

## R407C 및 R290 냉매에 대한 모세관내 유동특성 실험 및 모델링

### Experimentation and modeling on the flow of R407C and R290 through capillary tubes

김 용 찬\*, 조 일 용\*\*, 최 종 민\*\*\*  
Y. C. Kim, I. Y. Cho, J. M. Choi

**Key words** : R22 alternatives(R22 대체냉매), R407C, R290, Capillary tube(모세관), Flow modeling (유량모델)

#### ABSTRACT

Mass flow rates of R407C and R290 through capillary tubes were measured with various capillary tube geometries and flow conditions. For all refrigerants tested in the present study, mass flow rate through the capillary tube was strongly dependent on the condensing pressure, subcooling and capillary length and diameter. The flow rate of R407C was 5~10[%] higher than that of R22 at the same condensing temperature and degree of subcooling, while flow rate for R290 was 40[%] lower than that for R22. Based on experimental results, an empirical correlation was developed using Pi theorem to predict the mass flow rate through capillary tubes. The predicted flow rates using the model were consistent with the experimental data within  $\pm 10$ [%].

#### 기 호 설 명

$C_p$  : 비열[J/kg °C]  
 $D$  : 모세관 직경[mm]  
 $L$  : 모세관 길이[mm]  
 $m$  : 모세관 통과 질량유량[kg/h]  
 $P$  : 압력[kPa]  
 $T$  : 온도[°C]  
 $T_{sat}$  : 포화온도[°C]  
 $\Delta T_{sc}$  : 모세관 입구 과냉도[°C]  
 $v$  : 비체적 [ $m^3/kg$ ]

#### 그리스 문자

$\mu$  : 점성계수[kg/m · s]

#### 하첨자

$f$  : 액체상태  
 $in$  : 모세관 입구  
 $sat$  : 포화상태

#### 1. 서론

팽창장치는 응축기와 증발기 사이에 설치되어 냉매의 압력 및 온도를 떨어뜨리고 냉매유량을

\* 고려대학교 기계공학과

\*\* 삼성전자

\*\*\* 고려대학교 기계공학과 대학원

조절함으로써 시스템의 평형을 유지하는 역할을 한다. 따라서 이러한 팽창장치가 시스템의 용량에 맞게 선정되지 않으면 전체 시스템이 최적의 조건에서 운전될 수 없으므로 시스템의 성능 및 용량의 저하를 가져온다.

모세관은 주거용 및 일반 냉동시스템에 가장 널리 사용되고 있는 팽창장치이다. 모세관은 구조가 간단하고 작동의 신뢰성이 있으며 가격이 싸다는 장점이 있다. 그러나 모세관은 시스템의 용량조절폭이 다른 팽창장치에 비해 작으므로 설계점 이외의 운전조건에서 성능이 현저히 떨어진다는 단점이 있다. 모세관에 대해서는 많은 연구가 있었으며, 모세관에서의 경험식 및 수치해석을 통하여 모세관 설계의 기본 조건을 제시하였다.

Bolstad와 Jordan<sup>(1)</sup>은 모세관의 단일조건 하에서 임계유동의 존재를 검증하였으며, Dudley<sup>(2)</sup>는 초기 비등점이 이론적인 계산에 의한 비등점보다 뒤늦게 발생하는 증발지연현상을 관찰하였다. Kuehl과 Goldschmidt<sup>(3)</sup>는 R22를 사용하여 입구 압력, 과냉도 및 모세관 직경과 길이의 변화에 따른 용량실험을 실시하였으며, 이상유동을 균질 유동으로 가정하여 모세관에서의 유동을 고찰하였다. Wolf 등<sup>(4)</sup>은 여러 대체냉매를 적용하여 실험을 수행하고 그 결과를 이용하여 유량모델을 개발하였다. 김 등<sup>(5)</sup>은 모세관의 조도를 고려하여 모세관의 성능을 예측할 수 있는 수치모델을 세웠으며 장 등<sup>(6)</sup>은 HFC계열 순수냉매 및 혼합냉매의 모세관 내의 유동실험을 실시하여 모세관 내 유동의 비등지연을 예측할 수 있는 경험식을 제시하였다.

