

전자식과 온도식 팽창밸브를 적용한 히트펌프의 증발기 열원수 온도 변화에 따른 성능 비교

손창효¹ · 최광환² · 하수정³ · 전민주⁴ · 박성현⁵ · 최대호⁶ · 이상봉⁷ · 윤정인[†]

(Received April 24, 2018 ; Revised July 16, 2018 ; Accepted August 20, 2018)

Performance comparison of heat pump with electronic and thermostatic expansion valve according to temperature variation of evaporator heat source

Chang-Hyo Son¹ · Kwang-Hwan Choi² · Soo-Jung Ha³ · Min-Ju Jeon⁴ · Sung-Hyeon Park⁵ · Dae-Ho Choi⁶ · Sang-Bong Lee⁷ · Jung-In Yoon[†]

요약: 히트펌프는 낮은 열원에서 높은 열원으로 열을 옮기는 장치이다. 최근에는 히트펌프의 효율을 높이기 위하여 응답 속도가 우수한 전자식 팽창밸브가 사용되고 있다. 현재 전자식 팽창밸브 및 히트펌프에 관한 연구는 많이 있지만 각각의 상세한 데이터 분석은 많이 존재하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 전자식과 온도식 팽창밸브를 적용한 히트펌프의 성능 특성을 비교하고자 한다. 실험 장치는 압축기, 사방밸브, 응축기, 체크밸브, 수액기, 팽창밸브, 증발기와 기액 분리기로 구성되었다. 실험은 증발기 열원수 온도에 따라서 증발 압력, 응축 압력, 질량 유량, 냉각 용량, 압축기 소비 전력, COP에 대하여 진행하였다. 히트펌프에서 증발기 열원수 온도의 변화는 시스템의 냉방 능력 및 COP에 영향을 주는 것을 확인하였다. 이에 따라 증발기 열원수 온도를 조절하는 것은 에너지 절약에 도움이 된다. 그리고 온도식 팽창밸브의 경우 전자식 팽창밸브에 비해 부하 변동 시, 냉방능력, COP가 낮음을 확인하였다. 온도식 팽창밸브가 적용된 히트펌프는 스프링 압력을 조절하는 것이 시스템 성능 향상에 도움이 될 것이라 생각된다.

주제어: 히트 펌프, 전자식 팽창밸브, 온도식 팽창밸브, 열원수

Abstract: A heat pump is a device that raises heat from a low heat source to a high heat source. Recently, electronic expansion valve with a high response is applied to increase the efficiency of heat pump. There are many researches related to the electronic expansion valve and the heat pump, but the detailed data analysis on each influence is insufficient. Therefore, this study compares the performance characteristics of heat pump with electronic and thermostatic expansion valve. The device consists of compressor, four-way valve, plate type condenser, check valve, receiver, expansion valve, plate type evaporator and separator. Experiments were carried out on evaporating pressure, condensing pressure, mass flow rate, cooling capacity, compressor power consumption and COP according to evaporator heat source temperature. It has been found that the change of the evaporator heat source temperature in the heat pump affects the cooling capacity and COP of the system. Accordingly, adjusting the temperature of the evaporator heat source water helps to save energy. In the case of the thermostatic expansion valve, it was confirmed that the cooling capacity and the COP were low when the load was changed as compared with the electronic expansion valve. It is thought that adjusting the spring pressure of thermostatic expansion valve in the heat pump will help improve system performance.

Keywords: Heat pump, Electronic expansion valve, Thermostatic expansion valve, Heat source

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1099-3435>): Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University, 365, Sinseon-ro, Nam-Gu, Busan 48547, Korea, E-mail: yoonji@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6180

¹ Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University, E-mail: sonch@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6183

² Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University, E-mail: choikh@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6179

³ Ph.D. candidate, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University, E-mail: h0452@hanmail.net, Tel: 051-629-6173

⁴ Ph.D. candidate, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University, E-mail: mini7970@nate.com, Tel: 051-629-6173

⁵ M.S. candidate, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University, E-mail: skgjeq1111@naver.com, Tel: 051-629-6173

