

노즐이 적용된 전자식 팽창밸브 냉동 시스템의 동적 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Dynamic Characteristics of a Refrigeration System with a Nozzle-assisted Electronic Expansion Valve

김수진* · 고광수** · 박윤철*** †

Su-Jin Kim*, Gwang-Soo Ko** and Youn-Cheol Park*** †

(Received 06 April 2026, Revision received 31 May 2026, Accepted 31 May 2026)

초록 : 본 연구는 다양한 개도 범위에서 전자식 팽창밸브(Electronic Expansion Valve, EEV) 단독 시스템과 1.0 mm 노즐이 결합된 EEV 시스템의 동특성에 관한 실험적 연구이다. 과열도 히스테리시스에 초점을 맞추어, 밸브 개도 변화 과정 중 질량 유량, 토출 압력 및 냉방 용량의 동적 응답을 정량적으로 분석하였다. 연구 결과, EEV 단독 시스템은 비선형적 유량 응답으로 인해 낮은 개도에서 유의미한 히스테리시스를 보였다. 반면, EEV-노즐 구성은 급격한 변동을 완화하는 유량 완충기 역할을 통해 히스테리시스 발생 지점을 고개도 영역으로 이동시킴으로써 저·중개도에서의 안정성을 개선하였다. 결론적으로 이 구성은 제어 가능한 개도 범위를 확장하고 시스템 전반의 동적 안정성을 향상시킬 수 있다.

키워드 : 전자식 팽창밸브, 노즐, 동적 특성, 냉동 시스템, 과열도

Abstract : This study experimentally investigated the dynamic characteristics of an Electronic Expansion Valve(EEV)-only system compared to an EEV-nozzle (1.0 mm) combined system across various opening ratios. Focusing on superheat hysteresis, the dynamic responses of mass flow rate, discharge pressure, and cooling capacity were quantitatively analyzed during valve opening transitions. The results show that the EEV-only system exhibits significant hysteresis at low openings due to non-linear flow responses. Conversely, the EEV-nozzle configuration improves stability in the low-to-medium range by shifting significant hysteresis to higher openings. This shift is attributed to the nozzle acting as a flow buffer that mitigates abrupt variations, thereby extending the controllable range and enhancing overall system stability.

Key Words : Electronic Expansion Valve, Nozzle, Dynamic Characteristics, Refrigeration System, Superheat

*** † 박윤철(<https://orcid.org/0000-0001-8055-182X>) : 교수,
제주대학교 기계공학전공

E-mail : ycpark@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3626

*김수진(<https://orcid.org/0009-0007-3154-4931>) : 대학원생,
제주대학교 기계공학과

**고광수(<https://orcid.org/0000-0001-9255-3603>) : 책임연구
원, 제주대학교

*** † Youn-Cheol Park(<https://orcid.org/0000-0001-8055-182X>) : Professor, Major of Mechanical Engineering, Jeju National University.

E-mail : ycpark@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3626

*Su-Jin Kim(<https://orcid.org/0009-0007-3154-4931>) : Graduate student, Major of Mechanical Engineering, Jeju National University.

**Gwang-Soo Ko(<https://orcid.org/0000-0001-9255-3603>) : Principal Researcher, Industry-Academic Cooperation Foundation, Jeju National University.

— 기호 설명 —

ΔSH : Superheat hysteresis

SH_{inc} : Superheat during valve opening increase

SH_{dec} : Superheat during valve opening decrease

$\overline{\Delta SH}$: Mean superheat hysteresis

1. 서 론

냉동 사이클(Vapor-compression refrigeration cycle)은 압축기, 응축기, 팽창 장치, 증발기 등의 구성요소를 통하여 열에너지를 이동시키는 가장 널리 사용되는 냉동·공조 기술이다. 팽창 장치는 고압·고온의 냉매를 증발기로 공급하기 전에 압력과 유량을 조절하여 시스템의 과열도(superheat) 및 성능을 직접 결정하는 핵심 요소로 작용한다. 증발기出口的 과열도는 증발기 내 냉매의 완전한 기화 여부를 판단하고 열 교환 성능을 최적화하는 데 중요한 제어 변수이다. 전통적으로 사용되는 열팽창 밸브(Thermal Expansion Valve, TXV)는 기계적 작동 원리로 인하여 반응 속도가 느리고 부하 변화에 대한 적응성이 제한된다.