R22 대체냉매 중에서 HFC혼합냉매인 R410A 및 R407C가 공기조화 및 냉동시스템의 대체냉매로 가장 유력시 되고 있다. 그러나 두 냉매 모두 ODP는 영(zero)이지만 GWP가 각각 0.44와 0.28로서 환경적인 측면에서 TEWI(total equivalent warming impact)가 높은 단점이 있다.

HC(탄화수소)계 냉매는 천연냉매로서 가격이 싸고 ODP와 GWP가 모두 영이며, 환경파괴의 위험이 없다는 장점이 있다. HC계 냉매중 R290은 압축비가 낮고 기존 냉매들에 비하여 충전(charge)량이 반정도밖에 안되고 열전달계수가 높으며 암모니아와 같은 독성이나 악취가 없기

때문에 대체냉매로 가장 많은 연구가 이루어지고 있다.<sup>(7)</sup> 그러나 R290은 가연성을 가지고 있다는 단점이 있다.

본 연구에서는 R22 대체냉매로 유력시 되고 있는 HFC계 혼합냉매인 R407C와 HC(탄화수소)계의 천연냉매 R290을 적용하여 팽창장치 입출구의 운전조건 및 모세관의 길이와 직경의 형상을 변화시켜며 실험을 수행하였다. 실험결과와 분석을 통하여 모세관에서 냉매유량특성을 고찰하였고, 이를 토대로 시스템 용량에 맞는 최적의 모세관을 선정할 수 있도록 경험적 모델을 개발하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 모세관의 성능특성을 측정하기 위한 팽창장치 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 모세관 시험부의 과냉도, 응축압력, 증발압력을 쉽게 조절할 수 있도록 시험부를 포함하는 냉매순환회로, 가열기를 포함하는 온수순환회로, 냉각기를 포함하는 물/에틸렌 글리콜 순환회로로 구성하였다. 냉매는 액체펌프를 이용하여 공급하였으며, 액체펌프에서 발생하는 펄스의 진폭은 바이패스 라인을 이용하여 감소시켜 시험조건에 안정성을 얻었다. 응축압력과 입구 과냉도는 액체펌프의 회전수와 온수기의 공급 온도와 용량을 변화시켜 조절하였으며, 증발압력 및 출구 조건은 냉각기의 물/에틸렌 글리콜 용액의 공급 온도와 용량을 제어하여 조절하였다.

모세관 시험부는 응축열교환기와 증발열교환기의 중간에 설치하였으며, 모세관을 교환한 후 시험을 연속적으로 실시할 수 있도록 시험부 양단에 볼밸브를 설치하였다.

모세관을 통과하는 냉매유량은 질량유량계를 사용하여 측정하였다. 시험에 사용한 질량유량계의 정도는  $\pm 0.2[\%]$ 이다.

실험장치에 대한 자세한 설명은 참고문헌<sup>(8)</sup>을 참조하기 바랍니다.

### 2.2 실험방법 및 조건

본 연구에 사용한 모세관의 길이는 700, 1000, 1300 mm이며, 각 길이에 대하여 모세관의 직경

을 0.96, 1.21 및 1.36 mm로 변화시키면서 유량의 변화를 측정하였다. Table 1은 본 실험에 사용한 모세관의 사양을 나타낸다.

실험 조건은 인버터 열펌프의 일반적인 운전조건<sup>(8)</sup>을 포함하도록 선정하였으며, 주요 운전변수는 모세관 입구과냉도, 응축온도, 증발온도이다. Table 2는 본 연구의 실험조건을 나타내고 있다.

