

탄화수소계 냉매의 응축 열전달 및 압력강하 특성

이 호 생, 성 광 훈, Phan Thanh Tong, 윤 정 인*

부경대학교 대학원, *부경대학교 기계공학부

Characteristics of Condensing Heat Transfer and Pressure Drop of Hydrocarbon Refrigerants

Ho-Saeng Lee, Gwang-Hoon Seong, Phan Thanh Tong, Jung-In Yoon*

Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

(Received May 10, 2005; revision received October 31, 2006)

ABSTRACT: Experimental results for heat transfer characteristic and pressure gradient of hydrocarbon refrigerants (R-290, R-600a, R-1270) and HCFC refrigerant (R-22) during condensation inside horizontal double pipe heat exchangers are presented. The test sections which have one tube diameter of 12.70 mm with 0.89 mm, 9.52 mm with 0.76 mm, 6.35 mm with 0.13 mm wall thickness are used for this investigation, respectively. The local condensing heat transfer coefficients of hydrocarbon refrigerants were higher than those of R-22. The average condensing heat transfer coefficient increased with the increase of the mass flux. It showed the higher values in hydrocarbon refrigerants than R-22. Hydrocarbon refrigerants have higher pressure drop than R-22 in 10.92 mm, 8 mm and 6.1 mm inner diameters. These results from the investigation can be used in the design of heat transfer exchangers using hydrocarbons as the refrigerant for the air-conditioning systems.

Key words: Condensation(응축), Heat transfer coefficient(열전달계수), Hydrocarbon(탄화수소), Pressure drop(압력강하), Natural refrigerant(자연냉매)

기 호 설 명

c_p : 비열 [kJ/kgK]

d : 관의 직경 [m]

h : 열전달계수 [kW/m²K]

i : 엔탈피 [kJ/kg]

m : 질량유량 [kg/s]

n : 소구간의 개수

ΔP : 압력차 [kPa]

\dot{Q} : 열교환량 [kW]

q : 열유속 [kW/m²]

T : 온도 [K]

x : 건도

Δz : 소구간 길이 [m]

그리스 문자

μ : 점성계수

ρ : 밀도

Φ : 이상류 파라메타

† Corresponding author

Tel.: +82-51-620-1506; fax: +82-51-611-8818

E-mail address: yoonji@pknu.ac.kr

X : Martinelli 파라메타

하첨자

avg : 평균
 c : 응축기
 cr : 응축기의 냉매
 cw : 응축기의 냉각수
 exp : 실험 데이터
 in : 입구
 L : 액체
 loc : 국소
 out : 출구
 r : 냉매
 v : 기체
 w : 물
 wi : 내관벽 안

1. 서 론

냉동공조 산업에서 각종 환경문제를 일으키고 있는 CFC 및 HCFC 계열의 냉매들을 대체할 수 있는 새로운 냉매의 개발과 에너지 소비를 줄일 수 있는 고성능 열펌프 기기의 개발 및 냉동공조 산업기술이 필요하게 되었다.^(1,2) CFC 및 HCFC 계열의 냉매들을 대체할 수 있는 새로운 냉매로 HFC계 냉매나 비공비 혼합냉매가 권장되고 있으나 HFC계 냉매의 경우 오존층 파괴지수(ODP)가 0이기는 하지만 지구 온난화지수(GWP)가 높아 환경적 측면에서 이의 사용은 바람직하지 않다. 비공비 혼합냉매의 경우는 고장·수리·보수시에 발생하는 누출로 인한 성분비의 변동이 생기며, 재충전시에서도 초기 성분비를 재현하기 힘이 드는 등 여러 가지 어려움이 있다.⁽³⁾

새로이 개발되는 냉매는 지구환경을 파괴하지 않으면서 독성이 없고, 가연성이 없으며, 기존의 냉매와 열역학적 성질이 비슷해야 한다. 이러한 관점에서 자연냉매의 물성치 및 이들 자연냉매를 사용하는 시스템에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 이들 자연냉매 중 탄화수소계 냉매는 ODP 및 GWP가 거의 0에 가깝고 사용이 간편하며, 일반적인 광물질 윤활유와 잘 혼합되지만, 가연성 때문에 유럽을 제외한 다른 선진국들의 탄화수소계 냉매 사용은 거의 무시되어 왔다. 그러나 실제로

