

전기자동차 냉각수 폐열활용 판형열교환기 하이브리드 운전시 난방 성능 특성에 관한 연구

이호성*, 전한별*, 조중원*, 남광우**, 김정민***, 이재승****, 임정관****

*한국자동차연구원 융합연구본부 열제어연구센터

**에스트라오토모티브시스템 시스템선행개발팀

***인지컨트롤스 배터리시스템개발팀

****코렌스 기술연구본부

e-mail:leehs@katech.re.kr

A Study on Heating Performance Characteristics of Heat Pump system with Coolant-source plate heat exchanger operating hybrid mode for coolants in Electric Vehicles

Ho-Seong Lee*, Han-Byeol Jeon*, Choong-Won Cho*, Kwangwoo Nam**, Jung-Min Kim***,

Jae Seung Lee****, Junggwon Lim****

*Thermal Management Research Center, KATECH

**Advanced system team, Estra-automotive

***Battery System Team, Inzi Controls

****R&D Division, Korens

요약

본 연구에서는 전기자동차에 적용되는 두가지 종류의 냉각수 폐열을 증발열원으로 사용하기 위한 히트펌프 시스템에서 두가지 종류의 냉각수를 동시에 적용하였을 때, 히트펌프 시스템의 성능 특성에 대한 연구를 실험적으로 수행하였다. 두가지 종류의 냉각수를 동시에 적용하였을 때, 저온부의 온도가 히트펌프 시스템의 성능에 더 큰 영향을 주고 있기 때문에, 혹한기 조건에서는 외기온도보다 높은 고온 냉각수를 활용하는 것이 적절하다. 저온 냉각수의 열교환 면적이 고온 냉각수의 열교환 면적보다 더 크게 적용하였기 때문에, 저온 냉각수 적용시 성능이 나빠지는 결과를 보이고 있으므로, 냉각수 적용 판형열교환기의 설계를 개선할 필요가 있다고 판단된다. 추후에 판형열교환기의 개선 사양을 적용하였을 때의 히트펌프 시스템 성능 특성에 대한 연구를 추가할 예정이다.

Key words : Coolant source plate heat exchanger(냉각수열원 판형 열교환기), HT coolant(고온 냉각수), LT coolant(저온 냉각수), Heating performance(난방 성능), Electric vehicles (전기자동차)

Nomenclature

cp : specific heat [kJ/kg·K]

m : mass flow rate [kg/h]

T : temperature [°C]

Q : heat capacity [kW]

Subscripts

a : air

c : compressor

i : inlet

o : outlet

1. 서론

세계적으로 전기동력을 활용하는 친환경 자동차 시장이 환경문제에 대한 관심 증가로, 급속히 확대되고 있다. 국내의 미래차 생태계 가속화를 위해 정부에서는, 2019년에 친환경

차(전기동력자동차) 비중을 10%이상 확대하고, 2022년 이후에는 내수 판매의 40%이상을 친환경차가 차지할 수 있도록 목표하고 있기 때문에, 전기자동차를 포함하는 전기동력자동차의 확대가 예상되고 있다.

전기차는 내연기관처럼 난방 열원(엔진)을 보유하고 있지 않아서, 난방을 위한 별도 열원이 필요하여, 현재 주로 적용되는 있는 전기히터의 작동에 따라, 전기동력 자동차의 경우에도 주행거리가 20~50%까지 낮아지는 것으로 보고 되고 있어서, 히트펌프 시스템을 적용하여서, 난방시 주행거리 향상을 위한 연구가 진행중이다.([1],[2])

히트펌프 시스템의 경우, 가정용 시스템에 적용이 많이 진행된 기술로, 요즘에는 전기승용차에도 적용하기 위해서 연구되고 있는 기술로, Choi et al.[3]은 공랭식 히트펌프에 대해서 동절기 외기온에 따른 공랭식 히트펌프 시스템의 성능 평가를 통해 히트펌프 시스템의 외부 환경 요인에 따른 효율 향상에 대해서 실험적 연구를 진행하였고, Park et al. [4]는

전기차량용 히트펌프의 운전특성 해석을 위해 MATLAB/SIMULINK 환경에서 R134a 히트펌프 모델과 캐빈 모델을 설계하여, 모델은 여름과 겨울에서 히트펌프의 작동 특성에 따른 실내 온도변화를 나타낼 수 있으며, 모델 검증은 구성품 수준에서 응축기와 증발기의 용량 비교를 연구를 진행하였다. Woo et al. [5]은 공기열원과 폐열원의 이중열원 이용한 전기자동차용 히트펌프의 난방 운전 특성에 대해서 고찰하였다. 가정에서 사용하는 히트펌프 시스템이 공기 열원만을 사용하고 있는데 반하여서, 자동차에 사용중인 냉각수를 활용하는 히트펌프 시스템을 적용하는 연구로, 본 연구에서도 냉각수를 활용하는 시스템에 대한 진행하고자 한다.

