

무공해 자동차용 수열원 히트펌프 시스템의 난방 성능에 관한 실험적 연구 이 대 웅*

한라비스테온공조 연구본부

An Experimental Study on the Heating Performance of Coolant Heat Source Heat Pump System for Zero Emission Vehicles

Daewoong Lee*

Research Division, Halla-Visteon Climate Control Corporation, 95 Sinilseo-ro, Daedeok-gu, Daejeon 306-230, Korea
(Received 21 February 2014 / Revised 13 April 2014 / Accepted 14 April 2014)

Abstract : This study presented the feasibility of a coolant heat-source heat pump system as an alternative heating system for electrically driven vehicles. Heat pumps are among the most environmentally friendly and efficient heating technologies in residential buildings. In various countries, electric mobile devices such as EV, PHEV, and FCEV, have been mainly concerned with heat pumps for new mobile markets. The experiments herein were conducted for various ambient temperatures and coolant temperatures to reflect the winter season. The system, a coolant heat-source heat pump, consisted of an inside heat exchanger, an outside heat exchanger, a motor driven compressor, an electronic expansion valve, and plumbing parts. For the experimental results, the maximum heating capacity and air discharge temperature are up to 6.3 kW and 62°C respectively at an ambient temperature of 10°C, and coolant at 10°C. However, at -20°C ambient temperature and -10°C coolant temperature, conditions were insufficient to warm the cabin as the air discharge temperature was 13°C.

Key words : Coolant source heat pump system(수열원 열펌프 장치), Coefficient of performance(성능 계수), Inside heat exchanger(실내 열교환기), Outside heat exchanger(실외 열교환기), Electronic expansion valve(전자 팽창밸브), 3-way valve(냉매 전환 밸브)

Nomenclature

c_p : specific heat, kJ/kg·K
 D : depth, mm
 h : enthalpy, kJ/kg
 H : height, mm
 L : length, mm
 \dot{m} : mass flow rate, kg/h
 Q : heat capacity, kW
 T : temperature, °C
 W_c : work, kW

Subscripts

a : air
 w : water
 c : compressor
 i, o : inlet, outlet

1. 서론

화석연료 고갈과 지구온난화의 위협에 대한 대응 방안으로 화석에너지 사용량을 줄이고, 친환경 신재생에너지의 사용을 넓혀가기 위한 노력들이 경주되고 있는데 GHG 규제(green house gas regulation)

*Corresponding author, E-mail: dlee6@hvccglobal.com

가 심화되면서 자동차 산업도 큰 변혁을 맞이하고 있다. 우선 미국의 경우 EPA를 중심으로 차량의 연비 측정에 SC03 모드를 포함하여 에어컨을 가동하였을 때 연비에 미치는 영향을 평가하고, GHG 규제 최종법안에는 에어컨 크레딧(credit)로 에어컨에서의 CO₂ 배출을 줄이기 위한 친환경적인 기술과 노력 외에도 Super 크레딧을 부여하여 PHEV나, EV 또는 FCEV와 같은 친환경차의 개발을 장려하고 있다.¹⁾

유럽의 경우 2020년 전체 사용되는 화석연료의 20%를 신재생에너지로 대체하여 CO₂ 발생을 20% 줄이고, 나아가 전체 에너지 사용량을 20% 저감하겠다는 목표를 수립하고 있다. 여기서 히트펌프 시스템은 가장 친환경적이고, 효율적인 난방기술로 평가받고 있으며, 대부분의 유럽에서 빌딩과 주택의 난방 대체 기술로 주목을 받고 있다. Jakobs와 Laue²⁾는 빌딩의 여러 사용 환경을 고려한 난방시스템으로 히트펌프 시스템을 설치, 운전하여 현재의 난방시스템을 대체하기에 충분함을 입증하였다.

김영일 등³⁾은 발전소 설비 기기에서 발생하는 폐열이나, 소규모 연료전지에서 화학 반응시 발생하는 열원을 회수하여 저 열원에서 히트펌프 시스템이 충분히 경제성을 가지고 있음을 밝혔다. 뿐만 아니라 하천수와 같이 거의 회수 가치가 없는 열원으로부터도 히트펌프 시스템을 이용하여 난방과 온수공급에 충분한 열원을 얻을 수 있었다고 연구결과에 밝히고 있다.

