

연료전지 자동차용 스택 시스템의 열적 성능 특성에 관한 수치적 연구

이호성¹, 이무연^{2*}, 원종필¹

¹자동차부품연구원 열제어시스템 연구센터, ²동아대학교 기계공학과

Numerical study on the thermal performance characteristics of the stack system for FCEV

Ho-Seong Lee¹, Moo-Yeon Lee^{2*}, Jong-Phil Won¹

¹Thermal Management System Research Center, KATECH

²School of Mechanical Engineering, Dong-A University

요약 본 연구의 목적은 연료전지 자동차의 스택 시스템의 열적 특성을 파악하기 위하여 상용 수치 해석 프로그램을 이용하여 열전달 성능을 해석적으로 고찰하였다. 이를 위하여 연료전지 자동차가 일반도로 및 등판도로 등 주행 특성에 따른 스택 열관리 시스템의 냉각 특성과 에어컨의 작동 여부 등 운전 특성에 따른 스택 열관리 시스템의 냉각 특성을 고찰하였다. 스택 라디에이터로 유입되는 공기 유속이 증가함에 따라 모든 냉각수 유량조건에서 열전달 성능은 향상되었다. 공기 유속이 2 m/s에서 10 m/s로 증가함에 따라 스택 라디에이터의 열전달 성능은 냉각수 유량 20 l/min에서 105.3% 증가하였고, 냉각수 유량 120 l/min에서 221.3% 증가하였다. 스택 라디에이터는 가혹조건인 등판 각도 8% 및 속도 50 km/h에서 냉각수 입구 온도차 9.45 °C로 일반조건인 등판 각도 0% 및 속도 120 km/h에서 냉각수 입구 온도차인 5.1 °C보다 85.3% 증가했다. 또한, 연료전지 자동차가 가혹조건인 등판 주행시 에어컨 시스템을 작동할 경우 스택의 안정적 작동을 허용하는 한계 온도인 70 °C를 초과할 수 있다.

Abstract The objective of this study is to numerically investigate the heat transfer rate for evaluating the thermal performances of the stack thermal system using the commercial software. In order to perform this, the cooling performances of the stack system for fuel cell electric vehicle were tested under both driving road conditions including the general driving road and uphill driving road and operating conditions with and without of the air conditioning system. The heat transfer rate of the stack radiator for the stack system was increased with the increase of the inlet air flow velocity. The heat transfer rate of the stack radiator increased by 105.3% at the coolant flow rate of 20 l/min and 221.3% at the coolant flow rate of 120 l/min with the increase of the air flow velocity from 2 m/s to 10 m/s. 9.45 °C of inlet coolant temperature of the stack radiator at the severe driving condition of the slope of 8% and velocity of 50 km/h showed higher 85.3% than 5.1 °C of inlet coolant temperature at the general driving condition of the slope of 0% and velocity of 120 km/h. In addition, as the fuel cell electric vehicle with the air conditioning system operation was driving under severe uphill driving condition, the radiator coolant temperature for a stable stack operation could be exceeded over 70 °C.

Key Words : FEM (Front end module), Fuel cell, Heat transfer, Radiator, Stack

본 논문(작품)은 산업통상자원부의 재원 및 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업(No. 2013R1A1A1062152)으로 진행된 연구임.

