

## R22를 적용한 전자팽창밸브의 냉매유량 특성 및 유량예측 모델링

박 차 식, 이 선 일, 김 용 찬<sup>\*</sup>, 이 영 수<sup>\*\*</sup>

고려대학교 기계공학과 대학원, <sup>\*</sup>고려대학교 기계공학과, <sup>\*\*</sup>한국에너지기술연구원

### Mass Flow Characteristics and Empirical Modeling of R22 Flowing through Electronic Expansion Valves

Chasik Park, Sunil Lee, Yongchan Kim<sup>\*</sup>, YoungSoo Lee<sup>\*\*</sup>

*Graduate School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea*

*<sup>\*</sup>Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea*

*<sup>\*\*</sup>Korea Institute of Energy Research, 71-2 Jang-dong Yuseong-ku, Taejeon 305-343, Korea*

(Received August 4, 2006; revision received September 21, 2006)

**ABSTRACT:** The objective of this study are to analyze the flow characteristics of R22 flowing through EEVs and to develop an empirical correlation to predict the refrigerant flow rate. The mass flow rates of EEVs with different geometries were measured at various condensing temperatures, subcoolings, and EEV openings. Based on the experimental data, an empirical correlation for mass flow predictions in EEVs was developed by modifying the orifice equation. The correlation showed good agreement with the measured data for R22 with average and standard deviations of 1.4% and 6.1%, respectively. Approximately 90% of the measured data were within  $\pm 10\%$  of the predictions.

**Key words:** EEV(전자팽창밸브), Mass flow rate(유량), Correlation(상관식), Orifice(오리피스), Dimensionless parameters(무차원 변수), EEV opening(EEV 개도)

#### 기 호 설 명

$D$  : 오리피스 직경 [mm]  
 $D_e$  : 오리피스 유효직경 [mm]  
 $L$  : 오리피스 길이 [mm]  
 $\dot{m}$  : 질량유량 [kg/h]  
 $P_c$  : 임계압력 [kPa]  
 $P_d$  : 출구압력 [kPa]  
 $P_i$  : 입구압력 [kPa]  
 $P_s$  : 포화압력 [kPa]

$T_c$  : 임계온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $\Delta T_{sc}$  : 과냉도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]

#### 그리스 문자

$\nu$  : 동점성 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $\pi$  : 무차원 변수  
 $\rho$  : 밀도 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $\sigma$  : 표면장력 [ $\text{N}/\text{m}$ ]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-3290-3366; fax: +82-2-921-5439

E-mail address: yongckim@korea.ac.kr

하첨자

$f$  : 포화액체

g : 포화기체  
 meas : 실험값  
 pred : 계산값

## 1. 서 론

현대인의 생활수준이 지속적으로 향상됨에 따라 쾌적한 실내공간에 대한 관심이 증가하면서 공조기기의 보급이 증가하고 있다. 최근에는 하나의 실외기에 여러 개의 실내기를 멀티형 공조시스템을 적용하여 중소형 건물 전체에 보급하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 멀티형 시스템에서는 각 실내 유닛으로의 냉매분배가 서로 복합적으로 연결되어 있으므로 모세관이나 온도감응식 팽창밸브(TXV)와 같은 팽창장치를 적용하는 경우 냉매분배의 어려움이 존재한다. 따라서, 하나의 실외기에 여러 대의 실내기를 연결하여 시스템 전체의 효율적인 냉매유량 제어를 위한 전자팽창밸브(EEV)의 적용이 반드시 필요하다. 이와 같이 냉방사이클에 전자팽창밸브를 적용한 고효율 시스템이 증가함에 따라 전자팽창밸브에 대한 정확한 모델링이 요구되고 있다.

