

자동차 배기가스 유량 및 온도 변화에 따른 열전발전용 열교환기 발열량 특성에 관한 연구

김대완¹, 기한 에카나야케², 이무연^{2*}
¹엔티에프 텍, ²동아대학교 기계공학과

Thermal Characteristics of the Automobile Exhaust gas based Heat exchanger with various Exhaust gas Temperature and Mass flow rate

Dae-Wan Kim¹, Gihan Ekanayake², Moo-Yeon Lee^{2*}

¹R&D Division, NTF Tech Co.

²Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

요약 본 논문은 자동차 열전발전용 열교환기에서 배기가스의 유량과 온도 변화에 따른 발열량 특성을 수치적으로 연구하였다. 자동차 열전발전용 열교환기는 내부에 핀을 설치하여 자동차 배기가스에서 나오는 열에너지를 열전소자로 최대 값을 전달할 수 있도록 하였으며, 상용 프로그램인 CAD를 이용하여 설계하였다. 그리고 배기가스의 유량과 온도 변화에 따른 열교환기 발열량 특성을 분석하기 위하여 상용 프로그램인 ANSYS CFX v17.0을 이용하여 배기가스 유량은 0.01, 0.02, 0.03 kg/s로 변화시키고, 배기가스 온도는 400, 450, 500, 550, 600 °C로 변화시켜 수치해석 하였다. 결론적으로 열교환기의 입구 측과 출구 측 배기가스 압력 차는 배기가스의 유량에 따라 결정된다. 배기가스 유량이 증가하면 열교환기 입구 측과 출구 측 압력차는 증가하지만, 열교환기 입구 측과 출구 측 배기가스 압력차는 배기가스 온도에 따라 변하지 않는다. 따라서 열교환기 표면 온도를 최대 값으로 얻기 위해서는 배기가스 유량은 낮추고, 배기가스 온도는 높여야 한다는 결론을 도출하였다.

Abstract The objective of this study is to numerically investigate the thermal characteristics of an automobile exhaust-based heat exchanger for automotive thermoelectric power generation with various exhaust gas mass flow rates and temperatures. The heat exchanger for automotive thermoelectric power generation has a square-type pin installed inside, so the maximum amount of heat can be transferred to the thermoelectric element from the heat energy coming from the automobile exhaust gas. The exhaust gas mass flow rate changed from 0.01, to 0.02, to 0.03 kg/s, and the exhaust gas temperature changed from 400, to 450, to 500, to 550, to 600 °C, respectively. A numerical simulation was conducted by using the commercial program ANSYS CFX v17.0. Consequently, the exhaust gas pressure difference between the inlet and the outlet of the heat exchanger is determined according to the flow rate of the exhaust gas. When the mass flow rate of the exhaust gas increased, the pressure difference between the inlet and the outlet of the heat exchanger increased, but the exhaust gas pressure difference between the inlet of the heat exchanger and the outlet did not vary with the exhaust gas temperature. Therefore, in order to obtain the maximum surface temperature from the heat exchanger, the exhaust gas mass flow rate should be lower, and the exhaust gas temperature should be higher.

Keywords : Exhaust gas, Heat exchanger, Mass flow rate, Temperature, Thermoelectric generator

본 연구는 부산과학기술기획평가원의 지역특화 기술개발·확산 개방형연구실 운영사업으로 수행한 결과이며, 본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업으로 수행한 결과이고(B8-2416), 이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(no.2016R1D1A1B03935822)을 밝힙니다.

*Corresponding Author : Moo-Yeon Lee(Dong-A Univ.)

Tel: +82-51-200-7642 email: mylee@dau.ac.kr

Received January 17, 2017

Revised February 1, 2018

Accepted February 2, 2018

Published February 28, 2018

1. 서론

오늘날 과도한 화석연료 사용에 따른 자원 고갈과 환경오염 문제가 심각하게 대두되고 있다. 특히 인류의 주요 근거리 이동 수단 중 가장 많이 사용되는 자동차에 대하여 유럽 및 북미 지역에서는 높은 환경규제에 따라 배기가스에서 유해가스를 줄이기 위하여 많은 연구를 하고 있다.

