

# 전기자동차 냉난방 모듈 시스템의 냉방 운전 특성에 관한 실험적 연구

전한별\*, 김지민\*, 조중원\*, 이호성\*  
 \*한국자동차연구원 열제어 연구 센터  
 e-mail:leehs@katech.re.kr

## An Experimental Study on the Cooling Operation Characteristics of Electric Vehicle Cooling and Heating Module System

Han-Byeol Jeon\*, Ji-Min Kim\*, Chung-Won Cho\*, Ho-Seong Lee\*  
 \*Thermal Management Research Center, KATECH

### 요약

기존에 연구에서는 주로 공기 열원을 이용한 히트펌프에 대한 연구가 주로 이루어졌으며, 본 연구에서는 외기부하의 영향을 최소화하기 위하여, 냉난방 모듈화를 통한 폐열을 활용하는 방안에 대한 연구하였다. 냉각수를 사용하는 전기 구동 부품들의 폐열원을 사용하는 냉난방 모듈 시스템에 대한 냉방 성능을 분석하고자 전동식 압축기 속도 및 내외 풍량, 내외 온도에 따른 냉방 성능 비교 분석이 이루어질 수 있도록 실험적인 연구를 수행하였다. 냉방 성능 평가를 위해서, 먼저 냉매 충전량 평가를 실행하였으며, 적정 냉매량을 선정 시에는 수냉식 응축기 출구 과열도 및 전자팽창밸브 입구 과열도를 고려하여, 800g이라는 적정 냉매량을 선정하였다. 냉방 성능 평가를 위해서 다양한 조건에서 평가한 결과, HVAC 내기 평가 조건을 변화시켰을 때에는 전동식 압축기 소비동력은 변화하지 않고 일정하게 유지 되는 것을 확인하였으며, 냉방 성능만 증가하는 경향을 보였다. 이처럼 냉난방 모듈 시스템은 외기 및 내기 조건에는 전동식 압축기 소비동력이 변하지 않은 원인은 수냉식 응축기 및 수냉식 증발기에 공급되는 냉각수 온도 및 유량 조건이 일정했기 때문으로 확인된다.

keywords : Coolant-sourced condenser(수냉식 응축기), Coolant-sourced evaporator(수냉식 증발기), Cooling capacity(냉방 성능), Compressor work(압축기 소비동력), Heat pump(히트펌프)  
 경쟁력 강화 기술 확보가 필요하다.

### Nomenclature

$C_p$  : specific heat, kJ/kg-K  
 $h$  : enthalpy, kJ/kg  
 $\dot{m}$  : mass flow rate, kg/hr  
 $\dot{Q}$  : cooling capacity, kW  
 $W$  : compressor work, kW

### Subscripts

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

일반적인 내연기관 자동차의 경우 엔진 폐열을 실내 난방에 사용하기 때문에 실내 난방으로 인한 주행거리 손실은 발생하지 않는다. 이에 반해 전기동력자동차는 폐열량이 충분하지 않아 충전된 전기를 소비하는 전기히터를 사용하여 실내 난방 적용하기 때문에, 주행거리는 상온 주행거리 대비 50~70%에 불과한 상황으로, 전기동력자동차의 열이용 효율 극대화가 가능한 전기동력자동차용 냉난방 모듈화 시스템 개발이 필요하다.

전기승용차에 적용되는 히트펌프 시스템의 경우, 외기 온도 변화에 따라서, 시스템 난방 성능의 변화가 크기 때문에, 전기차에 적용하기 위한 난방 부하와 히트펌프 시스템의 난방능력의 부조화로 인하여, 현재 양산을 계획하고 있는 히트펌프 시스템의 경우, 히트펌프 시스템과 전기히터의 사용을 난방부하에 따라서, 소비전력 저감을 위한 제어기술을 개발하고 있는 상황으로, 본 연구에서는 외기부하의 영향을 최소화하기 위하여, 냉난방 모듈화를 통한 폐열을 활용하는 방안에 대한 연구를 진행할 예정이다.