냉매마다 서로 다른 물성치를 가지므로 그 비교를 위하여 응축온도를 고정시키고 각 냉매에 대하여 응축온도에 대한 포화압력을 응축압력으로 사용하였다. 본 연구에서는 응축온도를 38 °C, 45 °C 및 52 °C로 설정하였다. 이때 HFC계열의 3성분 혼합냉매인 R407C는 열교환기에서 온도구배가 생기는 비공비 혼합냉매인데, 일반적으로 비공비 혼합냉매의 응축온도는 포화압력의 비등점(bubble point)과 이슬점(dew point)의 평균값을 말하지만 과냉도는 비등점을 기준으로 계산하므로 각 압력에 대한 비등점을 기준온도로 사용하였다. 각 응축압력에 대하여 모세관 입구과냉도는 1 °C, 4 °C, 9 °C 및 14 °C로 변화시키면서 실험을 수행하였다.

모세관에서는 출구 압력이 입구 온도에 해당하는 포화압력보다 낮을 경우에는 초킹(choking)이 발생하여 냉매 유량에 거의 영향을 미치지 않는다<sup>(1)</sup>. 이러한 초킹현상은 본 연구의 R290 및 R407C에 대한 예비실험을 통하여 검증하였다. 따라서 본 연구에서는 증발압력을 각 냉매의

7 °C에 해당하는 포화압력을 사용하였다.

냉매 R290 및 R407C를 사용하여 모세관에서 유량조절특성을 측정하였으며, 기존의 실험결과와 비교검증을 위하여 R22에 대한 실험도 실시하였다.

Table 1 Dimensions of capillary tubes

No.	Length[mm]	Diameter[mm]
1	700	0.96
2	700	1.21
3	700	1.36
4	1000	0.96
5	1000	1.21
6	1000	1.36
7	1300	0.96
8	1300	1.21
9	1300	1.36

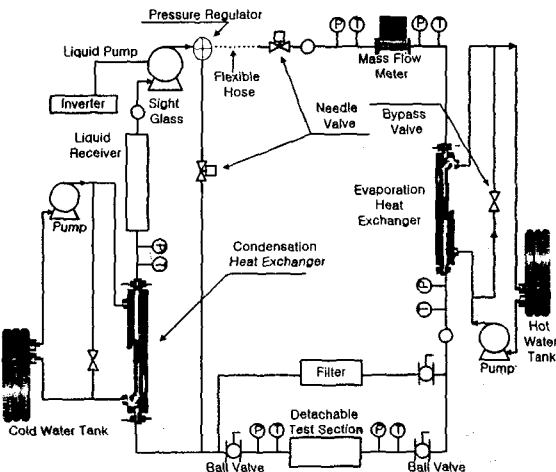


Fig. 1 Schematic of experimental setup.

Table 2 Test conditions

Upstream pressure	Sub-cooling	Downstream pressure
52 °C Saturation temperature	R290 : 1787.6 kPa R407C : 2324.0 kPa	7 °C Saturation temperature (Fixed)
45 °C Saturation temperature	R290 : 1532.8 kPa R407C : 1979.9 kPa	1, 4, 9, 14 (°C) R290 : 582.8 kPa R407C : 653.8 kPa
38 °C Saturation temperature	R290 : 1305.6 kPa R407C : 1674.3 kPa	

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 R22를 적용한 경우 본 연구에서 수행한 실험결과를 기존의 실험결과와 비교한 것이다. 본 연구의 측정결과는 Kuehl과 Goldschmidt<sup>(3)</sup>의 실험결과와 -1.85에서 -2.95 % 정도 차이를 보였고, Wolf 등<sup>(4)</sup>의 모델링 결과와는 -5.5에서 -9.2 %의 오차를 나타내어 본 연구에서 얻은 유량범위가 비교적 서로 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3은 동일한 직경( $D=1.21$  mm)과 길이( $L=1000$  mm)를 갖는 모세관에 대하여 과냉도  $9$  °C 일 때 응축압력 변화에 따른 R22, R407C, R290의 유량변화를 나타낸다. 모든 냉매에 대하여 응축압력이 증가함에 따라 냉매유량이 선형적으로 증가하였다. 응축압력 증가에 따른 냉매유량변화는 2가지 요인에 기인한다. 첫째, 동일한 과냉도 상태에서 압력이 증가할 경우 냉매의 비체적이 증가하여 유량을 감소시키는 역할을 한다. 둘째, 응축압력의 증가에 따라 모세관 입구에서 냉매가 증발이 일어나기 전까지의 단상영역의 길이가 증가하여 냉매유량을 증가시키는 역할을 한다. 이때, 단상의 압력강하가 비체적 감소에 의한 영향보다 유량에 더 큰 영향을 주어 냉매유량은 증가하였다.