전자팽창밸브는 내부에 오리피스와 니들밸브로 구성되어 있고 스톱모터에 의해 니들이 상하로 움직이면서 냉매유량을 능동적으로 제어할 수 있는 가변면적 팽창장치이다. 기존의 모세관이나 오리피스 등의 일정면적 팽창장치에 대한 연구는 이론적 모델이나 경험적 상관식<sup>(1-7)</sup>으로 많이 제시되어 왔다. Mei<sup>(8)</sup>와 Aaron and Domanski<sup>(9)</sup>는 R22를 적용하여 오리피스 팽창장치에 대한 실험적 연구를 수행하여 오리피스의 입구조건이 단상인 경우에 대하여 경험적 모델을 제시하였다. Kim and O'Neal<sup>(10)</sup>은 R134a를 적용한 오리피스 팽창장치의 이상유동에 대하여 실험적 연구를 수행하였으며 팽창장치 입구 및 출구의 조건이 주어졌을 때 성능을 예측할 수 있는 경험적 모델을 개발하였다. 하지만, 가변면적 팽창장치인 전자팽창밸브에 대한 성능 특성 연구는 아직까지 미흡하고, 전자팽창밸브의 특성을 잘 나타낼 수 있는 상관식은 아직 제시되지 못하고 있는 실정이다.

전자팽창밸브는 제조회사에 따라 모델별로 냉매유량 특성이 다르게 나타나므로 전자팽창밸브에 대한 일반적인 유량예측 모델에 대한 연구결과는 현재까지 발표된 바가 없다. 또한 제조회사가

제시하는 성능 데이터는 과냉도를 0℃로 고정된 상태에서의 이론값을 제시하고 있기 때문에 실제 적용시에 많은 오차를 보이며, 다양한 조건에서 시스템 성능을 예측하거나 설계를 하는 데에는 어려움이 있다. 따라서 전자팽창밸브의 유량 특성에 대한 기본적인 연구를 통하여 전자팽창밸브의 성능을 정확히 예측할 수 있는 모델의 개발이 요구되고 있다.

본 연구에서는 전자팽창밸브의 성능 특성을 고찰하기 위하여 운전조건 및 개도를 변화시키면서 냉매유량을 측정하였다. 전자팽창밸브의 유량범위는 기본적으로 오리피스의 직경에 의존하므로 베르누이 방정식으로부터 유도된 오리피스의 기본이론식<sup>(11)</sup>에 전자팽창밸브의 형상변수인 오리피스 직경, 길이 및 운전조건을 변수로 하여 경험적 상관식을 제시하였다. 개발된 모델은 실험 데이터와 비교를 통하여 검증을 하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 전자팽창밸브의 성능 특성을 측정하기 위한 실험장치 개략도이다. 실험장치는 전자팽창밸브 시험부의 입구과냉도, 응축압력, 그리고 증발압력을 쉽게 조절할 수 있도록 세 가지 유동루프로 구성되어 있다. 첫번째는 팽창장치 시험부를 포함한 냉매 유동루프이고, 두번째는 증발열교환기를 포함한 온수 유동루프, 마지막으로 응축열교환기를 포함한 물/에틸렌글리콜 유동루프이다. 전자팽창밸브 시험부의 입구압력을 제어하

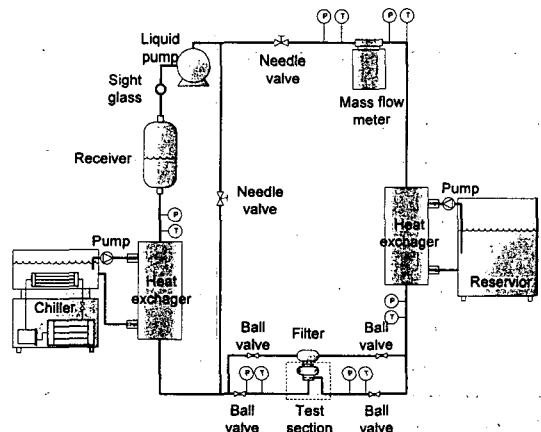


Fig. 1 Schematic diagram of test setup.

