

# R-410A 임계영역 운전조건에서 오리피스 성능특성에 관한 연구

최종민, 김용찬\*

국립한밭대학교 기계공학과, \*고려대학교 기계공학과

## Performance of Short Tube Orifices Using R-410A Near the Critical Region

Jong Min Choi, Yongchan Kim\*

Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

\*Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

(Received July 20, 2005; revision received October 12, 2005)

**ABSTRACT:** An experimental investigation was performed to develop an empirical correlation of R-410A flowing through short tube orifices working near the critical region. Tests were executed by varying upstream pressure from 2,619 kPa to 4,551 kPa, and upstream subcooling from 2.8 and 11.1°C. The experimental data were represented as a function of major operating parameters and short tube diameter. As compared to mass flow trends at normal upstream pressures, flow dependency on upstream subcooling became more significant at high upstream pressures due to a higher density change. Based on the database obtained from this study and literature, an empirical correlation was developed from a power law form of dimensionless parameters generated by the Buckingham Pi theorem. The correlation yielded good agreement with the data. Approximately 92% of the data were correlated within a relative deviation of 5%.

**Key words:** Short tube orifice(오리피스), Critical region(임계영역), Flow model(유량모델), Mass flow rate(질량유량)

### 기 호 설 명

$D$  : 모세관 내경 [mm]  
 $L$  : 모세관 길이 [mm]  
 $\dot{m}$  : 질량유량 [kg/h]  
 $P_c$  : 임계압력 [kPa]  
 $P_{sat}$  : 포화압력 [kPa]

$P_{up}$  : 상류압력 [kPa]  
 $T_c$  : 임계온도 [°C]  
 $\Delta T_{sub}$  : 과냉도 [°C]

### 그리스 문자

$\rho$  : 밀도 [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $\pi$  : 무차원 변수  
 $\mu$  : 점도 [ $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]

† 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

지구온난화와 오존층파괴를 일으키는 CFC 및 HCFC 계열의 냉매는 환경적 측면에서 HFC 계열 또는 자연냉매로 교체되고 있다. R-410A는 에어컨 및 열펌프에 주로 사용되고 있는 R-22를 대체하기 위한 HFC 계열 대체냉매로 알려져 있다.<sup>(1)</sup> R-410A는 동일 응축온도에서 작동압력이 높아 R-22 시스템보다 소형화할 수 있는 장점이 있으나, 외기온도 증가에 따른 시스템의 용량감소가 R-22 시스템보다 크다는 문제점을 가지고 있다.<sup>(2)</sup> 그러므로, R-410A를 R-22의 대체냉매로 시스템에 적용하기 위해서는 고온의 외기온도 조건에서 시스템 각 구성부품의 효율향상을 통한 시스템 성능을 최적화하는 것이 필요하다.<sup>(3)</sup> 고온의 외기 조건에서 R-410A 시스템의 성능은 적절한 과냉도를 가짐으로써 개선될 수 있으며, 이는 팽창장치를 이용하여 조절 가능하다.<sup>(2,3)</sup>

팽창장치는 시스템의 냉매유량과 고·저압의 균형을 통해 시스템 성능을 최적화하는 기능을 수행한다. 오리피스 팽창장치는 간단한 구조, 저가, 높은 신뢰성을 갖고, 열펌프 시스템 적용시 체크밸브가 필요 없는 등의 많은 장점을 가지고 있어서 에어컨과 열펌프 시스템의 팽창장치로 널리 사용되고 있다.<sup>(4,5)</sup>

오리피스의 성능 및 유량모델에 관한 많은 연구가 수행되었으나, 대부분 R-12와 R-22와 관련하여 수행되었다.<sup>(4,6,7)</sup> Aaron and Domanski<sup>(4)</sup>는 과냉의 입구조건에 대한 실험데이터를 이용하여 오리피스의 특성을 규명하고 유량예측 모델을 개발하였다. Kim and O'Neal<sup>(7)</sup>은 Aaron and Domanski<sup>(4)</sup>의 모델을 개선하여 R-22 냉매에 대한 경험적 오리피스 유량모델을 개발하였다. 최근에는 대체냉매를 적용한 여러 경험적 오리피스 유량예측모델에 관한 연구가 수행되었다.<sup>(5,8,9)</sup> Kim and O'Neal<sup>(8)</sup>은 단상의 오리피스 방정식을 수정하여 R-134a의 유량예측모델을 개발하고 성능을

고찰하였다. Payne and O'Neal<sup>(9)</sup>은 Kim and O'Neal<sup>(8)</sup>의 모델과 유사한 형태를 사용하여 HFC 혼합냉매에 대한 유량모델을 개발하였다.

