

바이패스 오리피스 팽창장치의 유동 특성에 관한 실험적 연구

Experimental study on characteristics of two-phase flow through a bypass-orifice expansion device

최 종 민*, 김 용 찬**
J. M. Choi, Y. C. Kim

Key words : Bypass orifice(바이패스 오리피스), Straight orifice(직선형 오리피스), Inverter-driven heat pump(인버터 열펌프)

Abstract

To establish optimum cycle of the inverter-driven heat pump with a variation of frequency, the bypass orifice, which is a short tube having a bypass hole in the middle, was designed and tested. Flow characteristics of the bypass orifice were measured as a function of orifice geometry and operating conditions. Flow trends with respect to frequency were compared with those of short tube orifices and capillary tubes. Generally, the bypass orifice showed the best flow trends among them, that will enhance the seasonal energy efficiency ratio of an inverter heat pump system. Based on experimental data, the semi-empirical flow model was developed to predict mass flow rate through bypass orifices. The maximum difference between measured data and model's prediction was within $\pm 5\%$.

기 호 설 명

A	: 오리피스 단면적, m^2	LB	: 바이패스 구멍의 위치, mm
C	: 오리피스 상수	\dot{m}_s	: 질량유량, kg/h
DB	: 바이패스 구멍직경, mm	P	: 압력, kPa
D_{in}	: 바이패스 오리피스 입구직경, mm		그리스문자
D_{out}	: 바이패스 오리피스 출구직경, mm	ρ	: 밀도, kg/m^3
DR	: D_{in}/D_{ref}		하첨자
EVAP	: $(P_c - P_{down})/P_c$		
L	: 오리피스 길이, mm	c	: 임계상태

* 고려대학교 공과대학 기계공학과 대학원

** 정희원, 고려대학교 공과대학 기계공학과

down : 하류

up : 상류

sat : 포화상태

1. 서 론

인버터 열펌프는 부하에 따라 압축기의 회전수를 조절하여 압축기의 연속운전을 가능하게 하며, 시스템의 고효율화, 신뢰성 확보 및 실내환경의 쾌적성 향상 등^(1,2)을 가능하게 한다. 현재 인버터 열펌프의 팽창장치로 국내에서는 주로 모세관을 사용하고 있으나, 모세관을 이용할 경우 모든 주파수에서 인버터 열펌프를 최적으로 운전할 수 없으므로 인버터 열펌프의 주파수 변화특성에 맞는 팽창장치의 연구 및 개발이 요구되고 있다.⁽³⁾

일정면적 팽창장치의 하나인 오리피스 팽창장치는 생산가격의 절감, 팽창장치의 검사 및 교체의 용이성, 모세관과 비교하여 대용량 시스템에의 적용가능성, 그리고 열펌프 적용시 체크밸브의 불필요성 등의 장점을 가지고 있어 최근 사용이 증대되고 있다.

Aaron과 Domanski⁽⁴⁾는 R-22을 사용하여 입구 조건이 단상인 경우에 오리피스에 대하여 실험을 수행하여 오리피스의 유동특성과 실험적 모델을 개발하였다. Kim⁽⁵⁾은 R-22와 대체냉매인 R-134a를 적용하여 오리피스에 대하여 실험적 연구를 수행하였

으며, 가시화 실험결과를 이용하여 오리피스의 유동 특성을 해석하고, 단상과 2상(two-phase)의 입구조건에 대하여 실험적 모델을 제시하였다. 국내에서 모세관에 대한 연구는 많이 수행되었지만 오리피스에 대한 연구, 특히 인버터 열펌프의 주파수 변화에 따른 성능특성과 관련된 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

본 논문에서는 기존의 모세관을 대체하여 인버터 열펌프의 주파수 변화에 따른 시스템 성능을 향상시킬 수 있는 바이패스형 오리피스를 개발하여, 주요 운전변수의 변화에 따른 실험을 실시하고, 그 유동특성을 고찰하였으며, 기존의 오리피스(본 논문에서는 '직선형 오리피스'라 칭한다) 및 모세관과 비교하였다. 또한 실험데이터를 이용하여 바이패스 오리피스의 유량을 예측할 수 있는 유량예측모델을 제시하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig.1은 본 연구에 사용된 팽창장치 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 입구 과냉도, 응축압력 및 증발압력을 쉽게 조절할 수 있도록 설계하였다. 오리피스의 입구압력은 액체펌프의 회전속도와 바이패스라인의 니들밸브를 이용하여 조절하며, 오리피스의 입