하지만 히트펌프 시스템에는 해결해야 할 몇 가지 문제점들이 있는데, 그중의 하나가 영하의 날씨에서 히트펌프의 저온 운전성 향상기술과 실외열교환기에서 응축수 빙결로 인한 착상 문제이다. 외기 온도가 낮아지면 난방성능이 급격히 저하되기 때문에 이를 보완하기 위하여 다양한 저온 운전 향상 기술들이 연구되고 있다. 그 기술들 중의 하나가 2단 압축가스 인젝션(gas injection) 히트펌프 기술로 -20°C와 같은 외기에서도 난방 성능을 확보할 수 있는 것으로 알려져 있다. 구성은 실내열교환기에서 방열을 한 냉매를 1차로 팽창하여 수액기에서 기체 냉매와 액체냉매로 분리하고, 기체냉매는 압축기로 유입되어 압축일을 수행하는 한편, 액체냉매는 2차

로 팽창되어 실외열교환기로 유입하여 2단 압축을 함으로써, 압축기의 토출 온도 감소, 소요 동력의 감소, 난방성능 향상 및 히트펌프 시스템의 성능계수를 향상시키는 기술이다.^{4,5)}

이대웅 등^{6,7)}은 무공해 자동차에서 히트펌프 시스템에 대하여 성능에 미치는 설계인자를 찾기 위하여 실내열교환기, 실외열교환기, 팽창밸브 및 공기로부터 열을 회수하는 공랭식 히트펌프 시스템과 냉각수로부터 열을 회수하는 수열원 히트펌프 시스템 방식에 대하여 성능실험을 하였고, 성능에 미치는 영향들에 대하여 각각 분석하였다. 특히 열원회수 방식에 따라 난방성능에 미치는 영향이 컸으며, 냉각수로부터 열원을 회수하는 수열원 히트펌프 방식이 공기열원방식 대비 외기온도가 10°C, 냉각수 온도가 10°C인 조건에서 36% 정도 난방성능이 우수하다고 보고하였다.

Schussler 등⁸⁾은 2012년 9월에 종료된 “e-Performance” 프로젝트에서 Audi R8 EV 차량에 적용할 배터리 통합냉각 시스템, 열관리 시스템에 대한 연구결과와 함께, 차량의 난방 장치로 전장 부품으로부터 폐열을 회수하는 히트펌프를 통합 냉난방 시스템으로 구성하여 자동차 전면 유리의 김서림 문제를 해결하면서 실내를 난방 하는데 소요되는 에너지를 최대 50%까지 저감하였다고 발표하였다.

본 연구에서는 자동차용 난방 기술로 수열원식 히트펌프 시스템에 대하여 연구하였다. 외기 온도와 냉각수의 온도를 변화하면서 히트펌프 시스템에서 얻을 수 있는 난방 용량과 차 실내로 토출되는 공기온도를 살펴보고, 이때 전동압축기의 회전수를 변경하면서 성능에 미치는 영향들에 대하여 실험적으로 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 수열원 히트펌프 난방성능 시험에 사용된 장치의 구조를 나타내고 있다. 시험 장치는 일반적으로 실제 차량에서 작동하는 냉·난방 시스템의 작동을 모사할 수 있으며 온도와 습도, 풍량 변화 등 다양한 환경조건과 압축기의 회전수를 변화하면서 시험할 수 있다.

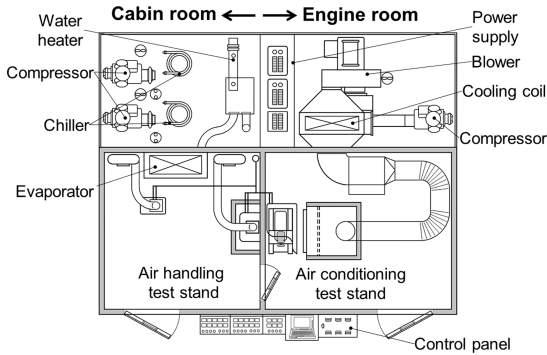


Fig. 1 Schematic of heat pump test apparatus

시험장치의 구성은 실내룸(cabin room)과 엔진룸(engine room), 제어부(control panel)로 구분할 수 있으며, 먼저 실내룸은 자동차의 실내를 모사하여 공기분배장치(air handling test stand)와 실내 온도와 습도를 제어할 수 있는 공조기(air conditioning test stand)가 위치하고 있다. 브레인 냉각기와 전기히터를 이용하여 -20 ~ 60°C까지 온도 조절이 가능하고, 습도는 스팀 발생기에서 10 ~ 90% 까지 제어가 가능하다. 엔진룸은 실제 차량의 엔진룸에 위치하는 에어컨 시스템의 구성부품을 장착하여 시험할 수 있으며, 냉방장치와 온도와 습도를 제어하는 공조기가 설치되어 있다. 40 HP의 압축기를 사용하는 냉동장치와 전기히터를 이용하여 온도 조절을 하고 있으며, 340 ~ 10,000 m³/h 범위 내에서 풍량 제어가 가능한 원심 회전식 송풍기로 차량이 주행할 때 외부 열교환기의 전면으로 불어오는 주행풍을 모사할 수 있다. 또한 냉동장치와 전기히터로 차량 엔진의 냉각수를 모사하여 약 -20 ~ 108°C 냉각수 온도가 제어된다. 그밖에 전동압축기의 투입일을 측정하기 위한 전력계, 구동토크 및 히트펌프 시스템내 순환하는 냉매량을 측정하기 위한 질량유량계가 설치되어 있다. 그리고 이들 실내룸과 엔진룸의 각종 환경과 시험조건은 제어부에 설치된 컴퓨터로 제어 및 모니터링되며, 데이터도 동시에 취득된다.

