

# 연료전지 스택 폐열 활용 전동식 히트펌프 시스템 난방 성능 특성 연구

이호성<sup>1\*</sup>, 김정일<sup>2</sup>, 원헌주<sup>3</sup>, 이무연<sup>4</sup>

<sup>1</sup>자동차 부품 연구원 열제어시스템 연구센터, <sup>2</sup>세덕 주식회사, <sup>3</sup>동아전장 주식회사, <sup>4</sup>동아대학교 기계공학과

## Experimental study on heating performance characteristics of electric heat pump system using stack coolant in a fuel cell electric vehicle

Ho-Seong Lee<sup>1\*</sup>, Jung-Il Kim<sup>2</sup>, Hun-Joo Won<sup>3</sup>, Moo-Yeon Lee<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Thermal Management System Research Center, KATECH

<sup>2</sup>Technical sales dept., CEDIC

<sup>3</sup>Motor R&D Center, Dong Ah Electric Equipment Co. Ltd

<sup>4</sup>Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

**요약** 본 연구의 목적은 수소연료전지 자동차의 난방부하 대응을 위한 스택 냉각수를 활용하여서, 전동식 히트펌프 시스템에 대한 난방성능 특성을 다양한 운전조건 변화에 대해서 고찰하는 것이다. 냉각수와 냉매(R-134a)와의 열교환을 위해서 판형열교환기를 적용하였고, 전동식 히트펌프 시스템에 적용되는 실내열교환기 입구의 공기온도와 압축기 회전수를 변화시키면서 난방 성능 특성을 분석하였다. 실내열교환기 입구 공기 온도 변화에 대해서 난방 성능은 거의 동일한 결과를 보이고 있는데, 이는 입출구 온도차와 공기 측 밀도의 변화가 균형을 이루었기 때문으로 판단된다. 반면, 히트펌프 시스템 효율(COP)의 경우, 난방 성능은 온도변화에 따라 동일하였지만, 유량 변화로 인하여서, 압축기 소모동력이 감소하였기 때문에, 실내열교환기 입구 온도가 감소함에 따라서, 시스템 효율은 증가하는 경향을 보이고 있다. 추가적으로, EEV개도가 45%정도까지 열리는 구간에서는, 압축기 소모전력 감소하였기 때문에, 시스템 효율이 증가하였고, 그 이후에는 동일한 시스템 효율을 유지하는 것을 알 수 있었다. 압축기 회전수 변화 시에는 난방성능이 증가하면, 시스템 효율은 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 원인은 압축기 회전수 증가에 따른 유량의 증가로 판단된다. 향후, 열원으로 사용하는 냉각수에 대한 운전조건을 변화시켜가면서, 난방성능 특성을 분석하여, 전동식 히트펌프의 난방부하 대응을 위한 제어 방안을 연구하고자 한다.

**Abstract** The objective of this study was to investigate heating performance characteristics of electric heat pump system in a fuel cell electric vehicle (FCEV). In order to analyze heating performance characteristics of electric heat pump system with plate-type heat exchanger using stack coolant to evaporate the refrigerant, R-134a, each component was installed and tested under various operating conditions, such as air inlet temperature of inner condenser and compressor speed. When the air inlet temperature of inner condenser was varied from 0.0°C to -20.0°C, heating capacity was not quite different due to similar temperature gap between inlet and outlet of inner condenser with electric-driven expansion valve (EEV). However, COP increased until certain EEV opening, especially under 45.0%, because of decreasing power consumption. According to the compressor speed variation from 2,000 to 4,000 RPM, heating capacity and COP were found to have opposite trend. In the future works, stack coolant conditions as the heat source for tested heat pump system were analyzed with respect to heating performance, such as heating capacity and COP.

**Keywords** : Fuel cell vehicle, Heating capacity, Heating COP, Inner condenser, Stack coolant

본 논문은 산업통상자원부에서 지원하는 산업기술혁신사업(글로벌전문기술개발사업(10076701), 우수기술연구센터(ATC, 10051890)사업)으로 진행된 연구임.