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

Tel: +82-10-5440-8421 email: mylee@dau.ac.kr

Received May 27, 2015

Revised June 10, 2015

Accepted June 11, 2015

Published June 30, 2015

1. 서론

수세기 동안 수송 및 운반 수단으로 가장 많이 사용되고 있는 것 중 하나가 내연기관 자동차이다. 이러한 내연기관 자동차는 대부분 가솔린과 디젤을 연료로 사용하고 있어 최근의 지구온난화 및 환경규제의 강화로 인하여 새로운 사용규제를 받고 있다 [1]. 이러한 추세에 맞추어 전기 동력 자동차는 기존의 내연기관을 대체하는 무공해 자동차로 많은 관심을 받고 있으며 많은 완성차 회사 및 연구기관에서 활발히 연구되고 있다 [2]. 전기 동력 자동차 중 내연기관과 배터리를 번갈아 가면서 사용하는 하이브리드 전기자동차는 가장 먼저 상용화가 되었지만 내연기관을 여전히 사용하고 있다는 점에서 근본적인 대안으로 보기는 어렵다. 또한, 순수 배터리만 사용하여 주행하는 전기자동차는 하이브리드 전기자동차에 비하여 친환경적이라고 할 수 있지만 현재까지 배터리, 무게, 효율 및 제조 기술로는 주행거리에 한계가 있어 내연기관 자동차를 완전히 대체하기는 쉽지 않다 [3]. 이에 반해 연료전지(Fuel cell electric vehicle) 자동차는 내연기관 자동차와 비교하여 유사한 주행거리 및 동력을 구현할 수 있는 장점이 있다. 이러한 연료전지 자동차는 내연기관 자동차와 비교하여 열효율이 우수한 특징이 있지만 작은 배기 손실로 인하여 냉각 손실이 큰 특징이 있다 [4, 5]. 또한, 일반적으로 연료전지 자동차의 허용 냉각수 온도는 내연기관과 비교하여 낮기 때문에 라디에이터에서 냉각수 입구와 공기 입구와의 온도차를 크게 할 수 없는 단점이 있다. 이러한 특징으로 인하여 연료전지 자동차에 사용되는 스택 열관리 시스템용 라디에이터(Radiator)는 내연기관 자동차에 비하여 일반적으로 크게 설계하고 연료전지 자동차용 열관리 시스템은 기존의 내연기관 자동차와는 다른 열전달 특성을 나타낸다 [6].

따라서 본 연구에서는 연료전지 자동차의 스택 열관리 시스템의 충분한 냉방성능 확보를 위하여 열전달 성능을 수치적으로 해석하고자 한다. 더불어, 연료전지 자동차의 스택 열관리 시스템에 대한 적합성 판단의 가장 중요한 요소인 라디에이터 입구에서 냉각수 온도를 자동차 주행 특성에 따라 예측하였다.

2. 수치해석 및 방법

본 연구에서는 자동차 관련 에너지 관리 최적화 설계

프로그램인 오스트리아 Steyr-Diamler Puch사에 의하여 개발된 KULI software를 이용하여 스택 열관리 시스템의 냉각성능 해석을 진행하였다 [7]. 상용프로그램인 KULI software의 여러 모델 중 자동차 냉각시스템(Cooling system) 설계 모델을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다 [8]. 먼저, 연료전지 자동차의 FEM (Front end module)은 크게 에어컨용 응축기와 스택 열관리 시스템을 구성하는 부품들로 구성되어 있다. 즉 스택 열관리 시스템의 성능해석을 위하여 FEM의 구성 부품들을 공기 유동방향에 따라 배열하였다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 스택 열관리 시스템의 성능해석을 위하여 FEM 구성 부품들을 공기의 유동방향으로 나열한 개략도로 시뮬레이션에 활용하였다. Fig. 1에서 보듯이, Stack room resistance는 FEM을 제외한 나머지 부분에 대한 유동 저항을 의미하고, 공기측 입구 및 출구에 대한 무차원 CP 값은 자동차의 주행속도 및 공기 조건에 따라 결정되는 값이다. 스택 열관리 시스템의 냉각 성능해석은 자동차 주행에 따른 특성을 모사하기 위하여 일반적으로 주행과 언덕과 같은 등판주행으로 구분하여 진행하였고, 다양한 운전 특성에 대한 영향을 알아보기 위해서 실내 에어컨 시스템의 작동 여부에 따른 냉각성능 변화를 고찰하였다. Fig. 2는 본 연구에서 사용한 스택 라디에이터의 개략적인 형상을 나타내고 있으며, 라디에이터 코어는 (W) 639 mm X (H) 501 mm X (D) 38 mm이고 72개로 구성된 2열의 튜브로 구성되어 있다. Fig. 3은 스택 열관리 시스템에 장착된 스택 라디에이터의 방열을 위한 팬의 성능 특성 곡선을 나타낸다. 스택 열관리 시스템의 스택 라디에이터에 공급되는 공기 유량은 Fig. 3의 팬 성능 특성 그래프를 이용하였다. 스택 라디에이터용 팬은 지름 320 mm의 블레이드 8개로 구성되었고, 모터 정격 용량은 120 W이다. Table 1은 본 연구에서 사용된 수치 해석 조건들을 나타낸다. 기존의 내연기관 자동차의 엔진 냉각을 위한 FEM에 위치해 있는 라디에이터의 냉각수 온도는 일반적으로 120 °C 수준으로 요구지만 연료전지 자동차의 스택 열관리 시스템의 적절한 스택 라디에이터의 냉각수 온도는 최적 스택 성능을 유지하기 위하여 70 °C이하로 관리되고 있다 [9]. 연료전지 자동차의 다양한 환경 조건 및 실제 도로 주행 조건을 고려하여 여름철 에어컨 시스템의 작동여부(On/off), 일반 도로와 등판 도로조건을 도로 기울기 0%와 8%, 주행속도는 50 km/h와 120 km/h로 고려하였고, 스택 라디에이터의