Table 1 Specification of experimental setup and test conditions

| EEV specification | Model             | Saginomiya                                                      |        |        | Fujikoki |        |        |
|-------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------|--------|--------|----------|--------|--------|
|                   |                   | DKV14                                                           | DKV18  | EKV24  | BD14SH   | BD18SH | BD24SH |
|                   | Orifice length    | 2.2 mm                                                          | 2.2 mm | 2.1 mm | 1.6 mm   | 1.6 mm | 1.6 mm |
|                   | Orifice diameter  | ∅1.4                                                            | ∅1.8   | ∅2.4   | ∅1.4     | ∅1.8   | ∅2.4   |
|                   | Capacity          | 2~4 kW                                                          | 5~9 kW | 10~ kW | 2~4 kW   | 5~9 kW | 10~ kW |
| Test conditions   | Condensing temp.  | 40.5°C, 47.5°C, 54.5°C                                          |        |        |          |        |        |
|                   | Evaporating temp. | 7°C                                                             |        |        |          |        |        |
|                   | Subcooling temp.  | 3.5°C, 6.5°C, 11.5°C                                            |        |        |          |        |        |
|                   | EEV opening       | 100, 150, 200, 300, 400, 480 step (EEV full opening : 480 step) |        |        |          |        |        |

기 위하여 가압식 액체펌프를 사용하였고 인버터로 속도를 조절하였다. 팽창장치 입구 과냉도는 정밀한 온도조절이 가능한 항온조를 포함한 온수 유동루프와 판형 열교환기를 통하여 냉매와 열교환이 이루어지도록 하였다. 팽창장치 출구의 2상 상태 냉매는 물/에틸렌글리콜 유동루프와 판형 열교환기에서 응축되도록 하여 과냉상태의 액냉매가 펌프로 흡입되도록 하였다. 증발 열교환기와 응축 열교환기 사이에 설치된 전자팽창밸브 시험부는 교체작업을 용이하게 하기 위하여 피팅류로 연결하였다. 시험부 전후에는 압력계와 열전대를 설치하여 압력과 온도를 측정하였다. 시험용 전자팽창밸브는 Saginomiya사와 Fujikoki사 제품을 용량대별로 총 6종의 모델을 선택하여 실험을 수행하였다. 시험 전자팽창밸브의 개도는 구동 드라이버와 연결하여 수동으로 0~480스텝까지 변화시킬 수 있도록 하였다.

본 실험에서는 전자팽창밸브 입출구의 운전변

수와 개도변화에 따라 팽창장치를 통과하는 냉매의 질량유량을 측정하였다. 전자팽창밸브 입구압력, 입구과냉도, 그리고 개도를 변화시키면서 실험을 실시하였다. 시험용 전자팽창밸브의 제원과 실험조건을 Table 1에 나타내었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 서로 다른 상류압력에서 입구 과냉도 변화에 따른 냉매유량의 변화를 나타낸다. 과냉도의 증가에 따라 냉매유량은 선형적으로 증가하였다. 또한, 입구압력이 상승함에 따라 과냉도의 증가에 따른 유량변화율도 증가하였다. 전자팽창밸브 BD14SH 경우 과냉도가 3.5°C에서 11.5°C로 증가할 때, 1,553 kPa의 입구압력조건에서 냉매유량은 4.4% 증가하였으나, 2,152 kPa의 입구압력조건에서는 8.9% 증가하였고, BD18SH 경우에는 12.6%에서 15.3%로 증가하였다. 이것은 입구 과냉

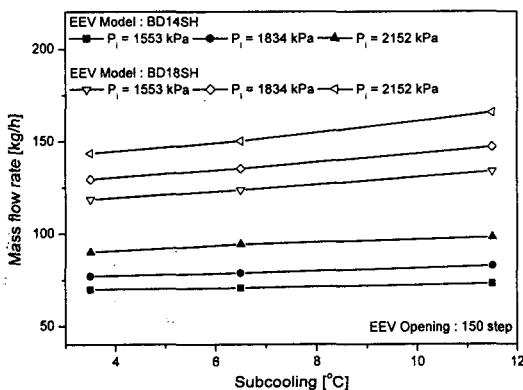


Fig. 2 Mass flow rate as a function of subcooling.

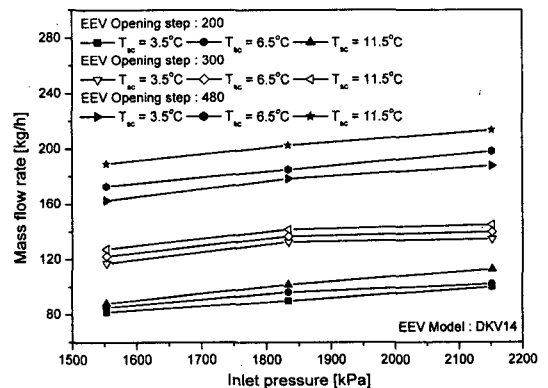


Fig. 3 Mass flow rate as a function of inlet pressure.