⁶ M.S. candidate, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University, E-mail: bugscard02@naver.com, Tel: 051-629-6173

⁷ Section chief, Keeha Precision Co., E-mail: freeend@hanmail.net, Tel: 051-831-8086

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

히트펌프는 낮은 열원에서 높은 열원으로 열을 끌어 올리는 장치로서, 압축기, 증발기, 응축기, 팽창밸브로 주로 이루어져 있다[1][2]. 최근에는 히트펌프의 효율을 더 높이기 위해서 냉매의 압력과 온도 변화에 대해 반응 속도가 빠른 전자식 팽창밸브를 많이 적용하고 있다[3][4]. 히트펌프를 구성할 때, 기존의 전자식 팽창밸브는 팽창밸브 내 유체의 흐름이 단일 방향이기 때문에 추가적인 바이패스 라인의 제작이 필요하며, 역방향으로 유체가 지나갈 때 역류를 방지하기 위한 체크밸브가 필요하다. 이로 인하여 히트펌프의 효율이 떨어지게 된다. 이를 개선하기 위해 바이패스 배관 및 체크밸브를 필요로 하지 않는 전자식 팽창밸브가 필요하다. 지금까지 발표된 대표적인 전자식 팽창밸브를 적용한 히트펌프 연구는 다음과 같이 진행되었다. 먼저, C. Zhang *et al.* [5]은 전자식 팽창밸브를 적용하고 냉매는 R22와 R407C를 사용한 냉동 시스템의 전자식 팽창밸브 입구 압력 및 개도에 따른 냉매의 질량 유량 변화를 실험적으로 연구하였다[6][7]. 그 결과, 전자식 팽창밸브의 입구 압력과 개도가 커질수록 냉매 질량 유량이 증가된다고 하였다. S. M. Beak *et al.* [8]은 전자식 팽창밸브를 적용한 가변속 수냉각기를 이용하여 압축기의 회전수 변화와 전자식 팽창밸브의 개도 변화가 전체 시스템에 미치는 영향에 대해 실험적으로 알아보았다. 실험을 통해 압축기의 회전수 제어에 의한 용량 제어의 범위는 약 60%이며, 압축기 회전수별로 최대 냉각 능력을 보이는 전자식 팽창밸브의 개도 값이 존재한다는 사실을 파악하였다[3]. 이와 같이 전자식 팽창밸브와 히트펌프 관련 연구들은 진행되어왔지만 각각의 변수에 대한 영향의 세부적인 원인 분석이 부족하며[9], 팽창밸브의 종류에 따른 히트펌프의 성능 특성에 관한 연구는 전무한 상태이다.

따라서, 본 논문에서는 2가지 전자식 팽창밸브와 하나의 온도식 팽창밸브를 사용한 히트펌프의 성능 특성을 비교하고자 한다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

Figure 1은 전자식 팽창밸브를 적용한 히트펌프 시스템의 개략도이며, 실제 장치는 Figure 2과 같다. 본 연구에 사용된 시스템은 압축기, 사방밸브, 판형 응축기, 체크밸브, 수액기, 전자식 팽창밸브, 판형 증발기, 액분리기 등으로 구성된다.

Figure 1의 히트펌프에서 압축기를 나온 고온, 고압의 냉매 증기는 사방밸브와 체크밸브를 지나 응축기로 들어가고, 응축기 내에서 냉각수와 열교환하여 냉각된 후 수액기로 유입된다. 수액기를 나온 냉매액은 필터드라이어와 질량 유량계를 지난 뒤 팽창밸브에서 교축과정을 통해 저온, 저압의 냉매액이 된다. 냉매액은 증발기로 유입되어 냉수와 열교환하여 압축기로 들어가 재순환하게 된다.