히트펌프 시스템의 난방 능력은 식 (1)과 같이 정의되며, 시험 장치에서 측정되는 측정값으로부터 계산된다.

$$Q_a = \dot{m} \cdot (h_{ai} - h_{ao}) \quad (1)$$

히트펌프 시스템의 성적계수는 압축기의 투입일

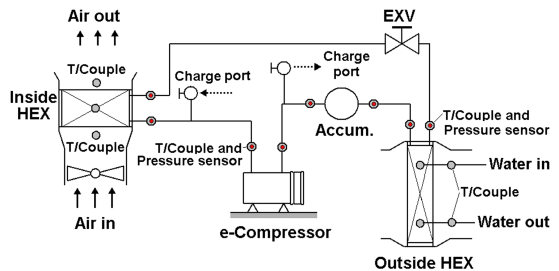
대비 난방 능력으로 정의되며 식 (2)와 같이 표현된다.

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

2.2 실험 방법

Fig. 2에 히트펌프 시스템의 구성도와 각 시험부품의 사양에 대하여 나타내었다. 히트펌프 시스템의 난방 성능 시험은 각 구성품을 실차 장착상태와 동일하게 시험 장치에 장착하여 시험하였다. 먼저 Fig. 2(a) 히트펌프 시스템의 구성도를 보면, 각 시험부품의 입구와 출구에는 모두 열전대(thermo couple)와 압력센서(pressure transducer)를 설치하여 온도와 압력을 측정하였고, 냉매의 흐름량과 공기의 양 및 냉각수의 흐름량도 각각 유량계로 측정하였다. 그밖에 외기온도와 냉각수 온도 및 전동 압축기의 투입일량도 함께 측정하였다.

본 실험에서 히트펌프 시스템은 영하의 외기온에서 발생할 수 있는 외부열교환기의 착상과 저온 운전성을 향상하기 위하여 차량에서 순환하는 냉각수의 폐열을 활용하는 수열원식 히트펌프 시스템으로 구성하였다. 상세 시험조건은 Table 1에 나타나 있다. 수열원식 히트펌프 시스템의 난방 성능 시험 시험환경변수로는 공기의 온도와 냉각수의 온도를 변화



(a) Schematic of water source heat pump system

Component	Specifications
Inside HEX	230L×250H×35D mm
Outside HEX	176L×112H×95D mm
Refrigerant	R134a, 750g
Compressor	Scroll (Electric driven)
	33 cc/revolution

(b) Specification of heat-pump system

Fig. 2 Schematic and geometric parameters of coolant source heat pump system

Table 1 Test conditions for heat pump system

Cabin room	
Air temperature	-20, 0, 10°C
Air volume flow rate	300 m ³ /h
Engine room	
Water temperature	-10, 0, 10°C
Compressor rotational speed	3000, 4500, 6000 rpm
Water flow rate	12 ℓ/min

하면서 시험하였고, 이때 전동 압축기의 회전수도 변경하여 성능에 미치는 영향을 함께 살펴보았다. 히트펌프 시스템내 흐르는 냉각수의 유량은 12 ℓ/min으로 일정하게 유지하였다.

3. 실험결과 고찰

3.1 냉매량 결정 시험

히트펌프 시스템에 충전되는 냉매량은 성능에 영향을 미치는 중요한 변수이므로, 본 연구에서는 시스템 내 적정한 냉매량 충전을 위하여 냉매량 결정 시험을 우선적으로 진행하였다. Fig. 3은 냉매 충전량 결정 시험 결과를 보여주고 있다.

냉매의 충전량이 증가함에 따라 시스템의 과냉각 온도와 압력이 함께 증가하다가 냉매량이 약 700 g 이상에서 과냉각 온도와 압력이 급격히 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 750 g의 냉매량을 히트펌프 시스템에 적합한 적정 냉매 충전량으로 선정하였다.