가연성 문제는 가정용 냉장고와 같은 충전량이 적은 소형의 장치에서는 폭발 가능성이 매우 희박하고, 대형 냉동·공조 장치에 있어서도 암모니아의 경우와 같이 적절한 환기와 누설 등에 대한 운전주의와 더불어 간단한 안전장치로 해결될 수 있는 것으로 보고되고 있다.⁽⁴⁾

Wijaya and Spatz⁽⁵⁾는 길이 3.05 m, 내경 7.75 mm인 평활관에서 응축과 증발에 대해서 연구하였다. 이들 데이터는 R-410A의 응축 열전달률이 R-22보다 약간 높게 나타난다고 보고하였다.

Haraguchi et al.^(6,7)은 2중관 대향류형 응축기에서의 R-22, R-123, R-134a의 응축전열 특성 실험에서 마찰압력강하에 대한 예측식을 제안하고 있으나, 그 정도에 대해서는 아직 검증되지 않고 있다. Cavallini et al.⁽⁸⁾은 수평관에서 HFC계 냉매들의 압력강하에 대해서 응축포화온도 40°C에서 R-134a가 R-22보다 압력강하가 크며, R-32, R-410A, R-125는 R-22보다 압력강하가 작음을 보고하고 있다. 하지만 이러한 탄화수소계 냉매를 실제 냉동·공조 장치에 적용하기 위한 기초자료는 대단히 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 HCFC계 냉매인 R-22를 기본 작동유체로 한 냉동·공조 장치를 내경 10.92 mm, 8 mm, 6.1 mm로 제작하여 탄화수소계 냉매인 R-1270 (propylene), R-600a (iso-butane), R-290 (propane)으로 작동유체를 변화시켜 평활관에서의 응축전열 특성 및 압력강하를 실험적으로 비교 분석하여 탄화수소계 냉매를 대체냉매로 사용하는 응축기의 설계를 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험장치로서 압축기, 응축기, 팽창장치, 증발기 및 주변장치로 구성된 기본적인 냉동·공조 시스템이며, 크게 냉매가 순환되는 경로와 증발기 및 응축기의 냉각수가 순환되는 경로로 구성되어 있다. 그리고 시험구간으로 사용한 열교환기인 응축기는 내관으로 냉매가 흐르고, 내관과 외관 사이의 환상구간으로 냉각수가 냉매흐름과 반대방향으로 흐르는 이중관형 열교환기이다.

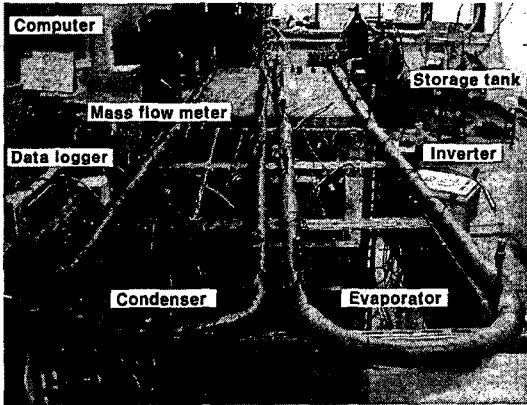


Fig. 1 Photograph of experimental apparatus.

Fig. 2는 시험부인 열교환기로서, 내관의 내경은 10.92 mm, 8 mm, 6.1 mm 동관으로 제작하였다. 그리고 외관은 두 관경 모두 내경 19.94 mm, 외경 22.22 mm인 동관을 사용하였다. 열교환기는 입구 측에서 675 mm 등간격 소구간으로 8구간으로 구분하였으며, U-bend를 지나는 냉매관의 경우 우회하지 않고 동일하게 bending하여 이중관 형태를 취하도록 하였다. 그리고 열교환기의 각 소구간에 차압계를 설치하여 냉매관 내의 압력강하를 측정할 수 있게 하였다.