인버터를 압축기에 연결하여 압축기의 주파수를 제어할 수 있도록 했고 압축 일량을 측정하기 위해 파워미터(WT230)를 설치하였다. 전자식 팽창밸브를 이용해 과열도를 일정하게 제어하는 동시에 액압축을 방지할 수 있도록 하였으며, 히트펌프 시스템 내의 냉매의 온도 및 압력을 측정하기 위해 T-type 열전대와 절대 압력계를 주요기기의 입·출구 측에 설치하였다. 냉매의 유량은 질량 유량계, 냉수 및 냉각수의 유량은 수유량계로 측정하였다. 또한 냉수 및 냉각수의 온도 유지를 위해 증발기 측과 응축기 측에 각각 항온조를 설치하였고, 데이터로거(YOKOGAWA, DR230)를 사용하여 실시간으로 데이터를 측정 및 기록이 되도록 하였다. Table 1은 주요 기기의 사양을 나타낸 것이다.

2.2 실험 조건 및 방법

실험의 조건은 KSB ISO 13256-2의 물순환식 히트펌프에 근거하여 정하였으며, 세부 실험 조건은 다음의 Table 2와 같다. 실험은 일정한 조건에서 인버터의 주파수(f), 증발기 측 냉수 입구 온도($T_{e,w,in}$), 응축기 측 냉각수 입구 온도($T_{c,w,in}$)를 각각 변화시켜가며 실시하였고, 실험은 일정한 조건에서 인버터의 주파수(f), 증발기 측 냉수 입구 온도($T_{e,w,in}$), 응축기 측 냉각수 입구 온도($T_{c,w,in}$)를 각각 변화시켜가며 실시하였고, 본 실험은 히트펌프 시스템의 전반적인 성능 특성을 파악하고 그 때의 원인을 규명하기 위한 것이므로 냉방 조건에 대해서만 실시하였다. 시스템은 30분 동안의 온도 측정 변이가 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이내, 압력 측정 변이가 $\pm 0.1 \text{ bar}$ 이내, 질량 유량의 변화가 $\pm 0.1 \text{ kg/min}$ 이내일 때 정상상태로 간주하였다. 또한 정상상태에 도달한 이후 냉매의 온도와 압력 및 질량 유량, 냉수와 냉각수의 입·출구 온도 및 수유량, 압축 일량 등을 30분 동안 측정하였다.

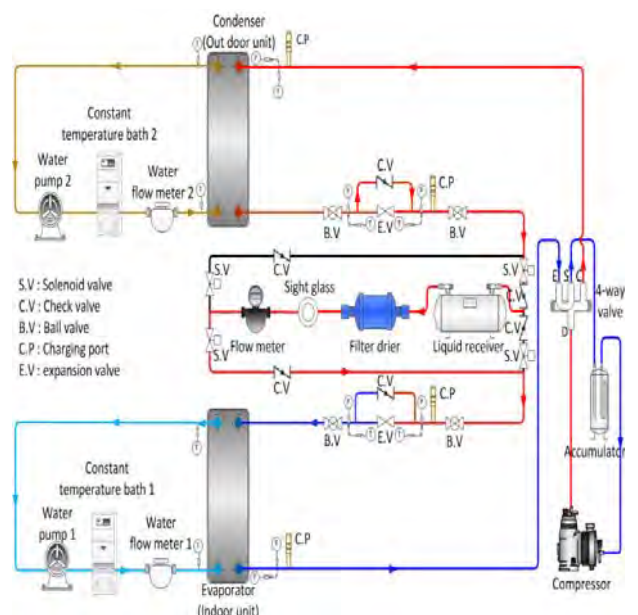


Figure 1: Schematic diagram of heat pump system with electronic expansion valve



Figure 2: Photograph of experimental apparatus

2.3 데이터 해석

본 실험에서 사용한 R410A의 열물성치 값 계산은 NIST에서 개발한 냉매 물성치 계산 프로그램인 REFPROP(version 8.01)[10]를 이용하였다. 히트펌프 시스템의 냉방 능력 및 COP(Coefficient of performance)는 식 (1), 식 (2)를 통해 각각 계산할 수 있다.

$$Q_e = G_{e,w} \cdot c_{p,w} \cdot \int_{T_{e,w,out}}^{T_{e,w,in}} dt \cdot \frac{1}{3600} \quad (1)$$