세계 완성차 업체는 자동차 배기가스의 환경규제에 대응하기 위하여 하이브리드 자동차(HEV), 플러그인 하이브리드 자동차(PHEV), 전기자동차(BEV), 연료전지 자동차(FCEV) 등 여러 형태의 친환경 자동차에 대하여 연구하고 있다.

친환경 자동차 중 전기자동차와 연료전지 자동차가 배기가스에 대한 환경규제를 만족하는 가장 좋은 방법이지만, 현재 각 나라에서 가진 인프라를 바탕으로 운영하기에는 부족하다. 그러므로 현재까지는 하이브리드 자동차와 플러그인 하이브리드 자동차 등과 같은 내연기관과 전기모터를 동시에 사용할 수 있는 자동차가 각광받고 있다. 이러한 하이브리드 자동차는 화석연료와 전기에너지를 동시에 사용하기 때문에 연료 충전에 대한 제약이 적으며, 높은 연비를 실현시킬 수 있어 매우 효율적인 자동차이다.

그러나 기존 내연기관 자동차와 마찬가지로 내연기관을 구동하여 자동차를 움직이기 때문에 연소에 따른 열에너지 손실이 발생하게 된다. 사용되는 연료에 따라 기관의 효율이 다르지만 대략 30~40%의 효율을 가지며, 나머지 열에너지는 엔진 냉각수와 배기가스 등으로 대부분 빠져나가게 된다. 기존 내연기관 자동차들은 이와 같이 손실되는 열에너지를 활용하는 방법이 겨울철 엔진 냉각수를 활용한 히터 구동 등 극히 일부분에 사용되고 있다.

배터리에 저장된 전기에너지를 이용하여 전기모터를 구동하는 하이브리드 자동차는 내연기관으로 직접적으로 발전하여 전기모터를 구동하거나 생산된 전기를 배터리에 저장하여 주행 중 필요 시 사용할 수 있다. 이와 같이 내연기관의 운동에너지를 이용하여 전기를 생산할 수 하이브리드 자동차에서 전기에너지를 생산하기 위하여 내연기관에서는 배기가스로 버려지는 열에너지를 이용하여 발전할 수 있는 열전발전 기술에 대하여 연구가 활발히 이루어지고 있다.

열전발전은 P, N형 소자가 결합되어 소자 양단의 온도 차에 의해 전기기전력이 발생하는 제백효과(Seebeck effect)를 이용하여 전기에너지를 발생시키는 열전소자를 활용한 발전 기술이다.

열전발전은 자동차뿐만 아니라 제련소, 화학공장 등에서 버려지는 폐열을 이용하여 발전할 수 있어 세계적으로 이슈가 되고 있는 CO₂ 저감 효과를 기대할 수 있다. 또한 열전발전 기술은 버려지는 폐열을 전기에너지로 변환 가능하기 때문에 과도한 화석에너지 사용에 따른 자원 고갈과 환경오염 문제를 동시에 해결할 수 있는 기술이다.

그러나 현재까지 열전발전 소자는 열에너지를 전기에너지로 변환하는 에너지 변환 효율 및 기전력의 출력 밀도가 낮고, 열전소자에 사용되는 소재의 기계적 취약성으로 인하여 낮은 생산수율과 이에 따른 열전소재 및 모듈의 가격 상승이 열전발전 기술 적용 및 확산에 단점으로 작용하고 있다.

Cho et al. 은 배기가스 냉각에 따른 열전발전모듈의 성능변화를 예측하기 위해 열전모듈의 발전성능을 체결압력과 온도조건에 따라 평가하여 모듈의 유효 성능지수(Zm)을 측정하였고 이를 이용하여 열전모듈 고온부 온도변화와 열전모듈 배열에 따른 시스템 출력특성을 예측하였다[1].

Bang et al. 은 차량용 열전발전 시스템 개발을 위하여 가열부와 냉각부를 포함하는 열전모듈을 설계하여 배기가스 온도 및 외기온도 변화에 따른 열전모듈의 성능을 수치적으로 분석하여 배기가스 온도가 증가할 경우 열전발전량은 증가하고 외기온도가 증가할 경우 열전발전량은 감소하는 것을 확인하였다[2].

