

100kW급 연료전지 열관리 시스템 실도로 운전조건 해석적 연구

이호성¹, 이무연², 조중원^{1*}

¹자동차 부품 연구원 열제어시스템 연구센터, ²동아대학교 기계공학과

Analytic study on thermal management operating conditions of balance of 100kW fuel cell power plant for a fuel cell electric vehicle

Ho-Seong Lee¹, Moo-Yeon Lee², Choong-Won Cho^{1*}

¹Thermal Management System Research Center, KATECH

²Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

요약 본 연구의 목적은 100kW급 연료전지 시스템의 열관리 성능을 실도로 운전조건에서 분석하여, 성능 해석 모델링을 개발하는 것이다. 개발된 모델을 적용하여, 열관리 시스템의 운전조건 변화에 따른 성능 변화를 고찰하고자 한다. 해석 모델링은 핵심부품들에 대한 성능 평가 데이터를 바탕으로, 성능에 영향을 주는 변수들로 개발하였다. 개발된 연료전지 열관리 시스템 해석 모델링으로 다양한 실차 운전조건에서의 최적 열관리 시스템에 대한 전력소비량을 분석하였다. 주요하게, 연료전지 열관리시스템 핵심부품(워터펌프, 냉각 팬, 3 Way Valve, 라디에이터)에 대한 성능 특성 분석 후 모델링을 진행하였다. 개발된 모델링으로 운전조건에 따른 유량 예측을 하였고, 실험값과 예측값과의 비교분석을 통하여서, 해석 모델링에 대한 검증을 진행하였다. 과도해석을 통하여서, 냉시동시 냉각수 온도가 특정온도까지의 소요시간을 예측하였다. 스택 운전조건에서 스택 입출구 온도가 적정 수준에서 움직이기 위한 열관리 시스템 운전조건에 대한 예측을 진행하였다. 그 결과를 바탕으로, 소모전력과 열방출량과의 비교분석을 하였다. 개발된 해석 모델링은 핵심부품들의 성능 변화시 연료전지 시스템 운전에 대한 영향도를 분석할 수 있도록 활용할 예정이다.

Abstract The objective of this study was to investigate performance characteristics of thermal management system(TMS) in a fuel cell electric vehicle with 100kW Fuel Cell(FC) system. In order to build up analytic modelling for TMS, each component was installed and tested under various operating conditions, such as water pump, radiator, 3-Way valve, COD heater, and FC stack etc. and as the results of them, correlations reflecting component's characteristics with flow rate, air velocity were developed. Developed analytic modelling was carried out under various operating conditions on the road. To verify modelling's accuracy, after prediction for optimum coolant flow rate was fulfilled under certain operating conditions, such as FC system, water pump speed, opening of 3-way valve, and pipe resistance, analytic and experimental values were compared and good agreement was shown. In order to predict cold-start operating performance for analytic modelling, coolant temperature variation was analyzed with -20°C ambient temperature and duration was predicted to rise in optimum temperature for FC. Because there is appropriate temperature difference between inlet and outlet of FC stack to operate FC system properly, related analysis was performed with respect to power consumption for TMS and heat rejection rate and performance map was depicted along with FC operating conditions.

Keywords : Analytic modelling, Coolant flow rate, Fuel cell vehicle, Heat rejection rate, Thermal management system

본 논문은 산업통상자원부에서 지원하는 산업기술혁신사업(자동차산업핵심기술개발사업(10082573, 10084611))으로 진행된 연구임.

*Corresponding Author : Choong-Won Cho(KATECH)

Tel: +82-41-559-3100 email: cwcho@katech.re.kr

Received December 12, 2018

Revised January 8, 2019

Accepted February 1, 2019

Published February 28, 2019

기호설명

- b : 바이패스(bypass)
- $COP_{heating}$: 난방효율 (coefficient of performancet system)
- C_p : 비열(Specific heat, kJ/kg·K)
- D : 회전반경 (diameter, mm)
- \dot{m} : 냉각수 유량(volume flow rate, liter min⁻¹)
- Q_{rad} : 라디에이터 방열량 (heating capacity, kW)
- r : 라디에이터(radiator)
- ω : 회전속도 (rotational speed, rev min⁻¹)
- τ : 시정수 (time constant, sec)