식 (1)에서 Q_e 는 냉방 능력 [kW], $G_{e,w}$ 는 증발기 측 냉수 유량 [kg/h], $c_{p,w}$ 는 냉수의 정압 비열 [kJ/(kg·°C)]와 $T_{e,w,in}$ 와 $T_{e,w,out}$ 는 각각 증발기 측 냉수의 입·출구 온도 [°C]를 나타낸다.

$$COP = \left(\frac{Q_e}{W_{com}} \right) \quad (2)$$

식 (2)에서 W_{com} 은 파워미터를 통해 측정된 압축 일량 [kW]을 나타내며, 식 (1)에서 구한 Q_e 를 이용하여 COP를 구할 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

본 논문에서는 3가지(A, B, C) 종류의 팽창밸브를 적용한 히트펌프의 증발기 입구 측 열원수 온도 변화에 따라서 증발 압력, 응축 압력, 질량 유량, 냉방 능력, 압축기 소비 동력, COP를 살펴보았다. 여기서, 용량이 다른 전자식 팽창밸브를 적용하여 실험한 이유는 히트펌프의 설계치 보다 큰 용량의 전자식 팽창밸브(8USRT)를 사용할 경우, 기존

팽창 밸브(5USRT)의 성능변화를 비교하기 위함이다.

Figure 3는 증발기 입구 측 열원수 온도에 따른 팽창밸브별 응축 압력을 나타낸 것이다. 온도식 팽창밸브의 경우, 증발기 입구 측 열원수 온도가 7°C, 12°C, 17°C로 증가함에 따라 응축 압력은 23.00 ~ 23.64 bar까지 증가하였으며, 전자식 팽창밸브 5USRT와 8USRT의 경우 각각 22.93 ~ 23.97 bar, 23.14. ~ 24.07 bar까지 증가하였다. 이는 증발기 입구 측 열원수 온도가 증가할수록 압축기 소비동력이 증가하게 되고 이에 따라 응축 압력이 증가한 것으로 판단된다. 또한, 시스템의 용량보다 더 큰 팽창밸브를 사용하였을 때, 응축 압력이 더 높게 나타났고 같은 용량의 온도식과 전자식 팽창밸브의 성능을 비교 하였을 때는 전자식 팽창밸브가 온도 변화의 응답이 더 좋아 직선적으로 변화였고, 온도식 팽창밸브는 전자식 보다 느린 반응 속도로 인해 곡선의 그래프가 그려지는 것으로 나타났다. Figure 4은 증발기 입구 측 열원수 온도에 따른 팽창밸브별 증발 압력을 나타낸 것이다. 증발 압력은 두개의 전자식 팽창밸브의 경우, 5USRT는 7.44 ~ 9.55 bar, 8USRT에서는 7.42 ~ 9.56 bar, 온도식 팽창밸브에서는 7.41 ~ 9.2 bar 까지 증가하는 것으로 나타났다. 이를 통하여 전자식 팽창밸브의 용량의 차이는 증발 압력의 변화에 있어서는 큰 차이가 나타나지 않았고, 온도식과 전자식 팽창밸브 사이에서는 온도 변화에 따른 반응 속도의 차이 때문에 전자식 팽창밸브 측에서의 온도 변화가 조금더 크게 나타나는 것으로 생각된다.

Table 1: Specification of main instruments

Unit	Specification
Compressor	Emerson copeland scroll ZP50K3E-TFD-522 380V, 3φ, 50Hz, 3.24kW
4-way valve	Saginomiya STF-0401G, 17.58kW Discharge : 1/2", Suction : 3/4"
Liquid receiver	Kyungan thermotec KRT-500V, 6.5L
Expansion valve	A : Dotech, DPF(o)-3.2C, Electronic expansion valve, 17.58kW
	B : Dotech, DPF(o)-5.2C, Electronic expansion valve, 28.1kW
	C : Danfoss, 068U1714, Orifice replacement thermostatic expansion valve
Condenser	Swep, plate heat exchanger B25TH, 9 m³/h
Evaporator	Swep, plate heat exchanger B25TH, 9 m³/h
Accumulator	Kyungan thermotec 5HP, 3.4L