용량은 24 kW와 27 kW로 구성하였고 냉각수 유량은 120 l/min으로 설정하여 T1, T2, T3, T4의 총 4가지 사례에 대하여 해석을 진행하였다.

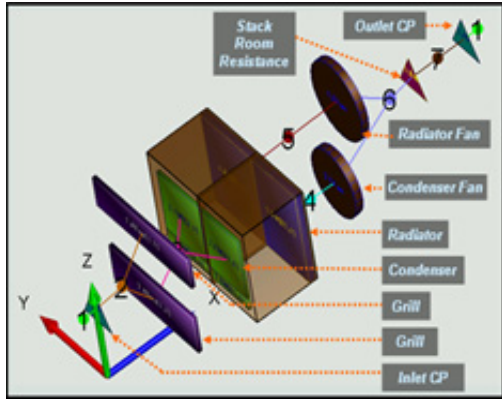


Fig. 1. Numerical model of the stack thermal management system

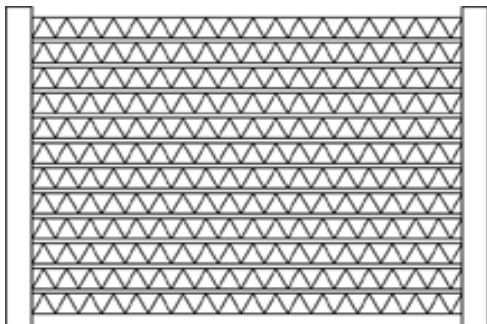


Fig. 2. Configurations of the stack radiator

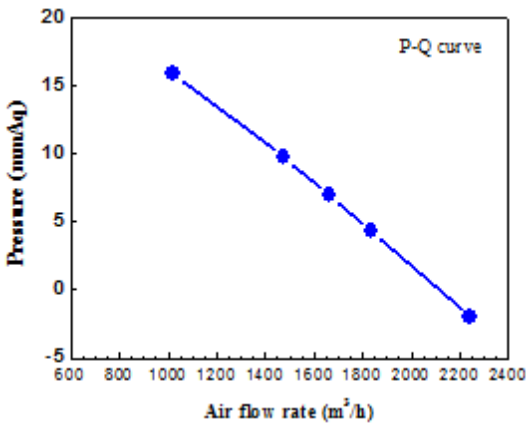


Fig. 3. Performance characteristics curve of the stack radiator fan

Table 1. Numerical analysis conditions

Parameters	T1	T2	T3	T4
Driving velocity (km/h)	50	120	50	120
Outdoor temperature (°C)	35	35	35	35
Stack radiator Q (kW)	24	27	24	27
Stack radiator \dot{m} (l/min)	120	120	120	120
Driving road slope (%)	8	0	8	0
Air conditioner	Off	Off	On	On

3. 수치해석 결과 및 고찰

3.1 스택 라디에이터 성능 특성

Fig. 4는 본 연구에서 얻어진 스택 라디에이터의 공기 유입 풍량에 따른 열전달 성능 특성을 나타낸다. 스택 라디에이터로 유입되는 공기 유속이 증가함에 따라 모든 냉각수 유량조건에서 열전달 성능은 향상되었다. 이러한 이유로는 공기 유속이 증가함에 따라 공기유량이 증가하여 라디에이터 방열 성능이 향상되었기 때문이다. 공기 유속이 2 m/s에서 10 m/s로 증가함에 따라 라디에이터의 열전달 증가하였고, 성능은 냉각수 유량이 20 l/min에서 105.3% 증가하였고 120 l/min에서 221.3% 증가하였다.