1. 서론

연료전지 차량은 내연기관 차량과 비교해 열효율이 우수하지만, 배기 손실이 적기 때문에, 냉각 손실이 매우 크다. 게다가 일반적으로 연료전지의 허용 수온은 내연기관과 비교해 낮게 설정되기 때문에, 라디에이터의 냉각수 입구온도와 공기측 입구온도의 온도차를 크게 할 수 없다. 이러한 이유에 의해, 연료전지차량에 탑재되는 라디에이터는 내연기관 차량에 비해 2배 이상의 방열량이 요구된다.[1~3, 5] Matthew H. Fronk[1]는 비슷한 용량의 내연기관 자동차 대비 연료전지 자동차의 냉각성능을 향상시키기 위한 냉각시스템 설계적인 측면과 차량의 운전조건에 영향을 대해서 연구를 수행하였다. 또한 열관리 시스템중에서 스택 냉각 시스템의 성능을 확보하고자 하는 연구들이 많이 진행이 되어서, 한재영 등[4]의 논문의 경우, 연료전지 열관리시스템에 대한 동적 거동을 해석적 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 100kW급 연료전지 시스템 발전효율 향상을 위한 열관리 시스템 실차 운전시의 조건을 적용하여서, 해석적으로 열관리 핵심부품들의 운전조건을 분석하였다. 핵심부품들에 대한 분석을 진행하고, 그 결과를 열관리 시스템 해석에 적용하여서, 운전조건을 도출하고자 하였다.

2. 핵심부품 모델링

100kW급 연료전지 시스템 열관리 시스템은 Fig. 1에서 보여주는 것 처럼, 스택을 통과한 냉각수가 라디에이터, 워터펌프, COD히터, 3 Way V/V를 거쳐서, 최종 온도로 스택에 다시 들어가기 위하여서, 구성되어있다. 본 연구에서는 상기 핵심부품들에 대한 해석 모델링을 구축하고자 한다.

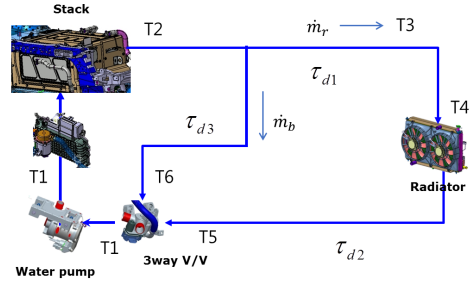
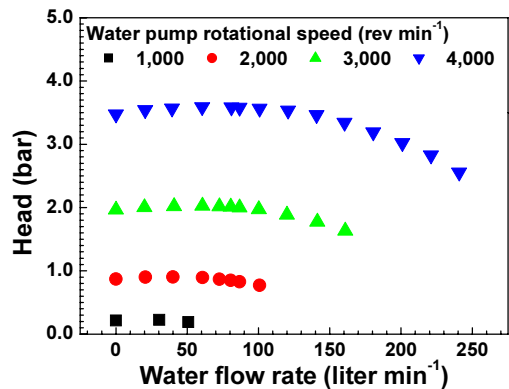


Fig. 1. Thermal management system for 100kW fuel cell power plant of a fuel cell electric vehicle

2.1 전동식 워터펌프

전동식 워터펌프는 회전수를 조절하여서, 냉각수 유량을 결정하고자 하는 유체기계로, 각 회전수에 따른 유량과 수두를 결과값으로 얻을 수 있기 때문에, 실험을 통하여서, 성능에 대한 데이터를 확보하였다.(Fig. 2(a)) 유량과 수두에 대해서, 워터펌프 회전수와 회전반경의 비로 무차원수를 만들어서 특성 곡선을 만들고, 무차원 상관식을 개발하였다.(Fig. 2(b)) 워터펌프 성능 특성에 대한 무차원 상관식의 경우, 워터펌프가 바뀐다 하여도, 유사한 방법으로 진행하였을 때, 상관식을 수정하여서, 시스템에서 분석될 수 있도록 하였다.