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

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

Received October 26, 2018

Revised December 4, 2018

Accepted December 7, 2018

Published December 31, 2018

## 기호설명

$h$  : 엔탈피 (enthalpy, kJ/kg)

$Q_{heating}$  : 난방용량 (heating capacity, kW)

$W$  : 압축기 소모동력 (compressor work, kW)

$COP_{heating}$  : 난방효율 (coefficient of performance system)

## 1. 서론

현재의 운송수단에서 가장 널리 사용되고 있는 자동차의 경우 이제까지 화석연료 기반의 에너지를 사용하고 있어서, 심각한 환경오염문제와 화석연료의 고갈이라는 문제를 안고 있다. 이러한 이유로 전 세계적으로 기존의 화석연료를 대체할 수 있는 새로운 에너지원의 개발에 많은 노력을 하고 있고, 그 결과로 전기 자동차와 연료전지 자동차와 같이 무공해 전기에너지를 사용하는 차량의 개발이 많은 주목을 받고 있다. 연료전지 자동차는 전기 동력을 활용하여서, 구동원으로 활용하고 있기 때문에, 구동원이 아닌 소모동력의 사용을 최소화하여야, 연비가 향상되는 효과를 볼 수 있다. 그렇지만, 엔진폐열을 활용하여서, 실내 난방을 진행하는 내연기관 자동차와 다르게, 전기동력 자동차의 경우, 전기히터를 사용하여서, 난방을 진행해야하기 때문에, 연비 감소의 주요 원인 중에 하나로 여겨지고 있다. 그러므로, 전기에너지를 최소화할 수 있는 난방시스템의 개발이 필요한 상황이고, 이러한 문제를 해결하기 위해서, 히트펌프 시스템에 대한 연구가 주요하게 진행되고 있다. TOSHIHISA KONDO et al. 은 수냉식 전기 히터보다 히트펌프가 나은지 알아보기 위해서 외기 공기 열원으로 하는 히트펌프 시스템을 구축하여 연구 해보니 외기 공기 열원으로 하는 히트펌프 시스템이 수냉식 전기 히터보다 전기에너지를 감소하고 있는 것을 보여주고 있고[1], Antonijevic et al. 은 히트펌프 시스템이 PTC 전기히터보다 연비와 성능측면에서 우수하다고 하였다[2]. 전기히터 대비 히트펌프 시스템의 효율이 높기 때문에, 다양한 히트펌프 시스템의 성능 특성에 대한 분석 연구가 진행되었다. Yicheol Choi 겨울철 외기온도에 따른 공기를 열원으로 하는 히트펌프 시스템의 성능 평가를 통해 시스템의 외부 환경요인에 따른 효율 향상에 대한 방향을 제시하고 있다[3]. Woo

et al. 은 공기열원과 폐열원의 이중열원 이용 전기자동차용 히트펌프의 난방 운전 특성에 대해서 고찰하였다[4]. 외기열원이 작을 경우 폐열원을 복합적으로 사용하여 난방용량 및 COP를 향상시킬 수 있음을 나타내고 있다. Hosoz et al. 은 R-134a 공기열원 히트펌프에 대한 성능 특성을 분석하였다[5]. 가정용과 산업용에서는 히트펌프 시스템에 대한 연구가 자동차 영역보다 먼저 선행되어왔기 때문에, 열원에 따른 여러 연구가 기진행이 되었다[6,7].

기존 연구들에서 자동차용 히트펌프 시스템의 경우, 공기열원, 하이브리드 열원에 대한 연구가 진행되었지만, 냉각수를 활용한 폐열원에 대한 연구는 많지 않고, 특히, 연료전지 스택 열원을 활용한 히트펌프 시스템 연구는 부족한 상황이다. 연료전지 스택의 경우, 상대적으로 높은 수준의 온도를 가지고 있기 때문에, 히트펌프의 열원으로 우수한 상황이기 때문에, 연료전지 자동차 난방운전 시 연비 저하를 최소화 할 수 있는 방안으로 활용될 수 있다.