Fig. 3에 나타낸 바와 같이 평활관에서 냉매, 냉각수 및 내관의 외벽면 온도측정은 각각 소구간

별로 8지점, 내관 외벽면은도 1개 지점당 원주방향 90° 간격으로 상부, 양 측부, 하부의 4지점에서 측정하였다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 작동유체로 규제 대상 냉매인 R-22와 이를 대체할 것으로 판단되어지는 자연 냉매 중 순도 99.5%의 탄화수소계 냉매인 프로판, 이소부탄, 그리고 프로필렌을 사용하였다. 결과분석을 위해 측정된 데이터는 각 소구간에서의 압력과 열교환기 입·출구에서의 압력을 측정하였고, 그 외에도 열교환기에서의 냉매온도, 냉각수 온도, 냉매와 냉각수의 유량을 측정하였다. 압력차의 측정에는 차압계(DPI 420, ±0.2 kPa)를 사용하였고 압력계는 응축기의 입구에서 출구까지 동일간격(1.35 m)으로 설치하여 관 내에서의 압력강하를 알 수 있도록 하였다. 온도측정은 정밀 수은온도계로 보정하여 ±0.1°C의 오차범위를 가지는 T형 열전대(thermocouple)를 사용하였고 실험 장치에서 데이터의 측정점으로 냉매유량계(OVAL 질량유량계, ±1%)는 응축기에서 응축된 액량을 측정하기 위하여 응축기 출구 측에 설치하였고, 응축기 및 증발기에서의 수유량계(ORIFICE FLOW-METER, ±1%)는 각각 응축기와 증발기 입구 측에 설치하였다. 실험조건, 즉 작동온도, 질량유속,

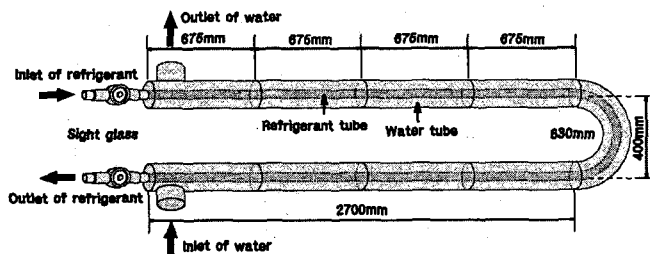


Fig. 2 Test section of the condenser.

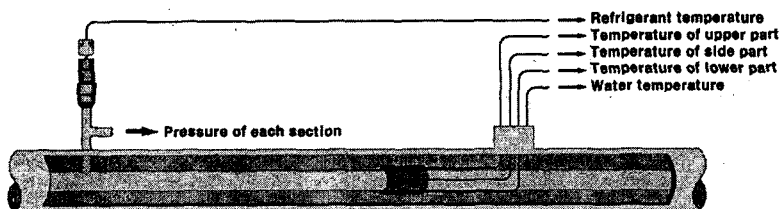


Fig. 3 Setting of thermocouple.

Table 1 Experimental conditions

Refrigerant	R-22	R-290	R-1270	R-600a
P_{sat} [kPa]	1357~1378	1191~1245	1372~1488	440~434
Condensing temperature [K]	309~337	309~327	310~335	308~317
Mass flux [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$]	150~400			62~150
Tube diameter (ID) [mm]	10.92, 8, 6.1			
Cooling water				
Temp. of con. inlet [K]	300~310			
Mass flow rate [kg/s]	0.17~0.25			

열유속 등은 냉매유량, 냉각수의 온도 및 유량 등을 조절시켜 시스템이 정상상태가 된 이후에 측정을 하였다. 냉매별 drop-in 기준은 응축온도 40℃로 하고, 응축기 출구는 과냉각도가 3~5℃가 되도록 각 냉매의 질량유속, 냉각수의 온도와 유량을 조절하였다. 그리고 실험데이터 측정이 완료되면 다시 냉매유량과 냉각수유량을 조절하여 반복실험을 하였다. 또한 온도, 압력 및 유량 등을 측정하기 위한 검출신호는 데이터 변환기를 통하여 컴퓨터에 입력시켜 처리하였다. 이 모든 과정은 열교환기의 내경 세 가지 종류 모두 동일하게 적용하여 실험하였다.