전기동력 자동차의 핵심부품인 배터리의 겨울철 저온으로 인한 성능 저하 현상 및 여름철 고온으로 인한 배터리 내구성

## 1. 서론

세계적으로 전기동력을 활용하는 친환경 자동차 시장이 환경문제에 대한 관심 증가로, 급속히 확대되고 있으며, 2022년 이후에는 내수 판매의 40%이상을 친환경차가 차지할 수 있도록 목표하고 있기 때문에 전기동력자동차의 상품성 향상,

문제를 해결하기 위하여, 냉각수를 활용하여, Heating과 Cooling을 진행하고 있는 상황으로, 냉난방 시스템과 배터리 연계를 진행하게 되면, 배터리 열관리를 위한 소모전력을 줄일 수 있고, 능동적인 배터리 열관리가 가능할 수 있다.

최근에 들어서, 전기승용차에 히트펌프를 적용하기 위해서 연구되고 있는 기술로, Woo et al.[1]은 공기열원과 폐열원의 이중열원 이용한 전기자동차용 히트펌프의 난방 운전 특성에 대해서 고찰하였으며, Choi et al.[2]는 공랭식 히트펌프에 대해서 동절기 외기온도에 따른 공랭식 히트펌프 시스템의 성능평가를 통해 히트펌프 시스템의 외부 환경오인에 따른 효율 향상에 대해서 실험적 연구를 진행하였고, Kim et al.[3]은 이차 루프 히트펌프를 시스템에 사용한 전기 자동차의 열관리 성능을 평가하기 위한 모델을 GT-Suite 환경에서 해석하여 연구를 진행하였다.

기존에 연구된 논문들에서는 주로 공기 열원을 이용한 히트펌프에 대한 연구가 주로 이루어졌으며, HVAC에서 냉매와 공기가 직접 열교환하여, 케인에 냉난방하는 방식의 연구가 주로 이루어졌다. 냉각수 열원을 사용하여 간접식 냉난방 시스템의 개발이 필요한 상황이다. 수열원 간접식 냉난방 시스템은 저온시 공랭식 열교환기의 착상 문제 및 열원 부족 등을 고려하지 않아도 되기 때문에, 히트펌프의 성능을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 냉각수를 사용하는 전기구동 부품들의 폐열원을 사용하는 냉난방 모듈 시스템에 대한 냉방 성능을 분석하고자 연구를 수행하였다. HVAC 내기 풍량, HVAC 내기 온도에 따른 냉방 성능 비교 분석이 이루어질 수 있도록 실험적인 연구를 수행하였다.

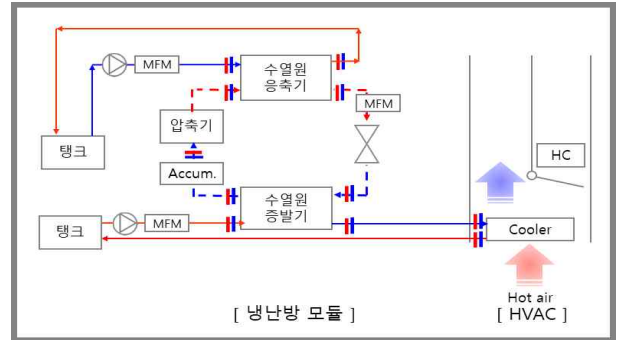
## 2. 실험 장치 및 방법

냉각수 폐열원을 사용한 냉난방 모듈 시스템은 전동식 압축기(Electric compressor), 수열원 응축기(Coolant-sourced condenser), 수열원 증발기(Coolant-sourced evaporator), EEV(Electric Expansion Valve), 어큐뮬레이터(Accumulator), 히터코어(Heater core), 쿨러(Cooler) 등으로 구성되어 있다.

수열원 응축기는 고온고압의 냉매를 전자부품들의 폐열을 적용한 냉각수와 열교환을 통하여서, 액체 상태의 냉매로 만들며, 흡열한 냉각수를 이용하여, 난방에 이용하게 적용하였으며, 수열원 증발기는 저온저압의 냉매를 전자부품들의 폐열을 적용한 냉각수와 열교환을 통하여서, 기체 상태의 냉매로 만들며, 방열된 냉각수를 이용하여 난방에 이용하게 적용하였다. 구성 부품에 대한 상세 사양은 Table 1과 같다.

냉난방 모듈 시스템 성능을 평가하기 위한 실험 장비의 배치도는 Fig. 1과 같다.