본 연구에서는 연료전지 자동차의 운전 시, 스택 냉각수 열원을 활용한 전동식 히트펌프 시스템에 대한 난방 성능 특성을 분석하기 위하여서, 연구를 진행하였다. 따라서 본 연구에서는 다양한 운전조건에서 수소연료전지 자동차의 열관리시스템에 대한 성능특성을 고찰하고 이를 통하여 얻은 결과를 바탕으로 수소연료전지 자동차의 열관리시스템 성능 및 연비 향상을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

연료전지 스택 폐열을 활용한 전동식 히트펌프 시스템 성능 특성을 분석하기 위한 실험 장치의 배치도는 Fig. 1과 같다.

전동식 압축기, 실내 열교환기(Inner condenser), 전자 제어식 팽창밸브, 어큐뮬레이터(Accumulator), 그리고 판형 열교환기(Plate type heat exchanger)로 구성되어 있다. 각 핵심부품들의 사양은 Table 1에 제시되었다.

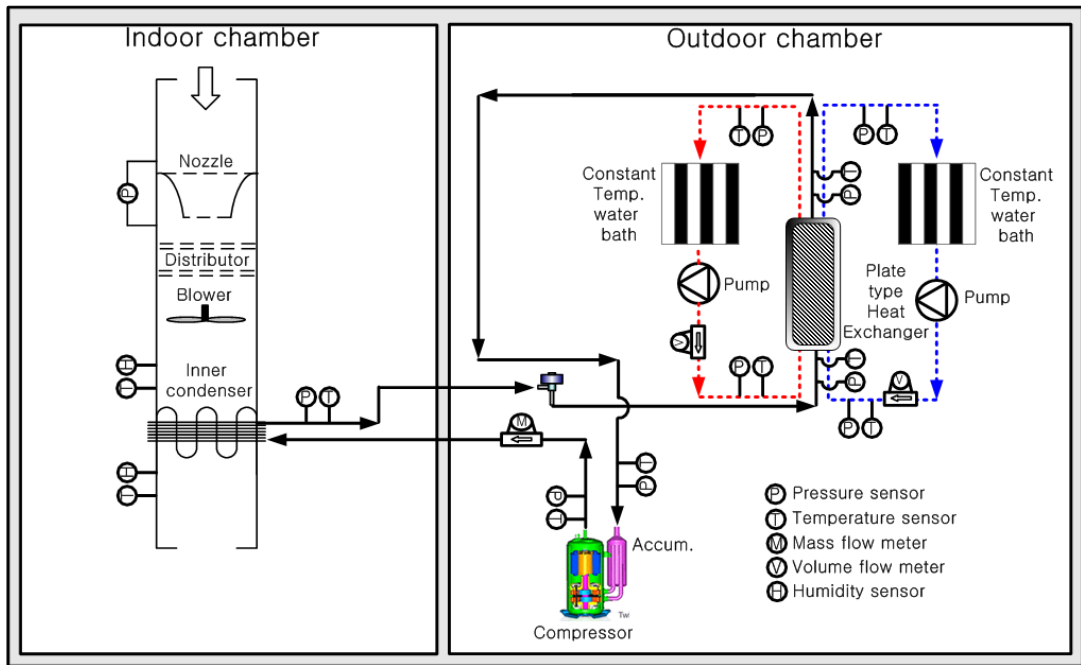


Fig. 1. Schematic diagram of coolant source heat pump for a fuel cell electric vehicle

Table 1. Specification of tested system components

Components	Specifications	
Inner Heat exchanger	Capacity (kW)	5.5 at 6 m <sup>3</sup> /min and 5,000 rpm
	Type, core size (mm <sup>3</sup> )	Multi-flow type, W222xH144xD54
Plate type heat exchanger	Capacity (kW)	6.5 at stack coolant 60 °C, 5000 rpm
	Type, core size (mm <sup>3</sup> )	Count flow type, W190xH225xD80
Compressor	Type	Electric driven
	Displacement (cc/rev)	33
Expansion valve	Type	Electric controlled
	Step	576
	Diameter(mm)	1.6
Accumulator	Volume (cc)	950

본 연구에서는 연료전지 스택 폐열을 활용할 수 있는 열교환기를 적용하였을 때, 외기온도 변화에 대한 전동식 난방시스템의 성능 특성에 대한 분석을 진행하고자 아래와 같이, 성능 평가 조건을 확립하였다. (Table 2)