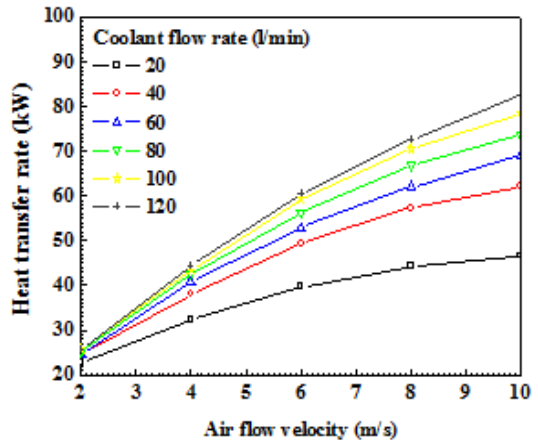


Fig. 4. Heat transfer rate of the stack radiator

또한, 공기유속의 증가에 따라 라디에이터의 열전달 성능은 냉각수 유량 20 l/min이 120 l/min로 증가함에 따라 평균 48.9%증가하였고, 공기 유속 증가에 따른 라디에이터 방열 성능 향상은 냉각수 유량이 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다 [10,11].

3.2 주행특성에 따른 열전달 성능

Fig. 5은 본 연구에서는 연료전지 자동차의 주행 특성에 따른 스택 라디에이터의 냉각수 입구 온도 변화 및 열전달 성능을 나타내고 있다. 연료전지 자동차의 실제 도로 주행 특성에 따른 스택 열관리 시스템의 냉각 성능 변화를 고찰하기 위하여 가속조건인 등판 각도 8% 및 속도 50 km/h에서 냉각수 입구 허용 최대온도 조건에 근접했지만, 비슷한 냉각 부하를 갖는 일반도로에서 주행속도 120 km/h에서는 비교적 여유 있는 냉각성능을 나타내었다. 결과적으로 스택 열관리 시스템은 주행 조건에 따라 스택 라디에이터 냉각성능에 미치는 영향이 달라졌으며, 가속 조건에서는 냉각수 입구 온도 차이가 2.2 °C로 나타났으며, 일반조건에서는 3.2 °C로 나타났다.

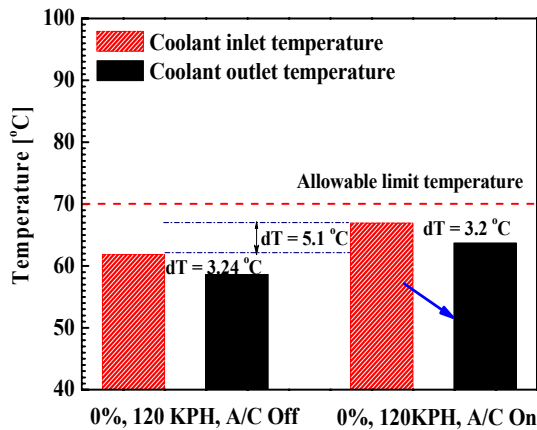
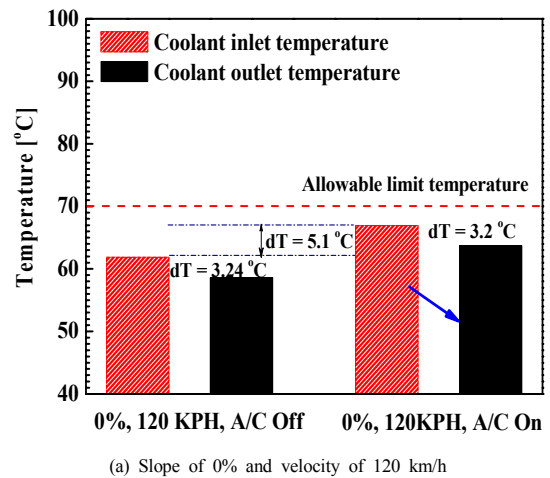


