

전기자동차 폐열활용 수열원 증발기 성능 특성에 관한 연구

이호성*, 전한별*, 조중원*, 정기윤**, 고윤기***, 김정민****, 백승열*****

*한국자동차연구원 융합연구본부 열제어연구센터

**한국자동차연구원 스마트카연구본부 자율협력주행연구센터

***한국자동차연구원 소재기술연구본부 화학소재연구센터

****인지컨트롤스 배터리시스템개발팀

*****에디슨 모터스 차량 설계팀

e-mail:leehs@katech.re.kr

A Study on Performance Characteristics of Coolant-source Evaporator using wasted heat in Electric Vehicles

Ho-Seong Lee*, Han-Byeol Jeon*, Choong-Won Cho*, Ki-Yun Jeong**, Youn-Ki Ko***,

Jung-Min Kim****, Sung-Youl Baik*****

*Thermal Management Research Center, KATECH

**Cooperative Automated Vehicle Research Center, KATECH

***Chemical Material Center, KATECH

****Battery System Team, Inzi Controls

*****Vehicle Technology / Trim Developmant, EDISON Motors

요약

본 연구에서는 전기자동차에 적용될 히트펌프에서 공기열원이 아닌 전자장비등의 폐열을 사용하고자, 냉각수 열원 증발기에 대한 성능 특성을 분석하고, 냉각수 운전조건을 변화시켜서, 실험을 수행하였다. 또한, 냉매 교체시기에서의 냉매 변화에 대한 성능 특성을 분석하기 위하여서, 동일 증발온도 조건에서, R-134a와 R-1234yf에 대한 실험적 연구를 진행하였다. 수열원 증발기에 적용되는 냉각수 유량은 냉각수 유량이 증가하면, 냉매측 유량의 증가로 인하여서, 방열량이 증가하는 경향을 보이고 있다. 냉각수 온도가 증가하면, 냉매와의 온도차가 커지기 때문에, 냉매 특성과는 상관없이, 방열 성능은 떨어지는 결과를 보이고 있다. 현재 사용중인 R-134a 냉매를 R-1234yf 냉매로 바꾸게 되면, 냉매유량의 증가하여도, 성능이 약간 떨어지는 경향을 보이고 있기 때문에, 내부 핀의 형상 변화 등을 포함한 설계 개선이 필요할 것으로 판단된다. 추후에 수열원 증발기의 개선 사양에 대한 분석을 추가할 필요가 있고, 수열원 열교환기를 적용한 히트펌프 시스템에 대한 성능 분석을 진행할 예정이다.

Keywords : Coolant source evaporator(수열원 열교환기), Refrigerant(냉매), Heating capacity(열용량), Wasted heat (폐열), Electric vehicles (전기자동차)

1. 서론

Nomenclature

cp : specific heat [kJ/kg·k]
h : enthalpy [kJ/kg]
m : mass flow rate [kg/h]
Q : heat capacity [kW]

Subscripts

c : coolant
i : inlet
o : outlet
ref : refrigerant

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

어서, 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 오인에 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 열원이 아닌 공기 열원에 대한 연구가 주를 이루었기 때문에, 냉각수 열원을 활용한 히트펌프 시스템의 연구가 필요하고, 특히, 냉각수 열원을 사용하기 위해서는 수열원 열교환기의 개발이 필요한 상황이다. 수열원 열교환기의 적용은 저온시의 착상문제등을 고려하지 않아도 되기 때문에, 안정적인 히트펌프 성능을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 냉각수를 사용하는 전기구동 부품들의 폐열원을 사용하는 전기자동차 히트펌프 시스템의 핵심부품인 수열원 증발기에 대한 성능을 분석하고자 연구를 수행하였다. 히트펌프 시스템에 적용되는 냉매에 따라서, 열교환 성능이 변화될 수 있기 때문에, 현재 사용중인 R-134a 냉매와 변경 예정인 R-1234yf 냉매에 대한 성능 비교 분석이 이루어질 수 있도록 실험적인 연구를 수행하였다.

2. 실험 장치 및 방법

냉각수 폐열원을 사용하는 전동식 히트펌프는 전동식 압축기(Electric compressor), 수열원 증발기(Coolant-sourced evaporator), 응축기(Condenser), TXV(Thermal Expansion Valve), 어큐뮬레이터(Accumulator) 등으로 구성되어 있다.