Table 2. Tested system test matrix

Components	Conditions
Compressor speed (RPM)	2,000~4,000
Tinner condenser,in(°C)	0.0, -10.0, -20.0
Qinner condenser,in(m <sup>3</sup> /hr)	300
mstackcoolant,in(liter/min)	10
Tstackcoolant,in(°C)	35

실외온도가 낮은 조건에서 연료전지 스택 폐열을 활용한 전동식 난방 시스템 성능 특성을 알아보기 위하여, 각 핵심부품의 입·출구에 온도와 압력센서를 적용하였고, 냉매 유량의 경우, 압축기 출구에서 측정하였다. 냉각수 유량의 경우, 스택 냉각수를 적용하여서, 평가를 진행하였고, 유량측정은 체적유량계를 사용하였다.

## 2.2 실험계산

시스템 난방 성능을 분석하기 위하여, 아래 식(1)과 같이 측정된 데이터를 근거로 계산을 진행하였다.

$$Q_{heating} = \dot{m}_{air} (h_{air,out} - h_{air,in}) \quad (1)$$

전동식 압축기 소요동력은 파워미터(WT-210)으로 측정하였다.

시스템 용량과 전동식 압축기 소요동력 계산한 값을 이용하여 난방 성능계수는 식(2)에 의해서 결정된다.

$$COP_{heating} = \frac{\dot{Q}_{heating}}{\dot{W}} \quad (2)$$

Table 3은 실험에 사용된 계측기에 대한 불확실도와 계측 후 주요하게 계산되어지는 난방성능 및 성적계수 (COP)에 대한 불확실도를 계산한 결과를 보여주고 있다.

Table 3. Test equipment and uncertainty of the experimental parameters

Items	Accuracy
Thermocouples (T-type)	±0.1 °C
Pressure gage (Sensors, PI3H)	±0.1% (Max 250 bar)
Mass flow meter (Coriolis type)	±0.15%, Max 680 kg/h
Data logger (Gantner)	E. Gate IP (V3) (2.93W @ 12.06 V)
Heat capacity	1.6%
Heating COP	6.0%

### 3. 실험결과 및 고찰

본 연구의 목적은 연료전지 자동차의 겨울철 난방성능 확보를 위한 방안으로 연료전지 스택 폐열을 활용하여서, 실내 난방을 위한 전동식 난방시스템에 대한 성능 특성을 분석하기 위하여서, 일정 스택 냉각수 온도에서 실내유입온도 변화와 압축기 회전수, 그리고, 팽창밸브 개도 변화에 대한 실험을 진행하였다.

#### 3.1 실내 온도 변화에 따른 성능 특성

Fig. 2는 연료전지 스택 폐열을 활용하였을 때, 난방 사이클을 보여주고 있다. 공기열원으로부터 진행하였을 경우에는 -20 °C 실내온도 수준에서는 작동 유체인 R-134a 냉매의 특성으로 인하여서, 진공압 수준까지도 떨어져야 난방 사이클이 형성되는 것을 알 수 있지만, 본 연구에서는 연료전지 스택 폐열을 사용하였기 때문에, 실내온도가 낮다고 하여도 저압축이 진공압 수준까지 떨어지지 않는다고 볼 수 있다[8]. 또한, 압축기 입구와 출구에서의 과열도가 공기열원방식보다는 작게 형성되는

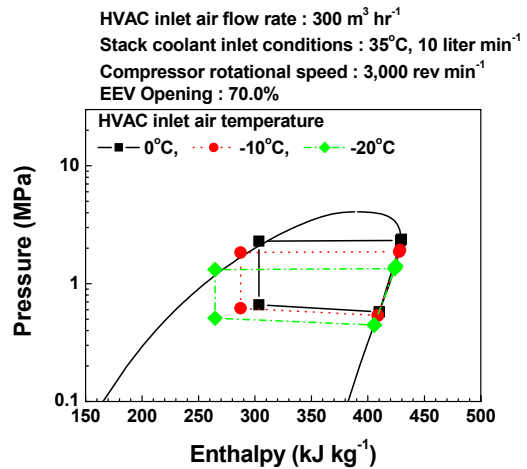


Fig. 2. P-h diagram of heating cycle with stack coolant heat-sourced heat pump

것을 볼 수 있는데, 이는 유량 증가로 인한 원인으로 분석된다.

