

히트펌프에서 탄화수소냉매 적용에 관한 실험적 연구

유성연[†]·박동성*·강태석*·이제묘**

An Experimental Study on Application of Hydrocarbon Refrigerants for Heat Pump

Seong-Yeon Yoo, Dong-Seong Park, Tae-Seok Kang and Je-Myo Lee

Key Words: Heat pump(히트펌프), Hydrocarbon refrigerant(탄화수소냉매), Pressure ratio(압력비), Volumetric efficiency(체적효율), Adiabatic efficiency(단열효율), COP(성적계수)

Abstract

This research describes the application of hydrocarbon refrigerants for heat pump system which is needed for fish farm. Tested refrigerants are HCFC-22 and hydrocarbon refrigerants(CARE 50 and ASR-20). CARE 50 is mixture of R-290 and R-170, and ASR-20 is mixture of R-152a, R-290 and other additives. Heat pump consist of shell and tube heat exchanger, scroll compressor, expansion valve and accumulator. Manual expansion valve is used for testing of wide range evaporating temperature. Hydrocarbon refrigerants show a good performance as an alternative for HCFC-22 in the range of evaporating temperature from -6°C to 6°C .

기 호 설 명

C : 물의 비열 [kJ/kg · K]

COP : 성적계수

\dot{m}_{actual} : 실제 냉매순환유량 [kg/s]

\dot{m}_{evap} : 증발기측 수량 [kg/s]

\dot{m}_{ideal} : 이론 냉매순환유량 [kg/s]

\dot{m}_{cond} : 응축기측 수량 [kg/s]

P_d : 압축기 토출압력 [kPa]

P_r : 압력비

P_s : 압축기 흡입압력 [kPa]

Q_{cond} : 방열량 [kW]

Q_{evap} : 냉각능력 [kW]

T : 온도 [$^{\circ}\text{C}$]

W_c : 압축기 소비동력 [kW]

W_{ideal} : 압축일 [kW]

그리스 문자

η_v : 체적효율 [%]

η_{ad} : 단열효율 [%]

하첨자

in : 입구측

out : 출구측

h : 난방

c : 냉방

[†] 충남대학교 기계설계공학과

E-mail : syyooh@cnu.ac.kr

TEL : (042)821-6646 FAX : (042)822-7366

* 충남대학교 대학원

** 한국기초과학지원연구원

1. 서 론

지구 오존층의 파괴물질을 규제하기 위한 몬트리올 의정서에 우리나라가 합의한 이후 국내에서는 규제물질인 CFC계 냉매가 사용이 중지되었다. CFC계 냉매의 과도기적 중간냉매인 HCFC계 냉매는 아직 가정용에어컨이나 산업용 냉동기, 히트펌프 등에 사용중이나 CFC계 냉매와 HCFC계 냉매는 빠른 속도로 HFC계 냉매로 대체되고 있다.⁽¹⁾ HFC계 냉매는 CFC계 냉매의 큰 약점인 ODP(Ozone Defection Potential)를 제거하기 위해 개발되어 ODP값이 0이나, GWP(Global Warming Potential)가 큰 단점이 있다. 이외에도 R22와는 다른 성능상의 차이와 윤활유, 압축기, 팽창밸브 같은 주요부품을 변경해야 하는 문제점이 있다.⁽²⁾ 이러한 HFC계 냉매의 단점과 환경상의 문제점을 해결하기 위해 국내·외에서 자연냉매에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 널리 연구되고 있는 자연냉매로는 프로판, 에탄, 이소부탄, 프로필렌 등의 탄화수소계 냉매와 이산화탄소 등이 있다. 탄화수소계 냉매는 HFC계 냉매에 비해 가격이 싸기 때문에 경제적인 이점이 있고 냉매의 효율도 우수하나, 가연성 및 폭발성 등의 단점이 있기 때문에 냉장고 등의 소형 시스템을 중심으로 연구가 진행되고 있다. 근래에 활발한 연구가 시작된 이산화탄소는 가연성이나 발화에 의한 폭발 등의 가능성이 없기 때문에 냉매로서의 안전성은 우수하나, 기존의 냉매에 비해 작동압력이 매우 높은 단점이 있다. 따라서, 높은 작동압력에 대처할 수 있는 연구 등이 현재 활발히 진행되고 있으나 아직은 초기단계의 연구에 머물러 있다.⁽³⁾