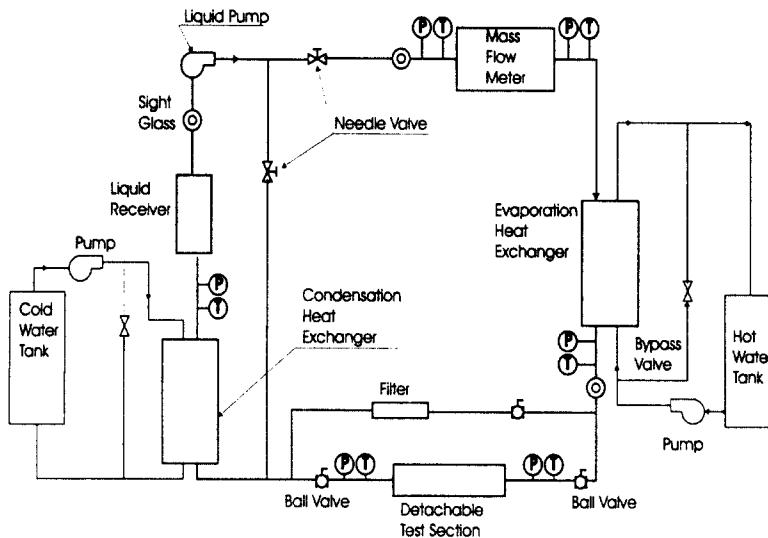


Fig.1 Schematic of the orifice test setup

구 과냉도는 증발열교환기에 공급되는 온수의 온도 및 유량제어를 통하여 조절한다. 오리피스 출구의 압력은 응축열교환기에 유입되는 물/글리콜 용액의 온도 및 유량으로 조절한다. 시험용 바이패스 오리피스 및 직선형 오리피스는 응축열교환기와 증발열교환기 사이의 시험부에 설치하며, 오리피스를 교환한 후 시험을 연속적으로 실시할 수 있도록 시험부 양쪽에 두 개의 볼밸브를 설치하였다.

Fig.2는 본 연구를 통하여 새롭게 설계한 바이패스 오리피스 팽창장치의 형상이고, Fig.3은 기존에 사용하고 있는 직선형 오리피스의 개략도이다. 본 연구에서 개발한 바이패스 오리피스는 직선형 오리피스와는 달리 유동방향으로 테이퍼가 있으며, 유동중간에 2개의 바이패스 구멍을 가지고 있다. Table 1은 실험에 사용된 오리피스의 형상 및 크기를 나타내고 있다.

시험조건은 인버터 열펌프의 일반적인 운전조건⁽³⁾을 포함하도록 선택하였으며, 실험에서 설정한 주요

운전변수는 입구 과냉도, 상류압력 및 하류압력 등이다. 상류압력은 인버터 열펌프의 저주파수, 정격주파수, 고주파수에서의 압력조건인 1,645kPa, 1,841kPa, 1,963kPa을 선택하였으며, 입구 과냉도는 1℃ ~ 13.9℃까지 변화시켰다. 하류압력은 입구온도에 해당하는 포화압력보다 낮은 범위에서 변화시켰다. Table 2는 본 연구에서 선택한 실험조건을 나타낸다. 작동유체는 HCFC-22를 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

인버터형 열펌프는 냉난방부하의 변동에 따라 압축기의 회전수를 조절하여 용량을 조절한다. 모세관

Table 1 Dimensions of tested orifices

L(mm)	D _{in} (mm)	D _{out} (mm)	DB(mm)	LB(mm)
15	1.26	1.26	Straight orifice	
15	1.26	1.26	0.79	7.91
15	0.99	1.37	0.73	7.87
15	1.33	0.80	0.53	7.87
15	1.36	0.91	0.52	7.85
15	1.38	0.92	0.73	7.94
15	1.39	0.94	0.56	7.86
15	1.40	0.86	0.53	7.88
15	1.43	0.91	0.50	7.87
15	1.39	0.98	0.57	5.92
15	1.37	0.92	0.56	10.36
15	1.36	0.89	0.66	7.88
15	1.38	0.92	0.56	7.92