Cho et al. 은 열전모듈 고저온 온도차 확대를 위한 배기구의 내부 형상에 따른 열전모듈 고온부 온도변화를 수치해석을 통하여 예측하여 열전발전기의 고온부 표면에 냉각핀과 배기구 내부에 충돌체트 유발 튜브를 추가하였을 때 고온부 표면온도가 기존 일반 파이프에 비해 약 64 °C 상승할 수 있음을 확인하였다[3].

Park et al. 은 열전모듈의 엔진 배기가스 열적조건이 열발전 성능에 미치는 영향을 온도차, 유량 변화와 고온부 온도에서 실험을 수행하여 열전모듈 제백계수, 전기저항, 열저항, 성능지수에 대하여 실험적으로 연구하여 열전모듈 온도차가 증가함에 따라 발전성능이 크게 향상되며 열전발전 성능을 결정하는 주요인자는 양단간의 온

도차임을 확인하였다. 그리고 양단간의 온도차에 따라 선형적으로 증가하고 고온부 온도가 증가함에 따라 줄어들고, 양단간의 온도차를 크게 하기 위해 저온부(냉각수)를 80 ℃보다 더 낮아야 더욱 높은 효율을 얻을 수 있음을 확인하였다[4].

Kim et al. 은 열전발전 모듈용 배기관의 형상 변화에 따른 배기압력 특성에 대하여 실험적으로 분석하여 엔진 부하가 증가함에 따라 배기가스 유량 증가로 배기압력이 증가하는 경향을 나타내고 배기압력조절 밸브의 스프링 장력이 증가함에 따라 배기관 전후단의 차압이 증가하고 스프링 장력이 동일한 경우 배플의 위치와 직경에 따라 압력 특성이 결정됨을 확인하였다[5].

Moon et al. 은 열전발전시스템을 구성하는 열전발전 소자의 발전효율 저해 인자를 찾아 그 대안을 제시하고 최대로 발전할 수 있는 열전발전시스템 장치를 고안하여 제시하기 위하여 실험적으로 연구하여 Seebeck effect의 이론에 따라 열전발전량이 결정되는 현상을 증명하였고, 열전발전소자는 N, P형 반도체가 같은 배열방식임에도 특정부위에서 발전량이 현저히 떨어지는 현상을 발견하였다[6].

In et al. 은 시뮬레이션 모델링을 통하여 배기가스 온도를 예측하고 그 결과를 이용하여 열전모듈의 성능을 파악하였다. RPM이 증가할수록 열전모듈의 제백계수, 전기저항, 성능지수가 감소하다 일정해지는 것을 확인하였고, 저 RPM일 경우 제백계수, 전기저항, 성능지수가 크다는 것을 확인하였다[7].

Lee 는 차량의 라디에이터에서 냉각수 폐열로 버려지는 열에너지를 회수하기 위하여 열전발전 모듈에 히트파이프를 적용하여 냉각수 폐열회수 열전발전 시스템을 제작하였고, 열전발전 시스템에서 냉각수 온도와 유량, 히트파이프에 설치된 냉각핀으로 불어오는 공기온도와 속도를 변경하면서, 성능에 미치는 영향을 실험적으로 연구하여 냉각수 폐열회수 열전발전 시스템에서 성능에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 모듈 양단의 온도차로 온도차가 클수록 발전성능과 변환효율이 높게 나타남을 확인하였다. 또한, 냉각수 유량이 증가할수록 발전성능과 변환효율도 높아지며, 이는 열전발전 시스템에 전달되는 고온 열량이 발전 성능에 영향을 크게 미치는 것으로 확인하였다[8]. 또한, Lee 는 차량에서 버려지는 배기가스로 버려지는 폐열을 열전모듈을 이용하여 회수하는 열전발전시스템에 대하여 실제 차량의 배기계를 분석하여 각

부위별 배기가스 온도를 측정하고 이를 바탕으로 제작된 열전발전 시스템에 냉각시스템을 설치하여 연소기에서 연소온도와 유량을 변경하면서 발전성능을 실험하고 성능에 미치는 영향을 연구하여 발전 성능에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 열전발전 시스템의 양단 온도차이며, 온도차가 클수록, 가스유량이 많을수록 고온열교환기에서 회수하는 열량이 많아져 발전 성능은 높게 나타남을 확인하였다[9].