기존에 연구된 논문들에서는 냉각수 열원이나 공기 열원등 한가지 열원을 활용한 연구가 주를 이루었다. 그렇지만, 양산 중인 전기자동차에는 배터리 냉각용 냉각수와 전자장비 냉각용 냉각수가 다르게 적용되고 있기 때문에, 두가지 냉각수를 히트펌프의 증발열원 혹은 응축열원으로 사용할 수 있다. 냉각수 열원 열교환기의 적용은 저온시의 착상문제등을 고려하지 않아도 되기 때문에, 안정적인 히트펌프 성능을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 두가지 종류의 냉각수를 사용하는 전기자동차 히트펌프 시스템의 핵심부품인 판형열교환기에 대한 두가지 냉각수를 동시에 적용하는 하이브리드 운전시 히트펌프 성능 특성을 분석하고자 연구를 수행하였다. 배터리와 전자장비 냉각용 냉각수의 운전 조건이 다르기 때문에, 냉각수 운전 온도가 다를 때의 히트펌프 시스템에 미치는 영향을 알아보기 위해 실험적인 연구를 수행하였다.

2. 실험 장치 및 방법

냉각수 폐열원을 사용하는 전동식 히트펌프는 전동식 압축기(Electric compressor), 증발기 역할의 냉각수 열원 판형열교환기(Coolant-source heat exchanger), 실내 난방을 위한 실내 응축기(Inner condenser), EXV(Electric expansion valve), 어큐레이터(Accumulator) 등으로 구성되어 있다.

본 연구에서 적용한 냉각수 열원 판형열교환기는 저온저압의 냉매를 고온의 냉각수(스택 및 배터리 열관리용)과 저온의 냉각수(전자장비 열관리용)들의 폐열을 적용한 냉각수와 열교환을 통하여서, 기체 상태의 냉매로 만들기 위해서, 적용하였다. 구성 부품에 대한 상세 사양은 Table 1과 같다. 두가지 종류의 온도가 다른 냉각수를 적용한 판형열교환기의 하이브리드 운전시의 히트펌프 시스템 성능을 평가하기 위한 실험 장치의 배치도는 Fig. 1과 같다.

Fig. 2는 본 연구에서 활용한 두가지 종류의 냉각수를 적용

할 수 있는 판형열교환기의 구조와 실물 사진이다. 고온 냉각수와 저온 냉각수를 다르게 적용하고, 냉매가 두가지 냉각수와 열교환을 할 수 있도록 하는 구조로 설계 및 제작되었다. 고온 냉각수가 전체 열교환 면적의 35%를 차지하고, 저온 냉각수가 65%정도를 차지하는 구조로 되어있다. 난방과 난방을 운전을 진행하는 히트펌프 시스템의 운전모드에 따른 영향도를 고려하여, 열전달 면적을 다르게 적용하였다.

본 연구에서는 두가지 종류의 냉각수를 동시에 적용하는 하이브리드 운전시 히트펌프 시스템의 난방 성능 특성을 분석하기 위하여서, 실험적으로 진행하였다. 실험에 적용된 고온 조건의 냉각수와 저온 조건의 냉각수에 대한 온도 및 냉각수 유량에 대한 실험 조건은 Table 2와 같다.

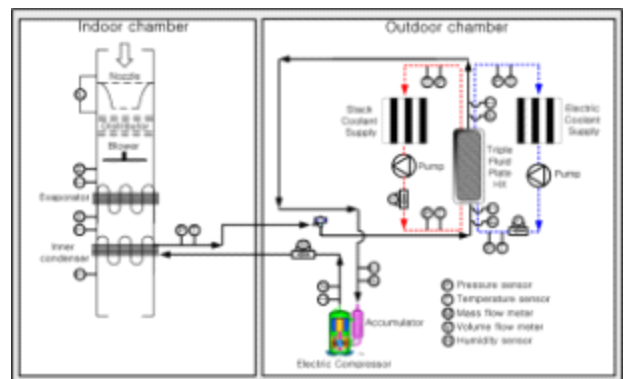
냉각수 열원의 하이브리드 운전시의 히트펌프 시스템 성능은 실내응축기의 방열량을 계산(식(1))하고, 압축기 소모전력과의 비교를 통하여, 시스템 효율을 분석하였다.