R-410A는 외기온도 증가에 따라 임계영역 근처에서 운전되지만,<sup>(2)</sup> 대부분의 기존 연구들은 일반 운전조건범위에서 수행되었으며,<sup>(1-3)</sup> 임계영역에서의 R-410A에 관한 연구는 매우 부족하다.

본 연구에서는 임계영역에서 R-410A에 대한 오리피스 성능특성을 분석하고, 오리피스의 경험적 유량모델을 개발하고자 한다. 이를 위하여 오리피스 형상변화에 따른 일반 운전조건과 임계영역에서의 R-410A 냉매에 대한 성능실험 및 분석을 실시하였으며, 성능데이터를 이용하여 오리피스 유량모델을 개발하였다. 개발된 유량모델을 실험데이터 및 기존의 연구결과와 비교하여 신뢰성을 검증하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

Fig.1은 오리피스의 성능특성을 측정하기 위한 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 오리피스 시험부의 입구 과냉도, 상류압력, 하류압력을 쉽게 조절할 수 있도록 구성하였다. 압축기를 이용하여 냉매유량을 조절하였으며, 압축기에는 가변속 모터를 사용하여 고온의 외기온도에 해당하는 오리피스의 운전조건을 구현하도록 구성하였다. 압축기의 출구에 오일분리기를 설치하여 오일에 의한 오리피스 유동의 영향을 최소화하였다. 오리피스 입구압력은 압축기의 회전수 및 응축기 2차 유체의 유량 및 온도를 변화시켜 조절하였으며, 과냉도는 오리피스 입구와 응축기 사이에 설치한 과냉기와 전기히터(heat tape)를 이용하여 조절하였다. 오리피스 출구의 2상상태의 냉매는 증발열 교환기에서 가열되어 압축기로 순환되도록 구성하였다.

냉매유량은 질량유량계를 과냉기와 오리피스 사이에 설치하여 측정하였으며, 정확도는 측정치의 0.2%이다. 시험부의 입출구에서 온도와 압력을 각각 T형 열전대와 압력계를 이용하여 측정하였으며, 정확도는 각각  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  및  $\pm 6.9\text{kPa}$ 이다.

Table 1은 본 연구에 사용한 오리피스의 형상 및 실험조건을 나타내며, R-410A 냉매에 대하여 실험을 수행하였다.

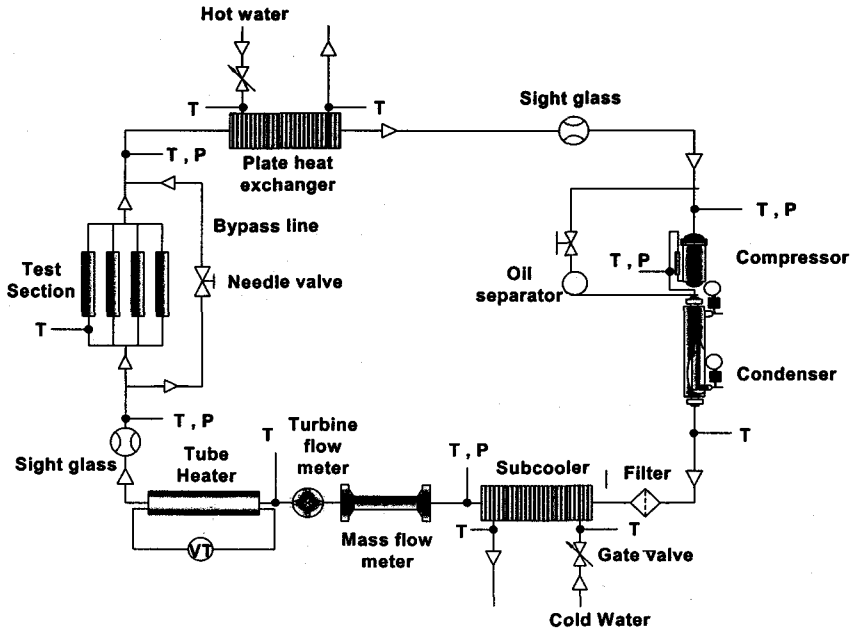


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup.