Fig. 4은 모세관의 길이( $L=1000$  mm) 및 직경( $D=1.21$  mm)이 일정하고 동일한 응축온도( $T_{sat}=45$  °C) 조건일 때 각각의 냉매에 대한 과냉도의 영향을 나타낸 것이다. 3가지 냉매 모두 과냉도의 변화에 따라 냉매유량이 크게 변화하며, R22 및 R407C의 냉매유량 증가의 기울기가 R290에 비하여 크게 나타났다. 과냉도의 증가에 따라 관내 단상영역의 길이가 증가하고 냉매의 비체적이 감소하므로 냉매유량이 증가된 것으로 사료된다.

Fig. 5는 각 냉매에 대하여 동일한 포화온도( $T_{sat}=45$  °C) 및 과냉도( $\Delta T_{sc}=9$  °C)에서 모세관 직경의 변화에 따른 유량변화를 나타낸 것이다. 모세관에서의 냉매유량은 모세관의 단면적에 비례하고 단면적은 직경의 제곱에 비례하므로 모세관 직경의 변화에 따른 냉매유량의 변화는 포물선 형태를 나타냈다.

입구조건과 모세관의 형상을 변화시켜가며 각 냉매의 유량변화를 측정된 결과 모든 경우에 대

하여 각 냉매간의 유량변화율은 거의 일정하게 나타났다(Fig. 3 ~ Fig. 5).

동일한 응축온도 및 과냉도 조건에서 R407C는 R22에 비해 5~10 %정도 유량이 크게 나타났다. R407C는 R22에 비하여, 동일한 온도의 포화압력과 동일한 과냉도를 가질 때 비체적이 다소 크므로 유량을 감소시키려는 경향이 있지만 동일한 온도의 포화압력을 비교하여 보면 R407C가 R22보다 200~300 kPa 정도 높아서 단상의 압력강하영역이 증가하여 결과적으로 더 큰 유량을 나타낸 것이다.

R290의 경우 동일한 운전조건에 대해서 R22에 비해 현저히 적은 유량을 나타냈다. 이것은

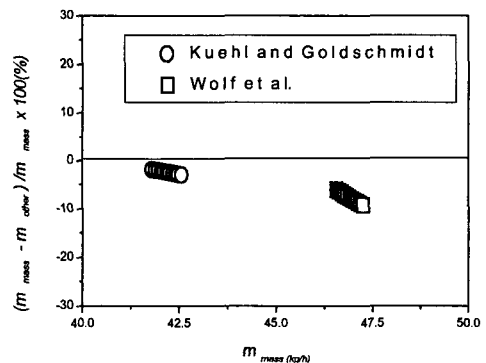


Fig. 2 Comparison of mass flow rate with results of other researchers<sup>(3,4)</sup>.

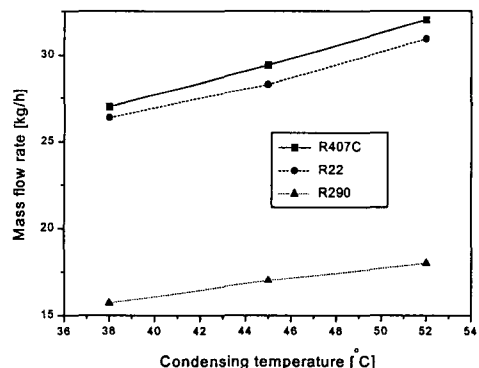


Fig. 3 Dependency of mass flow rates on condensing temperature at  $\Delta T_{sc}=9$ [°C].