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_a \cdot c_{pa} \cdot (T_{a,o} - T_{a,i}) \quad (1)$$

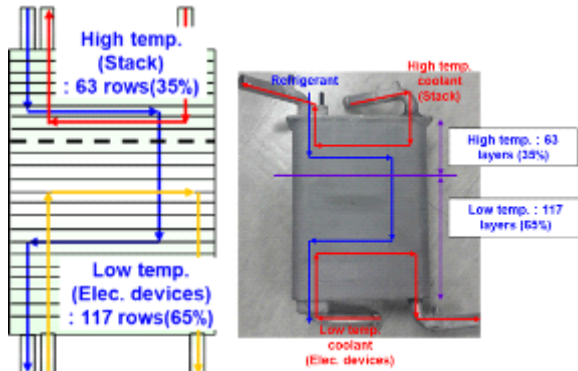
$$COP = \frac{Q_a}{W_c} \quad (2)$$

[Table 1] Specification of tested system components

Electric Compressor	Type	Scroll
	Displacement	33.0 cc/rev
Plate Heat Exchanger	Layers NO.	180 Layer (HT : 63, LT : 117)
	Core Size (L×D×H)	190×225×80 mm
Inner Condenser	Type	PF Type
	Core Size (L×D×H)	222×144×54 mm
Expansion Valve	Type	Electric expansion valve
Accumulator	Volume	950cc



[Fig. 1] Schematic of heat pump system for coolant-source plate heat exchanger



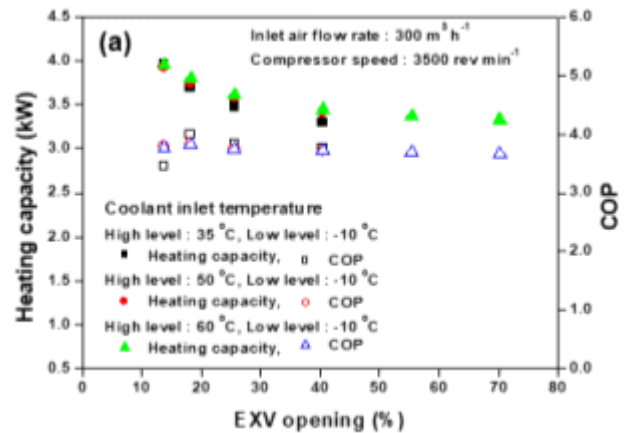
[Fig. 2] Coolant-source plate heat exchanger and channel configurations

[Table 2] Coolant-source plate heat exchanger Test Matrix

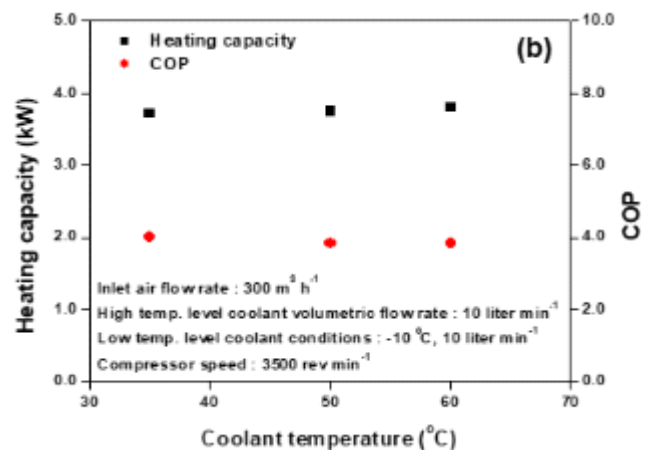
High temperature Coolant-side	Coolant Temp. [$^{\circ}\text{C}$]	35, 50, 60
	Coolant Flow Rate [L/min]	10
Low temperature Coolant-side	Coolant Temp. [$^{\circ}\text{C}$]	-10
	Coolant Flow Rate [L/min]	10

3. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 두가지 종류의 냉각수 폐열을 증발열원으로 사용하는 히트펌프 시스템에 대하여, 두가지 종류의 냉각수를 동시에 적용하였을 때, 난방 성능 및 난방 효율을 분석하고자 하였다. 본 연구에서는 배터리 및 스택의 경우, 높은 수준의 적정온도를 가지고 있어서, 혹한기에도 냉각수 온도를 높여서, 배터리와 스택의 온도를 최적수준으로 맞추고 있기 때문에, 고온조건의 냉각수의 운전조건 변화시켜 성능 특성을 알아보았다. 저온 냉각수인 전자장비 열관리용의 경우, 냉각에 특화되었기 때문에, 혹한기 조건에서는 냉각수 온도를 높이기 위한 장치를 사용하지 않기 때문에, 외기온도를 그대로 반영하는 것으로 하여, 히트펌프 시스템의 성능 특성을 분석하였다.