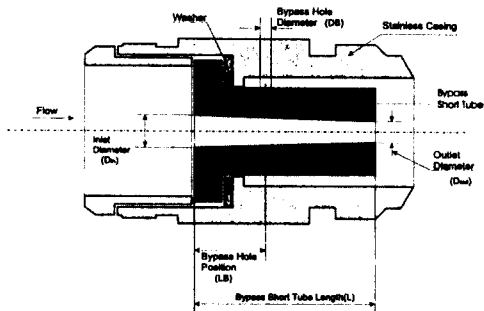


Fig.2 Test section of a bypass orifice

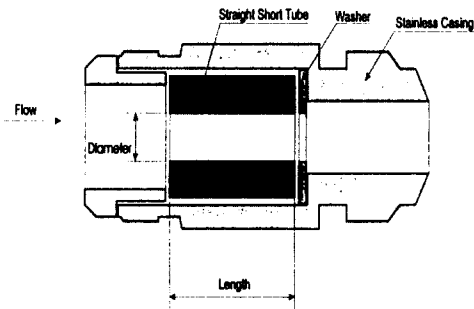


Fig.3 Test section of a straight orifice

Table 2 Test conditions

Parameters	P _{up} (kPa)	P _{down} (kPa)	T _{sub} (℃)
Conditions	1,645 1,841 1,963	600	13.9 8.7 5.7 1
		700	
		780	
		800	
		850	
		900	

을 인버터 열펌프의 팽창장치로 활용하는 경우 정격 주파수 조건에서 최대의 성능을 나타내는 모세관을 기준모세관으로 정하고, 저주파수 및 고주파수에서 최대의 성능을 나타낼 수 있는 모세관의 크기를 비교하여 볼 때, 저주파수 영역에서는 기준모세관과 비교하여 모세관의 길이가 증가하여 유량이 감소하고 고주파수 영역에서는 모세관의 길이가 감소하여 유량이 증가하여야 최대의 성능을 나타낸다⁽⁵⁾. 그러므로 인버터 열펌프가 모든 주파수범위에서 최적의 성능을 나타내기 위해서는 주파수 변화에 따른 유량 증가의 기울기가 모세관보다 커야 한다.

본 연구에서는 위와같은 인버터 열펌프의 특성을 만족시키기 위하여 기존의 직선형 오리피스스의 형상을 변화하여 바이패스 오리피스스를 개발하였으며, 운전 변수를 변화시키며 유동 특성을 측정하였다.

3.1 입구 및 출구 운전조건 영향

Fig.4는 하류압력의 변화에 따른 냉매유량의 변화를 나타내는데, 하류압력이 오리피스스 입구 온도에 해당하는 포화압력보다 낮을 경우 하류압력의 변화에 따른 유량 변화는 2.4% 이내로 직선형 오리피스스에서 보고된⁽⁴⁻⁶⁾ 초킹조건이 바이패스 오리피스스에서도 만족되고 있다. 바이패스 오리피스스를 열펌프에 적용한 경우 일반적으로 하류압력이 포화압력보다 낮으므로 팽창장치에서 초킹이 발생하여 시스템의 신뢰성을 확보할 수 있다.

Fig.5는 상류압력의 변화에 따른 냉매유량의 변화를 나타내고 있다. 상류압력의 증가에 따라 냉매 유

량은 거의 선형적으로 증가하며, 과냉도가 감소함에 따라 상류압력 증가에 따른 유량증가의 기울기는 감소하였다. 이는 상류압력이 증가하는 경우 오리피스스 입구 단상영역에서의 압력강하가 증가하기 때문에 냉매유량이 증가하며, 과냉도가 큰 영역에서는 과냉도가 작은 영역보다 상류압력 증가에 따른 단상상태의 압력강하 영역이 증가하여 과냉도가 큰 경우에 상류압력 증가에 따른 유량 증가폭이 크게 나타났다. 상류압력이 1,645kPa에서 1,963kPa로 증가할 때, 입구 과냉도 1℃인 경우 유량은 4.7kg/h 증가하였고, 과냉도 13.9℃인 경우 냉매유량의 증가는 10.3kg/h로 2배이상 증가하였다. 바이패스 오리피스스에서의 상류압력 변화에 따른 유량변화는 Kim이 보고한⁽⁵⁾ 직선형 오리피스스의 실험결과와 동일한 경향을 나타냈지만, 바이패스 오리피스스에서의 유량변화 기울기가 더 크게 나타나고 있다. 직선형 오리피스스는 입구부분