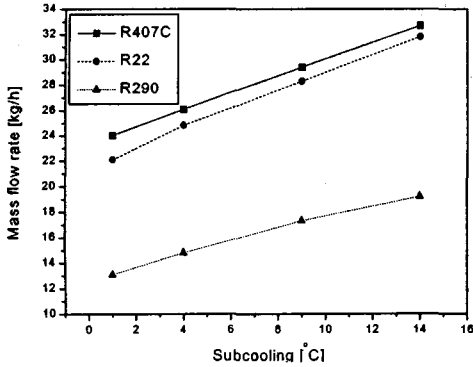


Fig. 4 Dependency of mass flow rate on subcooling at  $T_{sat,in}=45[^\circ\text{C}]$ .

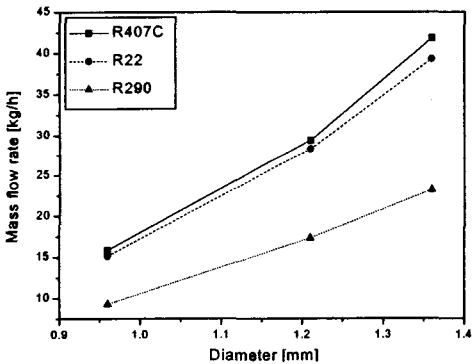


Fig. 5 Dependency of mass flow rates on capillary tube diameter at  $T_{sat,in}=45[^\circ\text{C}]$ ,  $\Delta T_{sc}=9[^\circ\text{C}]$ .

R290이 동일한 응축온도 및 과냉도 조건에서 R22에 비해 밀도가 매우 낮으며, 포화압력이 100~200 kPa 정도 낮기 때문이다. 이 두 요인에 의하여 R290은 R22보다 약 40 %정도 적은 유량을 나타냈다. 그러나 R290은 R22나 R407C보다 잠열이 현저히 크므로 R22를 사용하던 시스템에 적용시 충전량은 감소하고 효율은 증가할 것으로 사료된다.

#### 4. 모세관의 유량예측 경험모델

모세관의 구조는 간단하지만 관의 급격확대 및 축소, 관내부에서의 상변화 및 비등지연에 의한 준안정평형유동(metastable flow), 초킹 등으로 유동현상이 복잡하여 완전한 수학적모델로 해석하기가 어렵다. 본 연구에서는 실험결과를 토대로 모세관의 질량유량에 영향을 미치는 변수들을 Pi 정리를 이용하여 무차원화하여<sup>(4)</sup> R290 및 R407C의 모세관에서 질량유량을 예측할 수 있는 경험 모델을 제시하였다.

모세관을 흐르는 냉매유량은 모세관의 길이, 직경, 응축압력, 입구과냉도 및 냉매 물성치의 영향을 받으며, 이를 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (1)에 표현된 모세관의 형상, 입구조건 및 물성치를 실험 결과를 토대로 유량에 대한 각 변수간의 영향을 고찰하여 주요 변수를 결정한 후 Pi 정리를 이용하여 무차원 변수를 결정하였다. 식 (2)는 냉매유량을 주요 무차원 변수의 함수로 나타낸 것이다.

$$m = f_1(L, d, v, \mu, P_{in}, C_p, \Delta T_{sc}) \quad (1)$$

$$\pi_4 = f_2(\pi_1, \pi_2, \pi_3) \quad (2)$$

Table 3은  $\pi$ 로 표현된 무차원 변수들의 정의를 나타낸다. 냉매유량의 무차원수  $\pi_4$ 를 모세관의 형상, 입구조건을 나타내는 무차원변수들을 이용하여 Wolf 등이<sup>(4)</sup> 제시한 형태인 식 (3)과 같은 지수함수 형태로 나타내었다.

$$\pi_4 = a_1 \pi_1^{a_2} \pi_2^{a_3} \pi_3^{a_4} \quad (3)$$

식 (3)에 도입된 상수나 계수값들은 실험결과를 바탕으로 비선형 회귀곡선접합을 통하여 결정하였다. R407C의 물성치는 냉매제조회사인 ICI사에서 제공하는 자료를 이용하였으며<sup>(9)</sup>, R290의 물성치는 REFPROP 6.0을 이용하였다<sup>(10)</sup>. Table 4는 식 (3)에 적용되는 변수들의 단위를 나타내며, Table 5는 R407C 및 R290의 냉매에 대하여 식(3)에서의 계수값을 나타내고 있다.