[Fig. 3] Performance characteristics with EXV opening



[Fig. 4] Performance characteristics with HT coolant-side temperature

그림 2는 고온부 냉각수 온도를 변화시키면서, 팽창밸브 개도를 변경시켰을 때의 난방성능과 시스템 효율에 대한 분석한 결과를 보여주고 있다. 실내 컨텐서의 입구 공기 적용 조건은 -10°C , $300\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ 이었고, 압축기 회전수는 $3,500\text{ rev min}^{-1}$ 이었다. 팽창밸브 개도가 낮을수록 동일 압축기 회전수에서 고온이 더 높이 올라가고 있기 때문에, 난방성능은 증대되는 것을 알 수 있고, 시스템 효율의 경우, 15~20%에서 최적화되는 실험결과를 보여주고 있다. 난방성능의 경우, 3.5~4.0 kW 수준을 보이고, 난방 시스템 효율의 경우, 3.5 정도의 값을 보이고 있다.

그림 3은 고온부 온도가 높아졌을 때의 성능 특성을 분석한 결과이다. 고온부의 온도가 증가한다고 하여도, 난방 성능이나 시스템 효율은 거의 동일한 결과를 보여주고 있는데, 이는 고온 냉각수가 흐르는 고온부를 통과하여, 열을 흡수한 냉매가 저온 냉각수가 흐르는 저온부를 통과하면서, 흡수한 열을 빼앗기는 결과를 보인다. 저온부의 열교환 면적이 고온부 대비 약 2배정도 이기 때문에, 고온부의 온도가 올라간다고 하여도 저온부의 영향으로, 성능은 큰 차이가 없는 것을 알

수 있다. 이러한 결과를 보았을 때, 저온 냉각수의 온도가 낮을 경우에는 냉각수 열원으로 사용하기에 부적합하므로, 하이브리드 운전은 히트펌프 성능 개선에 도움이 되지 않을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 전기자동차에 적용되는 두가지 종류의 냉각수 폐열을 증발열원으로 사용하기 위한 히트펌프 시스템에서 두가지 종류의 냉각수를 동시에 적용하였을 때, 히트펌프 시스템의 성능 특성에 대한 연구를 실험적으로 수행하였다.

- 1) 두가지 종류의 냉각수를 동시에 적용하였을 때, 저온부의 온도가 히트펌프 시스템의 성능에 더 큰 영향을 주고 있기 때문에, 혹한기 조건에서는 외기온도보다 높은 고온 냉각수를 활용하는 것이 적절하다.
- 2) 저온 냉각수의 열교환 면적이 고온 냉각수의 열교환 면적보다 더 크게 적용하였기 때문에, 저온 냉각수 적용시 성능이 나빠지는 결과를 보이고 있으므로, 냉각수 적용 판형열교환기의 설계를 개선할 필요가 있다고 판단된다.

추후에 판형열교환기의 개선 사양을 적용하였을 때의 히트펌프 시스템 성능 특성에 대한 연구를 추가할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부에서 지원하는 산업기술혁신사업(시장자립형 3세대 xEV 산업육성 사업, 과제번호 : 20011653, 20011596)에 의해서, 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 이호성, 김정일, 이무연, “연료전지 스택 폐열 활용 전동식 히트펌프 시스템 난방 성능 특성 연구”, 한국산학기술학회논문지, 제 19권 12호, pp. 924-930, 2018년.
- [2] 전한별, 김정일, 원헌주, 이호성, “EV 상용차용 히트펌프 시스템 난방 운전 특성에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, 제 20권 12호, pp. 1-7, 2019년.
- [3] Yicheol Choi, Wonsuk Lee, Manhee Park, Yonghyun Choi, “Heating Performance Evaluations for Development of Heat Pump System on Battery Electric Vehicle” KSAE Fall Conference Proceedings, pp.559-563, 2011
- [4] Ji Soo Park, Jae Young Han, Sung-Soo Kim, Sang Seok

Yu, “Characteristic of Cabin Temperature According to Thermal Load Condition of Heat Pump for Electric Vehicle”, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B 40(2), pp.85-91, 2016

- [5] Hyoung Suk Woo, Jae Hwan Ahn, Myoung Su Oh, Hoon Kang, Yongchan 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 25(4), pp.180-186, 2013
- [6] Ho Seong Lee, Jong Phil Won, Choong Won Cho, Taek Kyu Lim, Young Chul Jung, Yongchan Kim “An Experimental Study on Direct Expansion System’s Performance of Mobile Alternative Refrigerant Air Conditioning System” KSAE Fall Conference Proceedings, pp.423~428, 2012