따라서, 현재의 시스템에 큰 변화 없이 적용할 수 있는 탄화수소계 냉매에 대한 활발한 연구가 진행 중에 있다. 김기문⁽⁴⁾ 등은 R22의 대체냉매로서 탄화수소계 냉매인 ASR-20을 개발하고, ASR-20a와 ASR-20b의 열역학적 특성실험 및 사이클실험·해석을 수행하였다. 정상진⁽⁵⁾은 R22와 HFC계 냉매인 R410A, 탄화수소계 냉매인 프로판 등의 냉매를 실험 및 해석적인 방법을 통해 비교·분석하였다. 이호생⁽⁶⁾ 등은 탄화수소계 냉매인 프로필렌(R-1270), 프로판(R-290), 이소부탄(R-600a), 에탄(R-170) 등의 냉매를 사용하여 각

각의 냉매에 대한 응축전열특성을 실험적으로 비교, 분석하였다. Bobbo⁽⁷⁾ 등은 프로판, 이소부탄과 다양한 종류의 HFC계 냉매와 혼합한 혼합냉매로 각각의 냉매에 대한 열역학적 특성을 실험적인 방법으로 비교 분석하였다.

본 연구에서는 R22와 탄화수소계 냉매인 ASR-20과 Care 50 등을 5RT급 양어장용 히트펌프 시험장치에 적용한 후 실험을 수행하여 비교분석하고, 각각의 냉매의 열전달 특성 및 히트펌프의 효율에 미치는 특성을 관찰해 보면서, 향후 탄화수소계 냉매를 적용한 히트펌프의 해석자료로서 활용하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

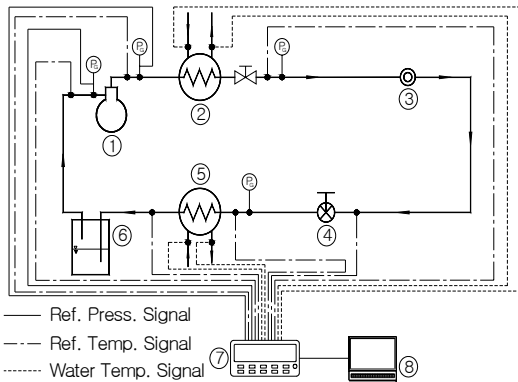
2.1 실험장치

실험장치는 실험을 수행하기 위한 열펌프와 측정장비로 이루어져 있다. 서로 다른 냉매에 대한 실험을 수행하기 위한 실험장치의 사진 및 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 열펌프는 압축기와 응축기, 팽창밸브, 그리고 증발기로 이루어진 간단한 냉동사이클로 이루어져 있다. 본 실험장치에서는 5RT급 스크롤 압축기가 사용되었고 응축기와 증발기는 원통 다관형 열교환기가 사용되었다. 또한 넓은 범위에서의 실험을 위해 수동식 팽창밸브(Saginomiya)를 사용하였다. 그리고, 실험시 증발기에서 미처 증발하지 못한 액냉매에 의한 압축기의 파손에 방지하기 위해 기액분리기를 추가로 장착하였다.

정밀한 측정을 위해 냉동 사이클상에 온도를 측정할 수 있는 열전대를 8개소 설치하고, 압축기 전·후단에 압력센서를 사용하여 고압과 저압의 압력을 측정하였다. 또한, 열교환기에서의 압력강하를 측정하기 위하여 응축기 후단과 증발기 입구측에 압력게이지를 설치하였다. 히트펌프의 열량을 측정하기 위해 응축기와 증발기를 지나는 물배관의 입출구의 온도를 측정하였다. 상기의 총 14개소의 온도 및 압력 데이터는 DAQ를 통해 PC에 2초 간격으로 기록되어지며 압축기의 소비전력을 측정하기 위해 전력계(Yokogawa CW-140)를 설치하고 열교환기를 지나는 물유량은 초음파 유량계(Flexim Flexus ADM 6725)를 사용하여 측정하였다.



(a) Photograph



No.	Item	No.	Item
1	Comp.(ZR61K3)	5	Evap.(Shell&Tube)
2	Cond.(Shell&Tube)	6	Accumulator
3	Sight Glass	7	DAQ
4	Expansion V/V	8	Notebook PC

(b) Schematic diagram

Fig. 1 Photograph and schematic diagram of experimental apparatus

2.2 실험방법

실험을 수행하면서 적정 냉매량을 주입하기 위해 액관 측에 설치된 Sight Glass와 증발온도와 압력 등을 기준으로 냉매를 주입한다. 냉매의 충전량은 별도로 준비된 전자저울을 사용하여 측정한다. 냉매충전 후 응축기 측의 물유량을 변화시키면서 응축온도를 조절하였으며, 팽창밸브를 사용하여 증발온도를 조절하였다.