Fig. 3은 실내온축기 입구 공기 온도 변화에 대한 전동식 난방시스템 성능 특성에 대한 결과를 보여주고 있다. 평가의 경우, 실내온축기 유입 공기 유량 300 m³ hr⁻¹, 압축기 회전수 2,000 rev min⁻¹, 그리고, 스택 냉각수 35.0 °C, 10.0 liter min⁻¹에서 EEV 개도를 변화시켜가면서, 성능 변화 특성을 분석하였다. Fig. 3(a)에서 보듯이, 연료전지 스택 폐열을 증발열원으로 활용할 경우, 압축기가 동일회전수이고, 폐열도 동일할 때는 난방 성능은 큰 차이를 보이지 않는다는 것을 알 수 있다. EEV 개도를 변경함에 따라서, 냉매 유량이 변화가 생기기 때문에, 압축기 토출압이 증가하여서, 공기토출 온도도 증가할 수 있지만, 상대적인 온도차와 비열, 그리고 밀도 등에 영향으로, 난방 열량은 동등 수준으로 보일 수 있다. -20.0 °C와 -10.0 °C에서의 입출구 온도차를 비교해 보면, -10.0 °C가 입출구 온도차가 동일 EEV조건이라면, 약 3.0%정도 높지만, -20.0 °C에서는 밀도가 약 2.8%정도 높기 때문에, 전체적으로 공기 측의 열량의 경우, 거의 동등수준이라는 것을 알 수 있다.(Fig. 3(b))

Fig. 3(a)에서 보듯이, 실내 유입 온도가 변화되는 상황에서, 난방 성능이 거의 동일한 조건에서, 소모동력은 온도가 낮아질수록 작아지기 때문에, 시스템 효율의 경우에도 온도가 낮아질 수록 커지는 것을 알 수 있다.(Fig. 3(c)) 이러한 결과는 Lee et al. 의 결과와 유사한 결과를 보이고 있다.

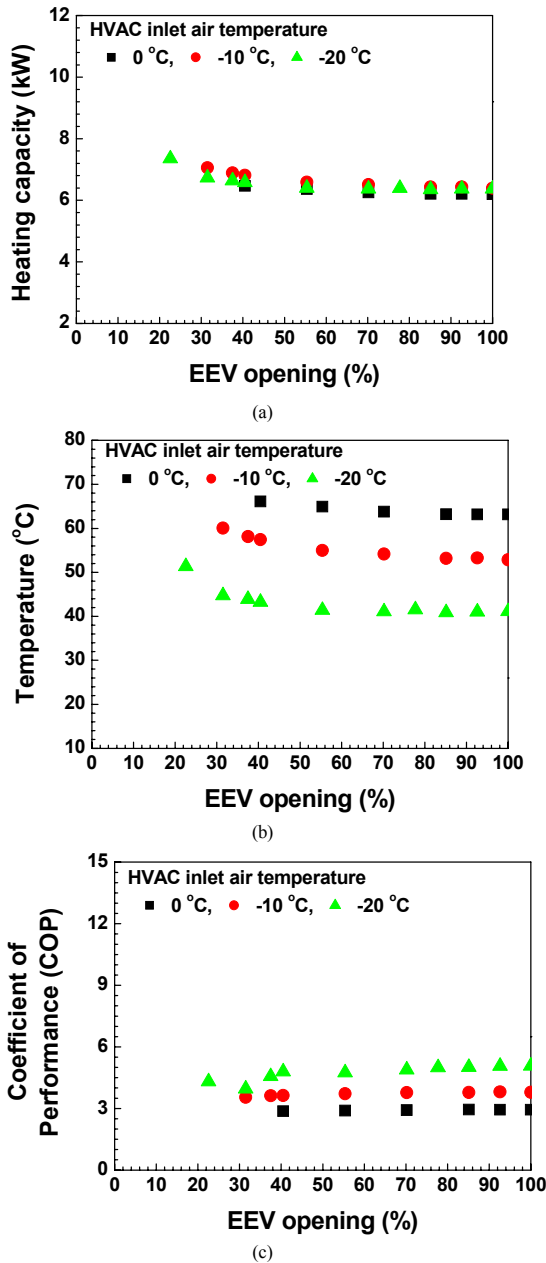


Fig. 3. Heating performance characteristics with the variation of air inlet temperature of inner condenser  
(a) Heating capacity (b) Air out temperature of inner condenser (c) Heating COP