Table 2: Experimental conditions

Parameter	Value	Unit
Inlet temperature of chilled water into evaporator : $T_{e,w,in}$	7, 12, 17	°C
Inlet temperature of cooling water into condenser : $T_{c,w,in}$	30	°C
Chilled water flow rate in evaporator : $G_{e,w}$	2000	kg/h
Cooling water flow rate in condenser : $G_{c,w}$	2000	kg/h
Inverter frequency : f	60	Hz
Superheating degree : T_{sup}	6	°C
Subcooling degree : T_{sub}	1.5	°C
Refrigerant	R410A	-

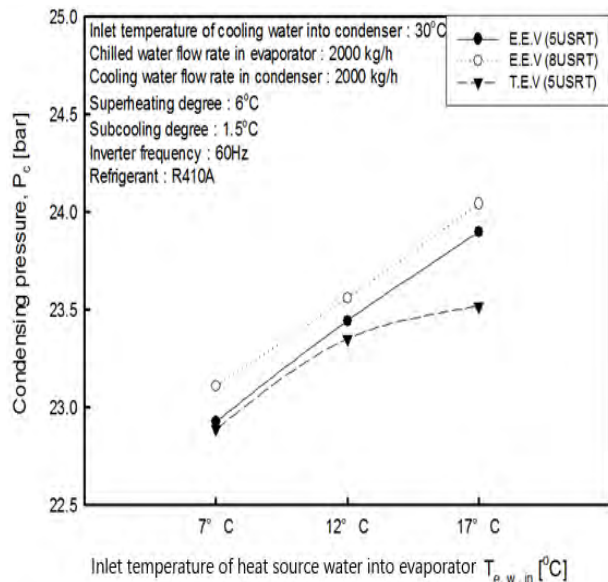


Figure 3: Condensing pressure of each expansion valves according to inlet temperature of heat source water into evaporator

Figure 5는 증발기 입구 측 열원수 온도에 따른 팽창밸브별 압축기 소비동력을 나타낸 것이다. 온도식 팽창밸브의 경우, 증발기 입구 측 열원수 온도가 7°C, 12°C, 17°C로 증가함에 전자식 팽창밸브 5USRT와 8USRT의 경우 각각 3.56 ~ 3.66 kW, 3.59 ~ 3.68 kW까지 증가하였고 온도식 팽창밸브의 경우 3.55 ~ 3.61 kW까지 증가하였다. 이는 증발기 입구 측 열원수 온도가 증가할수록 압축기 흡입측 냉매의 온도가 증가하게 되고 이에 따라 냉매의 비체적이 작아져 단위 체적 당의 질량이 더 늘어남에 따른 결과로 판단된다. 그로 인해 반응 속도가 느린 온도식 팽창밸브의 경우 압축 일량의 증가폭이 더 작은 것으로 사료된다. Figure 6는 증발기 입구 측 열원수 온도에 따른 팽창밸브별 냉방 능력을 나타낸 것이다. 온도식 팽창밸브의 경우, 증발기 입구 측 열원수 온도가 7°C, 12°C, 17°C로 증가함에 따라 냉방 능력은 온도식 팽창밸브는 10.66 ~ 13.83 kW까지 증가하였

으며, 전자식 팽창밸브 5USRT와 8USRT의 경우 각각 10.68 ~ 14.36 kW, 10.64 ~ 14.30 kW까지 증가하였다. 이는 증발기 입구 측 열원수 온도가 증가할수록 질량 유량이 증가함에 따라 냉방 능력이 증가한 것으로 판단된다. Figure 7에서는 증발기 입구 측 열원수 온도에 따른 질량 유량을 나타낸 것이다. 전자식 팽창밸브의 경우, 5USRT는 4.09 ~ 5.299 kg/min, 8USRT는 4.13 ~ 5.39 kg/min로 나타났으며, 온도식 팽창밸브의 경우, 4.19 ~ 4.96 kg/min로 나타났다. 실험 결과로써 전자식 팽창밸브가 온도식 팽창밸브보다 질량 유량의 증가 폭이 더 크게 나타났는데 이는 과열도 조절을 위한 팽창밸브의 반응 속도가 전자식 팽창밸브가 온도식보다 빨라 질량 유량의 증가폭이 더 큰 것으로 판단된다.