Fig. 5. Heat transfer rate of the stack radiator with driving conditions

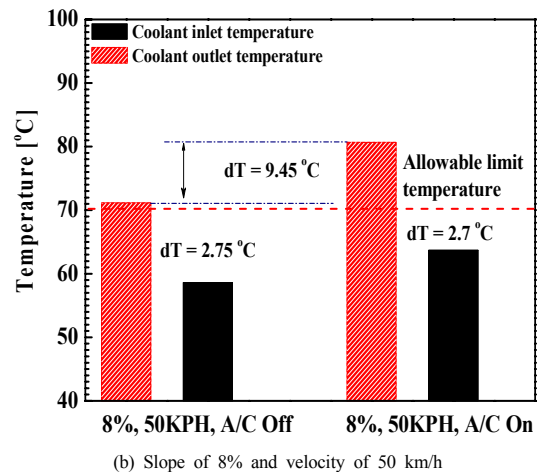
3.3 에어컨 작동여부에 따른 열전달 성능

일반적으로 연료전지 자동차를 포함하여 자동차는 탑승공간의 냉방을 위하여 에어컨을 장착하게 되어있고, 자동차 전면부 (FEM)의 최적 레이아웃을 위해서 라디에이터의 앞쪽에 에어컨 시스템의 응축기를 위치하게 한다 [12]. 에어컨 시스템을 가동하게 되면 응축기의 방열로 인하여 후단에 있는 라디에이터는 열부하가 증가하여 열전달 성능에 영향을 받게 되므로, 본 연구에서는 에어컨 시스템의 작동여부에 따른 스택 라디에이터의 열전달 성능을 고찰하였다. Fig. 6는 연료전지 자동차의 가속 조건인 등판 각도 8% 및 속도 50 km/h와 일반 조건인 등판 각도 0% 및 속도 120 km/h에서 에어컨 시스템 작동 여

부에 따라 스택 라디에이터의 냉각수 입구 온도 변화를 포함한 열전달 성능을 나타내고 있다. Figs. 6 (a) and (b)에서 보듯이 에어컨 작동 여부에 따라 스택 라디에이터 냉각수 입구 및 출구의 온도차 변화는 거의 없지만, 가속조건인 등판 각도 8% 및 속도 50 km/h에서 냉각수 입구 온도차 9.45 °C로 일반조건인 등판 각도 0% 및 속도 120km/h 에서 냉각수 입구 온도차인 5.1 °C보다 85.3% 증가했다. 또한, 연료전지 자동차가 가속조건인 등판 주행하면서 에어컨 시스템을 작동할 때는 스택의 안정적 작동을 허용하는 한계 온도인 70 °C를 초과할 수 있다. 이러한 이유는 응축기에서의 방열로 인하여 스택 라디에이터의 입구 온도차가 감소하였기 때문이다.



(a) Slope of 0% and velocity of 120 km/h



(b) Slope of 8% and velocity of 50 km/h

Fig. 6. Heat transfer rate of the stack radiator with and without air conditioning system

4. 결론

본 연구는 연료전지 자동차의 스택 열관리 시스템의 열적 특성을 파악하기 위하여 상용 수치 해석 프로그램을 이용하여 열전달 성능을 해석적으로 고찰하였다. 이를 위하여 연료전지 자동차가 일반도로 및 등판도로 주행 등 주행 특성에 따른 스택 열관리 시스템의 냉각 특성과 에어컨의 작동 여부 등 운전 특성에 따른 스택 열관리 시스템의 냉각 특성을 고찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 공기 유속이 2 m/s에서 10 m/s로 증가함에 따라 스택 라디에이터의 열전달 성능은 냉각수 유량 20 l/min에서 105.3% 증가하였고, 냉각수 유량 120 l/min에서 221.3% 증가하였다.
- 2) 주행 조건이 스택 열관리 시스템의 스택 라디에이터의 냉각성능에 영향을 주었으며 가혹 조건에서는 냉각수 입구 온도 차이가 2.2 °C로 나타났으며, 일반조건에서는 3.2 °C로 나타났다.
- 3) 스택 라디에이터는 가혹조건인 등판 각도 8% 및 속도 50 km/h에서 냉각수 입구 온도차 9.45 °C로 일반조건인 등판 각도 0% 및 속도 120 km/h에서 냉각수 입구 온도차인 5.1 °C보다 85.3% 증가했다.
- 4) 연료전지 자동차가 가혹조건인 등판 주행시 에어컨 시스템을 작동할 경우 스택의 안정적 작동을 허용하는 한계 온도인 70 °C를 초과할 수 있다.