본 연구에서 사용한 R-22와 그 대체냉매인 R-290, R-600a, R-1270의 열물성값 계산은 NIST (National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 냉매물성 계산 프로그램인 'REF-PROP(version 6.0)'을 이용하였다. 위의 실험조건을 Table 1에 나타내었다.

2.3 데이터 분석

열교환기인 응축기의 열교환량은 식(1), (2)로 계산하였다.

$$\dot{Q}_{cw} = \dot{m}_{cw} \cdot c_{p,cw} \cdot (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{cr} = \dot{m}_{cr} \cdot (i_{c,in} - i_{c,out}) \quad (2)$$

여기서, \dot{Q}_{cw} 와 \dot{Q}_{cr} 는 각각 냉각수에 의한 열교환량(kW)과 냉매의 엔탈피차에 의한 열교환량(kW)이고, \dot{m}_{cw} 와 \dot{m}_{cr} 은 각각 응축기측 냉각수의 유량(kg/s)과 냉매의 순환량(kg/s)이다. 그리고 $T_{c,in}$ 과 $T_{c,out}$ 는 각각 냉각수의 입구와 출구 온도(K)를 나타내며, $c_{p,cw}$ 는 냉각수의 비열(kJ/kg·K)을 나타낸

다. 또한 $i_{c,in}$ 과 $i_{c,out}$ 는 각각 응축기 입구와 출구에서의 포화 냉매증기 및 포화 냉매액의 엔탈피(kJ/kg)를 나타낸다. 응축기에서 열교환기 소구간에서의 열유속 \dot{q}_c (kW/m²)는 다음과 같은 식(3)으로부터 계산하였다.

$$\dot{q}_c = \frac{\dot{Q}_{c,exp}}{\pi \cdot d_i \cdot \Delta z} \quad (3)$$

여기에서, $\dot{Q}_{c,exp}$ 는 식(1)에서 계산된 열량이고, d_i 는 평균 관내경(m)이며, Δz 는 소구간의 길이(m)를 나타낸다.

각 소구간에서의 국소 열전달계수는 식(4)로부터 계산할 수 있다.

$$h_{c,loc} = \frac{q_c}{T_{cr} - T_{c,wi}} \quad (4)$$

여기에서, $h_{c,loc}$ 은 응축기에서의 소구간 국소 열전달계수(kW/m²·K)를 나타낸다. T_{cr} 와 $T_{c,wi}$ 은 응축기에서의 냉매와 관내벽 온도(K)이다. 내관벽 내표면온도는 정상상태에서의 1차원 전도방정식으로 계산하였다.

또한, 응축기의 평균 열전달계수 $h_{c,avg}$ (kW/m²·K)는 식(5)로부터 계산하였다.

$$h_{c,avg} = \frac{1}{x_{in} - x_{out}} \int_{x_{out}}^{x_{in}} h_{c,loc} dx = \sum \frac{h_{c,loc}}{n} \quad (5)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 응축 열전달

실험장치의 신뢰성을 확인하기 위하여 응축기

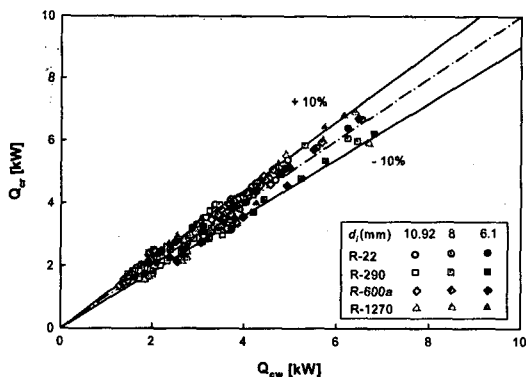


Fig. 4 Heat balance in the condenser.