따라서 본 연구에서는 자동차에서 배기가스로 버려지는 폐열에너지를 활용한 열전발전 기술을 적용하여 최대의 발전효율을 낼 수 있는 조건을 도출하여 향후 실차 적용 시 열전발전 알고리즘 설계에 이용하고자 한다.

2. 수치해석 방법

본 연구는 자동차 배기가스 열전발전 시스템에서 배기가스 온도 및 유량 변화에 따른 열전발전용 열교환기 발열량 특성을 알아내기 위하여 Fig.1과 같이 상용 설계 프로그램인 CAD를 이용하여 배기가스 열교환기 모델을 설계하였다. 개발된 열교환기 모델은 195×124×50 mm³의 크기를 가지고 있으며, 입구와 출구 직경은 34 mm이다. Gihan et al. 의 연구결과에서 최적의 핀 크기 및 형상은 직사각형의 높이는 50 mm, 두께 10 mm 이며, 이를 적용하여 동일한 핀을 열교환기 내에 배치하였다 [10]. 해석모델은 Table 1과 같이 재질을 열전달계수 237 W/m·℃, 밀도 2,702 kg/m³, 비열 930 J/kg·℃인 알루미늄으로 하였다.

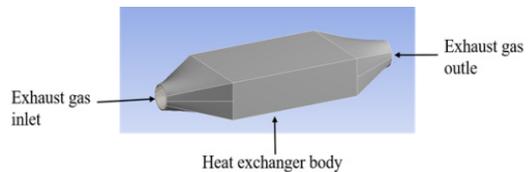


Fig. 1. The exhaust based heat exchanger's physical model

Table 1. Material of heat exchanger

Properties	Specifications
Material	Aluminum
Conductivity (W/m·℃)	237
Density (kg/m ³)	2,702
Specific heat capacity (J/kg·℃)	930

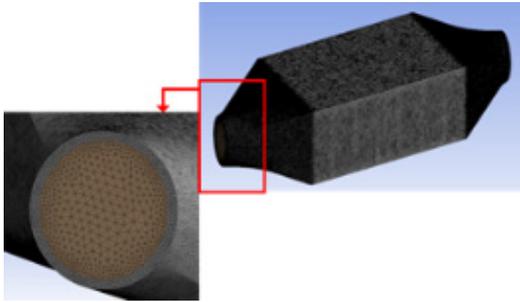


Fig. 2. Meshing details the exhaust based heat exchanger's physical model

Table 2. Mesh properties

Properties	Specifications
Mesh type	Automatic meshing
Nodes	2,002,390
Elements	6,919,138

Table 3. Condition of numerical analysis

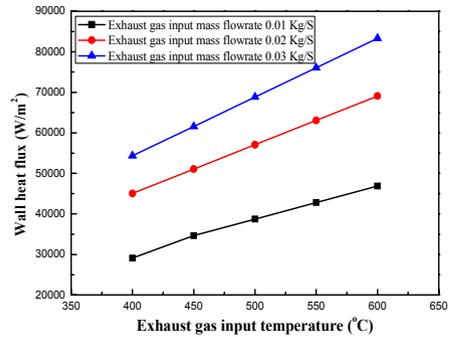
Properties	Specifications
Ambient temperature (°C)	25
Exhaust gas temperature (kg/s)	0.01, 0.02, 0.03
Exhaust gas temperature (°C)	400, 450, 500, 550, 600

수치해석은 상용 프로그램인 ANSYS CFX v.17을 사용하였으며, Fig. 2에 열교환기 출구 측 Mesh 나타내었다. Mesh는 곡선과 모서리에서 미세 Mesh를 생성하기 위하여 Proximity and curvature sizing function을 사용하였으며, Node 개수와 Element 개수는 각각 2,002,390개, 6,919,138개로 설정하였고 Table 2에 나타내었다.