### 3.2 압축기 회전수 변화에 따른 성능 특성

Fig. 4는 압축기 회전수 변화에 따른 전동식 난방시스템의 성능 변화 특성을 알아보기 위하여, 실내 응축기

유입 공기 조건을  $-20.0^{\circ}\text{C}$ ,  $300\text{ m}^3\text{ hr}^{-1}$ 로 하고, 연료전지 냉각수 조건을  $35.0^{\circ}\text{C}$ ,  $10.0\text{ liter min}^{-1}$ 하고, EEV를 변화시켜가면서, 실험을 진행하였고, 그 결과를 그래프로 나타내었다.

Fig. 4(a)를 보게 되면, 실내 유입 공기 온도가  $-20.0^{\circ}\text{C}$ 에서, EEV 개도 조절에 따라, 냉매 유량이 증가할수록, 난방 성능은 떨어지는 결과를 보이고 있다. 원인은 동일 회전수에서 유량이 증가하기 때문에, 토출 압력과 토출 온도가 떨어지게 되기 때문이다. 반대로, 시스템 효율의 경우(Fig. 4(b)), 증가하는 경향을 보이고 있지만, 일정 개도 이상에서는 시스템 효율의 변화는 거의 없어지고 있다. 즉, 일정 개도 이상에서는 성능 변화가 거의 없다는 것을 알 수 있다. EEV 개도 열림이 적을수록 유량이 적어서, 동일 압축기 회전수에서 냉매의 비가역성이 커져서, 고온이 되고, 압축기 소모 동력도 약간씩 커지는 결과로 시스템 효율은 상대적으로 낮아지는 것을 알 수 있다.

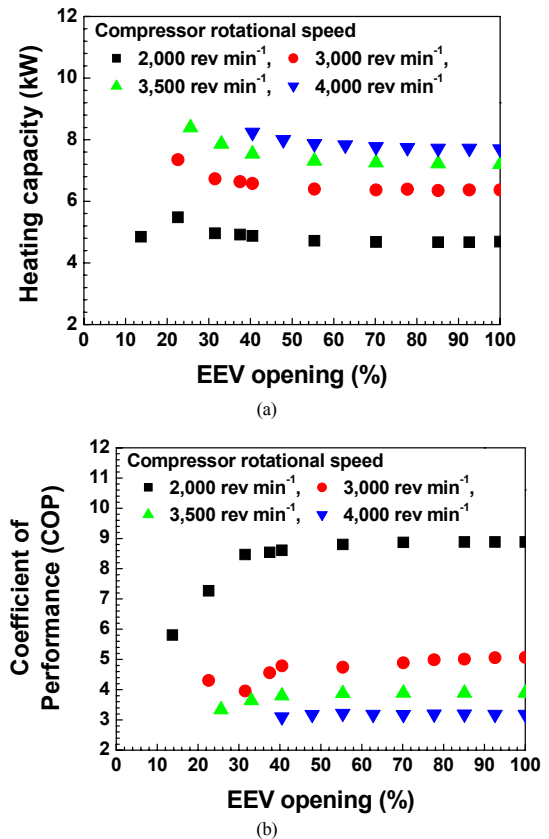


Fig. 4. Heating performance characteristics with the variation of compressor speed  
(a) Heating capacity (b) Heating COP

## 4. 결론

본 연구에서는 연료전지자동차의 겨울철 운전 시 적용되는 전기히터 운전으로 인한 연비 저하 특성을 개선하기 위하여, 연료전지 스택 폐열을 활용한 전동식 히트펌프 시스템의 적용을 고려하기 위하여, 전동식 히트펌프 운전 특성을 분석하고자 연구를 수행하였고, 그 결과는 아래와 같다.