이에 비해 전자식팽창밸브(Electronic Expansion Valve, EEV)는 스텝 모터 또는 전자 제어 기반 액추에이터를 통해 실시간으로 개도율을 조절하여 정밀한 유량 제어와 빠른 반응성을 제공한다. 이러한 특성에 의하여 냉동·공조 시스템 전반에서 과열도 조절 및 부하 변화 대응 능력 향상에 기여하며, 특히 부분 부하 조건에서 성능 이점을 갖는다.¹⁾

EEV는 제어 신호에 따라 스텝 모터를 통해 유량을 조절하며, 측정된 증발기 출구 온도와 압력 정보를 기반으로 유량을 정밀하게 조절한다. 이러한 전자식 제어 구조는 TXV에 비하여 넓은 작동 범위와 빠른 응답을 제공하며, 부하 변동에도 비교적 안정적인 제어 거동을 보인다.²⁾

그러나 EEV의 동적 거동과 시스템 전체의 과열도 제어에서 발생하는 비선형 현상에 대해서는 여전히 제한적이다.

냉동시스템에서 팽창밸브의 동적 특성은 전체 시스템의 안정성에 영향을 미치며, 특히 제어 루프에서 과열도 제어가 불안정해질 경우, 운전 성능 저하 또는 헌팅(hunting) 현상이 발생할 수 있음이 보고되었다. EEV를 포함한 제어 구조에서는 PI 또는 PID 설정과 센서 시간 상수는 시스템 안정성 및 과열도 신호 반응에 영향을 준다는 것이 실험적으로 검증되었다.³⁾

특히 EEV 제어 영역에서 히스테리시스가 과열도 제어 성능에 직접적인 영향을 미친다는 연구가 있었으며, 히스테리시스는 개도율 변화 이력에 따라 과열도 및 냉매 유량 응답이 달라지는 비선형적 동적 반응을 의미하며, 이는 제어 성능 저하 및 과열도 제어 오버슈트로 이어질 수 있다.

실제로 EEV 과열도 제어 알고리즘에서 신호를 추가하여 히스테리시스 영향을 줄이는 연구도 수행된 바 있다.⁴⁾

또 다른 연구에서는 냉동 시스템의 동적 모사(Dynamic Modeling)를 통하여 EEV 개도율 변화와 열전달 조건이 시스템 응답에 미치는 영향을 제시하였으며, EEV 제어 루프에서 발생할 수 있는 진동 현상을 정량적으로 설명하였다.⁵⁾ 이러한 연구들은 전체 시스템의 동적 응답을 이해하는 데 중요한 기초를 제공하나, 대부분은 제어 알고리즘 및 수치 모델링 관점이며, 실제 실험적 비교는 제한적이다.

팽창 장치의 성능 변화가 전체 시스템 성능에 미치는 영향은 유량·압력 관계 및 열역학적 상태 변화를 포함한다. EEV의 개도율이 질량 유량 및 증발 압력에 미치는 영향은 열역학적 분석과 실험을 통해 다양한 연구에서 확인되었으며, EEV의 유량 제어 특성은 냉동 시스템의 성능 및 에너지 소비에 큰 영향을 준다.⁶⁾

히트 펌프는 외기 조건 변화나 부하 변동 시 정상 상태에 도달하기 전 과도응답 구간을 갖는데, 압축기 속도와 팽창 장치 개도는 과도 특성을 결정한 연구가 있다. 시스템 히트 펌프에서 압축기 주파수 및 EEV 개도 변화가 히트 펌프의 과도 성능에 미치는 영향을 분석하였으며, 두 제어 변수를 적절히 조합한 제어 전략을 적용할 때 히트

펌프의 응답성 및 안정성이 향상될 수 있음을 제시하였다.⁷⁾

그러나 현재까지의 대부분 연구는 주로 EEV의 정적 성능, 제어 알고리즘 및 제어 신호 설계 등에 중점을 두고 있으며, EEV의 동적 응답을 실험적으로 비교한 연구는 제한적이다. 이에 따라 히스테리시스를 제어 전략 설계에 반영하거나, EEV 시스템의 안정성을 높이는 데 중요한 정보를 제공하는데 한계가 있다.