Table 1 Test conditions and short tube orifice geometries

Parameters		Conditions
Geometry	Length (mm)	12.7
	Diameter (mm)	1.10, 1.34, 1.72, 1.80
Operating conditions	Upstream pressure (kPa)	2619, 3180, 3604, 3833, 4327, 4551
	Upstream subcooling (°C)	2.8, 5.6, 11.1
	Downstream pressure (kPa)	772, 918, 1085, 1274

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 서로 다른 상류압력과 오리피스 직경 조건에서 과냉도의 변화에 따른 냉매유량의 변화를 나타낸다. 과냉도의 증가에 따라 냉매유량은 선형적으로 증가하였다. 그러나 과냉도의 변화에 따른 유량변화율은 상류압력이 증가함에 따라 증가하였다. 오리피스 직경이 1.72 mm일 때, 과냉도가 2.8°C에서 11.1°C로 증가함에 따라 2,619 kPa의 상류압력조건에서 냉매유량은 27.9% 증가하였으나, 4,327 kPa의 상류압력에 대해서는 37.5% 증가하였다. 오리피스 입구 과냉도의 변화에 따른 오리피스 유량의 변화는 입구밀도 및 오리피스 내부의 단상영역의 변화에 기인한다. 입구 과냉도가 증가함에 따라 오리피스 내부의 증발점(flashing

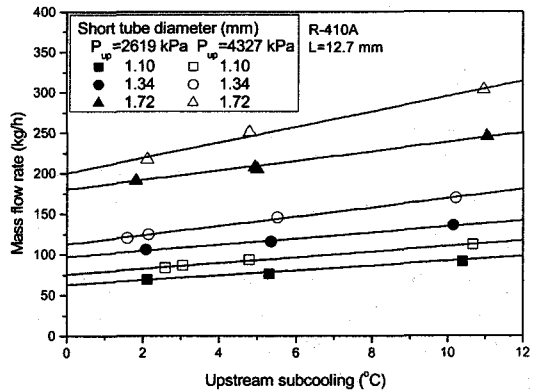


Fig. 2 Mass flow rate as a function of upstream subcooling for different short tube diameters.

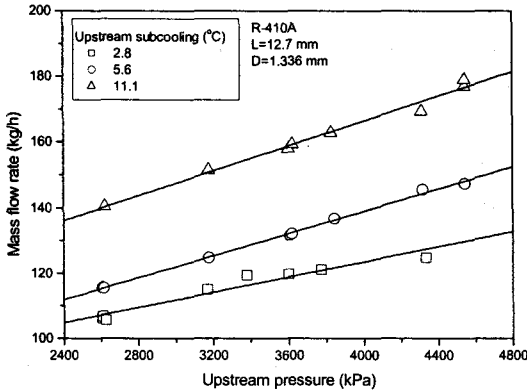


Fig. 3 Mass flow rate as a function of upstream pressure for different subcoolings.

point)은 오리피스 출구 쪽으로 이동하여 단상의 압력강하 영역을 증가시키고, 오리피스 입구의 밀도를 증가시켜 냉매유량을 증가시킨다. 과냉도가 2.8°C에서 11.1°C로 증가함에 따라 2,619 kPa의 상류압력에서 냉매밀도는 4.7% 증가하였고, 4,327 kPa의 상류압력에 대해서는 9.7% 증가하였다. 그러므로 임계영역에 근접한 상류압력조건에서 과냉도의 변화에 따른 냉매밀도의 영향은 더욱 증가한다.