도의 변화에 따른 냉매유량의 변화는 전자팽창밸브 내부의 오리피스에서 단상영역의 변화와 입구 비체적의 변화에 기인한다. 입구 과냉도가 증가함에 따라 전자팽창밸브 내의 오리피스에서의 증발점은 오리피스 출구 쪽으로 이동하여 단상의 압력강화 영역을 증가시키게 된다. 과냉도가 3.5°C에서 11.5°C로 증가하면 1,553 kPa의 오리피스 입구에서 냉매 비체적은 2.8%로 감소하고, 2,152 kPa에서는 3.4%로 감소한다. 즉, 입구압력이 높을수록 과냉도 변화에 따른 비체적의 감소량이 증가하므로 냉매유량의 변화율도 증가하게 된다.

Fig. 3은 서로 다른 과냉도와 전자팽창밸브 개도 조건에서 입구압력의 변화에 따른 냉매유량을 나타낸다. 유량은 입구압력 변화에 거의 선형적으로 비례하여 증가하였다. 과냉도가 일정한 상태에서 입출구의 압력차가 증가하면 냉매의 질량유속이 빨라져 전자팽창밸브에 흐르는 유량은 증가하게 된다.

Fig. 4는 전자팽창밸브 개도에 따른 유량변화를 나타낸다. 개도가 증가함에 따라 냉매유량은 선형적으로 증가하였다. 그래프에서 비교되어진 전자팽창밸브 모델 DKV18과 BD18SH의 오리피스 직경은 1.8 mm로 동일하지만 BD18SH의 오리피스 길이가 1.6 mm로서, DKV18의 오리피스 길이 2.2 mm보다 짧기 때문에 냉매유량이 전체적으로 더 큰 경향을 나타냈다. 또한 전자팽창밸브의 개도가 작아질수록 동일한 운전조건에서 두 모델의 유량차이는 증가하였다. 즉, 과냉도 조건 11.5°C에서 BD18SH는 개도가 480스텝에서 200스텝으로

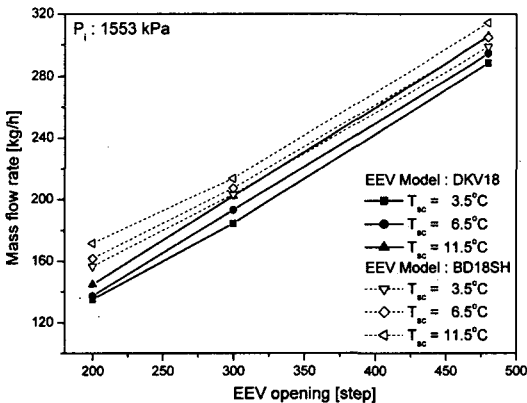


Fig. 4 Mass flow rate as a function of EEV opening.

감소하면 질량유량은 305.5 kg/h에서 144.8 kg/h로 53% 감소를 나타내었고; DKV18는 314.2 kg/h에서 171.6 kg/h로 45% 감소하였다. 이것은 개도가 작아질수록 오리피스의 개구면적이 감소하면서 오리피스의 길이가 긴 경우가 냉매유량 감소에 더 큰 영향을 주었기 때문이다. 따라서 전자팽창밸브 설계시에는 오리피스 길이와 직경의 비가 유량범위를 결정할 수 있는 중요한 요소임을 알 수 있다.

#### 4. 전자팽창밸브 유량예측 상관식

##### 4.1 전자팽창밸브 상관식의 개발

본 연구에서는 주어진 조건에서 전자팽창밸브를 통과하는 냉매유량을 예측할 수 있는 경험적 유량 모델을 개발하기 위하여 전자팽창밸브의 유량에 영향을 미치는 요소들에 대한 변수를 고찰하였다.