본 연구에서는 EEV 단독 시스템과 EEV 후단에 1.0 mm 노즐을 설치한 시스템을 대상으로 EEV 개도를 증감에 따른 냉동 시스템의 동적 특성을 연구하였다. 질량 유량, 토출 압력, 과열도 및 냉각 용량과 같은 제어 대상 변수로 시스템의 동적 거동을 분석하였으며, 과열도의 증감 과정에서 나타나는 히스테리시스와 히스테리시스의 평균 지표를 활용하여 동적 특성의 차이를 규명하였다.

이를 통하여 노즐 적용이 냉동 시스템의 동적 응답 특성 및 제어 안정성에 미치는 영향을 평가함으로써 EEV 제어 안정성 향상 및 설계 최적화 방향을 제시하고자 한다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

본 연구에서는 팽창 장치에 노즐을 설치한 냉동 시스템의 동적 특성을 비교하기 위하여 구경 1.3 mm의 열교환기에 전자식 팽창밸브(Electric Expansion Valve, EEV)를 설치하고, EEV 후단에 구경 1.0 mm의 노즐을 Fig. 1과 같이 제작하였다. EEV 단독 시스템과 EEV와 1.0 mm 노즐을 결합한 시스템에 대한 동적 특성 실험은 동일한 환경 조건에서 수행하였으며, 냉동 사이클 기반의 실험 장치를 구축하였다.

환경 챔버 내에서 온도 조절을 위하여 3.5 kW급의 에어컨디셔너와 6 kW급 전기 히터를 설치한 1,000 L 용량의 온수 탱크를 활용하였으며, 420 mL/h 용량의 복합식 가습기를 사용하여 환경챔버 내 습도를 제어하였다. 16.7 kW급의 칠러(Chiller)를 이용하여 응축기로 흐르는 냉각수 온도를 유

지하였고, EEV와 노즐이 설치된 열교환기의 풍량은 풍량과 온도를 측정하는 장치(Cord Tester)에 설치된 송풍기를 통하여 조절하였다. 실험에 사용된 냉동 시스템의 사양은 Table 1에 제시한 바와 같이 746 W의 압축기와 판형 열교환기(응축기)를 적용하였다.

팽창 장치는 EEV 단독 시스템과 1.0 mm 구경을 적용한 EEV 시스템으로 구성하였으며, Fig. 2와 같이 실험 장치를 제작하여 개략적으로 나타내었다. EEV와 1.0 mm 노즐이 적용된 EEV가 설치된 열교환기의 동적 특성 비교 실험은 에어컨디션 KS C 9306을 참고하여 상온 조건을 설정하여 진행하였다. Table 2에 측정 장치의 사양을 나타내었으며, 실험 조건은 Table 3에 제시하였다.

환경 챔버 내 건구온도는 27℃, 습구온도는 19.5℃(RH 50%) 조건을 기준으로 설정하였으며, Cord Tester의 풍량은 10 m³/min으로 고정하여 비교 실험을 수행하였다. EEV의 개도는 10%씩 증가 및 감소하여 히스테리시스를 비교하고자 하였다.

COP에 대한 오차 해석은 센서의 정확도를 기준으로 풍량은 ±2.0%, 온도는 30℃에서 ±0.5%, 압력은 ±0.5%, 소비전력은 ±0.25%를 적용하여 식 (1)과 식 (2)에 의하여 COP 오차는 1.64%로 나타났다.

$$\begin{aligned} COP_{error} &= \left(\frac{\dot{Q}_{cond}}{P_{comp}} \right) \\ &= (\dot{m}_{ref} \cdot (h_{cond,out} - h_{cond,i})) / P_{comp} \\ &= \bar{X} \end{aligned} \quad (1)$$

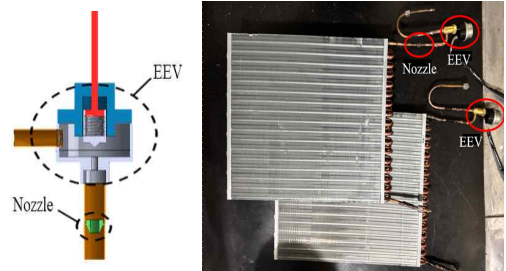


Fig. 1 Photograph of EEV and EEV with 1.0 mm nozzle which installed at the heat exchanger