Fig. 3은 서로 다른 과냉도에서 상류압력의 변화에 따른 오리피스를 통과하는 냉매유량의 변화를 나타낸다. 모든 과냉도에서 상류압력의 증가에 따라 냉매유량은 선형적으로 증가하였다. R-410A의 임계온도는 72.0°C이며, 본 연구에서 실험한 임계영역의 포화온도 71.7°C에 해당하는 상류 최고 포화압력인 4,551 kPa까지 상류압력의 증가에 따른 유량의 선형적 증가경향은 동일하게 나타났다. 실험에서 상류압력이 임계압력으로 접근하고, 과냉도가 2.8°C 이하일 때는 R-410A 적용 시스템이 다소 불안정한 운전상태를 나타냈다. 그러므로 R-410A를 냉매로 사용하는 시스템이 고온의 외기조건에서 운전될 때에는 냉매유량의 급격한 감소나 헛팅(hunting) 등을 방지하기 위하여 5.6°C 이상의 과냉도를 유지하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

Fig. 4는 R-410A 냉매에 대한 Payne and O'Neal<sup>(9)</sup>과 본 연구의 실험데이터를 나타내고 있다. 두 실험결과는 서로 잘 일치하였으며, 상류압력의 증가에 따라 냉매유량은 모두 선형적으로 증

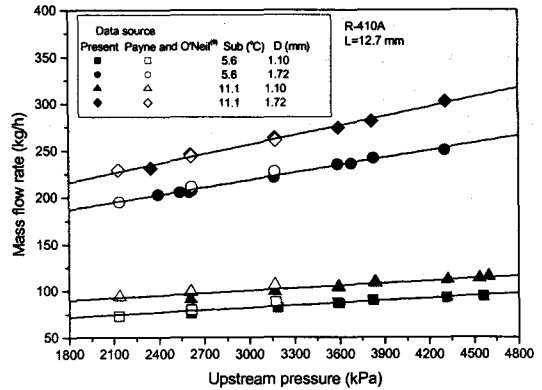


Fig. 4 Comparison of the present data with Payne and O'Neal's<sup>(9)</sup> for data extension over normal operating conditions.

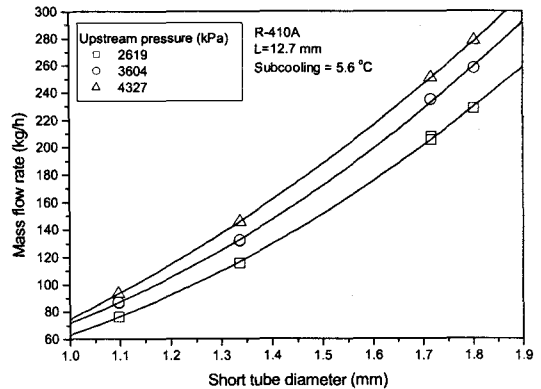


Fig. 5 Mass flow rate as a function of short tube diameter for different upstream pressure.

가하였으며, 직경이 증가함에 따라 상류압력 변화에 따른 유량변화율은 증가하였다. 오리피스의 직경이 1.097 mm에서 1.717 mm로 증가할 때 과냉도 5.6°C에서 상류압력의 변화에 따른 냉매유량의 증가율은 67% 나타났으며, 과냉도 11.1°C 조건에서는 증가율은 74%로 나타났다. 그러므로 R-410A 적용시스템에 직경이 큰 오리피스를 사용할 경우 시스템이 고온의 외기에서 운전될 때 과냉도의 감소에 따른 시스템의 냉매유량의 감소율은 더욱 증가할 것이다.

Fig. 5는 서로 다른 상류압력에서 오리피스의 직경 변화에 따른 냉매유량의 변화를 나타낸다. 냉매유량은 오리피스 직경의 제곱에 비례하여 증

가하였으며, 이는 일반 외기조건 범위에서 수행되었던 R-22, R-134a 및 R-410A 냉매에 대한 실험결과와 동일한 경향이다.<sup>(4,7,9)</sup> 상류압력 4,327 kPa에서 오리피스 직경이 1.1 mm에서 1.8 mm로 증가될 때, 냉매유량은 92.9 kg/h에서 278 kg/h로 199% 증가하였다.