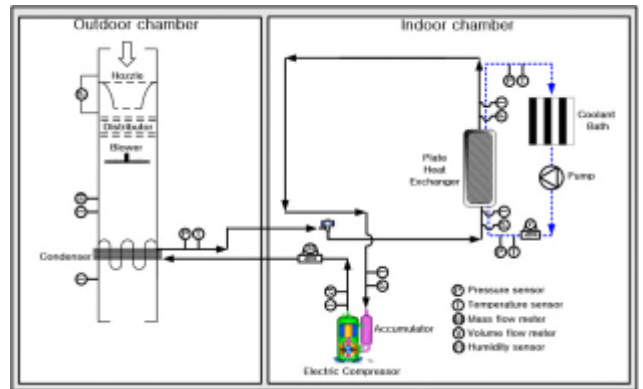
수열원 증발기는 저온저압의 냉매를 전자부품들의 폐열을 적용한 냉각수와 열교환을 통하여서, 기체 상태의 냉매로 만들기 위해서, 적용하였다. 구성 부품에 대한 상세 사양은

Table 1과 같다. 수열원 증발기 성능을 평가하기 위한 실험 장치의 배치도는 Fig. 1과 같다.

본 연구에서는 수열원 증발기에 대한 냉매별 성능 특성을 분석하기 위하여서, 실험적으로 진행하였다. 수열원 열교환기이기 때문에, 수열원에 대한 변화 특성을 반영하여, 차량의 운전 조건 변화로 냉각수 온도 및 냉각수 유량에 대한 변화를 평가 분석하였다. 본 연구의 실험 조건은 Table 2와 같다.

[표 1] Specification of Tested System Component

Electric Compressor	Type	Scroll
	Displacement	33.0 cc/rev
Plate Heat Exchanger	Layers NO.	30 Layer
	Core Size (L×D×H)	270×70×120 mm
Condenser	Type	PF Type
	Core Size	272×224×36 mm
Expansion Valve	Type	Thermal expansion valve
Accumulator	Volume	300cc



[그림 1] 수열원 증발기 평가 개요

[표 2] Coolant-sourced Evaporator Test Matrix

Coolant-side	Coolant Temp. [°C]	5, 10, 15
	Coolant Flow Rate [L/min]	5, 10, 15
Refrigerant-side (R-134a, R-1234yf)	Saturated Condensing Temperature [°C]	60
	Subcool at TXV inlet [K]	5.0
	Saturated Evaporating Temperature [°C]	0
	Superheat at Evaporator out[K]	5.0

수열원 증발기의 성능은 냉각수측과 냉매측의 방열량을 계산(식(1), 식(2))하고, 입출구 차압에 대한 특성을 분석하였다. 냉매측의 상태량의 경우, Refprop 10.0의 값을 적용하여서, 분석하였다.

$$\dot{Q}_{Ref.} = \dot{m}_r (h_{r,i} - h_{r,o}) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{Coolant} = \dot{m}_c \cdot c_p \cdot (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (2)$$

3. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 수열원 증발기에 대해서, 수열원의 조건 및 냉매를 변경하면서, 성능 특성을 분석하고자 하였다. 적용된 냉매는 현재 사용중인 R-134a와 변경될 R-1234yf이다. Lee et al.(4)는 냉매를 변경하였을 때의 자동차용 냉방 시스템 성능 특성을 분석하기 위하여, 연구를 하였고, 냉매 특성은 R-1234yf의 경우, 비체적이 작아서, 유량이 증가한다고 하였다. 본 연구에서는 수열원에 대한 운전조건 변화에 대한 냉매 별 영향도를 분석하기 위하여, 냉각수 측의 운전조건 변화에 대한 열교환기 성능 특성을 분석하였다.