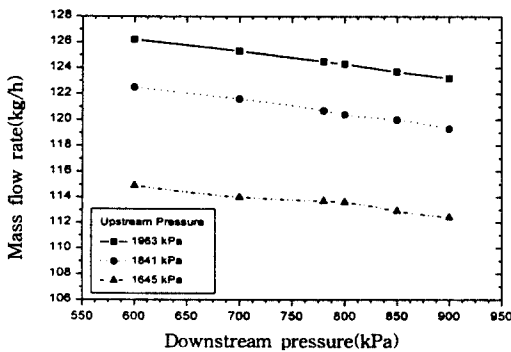


Fig.4 Flow dependency on downstream pressure

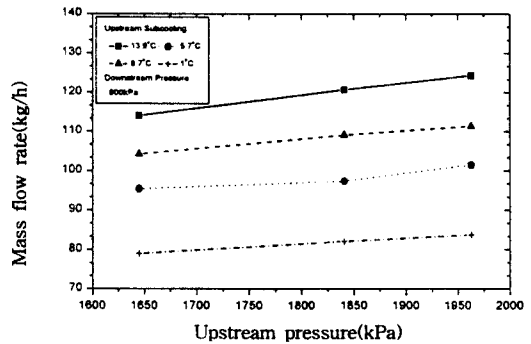


Fig.5 Flow dependency on upstream pressure

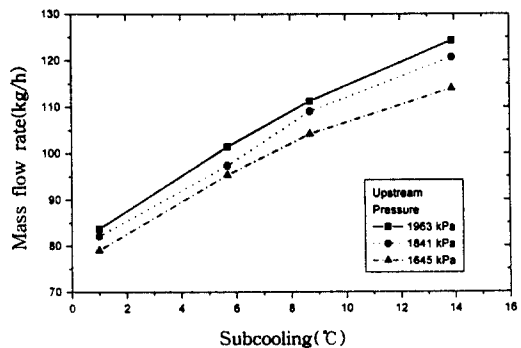


Fig.6 Flow dependency on upstream subcooling

에서 급격한 압력강하가 존재하고 이 영역에서의 압력강하로 오리피스의 유량이 결정되므로 서로 비슷한 입구형상을 갖고 있는 직선형 오리피스와 바이패스 오리피스는 상류압력 변화에 따라 동일한 유동형태를 나타냈다. 그러나, 바이패스 오리피스는 직선형 오리피스와 달리 상류압력 변화시에 내부압력 변화 및 증발점의 위치가 바이패스 구멍을 흐르는 유량에 영향을 주어서 상류압력 변화에 따른 유량변화가 직선형 오리피스보다 크게 나타났다.

Fig.6은 바이패스 오리피스의 서로 다른 입구압력에 대해 입구 과냉도의 변화에 따른 냉매유량 변화를 나타내고 있다. 냉매유량은 과냉도의 증가에 따라 증가하였으며, 과냉도의 영향이 매우 크게 나타나고 있다. 이는 과냉도의 증가에 따른 액체 밀도의 증가 그리고 입구부분에서의 압력강하의 증가에 기인한다.