(a)

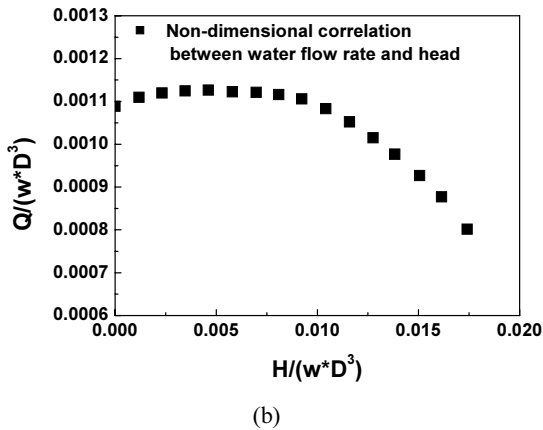


Fig. 2. Electric water pump performance database and data reduction for non-dimensional correlation between flow rate and head. (a) Experimental data for electric water pump, (b) Non-dimensional correlation between flow rate and head

2.2 라디에이터

라디에이터는 스택 냉각수의 온도가 적정온도보다 높을 경우, 외기온도와 열교환을 통하여서, 냉각수 온도를 낮추는 역할을 한다. Fig. 3은 라디에이터에 대한 냉각수 차압 측면, 방열량 측면에서의 성능 평가 결과를 보여주고 있다. 차압의 경우, 유량을 변수로 결정될 수 있는 상관식을 개발하였고, 방열량의 경우, 유량과 외부 공기속도의 2가지 변수가 있기 때문에, 유량과 외부 공기가 모두 포함될 수 있도록 식(1)과 같은 상관식을 개발하였다. 식(1)의 y_0 , A, 그리고 t_1 의 경우, 공기속도를 변수를 가지는 상관식으로 개발되었다.

$$Q_{rad} = y_0 + A \exp(\dot{m}_r / t_1) \quad (1)$$

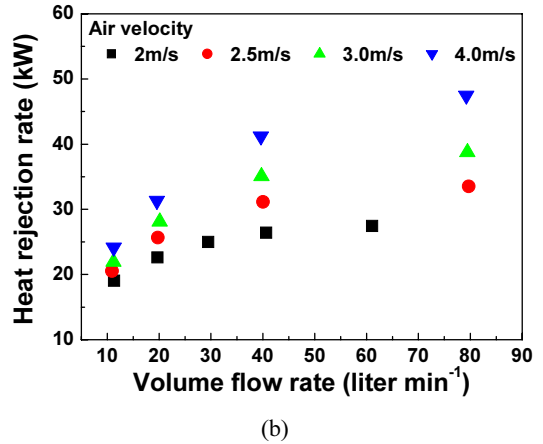
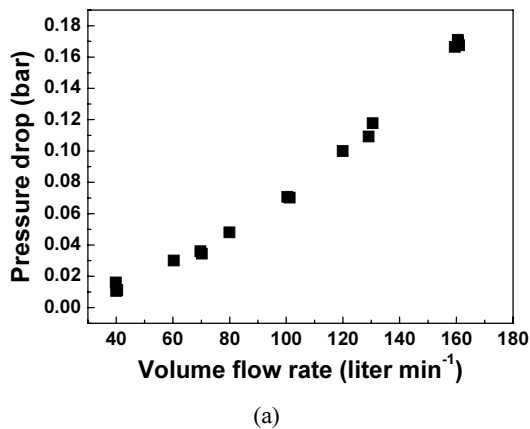
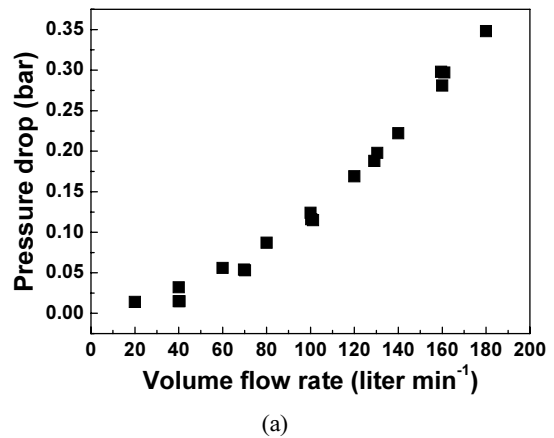


Fig. 3. Radiator performance database, (a) coolant-side pressure drop, (b) Heat rejection rate