Table 1 Specifications of experimental device

Compressor (W)	746
Evaporator (kW)	3.86
Condenser (kW)	4.55
Expansion valve type	EEV/ EEV with 1.0 mm Nozzle
Refrigerant	R-134a

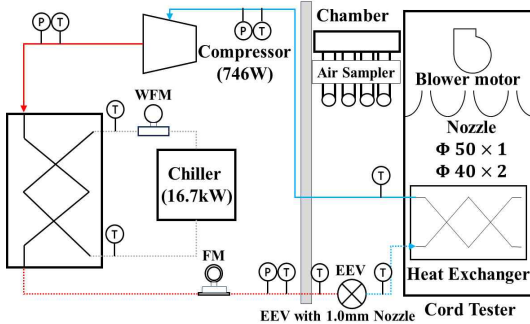
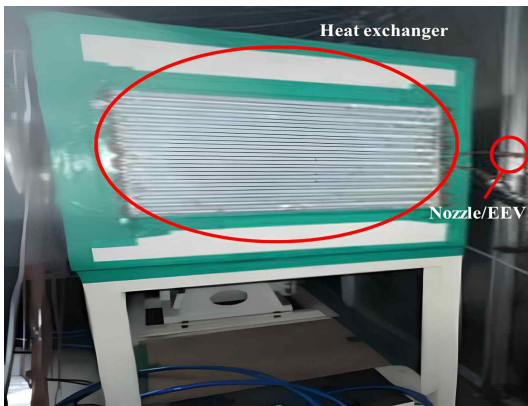


Fig. 2 Photograph of heat exchanger test device and schematic diagram of EEV with 1.0 mm nozzle system

$$\bar{X} = \frac{\sqrt{(\pm 2.0)^2 + (\pm 0.5)^2 + (\pm 0.5)^2 + (\pm 0.25)^2}}{4} = 1.64\% (2)$$

과열도 히스테리시스는 식 (3)을 이용하여 제어 민감도 최대가 되는 구간을 파악하고자 하였으며, EEV 제어 비선형성을 분석하기 위하여 과열도 평균 히스테리시스는 식 (4)를 사용하여 도출하였다.

Table 3 Test conditions of experiment test using EEV and EEV with 1.0 mm nozzle

Type	Water		Air		EEV Opening ratio (%)
	Temperature (°C)	Flow rate (lpm)	Temperature (°C)	Air flow rate (m³/min)	
EEV	35	10	27 (DBT)	10	10 to 100
Nozzle			19.5 (WBT)		10 to 100

Table 2 Specification of measurement device (Working fluid: R-134a)

Sensor	Specification	
Thermocouple	Manufacture	Omega
	Type	T-type
	Range	-200 to 400°C
	Accuracy	±0.5°C
Pressure transducer	Manufacture	Setra
	Model	C206
	Type	Gage pressure
	Range	0 to 1,000 psig
	Accuracy	±0.13% FS
	Output	4 to 20 mA
Mass flow meter	Manufacture	Omega
	Nominal flow rate	50 kg/min
	Accuracy	±0.02%
Water flow meter	Range	3 to 20 LPM
	Accuracy	±1%
	Pressure	20 bar
	Output	4 to 20 mA
Watt transducer	Manufacture	Light Star
	Model	KTG-1262S
	Load	0 to 500 Ω
	Accuracy	±0.25%

$$\Delta SH(i) = |SH_{inc}(i) - SH_{dec}(i)| \quad (3)$$

$$\overline{\Delta SH} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta SH(i) \quad (4)$$

3. 실험 결과 및 분석

EEV 단독 시스템과 1.0 mm 노즐이 적용된 냉동 시스템에서 개도율 증가 및 감소에 따른 질량 유량 변화를 Fig. 3과 같이 나타내었다. 두 시스템 모두 개도율 변화 이력에 따라 질량 유량 응답에 차이가 발생하였고, 개도율 감소 과정에서 더 큰 경향을 보였다.

EEV 단독 시스템의 경우, 초기 개도율 영역에서 냉매의 질량 유량이 급증한 후 20%의 개도율 영역 이후 감소하였으며, 20%에서 70% 구간에서 질량 유량 히스테리시스가 발생하였다. 1.0 mm 노즐 시스템에서는 개도율이 증가함에 따라 증가하다 개도율 80% 영역 이후 정체되었으며, 30% 이후부터 히스테리시스가 관측되었다. EEV 단독 시스템에 비하여 히스테리시스가 확대되었는데, 이는 노즐에 의하여 추가된 유동 저항과 압력 응답 지연이 시스템 수준에서 누적되었기 때문으로 해석된다.