Fig. 6은 R407C의 실험유량과 모델링 식을 통해 얻어진 유량을 비교한 것이다. 유량 모델값과 실험결과와의 전체 표준편차는 2.9 %였으며 실험 결과의 99 %가  $\pm 10$  % 오차내에 그리고

88 %가 ±5 % 오차 범위 내에 포함되어 모델링의 결과가 실험값과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. R290의 경우 모델링 결과와 실험치는 전체 표준편차가 4.1[%]였으며 실험결과의 96[%]가 ±10[%] 오차 범위내에 그리고 실험결과의 71[%]가 ±5[%]의 오차 범위 내에서 모델링 결과가 모세관에서의 냉매유량을 예측하였다(Fig. 7). R290의 경우 모델링에 의한 값과 실험값의 차이가 R407C에 비해 크게 나타났는데, 이는 R290이 R407C에 비하여 냉매유량 범위가 낮아 실험시의 측정 오차가 유량에 대해 백분율로 차지하는 비

Table 3 Pi terms of the flow model

Pi term	Definition	Meaning
$\pi_1$	$L/d$	geometry effect
$\pi_2$	$d^5 P_{in}/v_f \mu_f^2$	inlet pressure
$\pi_3$	$d^5 C_{p_f} \Delta T_{sc}/v_f^2 \mu_f^2$	inlet condition
$\pi_4$	$\dot{m}/d \mu_f$	flow rate

Table 4 Units of variable in equation (3)

Variable	Unit
Length	mm
Diameter	mm
Specific heat	J/(kg · °C)
Viscosity	micropoise
Specific volume	m <sup>3</sup> /kg

Table 5 Constants in equation (3)

	R407C	R290
a <sub>1</sub>	0.0823	0.0819
a <sub>2</sub>	-0.4299	-0.4580
a <sub>3</sub>	0.4703	0.4574
a <sub>4</sub>	0.1210	0.1374

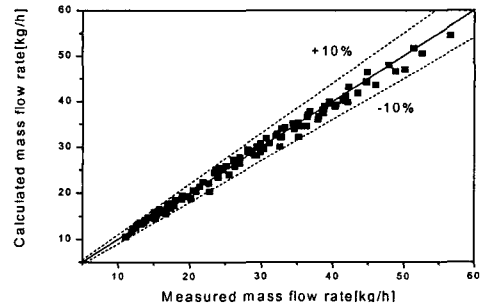


Fig. 6 Comparison of the measured mass flow rates for R407C with the calculated values.

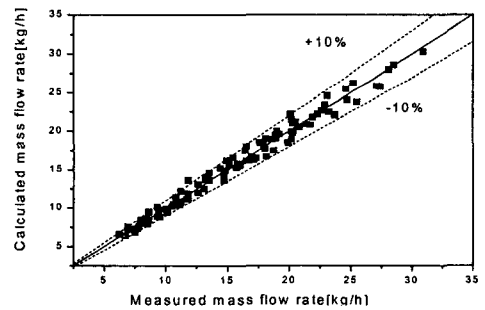


Fig. 7 Comparison of measured mass flow rates of R290 with the calculated values.

Table 6 Limitations on the application of the present flow model

Refrigerant	Parameter	Min.	Max.
R407C and R290	Length [mm]	700	1300
	Diameter [mm]	0.96	1.36
	Condensing temperature [°C]	38	52
	Subcooling [°C]	1	14

율이 크고 이에 따라 유량예측 정도가 작게 나오는 것으로 판단된다. Table 6은 본 연구에서 개발한 유량모델의 적용범위를 나타낸다.