3.2 바이패스 오리피스 형상변화의 영향

Fig.7은 서로 다른 길이와 입구직경비(L/D_{in})에

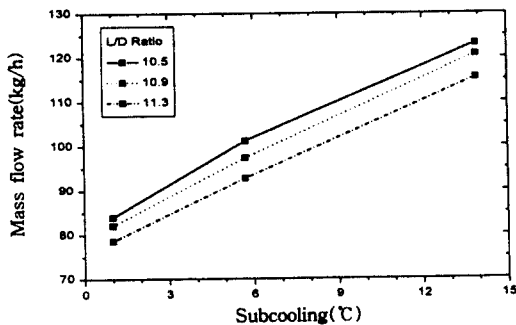


Fig.7 Flow dependency on upstream subcooling as a function of the L/D_{in}

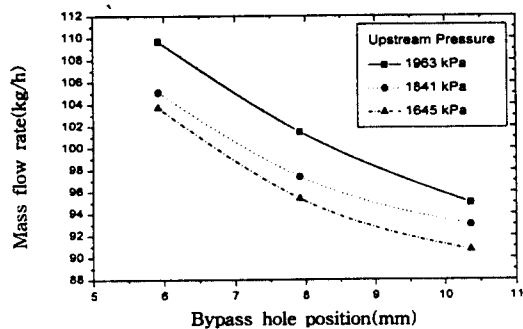


Fig.8 Flow dependency on bypass hole position

대한 입구 과냉도의 영향을 나타내고 있다. L/D_{in} 이 증가함에 따라 모든 입구 과냉도에 대하여 유량이 감소하였다. 직선형 오리피스에서도 이와 동일한 경향이 보고되었는데^(4,5), L/D_{in} 이 증가함에 따라 유동 저항이 증가되고 관내의 증발점이 앞쪽으로 이동되어 단상의 압력강하 영역이 감소하고 관내의 보이드율이 증가하여 유량이 감소된 것으로 사료된다.

Fig.8은 바이패스 구멍의 위치에 따른 유량 변화를 나타낸 것이다. 모든 입구 압력에 대하여 바이패스 구멍의 위치가 입구쪽에서 출구쪽으로 이동함에 따라 냉매유량은 감소하였다. 이는 오리피스 내부의 증발점의 위치와 오리피스 내부의 압력분포의 변화에 기인하는 것으로 보인다. 오리피스 길이방향의 내부압력 분포를 살펴보면, 입구부분에서 베나콘트랙타가 형성되어 압력의 최저점이 발생하게 되며, 베나콘트랙타 이후 관내부는 포화압력으로 회복되며 그 후 2상상태로 압력이 강해진다. 그러므로 바이패스 구멍이 뒤쪽으로 이동함에 따라 구멍의 입구압력이 감소하게 되고, 바이패스 구멍 입구건도가 증가하여 바이패스 구멍을 통과하는 유량이 감소하여 바이패스 오리피스 전체유량이 감소한 것으로 사료된다.

3.3 모세관, 직선형 오리피스 및 바이패스 오리피스의 비교

Fig.9는 모세관, 직선형 오리피스 및 바이패스 오리피스의 냉매유량을 주파수 변화에 따라 나타내고 있다. 여기에서 모세관의 자료는 Kim의 수치모델을 활용하여 계산한 것이며⁽⁶⁾, 각 주파수에서의 운전조건은 팽창장치로 모세관을 사용하는 인버터 열펌프의

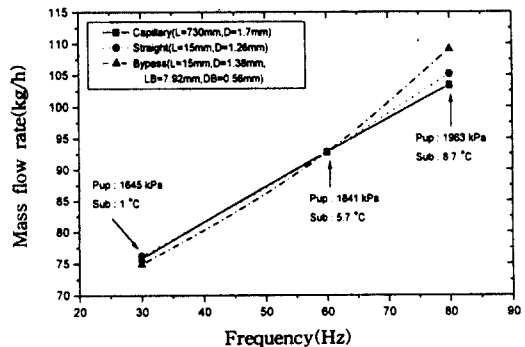


Fig.9 Comparison of characteristics of tested expansion devices

주파수 변화에 따른 성능특성 실험에서 얻은 자료를 이용한 것이다.⁽³⁾ 그림에 나타낸 모든 팽창장치를 정격조건(60Hz)에서 냉매유량이 동일하도록 선정 한 경우, 저주파수 영역에서는 바이패스 오리피스가 가장 적은 유량을 나타내고 있으며, 고주파수 영역에서는 바이패스 오리피스의 유량이 가장 크게 나타났다. 모세관의 유량은 입구압력 및 과냉도에 대하여 선형적으로 비례하지만⁽⁷⁻⁹⁾, 오리피스의 경우에는 유량이 과냉도에 대하여 비선형적으로 증가하기 때문에⁽⁵⁾ 오리피스가 모세관에 비하여 유량변화의 기울기가 크다. 또한, 바이패스 오리피스에서 바이패스 구멍을 통과하는 유량은 오리피스 내부의 증발점의 위치와 압력의 영향을 받아 입구 과냉도 또는 압력의 변화에 따라 유량의 변화폭이 커지기 때문이다. 그러므로 바이패스 오리피스는 직선형 오리피스나 모세관에 비하여 주파수 증가(압력 및 과냉도 증가)에 따른 유량 증가폭이 크게 나타나고 있다. 이는 인버터 열펌프에서 주파수 변화에 따라 최적 사이클을 이루기 위하여 요구되는 유량 특성이다.