Fig. 4에 EEV 단독 시스템과 노즐 결합 시스템의 개도율 증가 및 감소 조건에서 토출 압력 변화를 나타내었다. EEV 단독 시스템의 경우 개도율

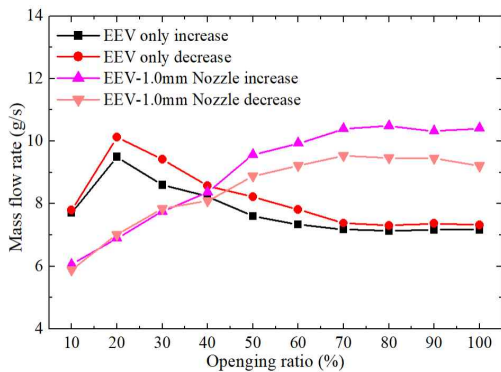


Fig. 3 Variation of mass flow rate with opening rate of the EEV and nozzle-installed systems

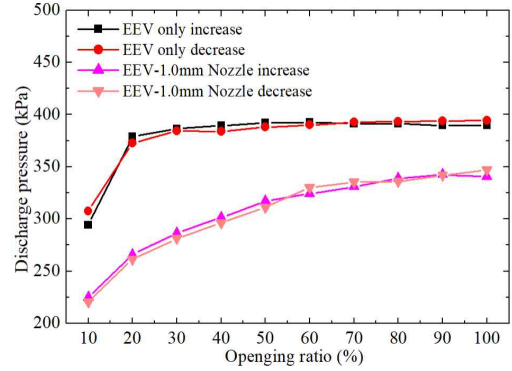


Fig. 4 Variation of discharge pressure with opening rate of the EEV and nozzle-installed systems

증가 및 감소 경로에 따른 토출 압력 곡선이 거의 중첩되었고, 동일 개도율에서 이력에 따른 토출 압력 차이는 제한적인 수준으로 관찰되었다.

노즐 결합 EEV 시스템에서는 전 개도율 영역에서 EEV 단독 시스템에 비하여 전반적으로 낮게 분포하였다. 이는 노즐에 의하여 압축기 흡입 부하가 감소하여 토출 측 압력 수준이 완화된 결과로 해석된다.

개도율 증가 및 감소 경로에 따른 토출 압력 곡선은 완전히 중첩되지는 않았으나, 뚜렷한 히스테리시스 루프를 형성하지 않았다. 이러한 결과는 노즐 결합이 시스템 부하를 완화하지만, 개도율 변화 이력에 따른 토출 압력의 동적 안정성이 유지됨을 의미한다.

EEV 단독 시스템과 노즐을 결합한 EEV 시스템에 대해 개도율 증가 및 감소에 따라 과열도 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 히스테리시스가 발생하는 개도율 구간은 시스템 구성에 따라 상이하게 관측되었다. EEV 단독 시스템의 경우, 개도율 20%에서 30% 구간에서 증가 및 감소 경로에 따른 과열도 차이가 나타났으며, 이는 저개도 영역에서 EEV 개도 변화에 따른 질량 유량 변동이 증발기 내 냉매 분포 및 과열도에 민감하게 적용하기 때문으로 판단된다.

한편, 노즐이 적용된 EEV 시스템에서는 저·중개도 영역에서 개도율 증가 및 감소 경로에 따른 과열도 차이가 제한적으로 나타났지만, 개도율

60%에서 80% 구간에서 두 경로 간 과열도 차이가 명확하게 관측되었다. 노즐에 의하여 저 개도 영역에서 질량 유량 변동이 완화되었으나, 고개도 영역에서 증발기 내 냉매 체류량 및 열 교환 상태가 이전 운전 이력에 영향받았기에 이러한 경향을 보였다. 이에 따라 노즐 결합 시스템에서 과열도 히스테리시스가 EEV 단독 시스템에 비하여 높은 개도율 영역에서 발생하는 특성을 보였다.