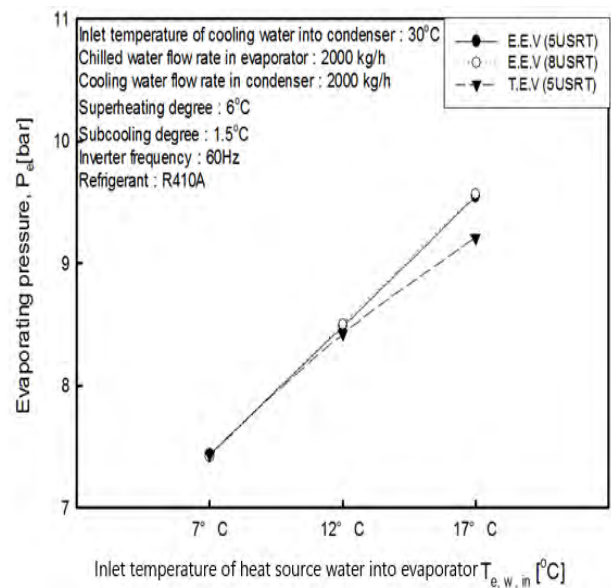


Figure 4: Evaporating pressure of each expansion valves according to inlet temperature of heat source water into evaporator

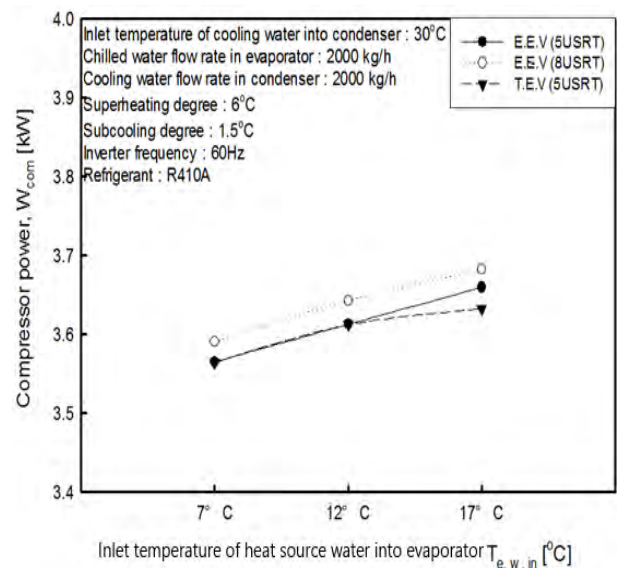


Figure 5: Compressor power of each expansion valves according to inlet temperature of heat source water into evaporator

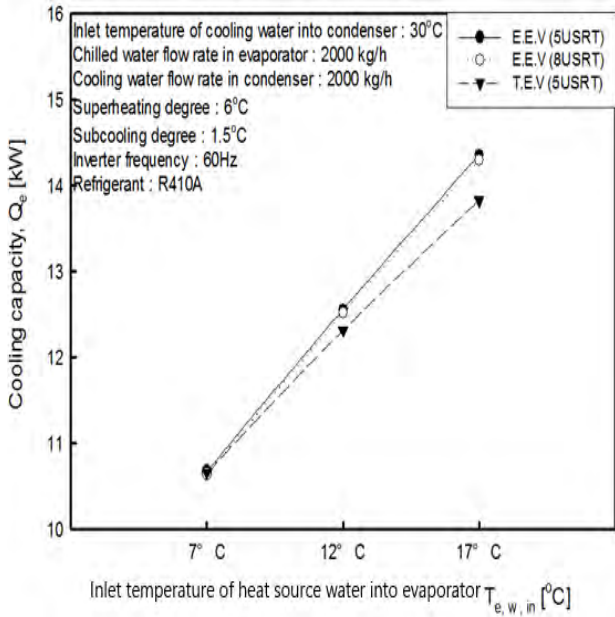


Figure 6: Cooling capacity of each expansion valves according to inlet temperature of heat source water into evaporator