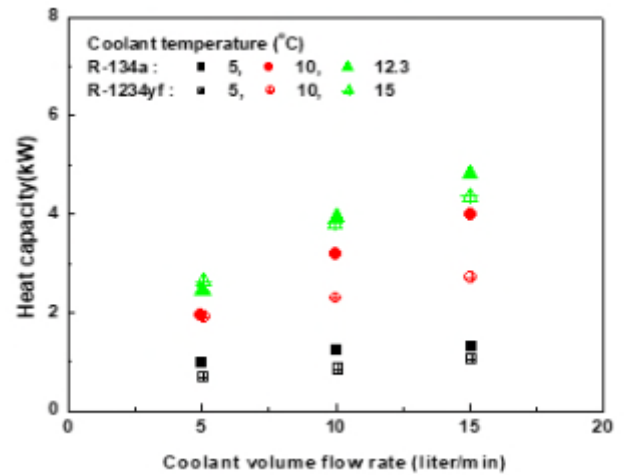
3.1 냉각수 유량 변화에 대한 영향

수열원 증발기의 냉각수 유량 변화에 대한 특성을 분석하였을 때, 냉각수 유량이 커질수록 방열량을 증가하는 경향을 보이고 있다. 냉각수 유량이 커지면, 냉매측의 열방출량도 커지기 때문에, 증발열량이 커지는 결과를 보여주고 있다. 냉매 측 조건을 동일하게 적용하였기 때문에, 냉각수 유량의 증가는 방열량을 증가시키는 효과를 보여주고 있다. 냉각수 온도가 10℃일 경우를 보았을 때, 냉각수 유량이 5liter/min에서 15liter/min으로 변경될 때, R-134a 냉매의 경우, 약 2배 정도의 방열량 증가를 보여주었다.(그림 2) R-1234yf의 경우에도 적용된 냉각수의 동일 유량 변화 조건에서 방열량이 약 43.0%정도 증가하는 것을 알 수 있었다. 방열량의 증가는 유량 증가의 영향으로 판단할 수 있는 것이, Fig. 3을 보게되면, 냉각수 유량 변화에 대한 냉매 질량유량 변화 특성을 보게되면, 방열량 증대 비율과 동일한 수준의 증가율을 보여주고 있다.

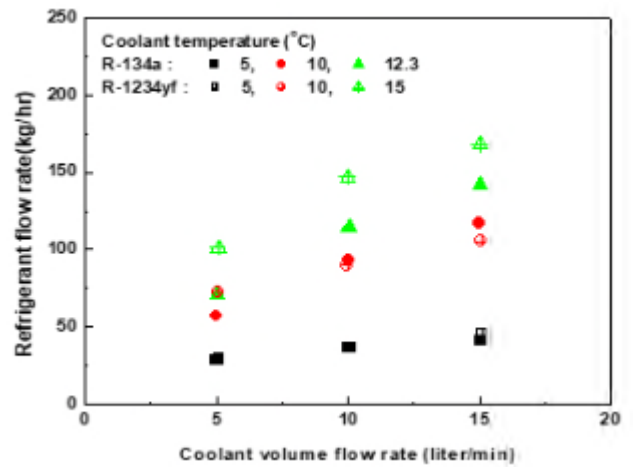
냉매별 특성을 분석하기 위하여, 냉각수 온도가 10℃, 유량이 10liter/min 조건에서의 방열량 특성을 분석하였을 때, R-134a냉매가 R-1234yf 냉매 보다 약 28.1%정도 더 높은 결과를 보여주고 있다.(그림 2) R-1234yf의 경우, 그림 3에서 보여지는 것과 같이, 유량은 더 높았지만, 동일 조건에서의 엔탈피 차이가 상대적으로 작았기 때문에, 성능이 떨어지는 결과를 보이고 있다.[4]

차압 측면에서는 냉각수 유량이 증가할수록 냉매측 질량유량도 증가하기 때문에, 차압이 증가하는 경향을 보이고 있다. 냉매별로 분석하였을 때, R-1234yf의 냉매 유량이 R-134a보다 더 컸기 때문에, R-1234yf의 냉매의 냉매측 차압이 더 크다는 것을 알 수 있다. 냉매를 바꾸었을 때, 냉매측 차압의 경

우, R-1234yf가 평균적으로 6.0%정도 더 높은 결과를 보이고 있다. 냉매를 바꾸었을 때, R-1234yf의 방열량 및 차압 측면에서 불리한 결과를 보이고 있기 때문에, R-1234yf로 변경하여, 수열원 증발기를 사용하기 위해서는 성능과 차압의 성능 개선을 위하여, 내부 핀의 형상등의 개선 설계가 필요할 것으로 판단된다.