Fig. 6에 개도율 증감에 따른 냉각 용량 변화를 나타내었다. EEV 단독 시스템은 개도율 20%에서 냉각 용량이 급격히 변화하였으며, 개도율 감소 과정에서 증가 경로 대비 냉각 용량이 높게 나타나는 구간이 관측되었다. 이에 따라 개도율 변화 이력에 따른 냉각 용량 히스테리시스가 확인되었으며, 저 개도 영역에서 두드러지게 나타났다. EEV에 노즐을 적용한 시스템에서는 개도율 증가에 따라 냉각 용량이 점진적으로 증가하다 개도율 70% 영역에서 최댓값을 나타낸 후 정체되었다. 다만 개도율 30% 이후 증가 및 감소 경로 간 냉각 용량 차이가 지속적으로 존재하였으며, EEV 단독 시스템 대비 히스테리시스 절대 폭이 크게 나타나는 경향을 보였다. 이는 노즐에 의해 추가된 유동 저항과 압력 응답 지연이 질량 유량 및 증발기 내 열전달 특성에 누적으로 작용한 결과로 판단된다.

Fig. 7은 개도율 증감에 따른 COP 변화를 이다. EEV 단독 시스템의 경우, 개도율이 증가함에 따라 COP가 약 2.2에서 1.5 수준으로 지속적으로

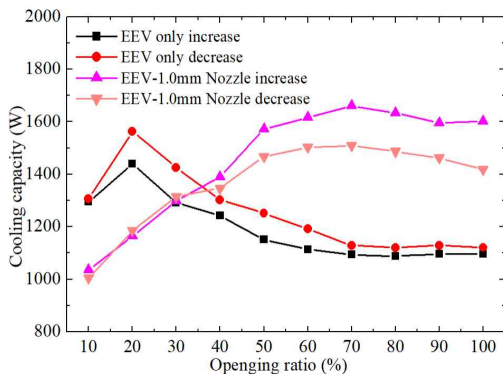


Fig. 6 Variation of cooling capacity with opening rate of the EEV and nozzle-installed systems

감소하는 경향을 보였으며, 개도율 증가 간 차이는 제한적인 수준으로 관측되었다. 노즐 결합 EEV 시스템에서는 전 개도율 영역에서 EEV 단독 시스템 대비 COP가 전반적으로 높게 나타났으며, 개도율 50%에서 70% 구간에서 약 2.3의 최댓값을 나타낸 후 완만하게 감소하였다. 이는 Fig. 4에서 확인된 바와 같이 노즐에 의한 압축기 흡입 부하 감소 및 Fig. 6의 냉각 용량 향상이 복합적으로 작용하여 COP 개선으로 이어진 것으로 판단된다.

EEV 단독 시스템과 노즐을 적용한 EEV 시스템에서 개도율에 따른 과열도 히스테리시스 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 이는 동일 개도율 조건에서 개도율 증가 및 감소 경로 간 과열도 차이를

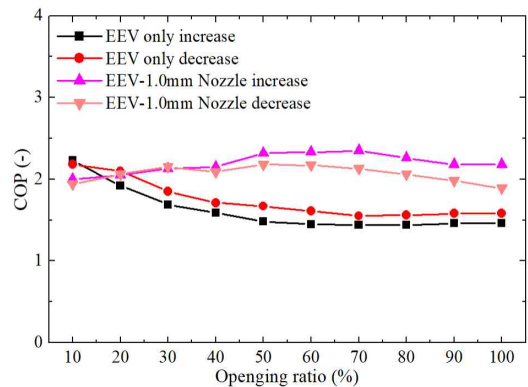


Fig. 7 Variation of COP with opening rate of the EEV and nozzle-installed systems

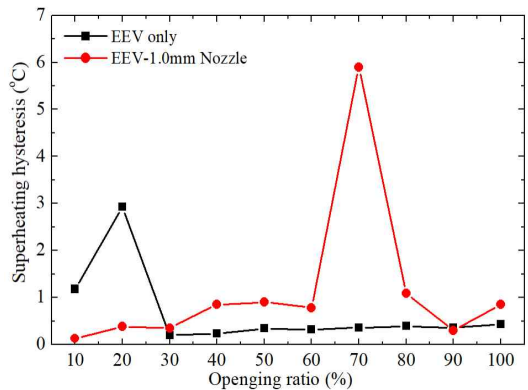


Fig. 8 Variation of superheat hysteresis with opening rate of the EEV and nozzle-installed systems

정량화한 결과이다. EEV 단독 시스템의 경우, 개도율 20%부터 30% 구간에서 과열도 차이가 2.9~3.3℃까지 급증하는 경향을 보였으며, 저 개도에서 중 개도로 전이되는 영역에서 EEV 유효 유로 면적 변화에 따른 질량 유량 민감도가 커지면서 개도율 증가 및 감소 경로에 따라 증발기 내 냉매 분포 및 충만 상태가 상이하게 형성되었기에 이러한 현상이 나타났다.