실험결과로 나타나는 히트펌프의 열량은 열교환기를 통과하는 물의 온도변화를 기준으로 측정

했다. 증발기와 응축기의 열량과 성적계수는 다음의 식(1)~(4)^(8, 9)에 따라서 구하였다.

$$Q_{cond} = \dot{m}_{cond} \cdot C \cdot (T_{out} - T_{in})_{cond} \quad (1)$$

$$Q_{evap} = \dot{m}_{evap} \cdot C \cdot (T_{in} - T_{out})_{evap} \quad (2)$$

$$COP_h = \frac{Q_{cond}}{W_c} \quad (3)$$

$$COP_c = \frac{Q_{evap}}{W_c} \quad (4)$$

3. 실험결과 및 고찰

실험에 사용된 냉매와 현재 R22의 대체냉매로 널리 쓰이는 R407C의 열역학적 성질은 Table 1에 나타나 있다. 냉매들의 물성치를 비교해보면, 현재 R22의 대체냉매로 세계적으로 널리 쓰이는 R407는 ODP는 0이나, GWP가 1,530으로 R22와 동등하게 높은 값을 보여주고 있다. 이에 반해 탄화수소계 냉매인 Care 50과 ASR-20의 ODP는 0이고 GWP 값도 0~58로 R22나 R407C에 비해 매우 적은 값을 나타내며, 환경 친화적인 냉매의 성질을 보여주고 있다. 탄화수소계 냉매의 Molecular Weight는 R22나 R407C의 약 60% 수준이며 나머지 냉매로서의 열역학적 특성은 기존의 냉매와 비슷하였다. 탄화수소계 냉매의 단점인 발화점이 ASR-20은 710℃이며, Care 50은 아직 확인되지 않았다.

Table 1 Thermodynamic properties of tested refrigerants

Item \ Refri.	R22	R407C	Care 50	ASR-20
Mol. weight	86.5	95.2	43.25	56.5
Boiling temp.	-40.8℃	-44℃	-49℃	-34.9℃
Toxicity	None	None	None	None
Ignition temp.	None	None	NIL	710℃
Thermal cond.	L	0.097	0.09	0.109
	V	0.010	0.02	0.015
ODP	0.05	0	0	0
GWP	1500	1530	~3	58

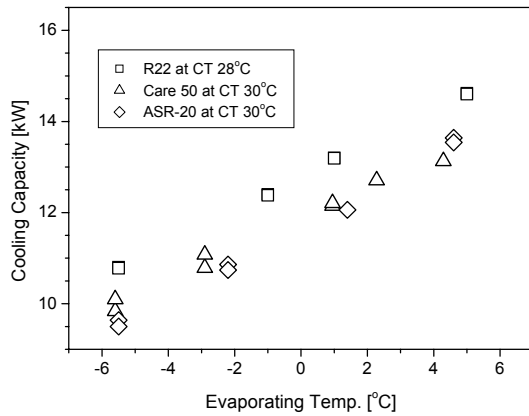


Fig. 2 Effect of evaporating temperature on cooling capacity with various refrigerants

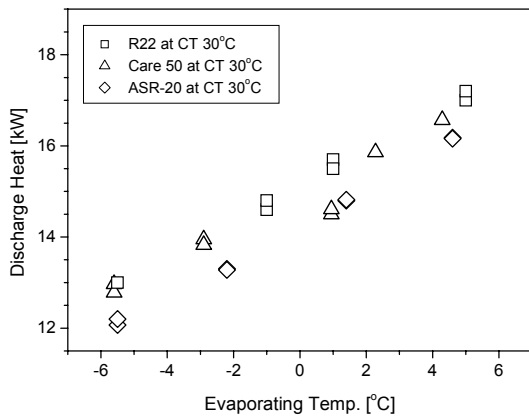


Fig. 3 Effect of evaporating temperature on discharge heat with various refrigerants

3.1 냉각능력 및 방열량

Fig. 2와 Fig. 3에 증발온도의 변화에 따른 R22와 탄화수소냉매를 적용한 히트펌프의 냉각능력 및 방열량을 나타내었다. R22와 탄화수소냉매를 적용한 경우 공통적으로 증발온도가 상승함에 따라 냉각능력 및 방열량이 증가하는 경향을 보였다. 증발온도가 증가할수록 압축기 입구 측에서의 비체적이 작아지면서 밀도가 증가하여 히트펌프를 순환하는 냉매의 질량유량이 증가하기 때문에 상기의 결과를 보여주었다.