2.3 스택 및 COD 히터

열관리 시스템의 실차 운전조건에 최적 유량을 분석하기 위하여서, 스택과 COD(Cathode Oxygen Deletion) 히터에 대한 차압 특성을 알아야 한다. Fig. 4는 스택과 COD 히터에 대한 냉각수 차압 측면에서의 평가 결과를 보여주고 있다. 스택 및 COD 히터에서의 냉각수 차압 특성의 경우, 냉각수 온도에 따라서, 차이가 날 수 있기 때문에, 냉각수 온도에 따른 성능 특성을 분석한 이후에, 그 결과를 바탕으로, 일반화 시킬 수 있는 상관식을 개발하여서, 냉각수 유량 대비 차압 특성에 대한 분석이 가능하도록 진행하였다.(Fig. 4(b))



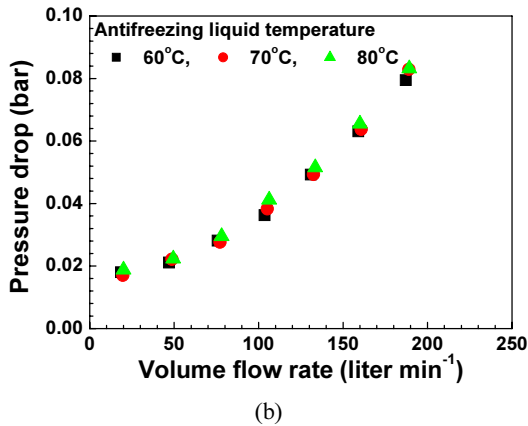


Fig. 4. Pressure drop characteristics for stack and COD heater, (a) Fuel cell stack, (b) COD heater

2.4 3-Way Valve (삼방밸브)

3 Way Valve는 냉각수 온도에 따라서, Bypass와 라디에이터 통과하는 냉각수 Layout을 조절하는 역할을 하고 있다. 3 Way Valve 각도를 조절하여서, 유량 분배를 진행할 수 있기 때문에, 각도별, 워터펌프 회전수별에 따른 유량 분배에 대한 특성을 평가하였다. Fig. 5는 평가 결과를 도식화 하였고, 이러한 결과를 바탕으로, 각도와 회전수를 반영할 수 있는 상관식을 개발하여서, 시스템 분석에 적용하였다. 3 Way Valve는 앞에서 언급한 바와 같이, 각도에 따라서, 라디에이터로 유량이 흐르거나, Bypass되어서 바로 스택으로 들어가는 유량이 분배되기 때문에, 워터펌프 회전수가 결정되었을 때, 각도에 대한 영향을 아래와 같은 상관식으로 분석하였다.

$$\Delta P_{v/v} = a \dot{m}^2, \quad (2)$$

where, $\ln(a) = A1 \exp\left(-\frac{\theta}{t1}\right) + y0$

3 Way Valve 유량이 분배가 되면, Radiator를 통과하는 배관, 그리고 Bypass를 통과하는 배관에서의 차압이 발생하기 때문에, 이에대한 부분도 고려하여서, 유량 예측을 위한 상관식이 적용되었다. 이러한 상관식을 적용하였을 때의 해석과 실험과의 결과 예측은 거의 유사한 값을 가졌다.(Fig. 5)

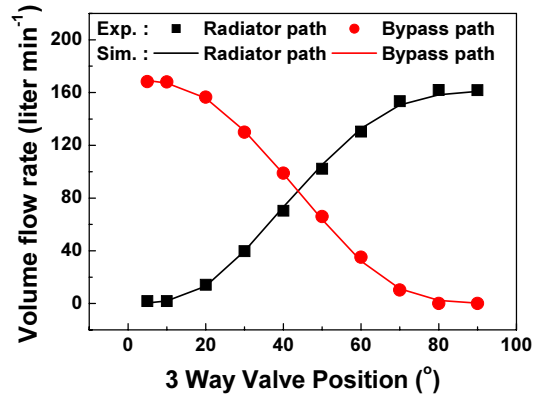


Fig. 5. Volume flow rate characteristics along with 3 way valve angle

3. 연료전지 열관리 시스템 운전 해석

자동차용 연료전지 발전시스템에 대한 운전조건해석을 진행하였을 때, 연료전지 시스템 냉각용 냉각수의 거동에 대한 분석을 진행하였다.