노즐 결합 EEV 시스템에서는 개도율 60%에서 80% 구간에서 과열도 차가 5.89℃까지 급증하였다. 이는 노즐이 저 개도 영역에서 지배 오리피스로 작용하여 개도 이력의 영향을 완화하는 반면, 고개도 영역에서는 유량 포화 및 증발기의 냉매 충만도 변화가 두드러지면서 개도 경로에 따른 열적 응답 차이가 확대되기 때문으로 해석된다.

Fig. 9에 개도율 변화에 따른 과열도의 전반적인 경향을 정량적으로 분석하기 위하여 개도율 증가 및 감소 과정에서 측정된 과열도의 평균을 나타내었다. 이는 히스테리시스 효과로 인한 경로 의존성을 제거한 대표적인 과열도 수준을 의미한다.

EEV 단독 시스템은 개도율 20% 부근에서 과열도가 급증한 이후 개도율 증가에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 저 개도 영역에서 EEV 유효 유로 면적 변화에 따른 질량 유량 증가율이 커져 증발기 출구 건도가 과열 영역과 2상 영역의 경계에서 급격히 변동하기 때문이다. 해당 구간에서는 소량의 개도 변화에도 증발기 내 냉매 분포가 불

안정해지며, 과열도 제어의 민감도가 증가하였다.

반면, EEV와 노즐을 결합한 시스템에서는 개도율 70% 부근에서 노즐 유량이 설계 한계 및 초크 유동에 근접하면서 EEV 개도 변화가 증발기 질량 유량에 직접적으로 반영되었고, 이에 따라 과열도가 급증하는 현상이 관찰되었다. 이러한 결과는 노즐 결합이 과열도 불안정 구간을 저 개도 영역에서 고개도 영역으로 이동시켜 제어 가능 범위를 확장하는 효과가 있음을 시사한다.

5. 결 론

본 연구에서는 EEV와 노즐이 적용된 EEV 냉동 시스템의 동적 특성 비교를 목적으로, EEV 단독 시스템과 1.0 mm 노즐을 EEV와 결합한 시스템을 대상으로 개도율 증감에 따른 히스테리시스를 분석하였다.

EEV 후단에 구경 1.0 mm 노즐을 제작하여 열교환기에 설치하여 상온 조건에 따라 환경 챔버 운전 실험을 수행하였다. 증발기 측 조건은 건구 온도 27℃, 습구 온도 19.5℃ 및 10 m³/min의 풍량에서, 응축기 측 조건은 35℃에서 개도율을 10% 간격으로 증가 또는 감소하여 실험을 진행하였으며, 개도율 증감에 따라 질량 유량, 과열도 및 과열도 히스테리시스를 평가하여 동적 특성을 비교하였다. 두 시스템은 개도율 변화에 대한 동적 응답 특성에서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) EEV 단독 시스템의 경우, 개도율 20%의 영역에서 질량 유량이 개도율 변화에 민감하게 반응하였으며, 개도율 10%에서 개도율 증감에 따른 과열도 차이가 급증하였다. 저 개도 영역에서 EEV의 유효 유로 면적 변화에 따른 질량 유량 증가율이 비선형적으로 커지면서 개도율 증가 및 감소 경로에 따라 과열도 응답이 상이하게 나타나는 히스테리시스를 유발하였다.