본 연구에서는 냉난방 모듈 시스템에 대한 냉방 성능 특성을 분석하기 위하여, 실험적으로 진행하였다. 냉난방 모듈 시스템의 적정 냉매량을 연구하기 위해서, 먼저 적정 냉매량 평가를 진행하였으며, HVAC 내기 풍량 및 내기 온도 조건에 대한 변화를 평가 분석하였다. 본 연구의 실험 조건은 Table 2와 같다.



[그림 1] 냉난방 모듈 시스템 평가 개요

[표 1] Specification of Tested System Component

Electric Compressor	Type	Scroll
	Displacement	33.0 cc/rev
Coolant-sourced Condenser	Type	Plate Heat Exchanger
	Layers NO.	40 Layer
	Core Size (L*D*H)	210*65*115mm
Coolant-sourced Evaporator	Type	Plate Heat Exchanger
	Layers NO.	30 Layer
	Core Size (L*D*H)	210*65*100mm
Expansion Valve	Type	Electric
Accumulator	Volume	300cc
Heater Core	Core Size (W*D*H)	255*215*45mm
Cooler	Core Size (W*D*H)	210*163*27mm

[표 2] Cooling & heating module system test matrix

Electric Compressor	Speed [RPM]	5,000
Coolant-sourced Condenser	Temperature [C]	50
	Flow rate [liter/min]	15
Coolant-sourced Evaporator	Temperature [C]	10
	Flow rate [liter/min]	15
Exterior-side	Temperature [C]	35
Interior-side	Flow rate [m <sup>3</sup> /h]	300, 400, 450
	Temperature [C]	27, 35, 42
EEV	Step [-]	800

수열원 열교환기의 성능은 냉각수측과 냉매측의 방열량을 계산하여, 특성을 분석하고, 냉방 성능은 공기측과 냉각수측의 방열량을 계산하여, 특성을 분석하였다.

$$\dot{Q}_{ref} = \dot{m}_{ref}(h_{ref,i} - h_{ref,o}) \quad (1)$$

Where,  $\dot{m}_{ref}$  denotes refrigerant side mass flow rate,  $h_{ref,i}$  denotes refrigerant side inlet enthalpy,  $h_{ref,o}$  denotes refrigerant side outlet enthalpy

$$\dot{Q}_{coolant} = \dot{m}_c C_{p_c}(T_{c,i} - T_{c,o}) \quad (2)$$

Where,  $\dot{m}_a$  denotes coolant side mass flow rate,  $C_{p_c}$  denotes coolant side specific heat,  $T_{a,i}$  denotes coolant side inlet temperature,  $T_{a,o}$  denotes coolant side outlet temperature

$$\dot{Q}_{cooling} = \dot{m}_a \rho_a (h_{a,i} - h_{a,o}) \quad (3)$$

Where,  $\dot{m}_a$  denotes air side volume flow rate,  $\rho_a$  denotes air side density,  $h_{a,i}$  denotes air side inlet enthalpy,  $h_{a,o}$  denotes air side outlet enthalpy

### 3. 실험 결과 및 고찰

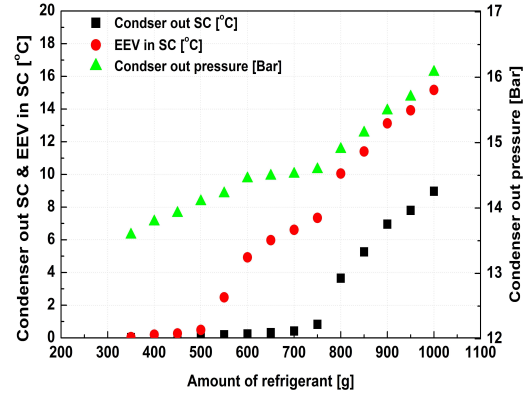
#### 3.1 냉난방 모듈 시스템의 냉매 충전량 평가

본 연구에서는 냉난방 모듈 시스템에 대한 냉방 성능 특성을 분석하기 위하여 일단, 냉난방 모듈 시스템의 냉매 충전량 평가를 진행하였으며, 외기온도 35℃, 내기온도 27℃, 내기풍량 450m<sup>3</sup>/h, 수냉식 응축기 입구 온도는 50℃, 유량은 15liter/min, 수냉식 증발기 입구 온도는 15℃, 유량은 15liter/min, 전동식 압축기 회전수는 5,000RPM, EEV 개도는 800Step에서 평가를 하였다.