4. 유량예측모델

4.1 유량모델의 개발

실험데이터를 이용하여 일반 외기조건과 고온 외기조건인 임계영역까지의 오리피스의 성능을 예측하기 위한 오리피스의 유량모델을 개발하였다. 모델개발을 위한 데이터 베이스는 본 연구의 72개 실험데이터와 Payne and O'Neal<sup>(9)</sup>의 138개 실험데이터로 구성되었다.

R-410A에 대한 오리피스 유량예측모델 개발을 위한 무차원 변수의 생성을 위해 오리피스의 유량과 관련된 변수들을 데이터 분석결과로부터 도출하였다. 입구압력, 과냉도, 입구온도에 해당하는 포화압력을 오리피스의 유량 관련 운전변수로 선정하였다. 오리피스 입구의 단상영역이 오리피스의 유량에 큰 영향을 미치므로 포화압력은 오리피스 입, 출구 관련 변수는 아니지만 유량 관련 변수로 고려하였다. 하류압력은 일반적으로 오리피스에서는 초킹이 발생하므로 본 모델의 운전 변수에 포함하지 않았다.<sup>(4,10)</sup> 압력 및 온도 관련 변수들에 대한 무차원화를 위하여 임계압력과 임계온도를 변수로 도입하였다. 오리피스는 압력강하에 의한 냉매유량 조절을 통한 시스템 매칭기능을 수행하는 기구이므로 압력강하와 관련된 밀도와 점도를 냉매의 물성치 관련 변수로 고려하였다. 오리피스 유량에 영향을 미치는 형상변수로서 직경 및 길이를 변수로 선정하였다. 선정된 오리피스 운전조건 및 형상변수를 이용하여 R-410A에 대한 오리피스 유량모델은 식(1)로 표현할 수 있다.

$$\dot{m} = f((P_{up} - P_{sat}), \Delta T, L, D, \mu_f, \mu_g, \rho_f, \rho_g, T_c) \quad (1)$$

식(1)의 변수에 대하여  $D, \rho_f, \mu_f$  및  $T_c$ 를 반복변수로 이용하여 Pi-theorem에 의해 6개의 무

Table 2 Dimensionless Pi-groups

Group	Parameter	Group	Parameter
$\pi_1$	$\frac{\dot{m}}{D^2 \sqrt{\rho_f P_{up}}}$	$\pi_4$	$\frac{L}{D}$
$\pi_2$	$\frac{P_{up} - P_{sat}}{P_c}$	$\pi_5$	$\frac{\rho_g}{\rho_f}$
$\pi_3$	$\frac{\Delta T_{sub}}{T_c}$	$\pi_6$	$\frac{\mu_f - \mu_g}{\mu_g}$

차원 변수를 생성하였으며, 생성된 무차원 변수들을 Table 2에 나타내었다.

냉매유량에 대한 무차원 변수인  $\pi_1$ 을 다른 5개의 무차원 변수에 대하여 지수함수 형태로 유량모델을 구성하였으며, 데이터베이스를 이용하여 비선형 회귀법을 적용하여 오리피스 유량예측 모델의 계수 및 지수들을 결정하였다. 식(2)는 본 연구에서 얻은 R-410A 냉매에 대한 임계영역까지 적용 가능한 오리피스 유량예측모델을 나타낸다.

$$\pi_1 = 0.80255 \pi_2^{3.0949} \pi_3^{-3.1066} \pi_4^{-0.1904} \pi_5^{-2.6183} \pi_6^{-1.4843} \quad (2)$$

4.2 유량모델의 검증 및 비교

Fig. 6은 개발된 유량모델의(식(2)) 예측값과 실험데이터와의 비교를 나타낸다. 모델의 예측값과 실험데이터와의 평균편차는 0.11%, 표준편차는 2.4%를 나타냈다. 또한, 예측값의 92%가 실험데이

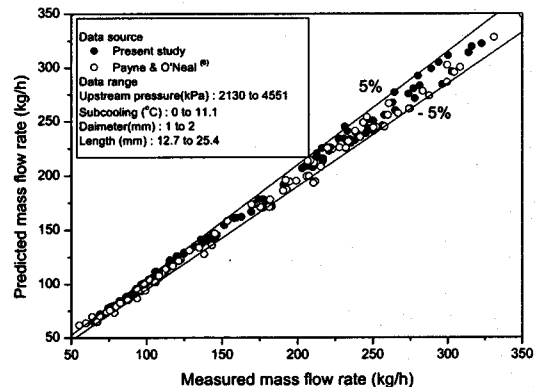


Fig. 6 Comparison of the present correlation's predictions with database.