2) EEV와 노즐을 결합한 시스템에서는 저·중 개도에서 노즐이 1차 유량 제한자로 작용하여 질량 유량 변화가 완만하게 상승하였고, 이에 따라 과열도 및 냉각 용량의 동적 응답 또한 안정적으로 나타났다. 그러나 개도율이 70% 이상 증가할

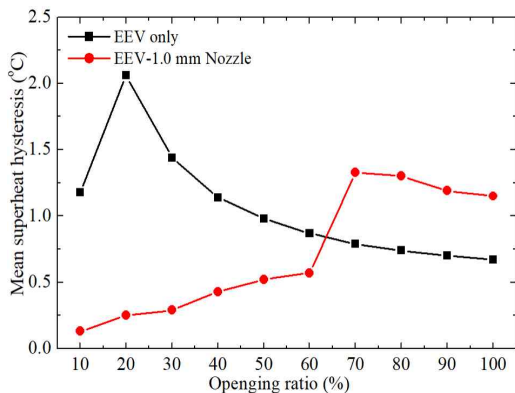


Fig. 9 Variation of mean superheat hysteresis with opening rate of the EEV

때 노즐 유량이 설계 한계 및 초크 유동 조건에 근접하여 개도를 변화에 따른 질량 유량 및 증발기 출구 민감도가 증가하여 과열도 히스테리시스가 5.89℃ 정도로 급격히 확대되었다.

3) 과열도 히스테리시스 평균값 비교 결과, EEV 단독 시스템은 20%의 저 개도 영역에서 히스테리시스가 집중적으로 발생하였으나, EEV와 노즐 결합 시스템은 70%의 고 개도 영역에서 히스테리시스가 두드러지게 나타났다. 이는 노즐 결합이 시스템의 동적 불안정 구간을 저 개도 영역에서 고개도 영역으로 이동시키는 효과가 있음을 의미하며, 결과적으로 실질적인 제어 가능 개도 범위를 확장하는 데 기여함을 확인할 수 있다.

종합적으로, 노즐을 EEV와 결합한 시스템은 개도를 변화에 대한 질량 유량 및 과열도 응답의 급격한 변화를 완화하여 동적 안정성이 향상되었으나, 70% 이상의 고 개도 영역에서 새로운 과열도 히스테리시스 관리가 필요함을 확인하였다. 따라서 향후에는 노즐 형상 최적화 또는 고개도 영역에서의 보조 제어 전략 병행을 통하여 전 개도 영역에서의 동적 안정성과 과열도 제어 성능이 동시에 향상될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 2025년도 제주대학교 교원성과지원 사업에 의하여 연구되었음.

Author contributions

S. J. Kim; Conceptualization, Data curation, Investigation, Writing-original draft. G. S. Ko; Formal analysis, Methodology, Validation. Y. C. Park; Funding acquisition, Project administration, Supervision, Writing-review & editing.

References

1. M. Jiang, J. Wu, R. Wang and Y. Xu, 2011, "Research on the control laws of the electronic

expansion valve for an air source heat pump water heater", *Building and Environment*, 46(10), 1954-1961.

(DOI:10.1016/j.buildenv.2011.04.003)

2. F. T. Knabben, A. F. Ronzoni and C. J. L. Hermes, 2020, "Application of electronic expansion valves in domestic refrigerators", *International Journal of Refrigeration*, 119, 227-237.

(DOI:10.1016/j.ijrefrig.2020.07.029)

3. Y. Xia and S. Deng, 2016, "The Influences of the operating characteristics of an Electronic Expansion Valve(EEV) on the operational stability of an EEV controlled direct expansion air conditioning system", *International Journal of Refrigeration*, 69, 394-406.

(DOI:10.1016/j.ijrefrig.2016.06.008)

4. D. Y. Han and S. H. Pyo, 2002, "EEV superheat control of a multi-type heat pump by using dither signal", *Journal of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, 14(11), 948-953.

5. Y. Shang, A. Wu, X. Fang and Y. You, 2016, "Dynamic simulation of electronic expansion valve controlled refrigeration system under different heat transfer conditions", *International Journal of Refrigeration*, 72, 41-52.

(DOI:10.1016/j.ijrefrig.2016.07.020)

6. X. Cao, Z. Y. Li, L. L. Shao and C. L. Zhang, 2016, "Refrigerant flow through electronic expansion valve: Experiment and neural network modeling", *Applied Thermal Engineering*, 92, 210-218.

(https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.062)

7. S. H. Lee and J. M. Choi, 2013, "Transient performance of a system heat pump with the variation of compressor speed and EEV openings", *Korean Society of Geothermal Energy Engineers*, 9(3), 11-18.