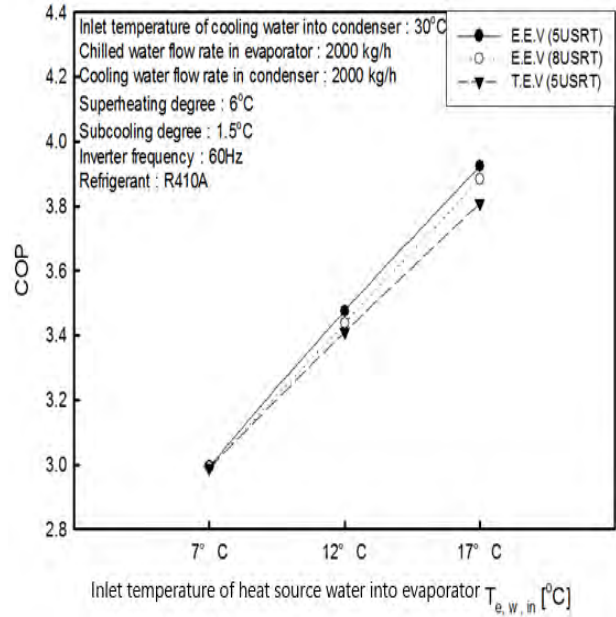


Figure 8: COP of each expansion valves according to inlet temperature of heat source water into evaporator

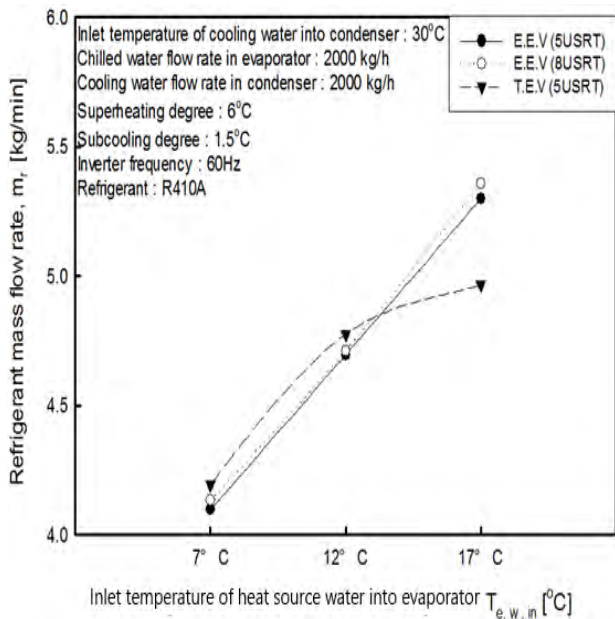


Figure 7: Refrigerant mass flow rate of each expansion valves according to inlet temperature of heat source water into evaporator