3.1 방열량 예측

유량분석을 진행한 이후에, 연료전지 시스템 운전조건에서, 방열량 분석을 통하여서, 각 핵심부품들의 입출구 온도 특성을 분석할 수 있도록, 아래와 같은 식들을 적용하였다. Fig. 1에서 시스템 차압에 대한 분석을 진행하여서, 유량을 예측하고, 예측된 유량을 활용하여서, 핵심부품들에서의 열전달량에 대한 분석으로 입출구의 온도에 대한 분석을 진행하였다. 구간을 지날때의 시간차가 발생하는 부분은 시정수를 적용하여서, 진행하였고, Bypass되는 유량과 Radiator로 가는 유량등을 고려하여서, 방열량 등을 예측할 수 있도록 시뮬레이션을 진행하였다.

$$C_{stack} \frac{\partial T_2}{\partial t} + (\dot{m}_r + \dot{m}_b) \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) = Q_{stack} \quad (3)$$

$$T_3(t) = T_2 \cdot (t - \tau_{d1}) \quad (4)$$

$$\dot{m}_r \cdot C_p \cdot (T_3 - T_4) = \frac{Q_{0,rad}(\dot{m}_r)}{\Delta T_0} (T_3 - T_{amb}) \quad (5)$$

$$T_5(t) = T_4 \cdot (t - \tau_{d2}) \quad (6)$$

$$T_6(t) = T_2 \cdot (t - \tau_{d3}) \quad (7)$$

$$\dot{m}_b \cdot (T_6 - T_1) = \dot{m}_r \cdot (T_1 - T_5) \quad (8)$$

3.2 유량 예측

워터펌프의 회전수 변화에 따른 유량 변화 특성을 해석한 이후에, 실제 실험과의 비교분석을 진행하였을 때, Fig. 6과 같이, 실제와 거의 유사한 유량값을 예측하고 있다. 시스템에 적용된 핵심부품들의 평가 결과를 근거로, 모델링이 진행되었기 때문에, 가능한 일로 판단된다.

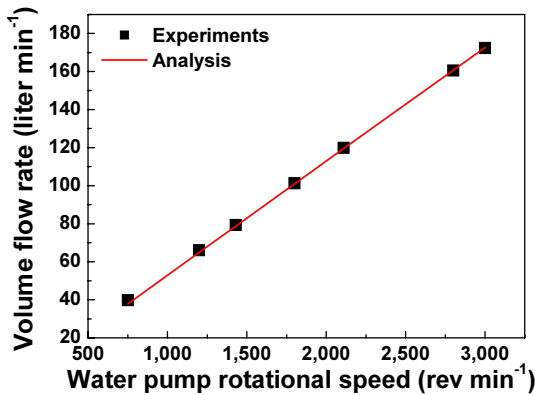


Fig. 6. Volume flow rate comparison between prediction and experimental data

3.3 냉시동시 온도 변화 특성

연료전지 시스템은 스택 온도가 60~70℃ 수준에서 최적 운전 효율을 보여주고 있으므로, 냉시동시에는 COD 히터를 작동시켜서, 최대한 빠르게 적정온도 수준까지 높일 수 있도록 열관리시스템을 운영하고 있다. 스택 운전시의 냉각수 온도도 상승하기 때문에, 스택이 운전되기 전에 적정온도 수준까지는 빠르게 올라가야하기 때문에, -20℃ 조건에서 13.0kW COD 히터를 적용하였을 때, Fig. 7과 같이, 300초 이후 스택 온도가 약 30℃ 수준 이상을 예측하였고, 이후 스택 출력을 10.0kW 수준으로 적용시 약 450sec 시점에서 적정 운전온도까지 확보가 가능할 것으로 분석되었다.

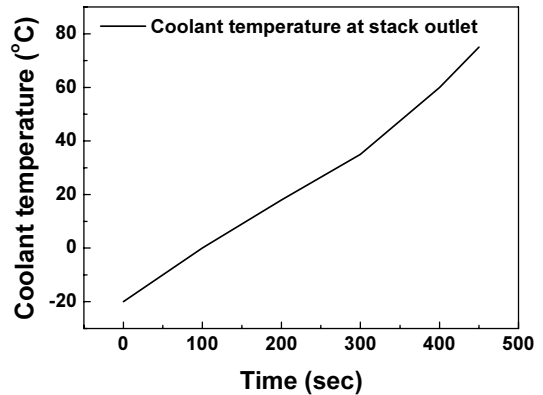


Fig. 7. Coolant temperature characteristics at stack outlet with COD heater under cold start condition