Fig. 2의 증발온도에 따른 냉각능력의 변화에 대한 결과를 관찰해보면 R22의 성능이 탄화수소

냉매인 Care 50과 ASR-20보다 최대 10% 정도 우수한 결과를 보였다. 그 이유는 냉동용량을 결정짓는 증발잠열과 순환유량을 곱한 값이 탄화수소냉매보다 R22가 높기 때문이다. R22는 탄화수소냉매보다 비체적이 작기 때문에 전체적인 사이클의 순환유량이 거의 2배에 이르지만, 탄화수소냉매의 증발잠열이 매우 커서 전체적인 용량이 R22와 거의 유사하게 나타나고 있다. 또한 냉매의 특성에 기인한 증발압력과 응축압력의 비율인 압력비(P_r)는 탄화수소냉매가 약간 낮은 것으로 조사되었다. 압력비가 낮으면 히트펌프의 성능에 직접적인 영향을 미치는 압축기의 체적효율(η_v)이 상승하여 히트펌프를 순환하는 냉매량이 증가하고, 결과적으로 히트펌프의 성능이 상승하게 된다. 또한, 낮은 압력비(P_r)에서는 단열효율(η_{ad})이 상승하고 압축기의 소비동력은 낮아지게 되므로 전체적인 시스템의 성적계수도 상승하게 된다. 압력비와 압축기의 효율의 관계를 나타내는 식⁽¹⁰⁾은 다음의 식(5)~(7)과 같다.

$$P_r = \frac{P_d}{P_s} \tag{5}$$

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_{actual}}{\dot{m}_{ideal}} \times 100 \tag{6}$$

$$\eta_{ad} = \frac{W_{ideal}}{W_c} \times 100 \tag{7}$$

방열량을 나타낸 Fig. 3의 결과를 관찰해보면 냉각능력의 경우와는 달리 R22와 탄화수소냉매가의 방열량이 거의 동등한 것으로 나타났다. 이는 응축온도 30°C에서의 응축에 필요한 잠열과 냉매순환유량을 곱한 값인 응축열량이 상대적으로 R22보다 탄화수소냉매가 우수하기 때문이다. 또한 R22 적용실험에서의 과냉도가 탄화수소냉매 적용실험보다 작게 나타난 것도 탄화수소냉매의 방열량을 향상시킨 원인으로 추정된다. 일반적으로 냉매부족현상이 일어나면 응축기 후단부에 냉매가 정체하지 않고 냉매가 빠르게 통과하면서 물과 냉매사이의 열교환이 이루어질 시간이 부족하게 되므로 과냉도가 감소하게 된다. 그러나, 본 실험에서는 R22와 탄화수소냉매의 냉매충전량의 변화시켜가면서 실험을 반복하며 관찰한 결과 시스템의 냉매부족 상태는 아니라 판단된다.

3.2 성적계수

Fig. 4와 Fig. 5는 증발온도의 변화에 따른 히트펌프의 성적계수를 냉매의 종류에 따라 실험한 결과이다. 성적계수도 냉각능력 및 방열량에서의 결과와 마찬가지로 증발온도가 상승함에 성적계수가 증가하는 경향을 보이고 있다.

응축온도가 일정한 상태에서 증발온도가 상승하면 압축기의 소비동력은 약간 증가하거나 일정한 값을 유지하는 경향을 보이지만, 증발온도의 상승에 따른 히트펌프의 순환유량이 증가함에 따라 냉각능력 및 방열량은 크게 상승하므로, 히트펌프의 성적계수는 증발온도가 상승할수록 증가하는 경향을 보인다.