## 5. 결 론

R22 대체냉매로 고려되고 있는 R407C와 R290에 대하여 모세관 성능시험을 실시하고 유동특성을 고찰하였으며, 실험결과를 이용하여 모세관의 형상 및 운전조건을 입력으로 냉매유량을 예측할 수 있는 경험모델을 제시하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

모세관을 통과하는 냉매유량은 R407C 및 R290 모두 응축압력, 입구 과냉도 및 모세관의 형상에 크게 의존하였다. R407C와 R290의 냉매유량은 응축압력이 증가하거나 과냉도가 커질수록 선형적으로 증가하였다. 모세관의 직경이 변화할 때 R407C와 R290에 대한 냉매유량은 직경의 제곱에 비례하였다. 이러한 유동특성은 R22를 적용할 때 일반적으로 고찰된 유동 특성과 동일한 경향을 나타내었다.

R407C는 R22에 비하여 동일한 응축온도 및 과냉도 조건하에서 모세관을 통과하는 유량이 5~10[%] 정도 증가하였으며, R290은 R22에 비하여 40[%]정도 작은 유량을 나타냈다.

모세관 형상 및 냉매 물성치들의 변수를 Pi 정리를 이용하여 무차원화하고 실험결과를 토대로 모세관에서의 냉매유량을 예측할 수 있는 경험모델을 제시하였다. 모델링 결과 R407C는 실험결과와의 99 %가 모델링 값과  $\pm 10$  %의 오차범위에 들었고, R290은 96 %가  $\pm 10$  %의 오차범위 내에서 서로 일치하였다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초 연구비(96-0200-12-03-3)지원으로 수행되었으며 지원에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. Bolstad, N.M., and Jordan, R.C. 1948, Theory and use of the capillary tube expansion device, Refrigerating Engineering, Vol. 56, No. 6, pp. 519-523.
2. Dudley, J.K., 1962, A photographic study of the two-phase flow of Freon in small bore tube, M.S. Thesis, Univ. of Wisconsin.
3. Kuehl, S.J., and Goldschmidt, V.W., 1991, Modeling of steady flow of R-22 through capillary tube, ASHRAE Trans., Vol. 97, Part 1, pp. 139-148.
4. Wolf, D.A., Bittle, R. R., and Pate, M.B., 1995, Adiabatic capillary tube performance with alternative refrigerants, ASHRAE RP-762, pp. 57-62.
5. 김창년, 황의필, 박영무, 1995, 조도를 고려한 모세관 성능, 공기조화냉동공학회 하계학술발표 논문집, pp. 283-289.
6. 장세동, 노승탁, 1995, HFC계열 순수냉매 및 혼합냉매의 모세관내의 유동, 공기조화냉동공학회 하계학술발표 논문집, pp. 263-268.
7. Wolfgang, H., 1993, Hydrocarbon properties, Greenpeace e. V., Vorsetzen 53, 20450 Hamburg, Germany.
8. 최종민, 김용찬, 김종엽, 배영돈, 1997, 바이패스 오리피스를 적용한 가변속 열펌프의 성능 특성에 관한 실험적 연구, 공기조화 냉동공학회 하계학술발표 논문집, pp. 485-491.
9. ICI, 1997, KLEA R407C Data sheet, ICI Co.
10. McLinden, M. O., et al., 1998, Thermodynamic and transport properties of refrigerants and refrigerant mixtures (REFPROP 6.0), NIST, Gaithersburg, MD., U.S.A.
11. 김용찬, 최종민, 1998, 모세관과 오리피스 팽창장치의 냉매유량 조절 특성의 비교, 공기조화 냉동공학 논문집, 제10권, 제1호, pp. 118-128.
12. 김용환 등, 1997, 대체냉매 R-407C의 모세관 선정에 관한 연구, 공기조화 냉동공학회 하계학술발표 논문집, pp. 97-103.