[그림 2] 냉각수 유량 변화에 따른 방열 성능 특성 변화



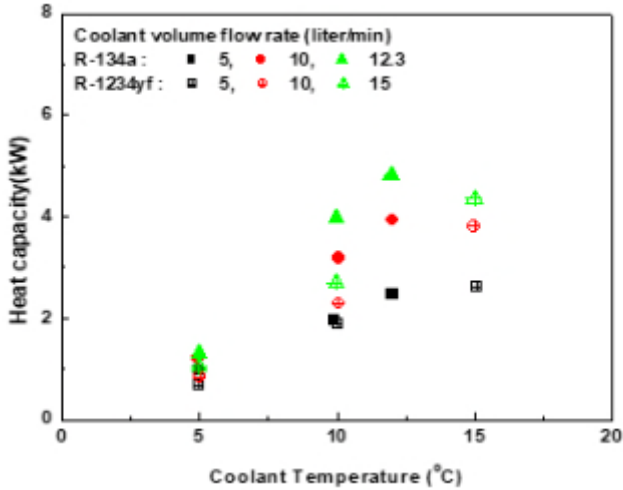
[그림 3] 냉각수 유량 변화에 따른 냉매측 유량 변화 특성

3.2 냉각수 온도 변화에 대한 영향

본 연구에서 진행한 수열원 증발기는 냉각수로부터 열을 흡수하여, 냉매가 증발이 될 수 있도록 하는 역할이다. 냉각수 온도를 높이면, 냉매측의 온도 압력조건이 동일한 상황에서, 온도차가 커지기 때문에, 열교환량은 커지게 된다. 그림 4에서 확인할 수 있듯이, 냉각수 온도가 높아지게 되면, 유량에 상관없이 방열량이 증가 되는 것을 알 수 있다. 10liter/min을 기준을 하였을 때, 온도가 5℃에서 15℃까지 올라갔을 때, 방열량은 약 3배정도 커지게 되는 것을 R-134a의 경우 알 수 있었고, R-1234yf 냉매의 경우도 거의 유사한 수준으로 증가되는 것을 알 수 있었다. 온도의 경우, 수열원 증

발기의 증발온도를 0℃로 하였기 때문에, 실험이 가능한 수준인 5℃도 수준까지만 평가를 진행하였다.

냉각수 유량 변화 특성과 유사하게 R-1234yf의 경우, 냉매 유량이 약간 증가하였지만, 입출구의 냉매측 엔탈피 차이는 R-134a가 더 높았기 때문에, 동일 냉각수 온도 조건에서, R-134a가 더 성능이 높은 결과를 보여주고 있다.



[그림 4] 냉각수 온도 변화에 따른 방열 성능 특성 변화

4. 결론

본 연구에서는 전기자동차에 적용될 히트펌프에서 공기열원이 아닌 전자장비등의 폐열을 사용하고자, 냉각수 열원 증발기에 대한 성능 특성을 분석하고, 냉각수 운전조건을 변화시켜서, 실험을 수행하였다. 또한, 냉매 교체시기에서의 냉매 변화에 대한 성능 특성을 분석하기 위하여, 동일 증발온도 조건에서, R-134a와 R-1234yf에 대한 실험적 연구를 진행하였다.

- 1) 수열원 증발기에 적용되는 냉각수는 냉각수 유량이 증가하면, 냉매측 유량의 증가로 인하여서, 방열량이 증가하는 경향을 보이고 있다.
- 2) 냉각수 온도가 증가하면, 냉매와의 온도차가 커지기 때문에, 냉매 특성과는 상관없이, 방열 성능은 떨어지는 결과를 보이고 있다.
- 3) 현재 사용중인 R-134a 냉매를 R-1234yf 냉매로 바꾸게 되면, 냉매유량의 증가하여도, 성능이 약간 떨어지는 경향을 보이고 있기 때문에, 내부 편의 형상 변화 등을 포함한 설계 개선이 필요할 것으로 판단된다.

추후에 수열원 증발기의 개선 사양에 대한 분석을 추가할 필요가 있고, 수열원 열교환기를 적용한 히트펌프 시스템에 대한 성능 분석을 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부에서 지원하는 산업기술혁신사업(자동차산업핵심기술개발사업, 과제번호 : 20000277)과 산업기술혁신사업(시장자립형 3세대 xEV 산업육성 사업, 과제번호 : 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”, 한국산학기술학회 논문지, 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