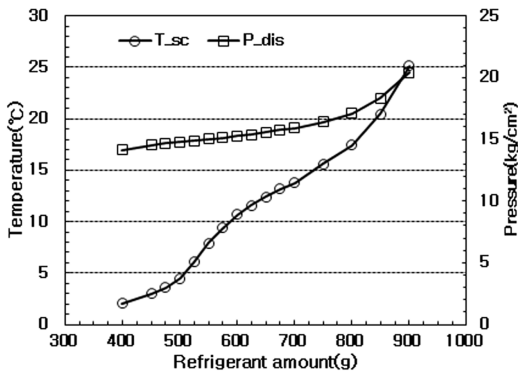


Fig. 3 Experimental results of refrigerant charge amount test

3.2 난방 성능 실험

Fig. 4는 외기온도가 각각 -20°C, 0°C, 10°C와 냉각수 온도가 각각 -10°C, 0°C, 10°C일 때 압축기의 회전수에 따라 난방 능력 시험결과를 나타내고 있다. 외기 온도와 냉각수 온도가 높을수록 방열량은 증가하며, 압축기 회전수가 높을수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 외기 온도와 냉각수 온도가 저온 운전 조건에 해당하는 각각 -20°C와 -10°C에서도 최소 2.8 kW 정도의 난방 능력을 나타내고 있다.

Fig. 5는 외기 온도가 각각 -20°C, 0°C, 10°C와 냉각수 온도가 각각 -10°C, 0°C, 10°C일 때 압축기의 회전수에 따라 난방 성능계수를 보여주고 있다. 성능계수는 외기 온도와 냉각수 온도가 낮을수록 증가하고 있으며, 외기 온도와 냉각수 온도가 각각 -20°C, -10°C의 저온 운전 조건에서 성능계수의 증가는 외기 온도와 냉각수 온도가 높을 때 보다 상대적

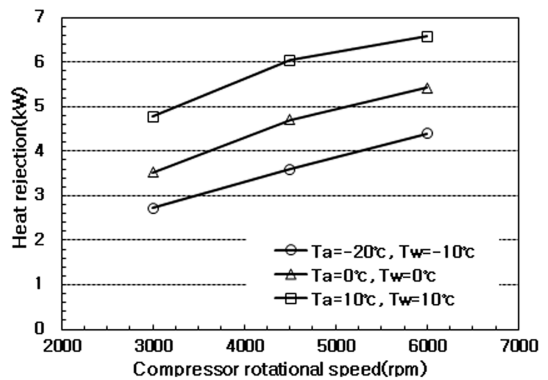


Fig. 4 Experimental results of variation of heating capacity with compressor rotational speed

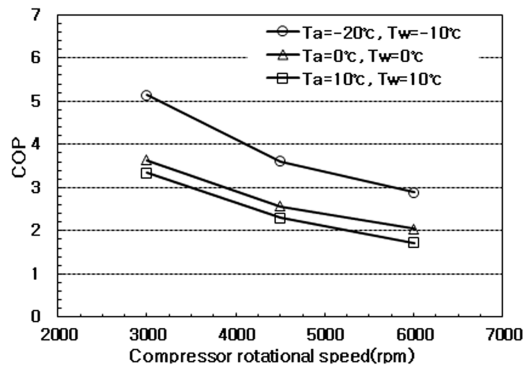


Fig. 5 Experimental results of variation of COP with compressor rotational speed

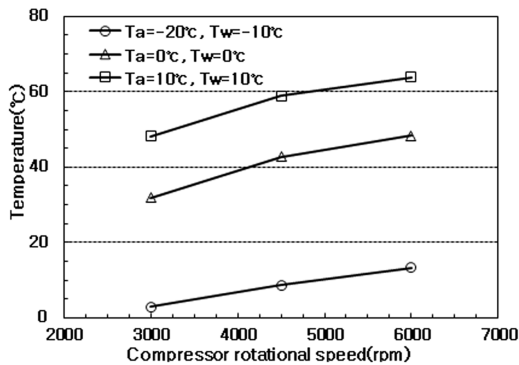


Fig. 6 Experimental results of variation of air discharge temperature with compressor rotational speed

으로 순환 냉매량이 작기 때문으로 보인다. 즉, 영하의 저온에서는 냉매의 증발압력이 낮아지고, 비체적이 증가하여 냉매 흐름량이 적어지고 유량이 급격히 감소하여 압축기의 투입일이 작아지기 때문이다.