3.4 테이퍼 방향의 영향

Fig.10은 테이퍼의 방향이 다른 바이패스 오리피스와 직선형 오리피스를 비교한 그림이다. 입구 직경이 출구 직경에 비하여 큰 경우, 주파수 변화에 따른 유량 증가폭이 직선형 오리피스 및 입구 직경이 출구 직경보다 작은 경우에 비하여 크게 나타나고 있다. 입구 직경이 출구 직경보다 큰 경우에는 다른 두 경

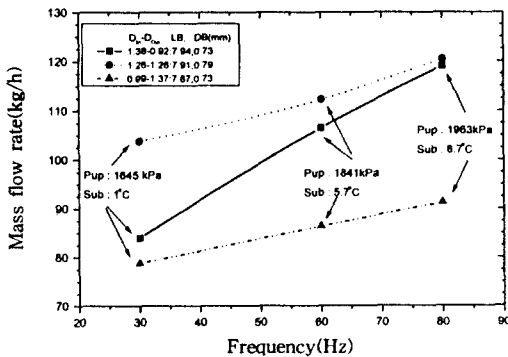


Fig.10 Effects of tapering direction on mass flow rate

우에 비하여 유동이 진행함에 따라 단면적이 감소하므로 압력 회복점과 증발점이 앞쪽에 위치하여 주파수 변화에 따라 바이패스 구멍을 통한 유량변화가 크므로 오리피스 전체유량의 변화가 커진다. 인버터 열펌프에서는 주파수 변화에 따라 모세관이나 직선형 오리피스보다 유량 변화폭이 큰 팽창장치가 요구되므로, 입구 직경이 출구직경보다 큰 바이패스 오리피스를 인버터 열펌프에 적용하여야 한다.

4. 바이패스 오리피스의 유량예측모델

바이패스 오리피스는 관에서의 급격확대 및 축소, 관내부에서의 상변화, 초크현상등으로 인하여 유동현상이 복잡하여, 관내부에서의 진도, 온도 및 음속을 예측하기 어렵기 때문에 수치적으로 해석하기 어렵다. 본 논문에 사용한 바이패스 오리피스의 출구는 이상상태의 유동을 가지며 출구압력이 입구온도에 해당하는 포화압력보다 낮은 경우 초크조건을 만족시키므로 단상의 오리피스 방정식을 바이패스 오리피스 유동에 맞도록 변형하여 바이패스 오리피스에서의 냉매유량 예측모델을 개발하였다.

$$\dot{m}_s = CA\sqrt{2\rho g_c(P_{up} - P_f)} \tag{1}$$

Table 3 Coefficients of correction factors in the flow model

Equations	Coefficients	HCFC-22
Eq(2)	a ₁	0.02706
	a ₂	11.35237
	a ₃	-0.68358
	a ₄	1.17439
	a ₅	1.31613
	a ₆	0.11144
	a ₇	-0.3044
	a ₈	0.67779
	a ₉	0.0829
	a ₁₀	0.04805
P _c		4,973.8kPa
T _c		369.3K
g _c		1.2960 × 10 ⁻¹⁰

여기서 P_f 는 초킹조건을 만족하도록 하류압력을 무차원의 운전조건 및 오리피스 형상으로 수정한 압력이다. P_f 는 무차원 형태를 가지고 있으므로 국제단위계(SI 단위계)와의 다른 단위계에서도 적용할 수 있고, HCFC-22 이외의 냉매에 대해서도 적용가능하다. P_f 의 수정에 사용된 무차원화된 변수들의 수정계수는 실험데이터를 이용하여 비선형 커브피팅에 의해 결정하였다. 유량 모델에 포함된 수정계수값들은 Table 3에 나타내었다.