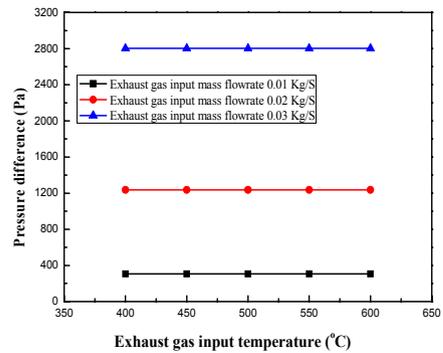
수치해석에 사용된 모델은 Table 3와 같이 외기 온도를 25 °C로 하고, 배기가스 질량유량을 0.01 kg/s, 0.02 kg/s, 0.03 kg/s로 변화시키고, 배기가스 온도를 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C, 600 °C로 변화시키며 각 조건에 따른 발열량에 대하여 수치해석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3(a)는 열교환기에 들어가는 배기가스 온도에 따른 발열량을 나타내었다. 배기가스 온도가 증가할수록 발열량은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 배기가스 유량이 0.01 kg/s 일 때 배기가스 온도가 400 °C 이면 발열량



(a)



(b)

Fig. 3. Wall heat flux and pressure difference of the exhausted based heat exchanger

(a) Wall heat flux variation with inlet exhaust gas temperature (b) Pressure difference variation with inlet exhaust gas temperature

은 29,094.3 W/m² 이며, 배기가스 온도가 600 °C 이면 발열량은 46,888 W/m² 이다. 배기가스 유량이 0.02 kg/s 일 때 배기가스 온도가 400 °C 이면 45,066.7 W/m² 이며, 배기가스 온도가 600 °C 이면 발열량은 69,102.3 W/m² 이다. 배기가스 유량이 0.03 kg/s 일 때 배기가스 온도가 400 °C 이면 54,343 W/m² 이며, 배기가스 온도가 600 °C 이면 발열량은 83,326 W/m² 이다. 여기서 발열량은 단위 면적당 에너지 흐름의 양으로 정의된다 [11]. 따라서 열교환기에 들어가는 배기가스 온도와 유량이 증가할수록 단위 면적당 에너지양은 증가한다.

Fig. 3(b)는 배기가스 온도와 유량에 따른 열교환기 입구 측과 출구 측의 압력강하를 나타내었다. 열교환기 입구 측과 출구 측의 압력강하는 배기가스 온도의 변화에 따라 변하지 않고, 배기가스 유량에 따라 변하였다. 배기가스 유량이 0.01 kg/s 일 때 입구 측 압력은 307 Pa

이고, 출구 측 압력은 0.820 Pa 이며, 배기가스 유량이 0.02 kg/s 일 때 입구 측 압력은 1239.76 Pa 이고, 출구 측 압력은 3.045 Pa 이며, 배기가스 유량이 0.01 kg/s 일 때 입구 측 압력은 2810.3 Pa 이고, 출구 측 압력은 6.838 Pa 이다.

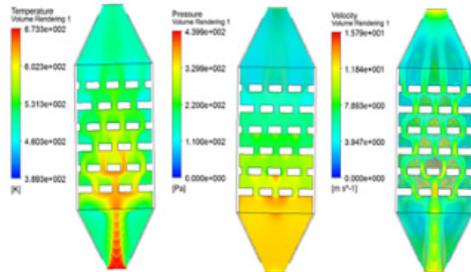


Fig. 4. Temperature, pressure and velocity distribution of the exhaust based heat exchanger

Fig. 4는 배기가스 유량이 0.01 kg/s 이고, 온도가 400 °C 일 때 열교환기 내 배기가스의 온도, 압력 및 속도를 나타내었다. 열교환기 내 사각 핀은 배기가스 유동을 막아 입구 측 배기가스 온도는 출구 측과 비교하여 높고, 입구 측 배기가스 압력은 출구 측과 비교하여 높으며, 입구 측 배기가스 속도도 출구 측과 비교하여 높게 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 열전발전용 열교환기에서 배기가스 온도와 유량에 따른 발열량 특성에 관하여 수치적으로 연구하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

열교환기의 입구 측과 출구 측 배기가스 압력 차는 배기가스의 유량에 따라 결정된다. 배기가스 유량이 증가하면 열교환기 입구 측과 출구 측 압력차는 증가한다.

그러나 열교환기 입구 측과 출구 측 배기가스 압력차는 배기가스 온도에 따라 변하지 않는다.