References

[1] D. H. Lim, M. Y. Lee, H. S. Lee, S. C. Kim, "Performance Evaluation of an In-Wheel Motor Cooling System in an Electric Vehicle/Hybrid Electric Vehicle", *Energies*, Vol. 7, No. 2, pp. 961-971, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en7020961>

[2] J. H. Seo, Y. M. Bang, L. S. Seo, M. Y. Lee, "Heat Transfer Characteristics of the Heat Pipe using Simplified Heat Transfer Model", *Trans. of KAIS*, Vol. 16, No. 1, pp. 15-20, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.1.15>

[3] H. S. Lee, M. Y. Lee, "Cooling Performance Characteristics on Mobile Air-Conditioning System for Hybrid Electric Vehicles", *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 2013, pp. 1-9, 2013.

[4] H. S. Lee, J. P. Won, C. W. Cho, Y. C. Kim, M. Y. Lee, "Heating Performance Characteristics of Stack Coolant Source Heat Pump using R744 for Fuel Cell Electric Vehicles", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 7, pp. 2065-2071, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-012-0516-2>

[5] J. C. Park, K. D. Baik, S. C. Kim, M. S. Kim, J. P. Won, "Studies on the Performance of a Stack Cooling System Using Air Conditioner Unit for Fuel Cell Vehicles", *KSAE 2008 Annual Conference*, pp. 1967-1970, 2008.

[6] T. Yamashita, T. Ishikawa, H. Shimonosono, M. Yamada, M. Iwasaki, "The Development of the Cooling System for FCV", *2004 JAMA Annual Conference*, No. 88-04, 2004.

[7] Y. R. Back, 1999, "A Design Program for Cooling System of Vehicle(KULI)", *Journal of the KSME*, Vol. 39, No. 5, pp. 26-27

[8] <http://www.kuli-software.com/>

[9] S. C. Kim, J. P. Won, Y. S. Park, T. W. Lim, M. S. Kim, "Performance evaluation of a stack cooling system using CO2 air conditioning system in fuel cell vehicles", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 32, pp. 70-77, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2008.07.003>

[10] H. S. Lee, J. P. Won, S. C. Kim, C. G. Cho, Y. S. Park, S. K. Kim, "Study on Performance Analysis and Evaluation of Stack Cooling System for Fuel Cell Electric Vehicle", *KSAE 2008 Annual Conference*, KSAE-A0424, 2008.

[11] H. S. Lee, J. P. Won, C. W. Cho, D. H. Lee, Y. S. Park, S. K. Kim, "A Study on Analytic Approach for Stack Cooling Performance Improvement of Fuel Cell Electric Vehicle", *KSAE 2009 Annual Conference*, 2009 KSAE, pp. 3007-3013, 2009.

[12] J. G. Kim, W. H. Jeon, J. H. Cho, "Engine Room Layout Design Optimization of Fuel Cell Vehicle Using CFD Technique", *Transactions of KSAE*, Vol. 19, No. 4, pp. 99-106, 2011.

이 호 성(Ho-Seong Lee)

[정회원]



- 2006년 2월 : 고려대학교 기계공학부 (공학석사)
- 2007년 9월 ~ 현재 : 자동차부품연구원 선임연구원

<관심분야>

자동차 냉각시스템 해석 및 평가, 자동차 열관리

원 종 필(Won, Jong-Phil)

[정회원]



- 1999년 2월 : 경희대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1993년 2월 ~ 현재 : 자동차부품연구원 열제어시스템 연구센터 책임연구원

<관심분야>

자동차 냉각장치, 열교환기, 연료전지

이 무 연(Moo-Yeon Lee)

[종신회원]



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

<관심분야>

친환경 자동차 열관리, 열/물질전달, 연료전지, 나노유체