$$P_f = P_{sat} [a_1 + A_2 (P_{up}/P_c)^{a_2} (D/D_{ref})^{a_3} SUBC^{a_4} + a_5 (P_{up}/P_c)^{a_5} + a_8 EXP(a_9 (D/D_{ref})) + a_{10} EVAP] \quad (2)$$

여기서, $PRA = P_{up}/P_c$

$$DR = D/D_{ref}$$

$$SUBC = (T_{sat} - T_{up})/T_c$$

$$EVAP = (P_c - P_{down})/P_c$$

식(2)에서 PRA, DR, SUBC 및 EVAP는 각각 입구압력, 직경, 과냉도 및 출구압력에 대한 무차원 변수들이다. 전체적으로 유량모델과 실험결과와의 오차는 ±5% 이내였다.

5. 결 론

기존의 모세관을 대체하여 고주파수 및 저주파수 영역에서 인버터 열펌프의 성능을 향상시킬 수 있는 바이패스형 오리피스 팽창장치를 설계하여, 주파수 변화에 따른 운전조건 및 바이패스 오리피스 형상을 변화시키면서 성능특성을 측정하였으며, 인버터 열펌프에의 적용가능성을 살펴보았다. 또한 실험데이터를 이용하여 바이패스 오리피스의 유량예측 경험 모델을 개발하였다.

본 연구를 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 바이패스 오리피스는 직선형 오리피스와 비슷한 경향의 유동 특성을 나타내며, 특히 초킹 조건을 만족하므로 인버터 열펌프에 적용시 시스템의 신뢰도를 확보할 수 있다.

(2) 인버터 열펌프의 저주파수 및 고주파수 범위에서 성능향상을 위하여 주파수 변화에 따른 유량 변화 폭이 모세관보다 큰 팽창장치가 요구되는데, 바이패스 오리피스는 모세관이나 직선형 오리피스에 비하여 주파수 변화에 따른 유량 증가폭이 크게 나타났다.

(3) 바이패스 오리피스의 입구 직경, 바이패스 구멍의 위치 및 직경 변화를 통하여 주파수 변화에 따른 유량변화의 폭을 조절할 수 있다.

(4) 실험데이터를 이용하여 바이패스 오리피스의 유량을 예측할 수 있는 경험적 모델을 제시하였으며, 유량모델과 실험결과와의 오차는 ±5% 이내였다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단 과학기술 기초중점연구 지원신청(ME97-A-02) 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Benton, R., 1982, "Heat pump setback: computer prediction and field test verification of energy savings with improved controls", ASHRAE Journal, pp. 23~29.
2. Lorentzen, G., 1986, "Heat pumps-where are improvements possible? an exercise in energy", International J. of Refrigeration Vol. 9, pp. 105~107.
3. 최종민, 김용찬, 김종엽, 배영돈, 1997, "인버터 열펌프의 주파수 및 모세관 길이 변화에 따른 시스템 성능특성의 실험적 연구", 공기조화 냉동공학 논문집, 제9권, 제1호, pp. 64~72.
4. Aaron, A.A., Domanski, P.A., 1989, "An experimental investigation and modeling of the flow rate of refrigerant 22 through the short tube restrictor", NIST-IR 89-4120, US Department of Commerce, NIST.
5. Kim, Y., 1993, "Two-phase flow of HCFC-22 and HFC-134a through short tube orifices", Ph.D. Dissertation, Texas A&M University.

6. 김용찬, 최종민, 1995, “모세관과 오리피스 팽창 장치의 성능 특성 비교”, 공기조화냉동공학회 동계학술발표 논문집, pp. 242~247.
7. Kuehl, S.J., Goldschmidt, V.W., 1991, “Modeling of steady flows of R-22 through capillary tubes : test data”, ASHRAE Transaction. Vol. 97, Part 1, pp. 139~148.
8. 김창년, 황의필, 박영무, 1995, “조도를 고려한 R-22용 모세관 선정 선도”, 공기조화냉동공학 논문집, 제7권, 제4호, pp. 681~693.
9. 한창섭, 1991, “소형냉동시스템의 시동시 동적 성능에 관한 시뮬레이션 및 실험적 연구”, 고려대학교 박사학위 논문.