Fig. 5는 전자팽창밸브의 기본 단면구조를 나타낸다. 내부에는 오리피스와 니들밸브가 있어 니들밸브의 상하 움직임에 따라 오리피스의 개도가 변화하는 구조로 되어 있다. 본 연구에서는 개도 변화에 따른 개구면적의 변화를 이중관에 대한 수력직경의 함수로 나타내었다. 즉, 오리피스 직경(D)과 임의의 개도에서 니들밸브 외경(d)과의 차를 유효직경( $D_e$ )으로 정의하여 니들밸브의 움직임에 따른 변화로 나타내었다. 본 연구에 사용한 전자팽창밸브는(6종) 48스텝부터 개도가 열리기 시작하여 480스텝에서 완전히 열리도록 제작되어 있다. 따라서 전자팽창밸브 개도와 유효직경과의 관계는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_e = D - d = \left( \frac{EEV_{step} - 48}{EEV_{full\ step} - 48} \right) D \quad (1)$$

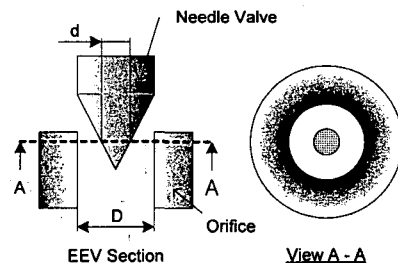


Fig. 5 Schematic of EEV cross section.

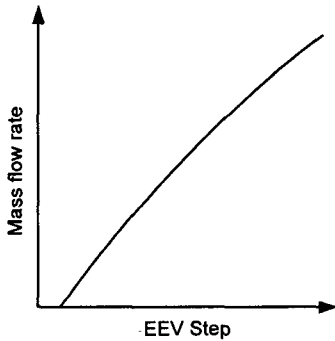


Fig. 6 Mass flow rate curve of EEV.

Fig. 6은 전자팽창밸브 스텝과 냉매 질량유량에 따른 특성곡선을 개략적으로 나타낸다. 일반적으로, 상변화 없이 오리피스를 지나는 액상의 유동은 베르누이방정식으로부터 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m} = C A_t \sqrt{\frac{2\rho(P_i - P_d)}{1 - \beta^4}} \quad (2)$$

여기서,  $A_t$ 는 베나콘트랙타 면적이고,  $\beta$ 는 오리피스 상류관 직경과 베나콘트랙타의 직경비이다. 그리고  $C$ 는 실험에 의한 보정계수값이다.

Aaron and Domanski<sup>(9)</sup>가 제시한 R22에 대한 경험식은 식(2)에서  $\beta$ 를 무시하고, 하류압력  $P_d$  대신 오리피스 내에서 발생하는 압력강하의 영향을 고려하여 비등이 발생하는 압력  $P_f$ 를 포함시켰다.

$$\dot{m} = C_d \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) \sqrt{2\rho_f(P_i - P_f)} \quad (3)$$

본 연구에서는 전자팽창밸브의 유량특성은 기본적으로 오리피스에 의한 압력강하에 의존하므로 오리피스의 기본 이론식에 전자팽창밸브의 형상변수인 오리피스 직경, 길이 및 운전조건에 대한 무차원식을 보정계수로 개발하여 전자팽창밸브에 대한 경험적 모델을 식(4)와 같이 제시하였다. 냉매유량에 영향을 주는 운전변수로는 입구 압력, 과냉도, 포화압력, 하류압력이 있다. 포화압력은 과냉영역이 질량유량에 영향을 주는 주요 인자 중의 하나이므로 운전변수에 포함된다. 준안정영역의 존재는 냉매가 오리피스를 통과하는 동안 상대적으로 높은 밀도로 인해 유량증가에

Table 2 Dimensionless Pi-groups

| Group   | Parameter                   | Group   | Parameter             |
|---------|-----------------------------|---------|-----------------------|
| $\pi_1$ | $\frac{P_i - P_d}{P_c}$     | $\pi_4$ | $\frac{\nu_g}{\nu_f}$ |
| $\pi_2$ | $\frac{\Delta T_{sc}}{T_c}$ | $\pi_5$ | $\frac{\sigma}{DP_i}$ |
| $\pi_3$ | $\frac{L}{D}$               | $\pi_6$ | $\frac{D_e}{D}$       |