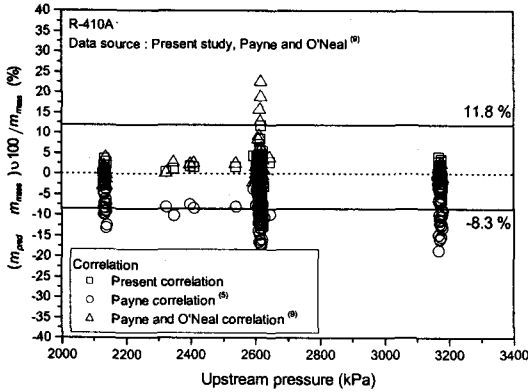


Fig. 7 Deviations of several correlations' predictions from measured data at upstream pressure from 2,130 to 3,180 kPa.

터와  $\pm 5\%$  이내에서 잘 일치하였다. 데이터와 예측값과의 최대편차는 냉매유량이 적은 영역에서 발생하였으며, 이는 저유량 범위에서 실험오차가 크게 나타났기 때문이다.

본 연구에서 개발된 모델의 유량예측 성능을 기존의 모델<sup>(5,9)</sup>과 비교하였다. Figs. 7, 8은 일반 외기온도조건(2,130~3,180 kPa)과 임계온도조건(3,180~4,551 kPa) 영역에서의 상류압력 변화에 따른 본 연구에서 개발된 식(2)의 모델과 기존의 Payne<sup>(5)</sup> 및 Payne and O'Neal<sup>(9)</sup>의 모델의 예측값과 실험값과의 상대오차를 나타낸다. 상류압력이 2,130 kPa에서 3,180 kPa의 범위일 때, 본 연구에서 개발된 모델은 -8.3에서 11.8%의 오차를 나타냈으며, Payne<sup>(5)</sup>과 Payne and O'Neal<sup>(9)</sup>의 모델은 각각 -19.5~8.4%, -4.4~22.6%의 오차를 나타냈다. 고온의 외기조건인 상류압력 3,180 kPa에서 4,551 kPa의 영역에서, 본 모델과 Payne<sup>(5)</sup> 및 Payne and O'Neal<sup>(9)</sup>의 모델은 실험데이터와 각각 -4.1~5.9%, -24.7~14.3%, -2.7~14.7%의 오차를 나타냈다.

Payne<sup>(5)</sup>의 모델은 상류압력이 2,100 kPa에서 3,000 kPa의 압력범위에 대해서는 평균편차와 표준편차가 각각 2.98%와 3.98%로 매우 우수한 예측성능을 나타냈으나, 상류압력이 4,000 kPa에서 4,551 kPa의 임계영역 부근까지의 고온의 외기온도에 대해서는 평균편차와 표준편차가 각각 1.68%와 10.92%를 나타내어 모델의 예측도가 현저하게 감소하였다. Payne and O'Neal<sup>(9)</sup>의 모델은 전체적으로 Payne<sup>(5)</sup> 모델보다 우수한 예측성능을 나

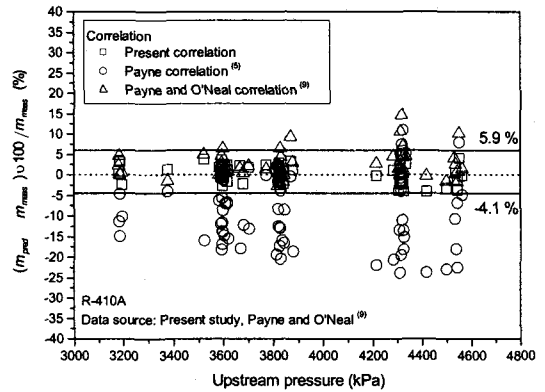


Fig. 8 Deviation of several correlations' predictions from measured data at upstream pressures from 3,180 to 4,551 kPa.