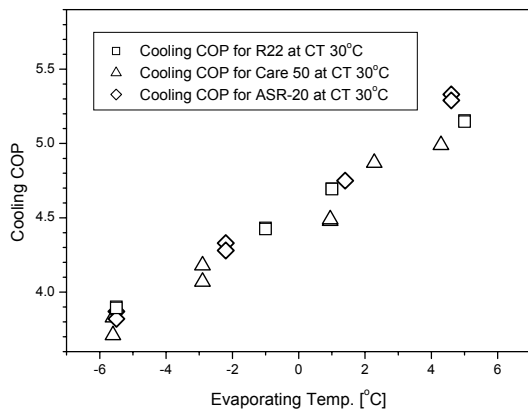


Fig. 4 Effect of evaporating temperature on cooling COP with various refrigerants

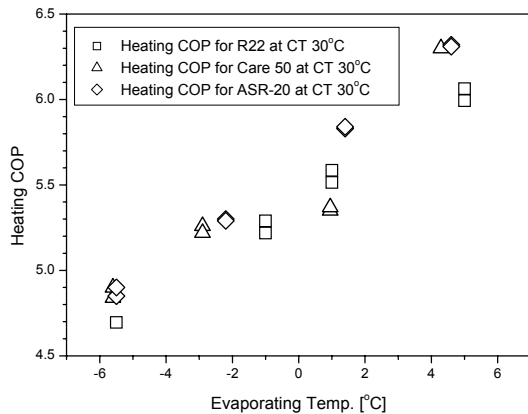


Fig. 5 Effect of evaporating temperature on heating COP with various refrigerants

냉방성적계수와 난방성적계수의 결과를 관찰해 보면 모든 냉매가 거의 유사한 결과 값을 보이고 있지만, 난방성적계수에서 탄화수소냉매가 R22보다 약 5%정도 우수한 결과를 보였다. 탄화수소냉매가 높은 온도에서 냉매의 잠열특성이 R22에 비해 우수하기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

R22와 탄화수소계 냉매인 Care50, ASR-20을 5RT급 양어장용 히트펌프에 적용하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 동등한 응축온도 조건에서 실험한 결과 히트펌프의 냉각능력은 R22가 탄화수소냉매 보다 최대 10%정도 우수한 결과를 보였다.
- (2) R22와 탄화수소 냉매를 적용하여 실험한 결과 방열량은 3가지 냉매가 거의 동등한 성능을 나타내었다.
- (3) 탄화수소냉매와 R22의 냉각능력 및 방열량은 거의 동일한 결과를 나타내었으나, 성적계수에서는 탄화수소냉매가 약 5%정도 우수한 결과를 나타내었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 21세기 프론티어 연구 개발사업인 이산화탄소 저감 및 처리 기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 : M1-02KP-01-0001)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) UNEP, 1987, "Montreal protocol on substance that depletes the ozone layer,"
- (2) Bitzer International, 2003, "Bitzer Refrigerant Report 9," *Bitzer K hlmaschinenbau GmbH*, pp. 9~12.
- (3) Lee, S. K., So, S. K. and Choi, Y. M., 2002, "Refrigeration Compressors for Airconditioner," *Magazine of the SAREK*, Vol. 31, pp. 8~14.
- (4) Kim, K. M., Cho, S. Y., Oh, S. I., Kim, D. J. and Lee, J. M., 2003, "A Study on the Application of Refrigerant Mixture(ASR-20) for the Alternation of R22," *Proceedings of the*

- SAREK*, pp. 833–839.
- (5) Jung, S. J., 2003, "A Study on the Performance of Heat Pump System Using Natural Refrigerant," *Master Thesis of Chungnam National University*.
- (6) Lee, H. S., Kim, J. D. and Yoon, J. N., 2004 "Condensing Heat Transfer Characteristics of Propylene Refrigerant," *Journal of the SAREK*, Vol. 7, pp. 639–644.
- (7) Bobbo, S., Camporese, R., Fedel, L. and Stryjek, R., 2004, "HFC+HC Blends as Refrigerants," *10th International Refrigeration and Airconditioning Conference at Purdue*, R143.
- (8) Kim, S. Y., 1988, "Heat Exchanger Design Handbook," *Hanmi Press*, pp. 8–9.
- (9) McQuiston, F. C., Parker, J. D. and Spitler, J. D., 2002, "Heating, Ventilating and Airconditioning ; Analysis and Design," *John Wiley & Sons.*, pp. 85–88
- (10) ASHRAE, 1992, "ASHRAE Handbook ; HVAC System and Equipment," *American Society of Heating, Refrigerating and Airconditioning Engineers, Inc.*, pp. 35.1–35.2