영향을 준다. 준안정 유동의 영향은 표면장력과 점도, 밀도를 모델의 변수로 도입하여 고려할 수 있다. 오리피스의 형상변수로는 오리피스 직경과 길이, 그리고 전자팽창밸브의 개도량 변화에 따른 유효직경을 식(1)로부터 고려하였다. 식(5)는 전자팽창밸브 유량모델의 보정계수( $C_d$ )와 관련된 변수를 나타낸다.

$$\dot{m} = C_d A \sqrt{2\rho_f(P_i - P_s)} \quad (4)$$

$$C_d = f(P_i, P_d, P_c, \Delta T_{sc}, L, D_e, \nu_g, \nu_f, \sigma) \quad (5)$$

Table 2는 전자팽창밸브 냉매유량모델의 보정계수에 대한 6개의 무차원 변수를 나타낸다. 각 변수값은 각 운전점의 포화상태량이고 REFPROP<sup>(12)</sup>을 이용하여 계산하였다. 식(6)은 식(5)에 포함된 변수를 가지고 6개의 무차원항을 구성하여 실험 데이터를 바탕으로 지수를 결정한 유량예측 무차원 상관식이다.

$$C_d = 2.085 \pi_1^{1.140} \pi_2^{-0.624} \pi_3^{-0.232} \pi_4^{1.609} \pi_5^{0.247} \pi_6^{0.703} \quad (6)$$

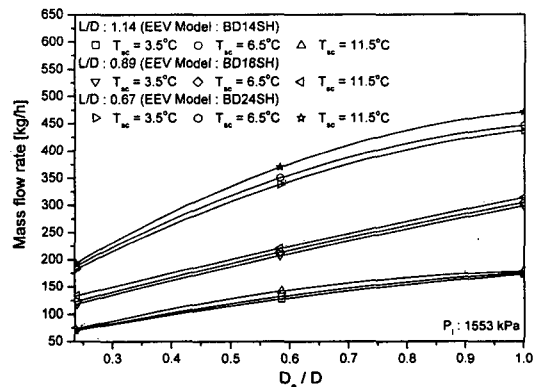


Fig. 7 Mass flow rate as a function of effective diameter to orifice diameter.

Fig. 7은 식(6)의 무차원 상관식에서 전자팽창밸브 오리피스 직경( $D$ )과 유효직경( $D_e$ ) 변화가 질량유량에 미치는 영향을 나타낸다. 오리피스 직경( $D$ )이 클수록 전자팽창밸브 스텝변화에 따른 유량변화가 크게 나타났다. 이것은 오리피스의 직경이 커지면 전자팽창밸브가 정확한 유량제어를 하기 위해 더 작은 스트로크에 의한 스텝제어가 필요함을 의미한다.

#### 4.2 상관식과 실험데이터의 비교

상관식의 정확성을 검증하기 위하여 상관식의 예측값을 본 연구에서 측정된 데이터와 비교하였다. Fig. 8에 나타낸 바와 같이 상관식 예측값과 실험 측정값은 최대 +15~-15% 정도의 상대오차를 나타내었고, 전체 실험데이터의 90%가 10% 이내의 상대오차를 나타내었다. 그리고 실험한 데이터와의 평균 편차는 1.4%, 표준편차는 6.1%로 나타났다. 상대오차, 평균 편차, 그리고 표준편차의 정의는 각각 식(7)~(9)에 나타내었다.

$$Rel. dev. = \frac{m_{pred}}{m_{pred} - m_{meas}} \times 100 \quad (7)$$

$$Ave. dev. = \frac{1}{n} \sum_1^n \left[ \frac{m_{pred}}{m_{pred} - m_{meas}} \times 100 \right] \quad (8)$$

$$Std. dev. = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n [Rel. dev.]^2 - [Ave. dev.]^2} \quad (9)$$