Figure 8은 증발기 입구 측 열원수 온도에 따른 팽창밸브 별 COP를 나타낸 것이다. 온도식 팽창밸브의 경우, 증발기 입구 측 열원수 온도가 7°C, 12°C, 17°C로 증가함에 따라 COP는 온도식 팽창밸브에서 2.98 ~ 3.81까지 증가하였으며, 전자식 팽창밸브 5USRT와 8USRT의 경우 각각 2.99 ~ 3.92, 2.96 ~ 3.88까지 증가하였다. 이는 증발기 입구 측 열원수 온도가 증가할수록 압축기 소비동력의 증가 비율에 비해 냉방 능력의 증가 비율이 더 크기 때문에 나타난 결과로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 R410A를 작동 유체로 하는 물-물 히트펌프를 대상으로 한다. 팽창밸브 종류(A, B, C)에 따라 증발기 측 냉수 입구 온도 변화(7°C, 12°C, 17°C)가 히트펌프 시스템의 냉방 성능 특성에 미치는 영향을 알아보았으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 히트펌프에서 증발기 측 냉수 입구온도의 변화는 시스템의 냉방능력 및 COP에 큰 영향을 주는 것을 확인하였다. 냉방능력의 경우 전자식 팽창밸브의 용량의 차이에 따라 비교해 보면 증가 폭이 7°C ~ 17°C까지 증가함에 따라 약 34%의 증가 폭이 나타났으며, 같은 용량의 전자식과 온도식의 차이에서는 약 5%정도의 차이로 전자식 팽창밸브의 증가폭이 더 크게 나타났다. COP의 경우, 전자식 팽창밸브 용량의 차이에 따라 두 가지 다 31%의 차이가 나타났고, 온도식과 전자식 팽창밸브의 비교에서는 약 4%의 차이가 나타났다. 전자식 팽창밸브의 세부적인 수치에서는 차이가 나타났지만 전체적인 변화에 있어서 차이가 나타나는 것은 용량의 차이로 인하여 계도 별 차이 값이 용량이 작은 5USRT의 경우가 좀 더 정밀하게 측정이 가능하기 때문에 세부적인 측정값에 대해서 차이가 나타나는 것으로 생각 되며 온도식 팽창밸브와 전자식 팽창밸브의 사이에 있어서는 감온통을 이용하여 온도 변화를 감지하는 온도식 팽창밸브의 경우가 반응 속도의 차이 때문에 이와 같은 결과가 나오는 것으로 생각된다. 따라서, 부하변동이 심한 조건에서 히트펌프가 운전 될 경우에는 온도식 팽창밸브 보다는 전자식 팽창밸브를 사용하는 것이 유리하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가

원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20162020107620). 본 연구는 ‘박성현’의 ‘팽창밸브 종류에 따른 히트펌프의 냉방 성능 비교’의 석사 논문의 일부입니다.

References

- [1] D. K. Kim, J. U. Jeon, and K. S. Kim, “Comparison of actual cooling energy consumption with calculated cooling energy consumption and analysis of energy performance between GHP and EHP,” Korean Architectural Society Proceedings Department of Planning, vol. 27, no. 5, pp. 237-244, 2011 (in Korean).
- [2] S. R. Park, “Heat pump technology trends,” International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, vol. 39, no. 6, pp. 4-13, 2010 (in Korean).
- [3] S. H. Lee and J. M. Choi, “Transient performance of a system heat pump with the variation of compressor speed and EEV openings,” International Journal of Korea Society of Geothermal Energy Engineers, vol. 9, no. 3, pp. 11-18, 2013.
- [4] D. Y. Han and P. S. Yoo, “Seasonal performance analysis of the EXV used heat pump system,” International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration in Summer Conference, pp. 841-846, 2001 (in Korean).
- [5] C. Zhang, S. Ma, J. Chen, and Z. Chen, “Experimental analysis of R22 and R407C flow through electronic expansion valve,” Energy Conversion and Management, vol. 47, no. 5, pp. 529-544, 2006.
- [6] T. Nishimura, “Heat pumps - status and trends in Asia and the Pacific,” International Journal of Refrigeration, vol. 25, no. 4, pp. 405-413, 2002.
- [7] S. S. Bertsch and E. A. Groll, “Two-stage air-source heat pump for residential heating and cooling applications in northern US climates,” International Journal of Refrigeration, vol. 31, no. 7, pp. 1282-1292, 2008.
- [8] S. M. Beak, C. G. Moon, H. W. Kim, S. K. Jeong, and J. I. Yoon, “Characteristics of capacity control of variable speed water cooler with the electronic expansion valve open/close degree,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 34, no. 2, pp. 282-288, 2011 (in Korean).
- [9] C. Liu, Y. Hou, J. Ma, X. Liu, and L. Chen, “Experimental study on the CO₂ flow characteristics through electronic expansion valves in heat pump,”

International Journal of Refrigeration, vol. 69, pp. 106-113, 2016.

- [10] E. W. Lemmon, M. L. Huber, and M. O. McLinden, “Creating and Modifying plots,” NIST standard reference database 23: reference fluidthermodynamic and transport properties-REFPROP, Version 9.1, National Institute of Standards and Technology, 2013.