3.4 스택 최적운전을 위한 열관리시스템 분석

연료전지 시스템 운전조건에 따라 열관리시스템에 대한 성능 특성을 분석하기 위하여서, 외기온도 35℃, 스택 냉각수 입구 온도 65℃조건에서 해석을 진행하였다. 연료전지는 스택 입·출구 온도가 5 ~ 15℃ 사이에서 운전되고 있기 때문에, 이러한 운전조건을 확보하기 위한 열관리 시스템 작동조건을 분석하였다. Fig. 8은 스택 운전조건에서 입출구 온도차를 확보하기 위하여서, 냉각수 펌프와 냉각 팬의 최적 회전수와 열방출량을 보여주고 있다. 회전수에 대한 분석을 통하여서, 각 유체기계의 소모전력도 분석될 수 있기 때문에, 열방출을 위한 소모전력의 비율을 분석하였을 때, 열방출 10kW 조건에서는 90~160으로 큰 값을 가지고, 열방출 50kW 조건에서는 9~22정도로 크게 작아지는 것을 알 수 있었다.

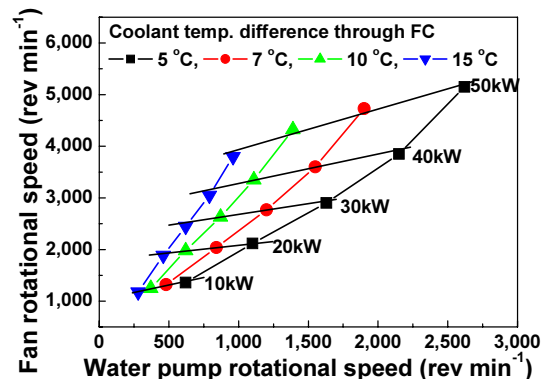


Fig. 8. Optimal operating conditions for water pump and cooling fan along with heat capacity under coolant temperature difference through stack

4. 결론

100kW급 연료전지 발전시스템의 분석하기 위해, 핵심부품들에 대한 성능 평가를 진행하였다. 그 결과로, 상관식을 개발하여 열관리시스템 해석모델링을 구축하였다. 구축된 해석 모델링을 활용하여 다양한 조건에 대한 해석을 진행하였고, 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 연료전지 열관리시스템 핵심부품(워터펌프, 냉각팬, 3 Way Valve, 라디에이터)에 대한 성능 특성 분석하였다. 결과 데이터로 예측 모델링을 구축하였고, 모델링 검증은 실험값과 비교하였다.
- 2) 냉시동시 냉각수 온도 변화 특성을 해석하여 특정 온도까지의 소요시간을 예측하였다.
- 3) 스택 입·출구 온도가 적정 수준에서 작동하기 위한 열관리 시스템 운전조건 예측을 진행하였고, 소모전력과 열방출량을 비교분석하였다.

References

- [1] Matthew H. Fronk, David L. Wetter, David A. Masten, Andrew Bosco, "PEM Fuel Cell System Solutions for Transportation", *SAE 2000 World Congress*, No.2000-01-0373, 2000.
- [2] Toshihiro Yamashita, Takayuki Ishikawa, Hitoshi Shimonosono, Minoru Yamada, Mitsuru Iwasaki, "The development of the cooling system for FCV", *2004 JAMA annual conference*, No.88-04, 2004.
- [3] J.Hager, L.Schickmair, "Fuel cell vehicle thermal management system simulation in Contrast to conventional vehicle concepts", *2005 SAE International*.
- [4] Han, J. Y., Lee, K. H., and Yu, S. S., 2012, "Dynamic Modeling of Cooling System Thermal Management for Automotive PEMFC Application" *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 36, No. 12, pp. 1185~1192. DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2012.36.12.1185>
- [5] H, S. Lee, M. Y. Lee, and J. P. Won, "Numerical study on the thermal performance characteristics of the stack system for FCEV", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 16, No. 6, pp. 3708~3713, 2015. DOI : <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.6.3708>

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

이 무 연(Moo-Yeon Lee)

[정회원]



- 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

조 중 원(Cho, Chung-Won)

[정회원]



- 2005년 2월 : KAIST 기계공학 과 (공학박사)
- 2008년 5월 : 에너지기술연구원 고분자 연료전지 연구단
- 2008년 7월 ~ 현재 : 자동차부품연구원 열제어시스템 연구센터

<관심분야>

친환경 자동차 열관리 시스템, 연료전지 및 BOP