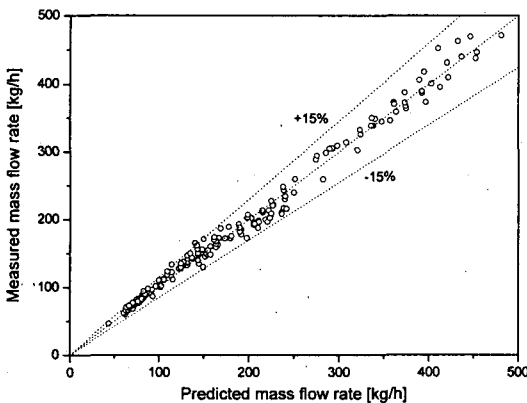


Fig. 8 Comparison of the present correlation's predictions with data base.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 전자팽창밸브의 성능특성을 평가할 수 있는 실험장치를 제작하여 다양한 운전 조건에서 실험을 실시하였으며, 실험 데이터를 이용하여 냉매유량을 예측할 수 있는 경험적 모델을 개발하였다.

(1) 냉매 질량유량은 전자팽창밸브 입구의 과냉도, 압력, 그리고 오리피스 개구면적이 커질수록 증가하였다. 동일한 오리피스 직경에서는 오리피스 길이가 길수록, 동일한 오리피스 길이에서는 직경이 클수록 오리피스 스텝변화에 따른 냉매유량 변화특성이 더 크게 나타났다.

(2) 평가한 데이터를 오리피스 이론 유량식을 수정하여 무차원 상관식에 전자팽창밸브 유량모델을 개발하였다.

(3) 전자팽창밸브 상관식은 실험한 6종의 모델에 대하여 실험값과 예측값의 상대오차는 +15~-15% 이내의 오차 범위였고 평균 편차는 1.4%, 표준편차는 6.1%로 나타났다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발사업인 이산화탄소 저감 및 처리 기술개발사업단의 연구비 지원(BA2-101-2-0-1)으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Kuehl, S. J. and Goldschmidt, V. W., 1991, Modeling of steady flow of R-22 through capillary tubes, ASHRAE Trans., Vol. 97, No. 1, pp. 139-148.
2. Dirik, E., Inan, C. and Tanes, M. Y., 1994, Numerical and experimental studies on adiabatic and non-adiabatic capillary tubes with HFC-134a, Proceedings of IIR-Purdue Refrigeration Conference, West Lafayette, U.S.A.
3. Wolf, D. A., Bittle, R. R. and Pate, M. B., 1995, Adiabatic capillary tube performance with alternative refrigerants, ASHRAE Final Report No. RP-762.
4. Melo, C., Ferreira, R. T. S., Neto, C. B., Gon-

- calves, J. M. and Mezavila, M. M., 1999, An experimental analysis of adiabatic capillary tubes, *Applied Thermal Eng.*, Vol. 19, pp. 669-694.
5. Kim, Y., Choi, J. M. and Chung, J. T., 2003, A generalized correlation for refrigerant mass flow rate through adiabatic capillary tubes, *Int. Journal of Refrigeration*, Vol. 26, No. 7, pp. 881-888.
  6. Krakow, K. I. and Lin, S., 1988, Refrigerant flow through orifices, *ASHRAE Trans.*, Vol. 94, Part 1, pp. 484-506.
  7. Kim, Y. and O'Neal, D. L., 1994, Two-phase flow of R-22 through short tube orifices, *ASHRAE Trans*, Vol. 100, Part 1, pp. 323-334.
  8. Mei, V. C., 1982, Short tube refrigerant restrictors. *ASHRAE Trans.*, Vol. 88, Part 2, pp. 157-168.
  9. Aaron, A. A. and Domanski, P. A., 1990, Experimentation analysis and correlation of refrigerant-22 flow through short tube restrictors, *ASHRAE Transactions*, Vol. 96, Part 1, pp. 729-742.
  10. Kim, Y. and O'Neal, D. L., 1993, An experimental study of two-phase flow of HFC-134a through short tube orifices, *Heat Pump and Refrigeration Systems Design, Analysis and Applications*, ASME, AES-Vol. 29, pp. 484-506.
  11. Gerhart, P. M., 1992, *Fundamentals of fluid mechanics*, Addison Wesley Publishing Company, pp. 526-527.
  12. McLinden, M., Klein, S. A., Lemmon, E. W. and Peski, A. P., NIST thermodynamic and transport properties of refrigerant and refrigerant mixture (REFPROP), Version 7.0.