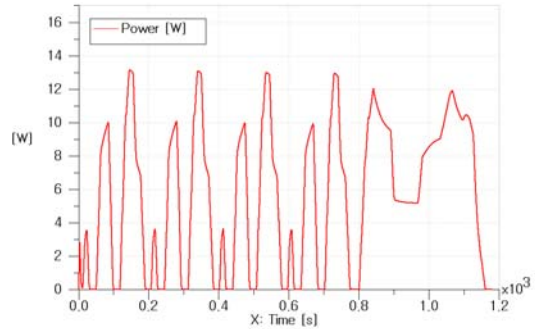
[Fig. 7] Heat recovered by using TEM

NEDC운전모드 1180초 동안 운전조건에 따라 열전소자 한 개가 생산해낸 전력그래프는 Fig. 8과 같다. 열전소자 1개로부터 생산해낸 총 전력량은 6.6 kW이며, 평균 5.6 W의 전력이 생산되었다. 열전소자의 전기에너지 변

환효율은 식(5)로 정의 된다.

$$\eta_{conv} = \frac{\text{발전량}}{\text{회수한 열량}} \quad (5)$$

이 식으로부터 회수된 엔진 배기폐열의 전기에너지로 변환된 효율은 약 3.9%이다.



[Fig. 8] Electric power converted from exhaust heat using TEM

3.3 폐열회수에 따른 배기가스 성분조사

해석에 사용된 DOC의 제원을 Table 2에 정리하였다.

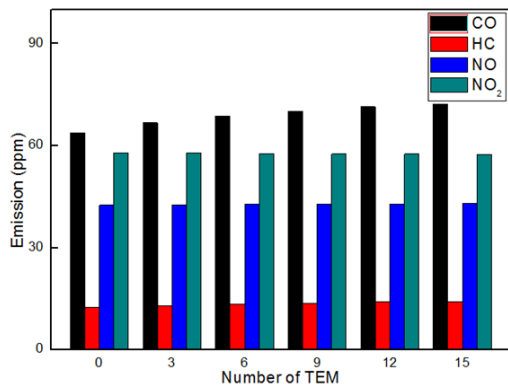
[Table 2] Geometry of Diesel Oxidation Catalyst (DOC)

Monolith Length (mm)	76
Monolith Diameter (mm)	144
Number of Cells (#/in. ²)	400
Wall Thickness (mm)	0.16

DOC내부에서 배기가스 유체의 이동은 층류로 가정하였고, DOC의 냉각은 473K의 고정온도로 냉각이 된다고 가정하였다. Fig. 9는 열전소자를 DOC전단에 부착하여 폐열회수 결과 감소하는 배기가스 온도로 인한 DOC의 배기 전환 성능을 보여준다. DOC를 통과하기 전 엔진으로부터의 배기배출물의 양은 1180초 동안 평균 CO(1056.1 ppm), HC(462.5 ppm), NO(100.2 ppm)으로 각각 열전소자 부착 유무에 관계없이 큰 차이가 나지 않았지만, DOC에 통과하고 난 뒤의 배기가스의 조성물은 열전소자에 의해 감소된 배기가스온도로 부착 전, 후가 차이가 남을 알 수 있다 열전소자 부착수가 증가함에 따라 CO배출도 증가하는 것을 알 수 있으며, 다른 배기 성분도 미세하게 증가하는 것을 관찰하였다. 이는 열전소자

로 인하여 낮아진 배기가스의 온도가 촉매 효율에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

DOC는 디젤 엔진에서 불완전 연소 결과 발생한 배기 배출물을 산화 시켜 덜 해로운 이산화탄소나 물로 변환해 주는 장치인데, 디젤연소에서 발생하는 NO가 산화되어 NO₂로 변화는 과정은 CO나 HC 변환률을 저하하는 요인이 된다. 따라서 그림에서 보여준 NO의 감소는 NO₂로 변환되었기 때문이다.



[Fig. 9] Engine-out emission for the number of TEM attached before DOC

4. 결론

본 연구에서는 자동차 엔진 배기 폐열을 회수하기 위한 열전소자 해석 모델을 설계하여 폐열 회수량을 평가하였다. NEDC 운전모드 1사이클(1180초)동안 하나의 열전소자로 회수한 배기폐열은 평균 146W이며, 5.6W의 전력을 생산했다. 배기관에 부착하는 열전소자의 수가 증가한다면, 회수량과 발전량을 증가시킬 수 있으나, 배기가스 온도 저감으로 인한 디젤 산화 촉매의 활성화에 영향을 미친다. 열전소자 15개 사용 시 CO와 HC 배출이 약 14% 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 열전소자를 이용한 배기 폐열 회수 시스템 개발 시 폐열 회수뿐만 아니라 배기에 미치는 영향을 반드시 고려해야 할 것으로 사료된다.

References

- [1] D. M. Rowe, Gao Min(1998) "Evaluation of thermoelectric modules for power generation", Journal of Power Source 73, pp. 193-198
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7753\(97\)02801-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7753(97)02801-2)
- [2] D. M. Rowe(2006), "Thermoelectrics handbook", Taylor & Francis Group, LLC
- [3] K. B. Kim, "Development of Simulation Model for Waste Heat Recovery from Automotive Engine Exhaust Using Thermoelectric Generator", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol(14), No(3), pp. 1022-1026, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.3.1022>
- [4] J.P. Holman, *Heat transfer*: p.57-59, McGrawHill, 10th edition, 2010.
- [5] Material Property, Available From: <http://www.matweb.com>, (accessed Apr., 15, 2014)

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