- 1) 연료전지 스택 폐열원을 이용할 경우, 동일 증발열원으로 인하여, 실내온도가 변화하여도, 난방용량은 거의 동일한 수준이지만, 토출온도는 온도에 따라 차이를 보이고 있다.
- 2) 시스템 효율의 경우, 유입 공기 온도가 낮을수록 더 높아지는 결과를 보여주고 있는데, 이는 유량이 작아지기 때문에, 압축기 소모동력이 작아서, 상대적으로 효율이 높아지는 결과를 보이고 있다.
- 3) 압축기 회전수 변화에 따른 성능 특성의 경우도, 회전수가 증가할수록 난방 성능은 증가하고, 시스템 효율은 작아지게 되는 것을 알 수 있고, 일정 EEV 개도 이상에서의 성능 변화는 크지 않다는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서 일정한 스택 폐열을 이용한 시스템 성능 특성에 대한 연구를 진행하였기 때문에, 향후, 스택 폐열 운전조건 변화에 대한 시스템 성능 변화 특성을 분석할 예정이다.

## References

- [1] TOSHIHISA KONDO, AKIRA KATAYAMA, HIDEKI SUETAKE, MASATOSHI MORISHITA, "Development of Automotive Air-Conditioning Systems" *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, Vol. 48, No. 2, June 2011.
- [2] Antonijevic D, Heckt R., "Heat pump supplemental heating system for motor vehicles", *Journal of Automobile Engineering*, vol. 218, no. 10, pp. 1111 - 1115, 2004.  
DOI: <https://dx.doi.org/10.1177/095440700421801005>
- [3] Y. C. Choi, W. S. Lee, M. H. Park, Y. H. Choi, "Heating Performance Evaluations for Development of Heat Pump System on Battery Electric Vehicle", *Proc. of KSAE Fall Conference*, pp.559-563, 2011.
- [4] H. S. Woo, J. H. Ahn, M. S. Oh, Y. C. Kim, "Study on the Heating Performance Characteristics of a Heat Pump System Utilizing Air and Waste Heat Source for Electric Vehicles", *Korean Journal of Air-Conditioning*

and Refrigeration Engineering, Vol. 25, No. 4, pp.180-186, 2013.

- [5] M. Hosoz, M. Direk, "Performance evaluation of an integrated automotive air conditioning and heat pump system", *Energy Conversion and Management* 47, pp 545 - 559, 2006.
- [6] H. S. Lee, Y. C. Kim, "Experimental study on heating performance characteristics of stack coolant heat-sourced electric driven air conditioning system in a fuel cell electric vehicle", *Proc. of KSAE Spring Conference*, pp.1249-1254, 2017.
- [7] S. H. Lee, "Analysis on the performance test results of heat pump for the closed cooling water heat recovery on combined thermal power plant", *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 19, No. 2, pp 43 - 48, 2016.  
DOI: <https://dx.doi.org/10.5293/kfma.2016.19.2.043>
- [8] H. S. Lee, M. Y. Lee, "Steady state and start-up performance characteristics of air source heat pump for cabin heating in an electric passenger vehicle", *International Journal of Refrigeration*, No. 69, pp. 232-242, 2016  
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.06.021>

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

김 정 일(Jung-II Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 충북대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2002년 ~ 2003년 : CMSTech. Co. CAE팀장
- 2003년 ~ 2005년 : ECIM Co. Ltd. CFD팀장
- 2005년 ~ 현재 : CEDIC Co. Ltd. 자동차 CAE팀장

<관심분야>

자동차 및 항공기 열관리 분야 해석

**원 헌 주(Hun-Joo Won)**

[정회원]



- 1989년 2월 : 경남대학교 전자공학과 (공학사)
- 1989년 3월 ~ 2000년 3월 : 동환산업 전장팀장
- 2005년 11월 ~ 2010년 3월 : 효성정밀 BLDC개발팀장
- 2010년 4월 ~ 현재 : 동아전장(주) 모터액츄에이터 개발팀장

<관심분야>

자동차용 유체기계용 모터 개발

---

**이 무 연(Moo-Yeon Lee)**

[정회원]



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

<관심분야>

친환경 자동차 열관리, 열/물질전달, 연료전지, 나노유체