타졌지만, 고압의 운전조건에서는 냉매유량을 다소 크게 예측하였으며, 이는 모델개발에 사용한 데이터 베이스가 고압의 상류압력에 대한 데이터가 부족하기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발된 유량예측모델은 실험데이터와 잘 일치하여 R-410A를 적용한 오리피스의 유량예측에 적용 가능하다. 개발된 모델은 실험데이터의 범위 내에서 신뢰성을 갖으며, 응축압력 2,130~4,551 kPa, 과냉도 0.4~15.9°C, 오리피스 길이 12.7~25.4 mm, 오리피스 직경 1.1~1.8 mm의 범위에서 적용 가능하다.

## 5. 결 론

R-410A 냉매에 대하여 일반적인 운전조건과 임계압력까지의 운전조건에서 오리피스의 성능측정실험을 실시하였다. 냉매유량은 상류압력과 과냉도 및 오리피스 직경에 크게 의존하였으며, 기존의 연구결과와 동일한 경향을 나타냈다. 그러나, 3,604 kPa 이상의 상류압력조건에서 냉매밀도 변화가 커서 과냉도의 감소에 따른 유량감소는 매우 크게 나타났다. 과냉도 및 오리피스 직경이 감소할 때, 상류압력 변화에 따른 냉매유량 변화율은 감소하였다. 본 연구 및 기존 문헌으로부터 얻은 R-410A 냉매에 대한 실험데이터를 이용하여 오리피스 유량예측모델을 개발하였다. 유량예측모델은 오리피스 입구조건과 형상 및 냉매 물성치에 Pi-theorem을 적용하여 지수함수 형태로 개발하였다. 개발된 모델의 예측값은 실험데이터

와 각각 0.11%와 2.4%의 평균편차와 표준편차를 나타냈으며, 예측값의 92%가 실험데이터와  $\pm 5\%$  이내의 상대오차를 나타냈으며, 기존 모델에 비하여 전 운전조건에서 우수한 예측성능을 나타냈다.

## 후 기

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며(KRF-2004-042-D00023), 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Chin, L. and Spatz, M. W., 1999, Issues relating to the adoption of R-410A in air conditioning systems, 20th International Congress of Refrigeration, Sydney.
2. Motta, S. Y. and Domanski, P. A., 2000, Performance of R-22 and its alternatives working at high outdoor temperatures, The Eighth International Refrigeration Conference, IN.
3. Wells, W., Bivens, D., Yokozeki, A. and Rice, C. K., 1999, Air conditioning system performance with R-410A at high ambient temperatures, ASHRAE Annual Meeting, Seattle.
4. Aaron, A. A. and Domanski, P. A., 1990. Experimentation, analysis, and correlation of refrigerant-22 flow through short tube restrictor, ASHRAE Transactions, Vol.96, No. 1, pp. 729-742.
5. Payne, W. V., 1997, A universal mass flow rate correlation for refrigerants and refrigerant/oil mixtures flowing through short tube orifices, Ph.D Thesis, Texas A&M University, Texas, USA..
6. Pasqua, P. F., 1953, Metastable flow of Freon-12, Refrigeration Engineering, Vol.61, pp. 1084-1088.
7. Kim, Y. and O'Neal, D. L., 1993, Two-phase flow of refrigerant-22 through short tube orifices, ASHRAE Transactions, Vol.100, No. 1, pp. 323-334.
8. Kim, Y. and O'Neal, D. L., 1994, A semi-empirical model of two-phase flow of refrigerant-134a through short tube orifices, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 9, pp. 426-435.
9. Payne, W. V. and O'Neal, D. L., 1995, Two-phase flow of two HFC refrigerant mixtures through short tube orifices, U.S. Environmental Protection Agency, Report-600/R-95-168.
10. Kim, Y., 1993, Two-phase flow of HCFC-22 and HFC-134a through short tube orifices, Ph.D Thesis, Texas A&M University, Texas, USA.