Fig. 6은 외기 온도가 각각 -20°C, 0°C, 10°C와 냉각수 온도가 각각 -10°C, 0°C, 10°C일 때 압축기의 회전수에 따라 공조장치에서 토출되는 공기의 온도를 보여주고 있다. 외기 온도와 냉각수 온도가 0°C 정도만 되어도 토출되는 공기 온도는 약 32 ~ 48°C 정도로 실내를 난방하기에는 충분할 것으로 보인다. 하지만, 외기 온도가 -20°C이고, 냉각수 온도가 -10°C에서는 압축기 회전수에 따라 다르지만 토출되는 공기 온도가 최고 13°C 정도로 겨울철 차 실내를 난방하기에는 충분치 않다. 즉, 영하이하의 저온 환경에서 난방 능력을 살펴보면 차 실내 난방에 어느 정도 가능성이 있는 것으로 보이나, 토출되는 공기의 온도를 보면 별도의 보조 난방장치가 필요하다고 할 수 있겠다.

4. 결론

수열원식 히트펌프 시스템에 대하여 외기온도와 냉각수 온도를 변화하면서 난방성능에 미치는 영향에 대하여 살펴보고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시험조건 내에서 외기 온도와 냉각수 온도가 높을수록 난방 능력과 토출 공기온도는 증가하였으며, 성능계수는 감소하는 경향을 나타내었다.
- 2) 외기 온도와 냉각수 온도가 각각 0°C일 때, 난방 능력은 3.5 ~ 4.0kW, 토출 공기온도는 31.8 ~ 48.4°C

및 성능계수는 2.0 ~ 3.6 정도로 히트펌프만으로 차 실내 난방은 가능할 것으로 보인다.

- 3) 외기 온도가 -20°C이고, 냉각수 온도가 -10°C일 때, 난방능력은 2.7 ~ 4.4 kW, 토출 공기온도는 3.0 ~ 13.4°C로 차 실내를 난방하기에는 충분하지 않았다.

지금까지의 수열원식 히트펌프 시스템의 시험 결과에 따르면 외기온도가 낮은 겨울철에도 착상 없이 저온운전이 가능하였으며, 냉각수로부터 어느 정도 열 회수가 가능하다는 것을 확인하였다. 다만 토출되는 공기의 온도로 볼 때 -20°C의 외기조건과 -10°C의 냉각수 조건에서의 히트펌프 시스템은 토출 공기온도가 충분치 않아 난방에 이용하기에는 어려워 보이며, 별도의 난방장치 등이 필요함을 알 수 있다. 또한 본 시험은 정상상태에서의 실험결과로 실제의 차량에서는 냉각수 양이 한정되어 있기 때문에 본 실험결과와는 다른 경향의 난방 성능을 나타낼 수 있다. 하지만 0°C 정도의 외기환경에서는 수열원식 히트펌프 시스템의 운전은 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부가 지원하는 지식경제기술 혁신사업의 일환으로 수행되었다. 도움을 주신 관계자 여러분께 감사하는 바이다.

References

- 1) M. S. Kwon, "Development Trends and Challenges of Environmental Friendly Vehicles," KSAE, HEV and FCEV Workshop, Special Material, 2007.
- 2) R. Jackobs and H. J. Laue, "Energy Efficiency and CO₂ Reduction in the Building Stock - The Role of the Heat Pumps," International High Performance Building Conference, Purdue, No.3283, 2010.
- 3) C. H. Yang, Y. I. Kim and K. S. Chung, "Economical Analysis of a Small Capacity Water Source Heat Pump Utilizing Unused Energy of Underground Water Tank," SAREK, Proceeding of Summer, pp.572-575, 2012.

- 4) M. Nonaka, "High Performance Room Air Conditioner Using Two-stage Compression Gas Injection," JSME, Vol.108, No.1045, pp.940-941, 2011.
- 5) D. W. Lee, D. H. Oh and Y. J. Jee, "Investigation of R134a Heat Pump System for Zero Emission Vehicle," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.595-600, 2011.
- 6) C. H. Park, Y. J. Jee and D. W. Lee, "Development Trends of Heat Pump System for Electric Driven Vehicles," Auto Journal, KSAE, Vol.33, No.12, pp.29-35, 2011.
- 7) D. W. Lee, D. H. Oh and Y. J. Jee, "Experimental Study on the Performance of R134a Heat Pump System for Zero Emission Vehicle," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.429-434, 2012.
- 8) M. Schussler, I. C. Allmann, P. Keck and C. Bohmann, "Research Project e-Performance Aspects of Thermal Management (TM) for Next Generation BEVs," 2nd International Conference of Thermal Management for EV/HEV, Germany, IQPC, 2012.