냉매를 350g부터 50g씩 증가시켜서, 1000g까지 냉매 충전량을 평가하였다. 그 결과는 Fig. 2로 나타내었다. 수냉식 응축기 출구 과열도는 냉매 충전량 750g에서 0.8℃로 생성되어, 가파르게 과열도가 증가한다. EEV 입구 과열도는 냉매 충전량 550g부터 2.5℃로 생성되어서, 냉매 충전량 600g에서 750g까지 구간은 서서히 과열도가 증가하는 경향을 보이다가 냉매 충전량 750g부터 가파르게 과열도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 수냉식 응축기 출구 압력은 냉매 충전량 350g에서 600g까지 증가하는 경향을 보이고 있으나, 냉매 충전량 600g에서 750g까지는 압력이 증가하지 않고, 일정하게 압력을 유지하는 구간을 확인 할 수 있다. 냉매 충전량 750g 이후부터는 다시 가파르게 증가하는 경향을 보이고 있다.

공조 시스템의 적정 냉매량을 선정하기 위해서는 과열도는 5~10℃에서 형성이 되어야지 적정한 냉매량으로 할 수 있다.

Compressor speed : 5,000RPM, Exterior temperature : 35℃  
Interior temperature : 27℃, Interior flow rate : 450m<sup>3</sup>/h, EEV opening step : 800step  
Coolant-sourced condenser coolant temp. : 50℃, flow rate : 15liter/min  
Coolant-sourced evaporator coolant temp. : 15℃, flow rate : 15liter/min



[그림 2] 냉난방 모듈 시스템의 냉매 충전량 평가

이 점을 고려해보면 냉매 충전량 750g에서 EEV 입구 과열도가 7.3℃로 생성이 되며, 수냉식 응축기 출구 압력도 냉매 충전량 600g에서 750g까지 압력이 일정한 구간이 있어서, 적정 냉매량을 750g에서 선정해야 하지만, 냉매 충전량 750g에서 수냉식 응축기 출구 과열도가 0.8℃로 과열도가 너무 짧아서 선정하지 않다. 냉매 충전량 800g에서는 수냉식 응축기 출구 과열도는 3.7℃이며, EEV 입구 과열도는 10.0℃이다. 이 점을 고려하여, 냉매 충전량 800g을 적정 냉매량으로 선정하였다.

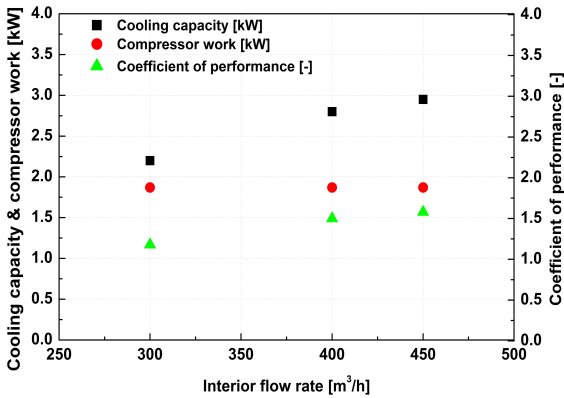
#### 3.2 HVAC 내기 평가 조건 변화의 영향

본 연구에서는 냉난방 모듈 시스템에 대한 냉방 성능 특성을 분석하기 위해서, 외기온도 35℃, 수냉식 응축기 입구 온도는 50℃, 유량은 15liter/min, 수냉식 증발기 입구 온도는 15℃, 유량은 15liter/min, EEV 개도는 800Step, 전동식 압축기 회전수는 5,000RPM에서 평가를 하였으며, HVAC 내기 온도를 27, 35, 42℃로 변화를 주었고, 내기 풍량을 300, 400, 450m<sup>3</sup>/h로 변화를 주면서 냉난방 모듈 시스템의 냉방 성능을 분석하였다.

HVAC 내기 풍량을 300m<sup>3</sup>/h에서 400m<sup>3</sup>/h으로 증가시키면, 냉방 성능은 약 0.60kW정도 증가하였으며, 전동식 압축기 소비전력은 하나도 증가하지 않았다. HVAC 내기 풍량을 400m<sup>3</sup>/h에서 450m<sup>3</sup>/h으로 증가시키면, 냉방 성능은 약 0.15kW정도 증가하였으며, 전동식 압축기 소비전력은 하나도 증가하지 않았다.