열교환기 표면 온도를 최대 값으로 얻기 위해서는 배기가스 유량은 낮추고, 배기가스 온도는 높여야 한다.

References

[1] C. W. Cho, H. S. Lee, Y. G. Chang, T. K. Lim, J. P. Won and G. S. Lee, "Performance Characteristics of Thermoelectric Generator Modules with Temperature

Reduction in Exhausted Gas", *Proc. of The Korean Society of Automotive Engineers 2015 Spring Annual Meeting*, pp. 285-285, May, 2015.

[2] Y. M. Bang, J. H. Seo, M. S. Patil, G. Ekanayake, Y. J. Doh, G. S. Lee J. K. Yeom and M. Y. Lee, "Study on Performance Characteristics in Thermoelectric Module with Variations of Exhaust Gas and Ambient Temperatures", *Proc. of The Korean Society of Mechanical Engineers 2017 Spring Annual Meeting*, pp. 46-47, May, 2017.

[3] C. W. Cho, E. S. Shin, J. C. Jang and H. C. Suh, "Study on Effects of Exhaust Pipe on Temperature at Thermoelectric Generator", *Proc. of The Korean Society of Automotive Engineers 2016 Spring Annual Meeting*, pp. 260-260, May, 2016.

[4] S. G. Park, B. D. In and K. H. Lee, "Performance of Thermoelectric Generator with Various Thermal Conditions of Exhaust Gas from Internal Combustion Engine", *Proc. of The Korean Society of Automotive Engineers 2010 Fall Annual Meeting*, pp. 456-461, November, 2010.

[5] C. H. Kim, H. C. Kim, S. W. Han, H. C. Seo and Y. S. Ko, "Characteristics of Exhaust Pressure According to the Exhaust Pipe Geometric Variation in a Thermoelectric Generation Module", *Proc. of The Korean Society of Automotive Engineers 2016 Spring Annual Meeting*, pp. 89-90, May, 2016.

[6] C. J. Moon, E. H. Cheang, J. M. Lim, S. J. Park, T. G. Kim and Y. G. Kim, "A Study for Thermoelectric Generator System And Caused Low Thermoelectric Power", *Proc. of The Korean Solar Energy Society 2008 Spring Annual Meeting*, pp. 68-74, April, 2008.

[7] B. D. In, S. K. Park and K. H. Lee, "Numerical Study of Thermoelectric Generator with Various Thermal Conditions of Exhaust Gas from Internal Combustion Engine", *Proc. of The Korean Society of Automotive Engineers 2011 Spring Annual Meeting*, pp. 168-171, May, 2011.

[8] D. W. Lee, "An Experimental Study on Thermoelectric Generator Performance for Waste Coolant Recovery Systems in Vehicles", *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, vol. 26, no. 7, pp. 329-334, July, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.6110/KJACR.2014.26.7.329>

[9] D. W. Lee, "Experimental Study on Thermoelectric Generator Performance for Waste Heat Recovery in Vehicles", *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, vol. 26, no. 6, pp. 329-334, June, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.6110/KJACR.2014.26.6.287>

[10] G. Ekanayake, M. S. Patil, J. H. Seo, C. P. Cho and M. Y. Lee, "Numerical study on performance characteristics of the automotive exhaust base heat exchanger", *Proc. of The Korean Society of Mechanical Engineers 2017 Fall Annual Meeting*, pp. 33-34, November, 2017.

[11] Z. Han and R. D. Reitz, "A temperature wall function formulation for variable-density turbulent flows with application to engine convective heat transfer modeling", *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 40, no. 3, pp. 613-25, 1997.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(96\)00117-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(96)00117-2)

김 대 완(Dae-Wan Kim)

[정회원]



- 2009년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학사)
- 2011년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2013년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (박사수료)
- 2015년 12월 ~ 현재 : 엔티에프텍 선임연구원

<관심분야>

친환경 자동차 열관리, 신재생에너지, 자성유체

기한 에카나야케(Gihan Ekanayake)

[준회원]



- 2013년 12월 : BSc. Physical Science at University of Peradeniya (학사)
- 2016년 9월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 (석사과정)

<관심분야>

친환경 자동차 열관리, 열전발전

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