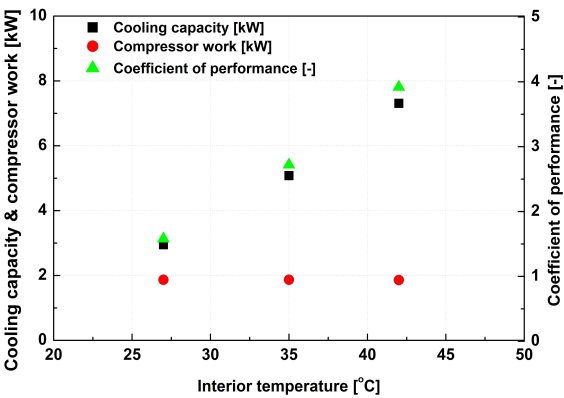
HVAC 내기 온도를 27℃에서 35℃로 증가시키면, 냉방 성능은 약 2.13kW정도 증가하였으며, 전동식 압축기 소비전력은 하나도 증가하지 않았다. HVAC 내기 온도를 35℃에서 42℃로 증가시키면, 냉방 성능은 약 2.22kW정도 증가하였으며, 전동식 압축기 소비전력은 하나도 증가하지 않았다.

Exterior temperature : 35°C, Interior temperature : 27°C  
 Compressor speed : 5,000RPM, EEV opening step : 800step  
 Coolant-sourced condenser coolant temp. : 50°C, flow rate : 15liter/min  
 Coolant-sourced evaporator coolant temp. : 15°C, flow rate : 15liter/min



[그림 3] HVAC 내기 풍량에 따른 냉방 성능, 전동식 압축기 소비전력, 성능계수 그래프

Exterior temperature : 35°C, Interior flow rate : 450m³/h  
 Compressor speed : 5,000RPM, EEV opening step : 800step  
 Coolant-sourced condenser coolant temp. : 50°C, flow rate : 15liter/min  
 Coolant-sourced evaporator coolant temp. : 15°C, flow rate : 15liter/min



[그림 4] HVAC 내기 온도에 따른 냉방 성능, 전동식 압축기 소비전력, 성능계수 그래프

냉난방 모듈 시스템에서 HVAC 내기 평가 조건을 변화 시키는 것은 전동식 압축기 소비동력에는 영향을 미치지 않고, 냉방 성능에만 영향을 미치는 것을 확인하였다. 전동식 압축기 소비동력이 일정하게 유지되는 이유는 수냉식 응축기 및 수냉식 증발기를 사용하여 일정한 온도 및 유량을 공급해 주기 때문이다.

이처럼 냉난방 모듈 시스템은 외기 및 내기 평가 조건에 영향을 받지 않고, 안정적으로 작동하는 시스템인 것을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 냉난방 모듈 시스템의 냉방 성능 특성을 확인하기 위해서, 다양한 조건에서 평가를 진행하였다.

1) 적정 냉매량은 수냉식 응축기 출구 과열도 및 전자

팽창밸브 입구 과열도를 고려하여, 적정 냉매량은 800g으로 선정하였다.

2) HVAC 내기 평가 조건을 변화시키면, 냉방 성능은 증가하나, 전동식 압축기 소비동력은 일정한 경향을 확인하였다.

3) 냉난방 모듈 시스템은 외기 및 내기 조건보다 수냉식 열교환기의 조건에 영향을 받는 것으로 확인하였다.

추후에 수냉식 응축기 및 수냉식 증발기의 냉각수 입구 온도, 냉각수 입구 유량 조건을 변화시켜서, 냉방 성능 평가를 진행할 예정이며, 냉난방 모듈 시스템의 난방 성능 분석도 진행할 예정입니다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부에서 지원하는 산업기술 혁신사업(자동차산업핵심기술개발사업, 과제번호 : 20003988)과 산업기술혁신사업(시장자립형 3세대 xEV 산업육성 사업, 과제번호 : 20011653)에 의해서, 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

[1] Hyoung Suk Woo,, Jae Hwan Ahn, Myuong 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), pp180-186, 2013

[2] Yichel 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

[3] Taewoo Kim, Jaejune Lee, Dogyun Kim, Yunsang Lee, Gumbae Choi, Sangshin Lee, Sungjin Park, "Performance Estimation of Thermal Management System using Secondary Loop Heat Pump System for an Electric Vehicle" KSAE Fall Conference Proceedings, pp,1350-1350, 2019