에서 냉매와 냉각수 사이의 열평형을 검토하였다. Fig. 4는 평활관으로 제작된 응축기에서의 열평형을 나타낸 결과이다. 가로축은 냉각수 유량과 입·출구 온도차로 계산한 열용량 Q_{cw} 이고, 세로축은 응축기 입·출구에서의 냉매의 유량과 엔탈피차로 계산한 열용량 Q_{cr} 이다. 오차범위는 탄화수소계 냉매의 경우에 거의 모든 관경 및 유량 범위에서 대체적으로 냉매의 종류에 관계없이 $\pm 10\%$ 내외에서 거의 일치하였다.

Fig. 5는 냉매 질량유속이 $150 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 일 때 각 냉매별 내관 내경 10.92 mm, 8 mm, 6.1 mm에서의 국소 응축 열전달계수의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 국소 응축 열전달계수는 응축기 입구의 과열증기가 응축기 출구까지 응축이 진행됨에 따라 건도가 감소하면서 액막의 두께가 두꺼워지게 되는데, 이와 같이 액막의 두께가 증

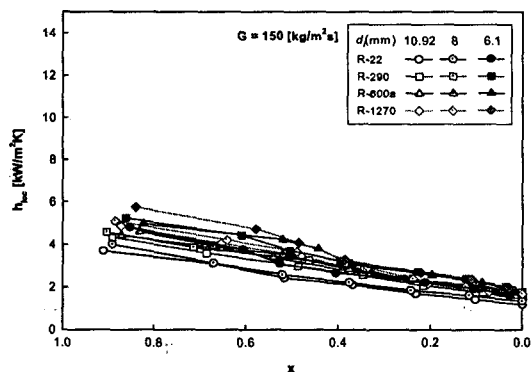


Fig. 5 Local condensing heat transfer coefficient vs. quality.

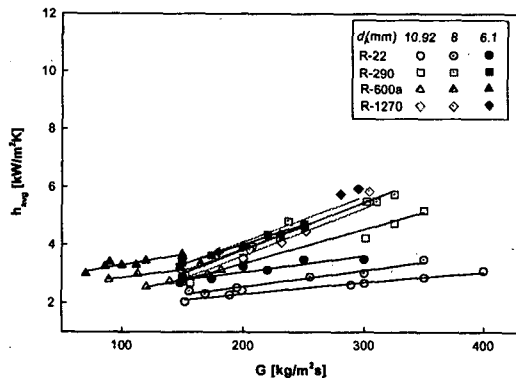


Fig. 6 Average condensing heat transfer coefficient.

가함에 따라 기액 이상류의 속도가 감소하기 때문에 열저항이 증가하게 된다. 따라서 국소 응축 열전달계수가 건도가 감소함에 따라 감소된다고 생각된다. 탄화수소계열의 경우 국소 응축 열전달계수는 R-22에 비해 내경 10.92 mm에서는 R-290은 약 16.55%, R-1270은 약 23.44%, R-600a는 약 22.24% 정도 높게 나왔고, 내경 8 mm에서는 R-290은 약 19.34%, R-1270은 약 23.82%, R-600a는 약 20.17% 정도 높게 나왔으며, 내경 6.1 mm에서는 R-290은 15.80%, R-600a는 11.30%, R-1270은 19.09% 정도 각각 높은 값을 나타내었다.

Fig. 6은 내관 내경 10.92, 8, 6.1 mm에서 내 가지 냉매의 질량유속 $62 \sim 400 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 의 범위에 대한 평균 응축 열전달계수를 나타낸 것이다. 그림에서 평균 응축 열전달계수는 질량유속에 비례하여 증가하는 일반적인 경향을 나타내었다.

냉매별로는 탄화수소계 냉매가 프레온계 냉매 R-22보다 높게 나타났다. 탄화수소계 냉매들에 있어서는 냉매 질량유속이 높아질수록 R-1270, R-600a, R-290 순으로 높게 나타났다.

3.2 압력강하 실험결과

3.2.1 응축 압력강하

Fig. 7은 질량유속 $150 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 일 때 건도의 변화에 따른 단위길이당의 평균 압력강하를 비교한 것이다. 건도가 0.3인 지점에서 압력강하가 이전 건도에서보다 큰 이유는 시험부인 응축기의 곡관부가 위치한 곳이기 때문이라 생각된다. 그래프

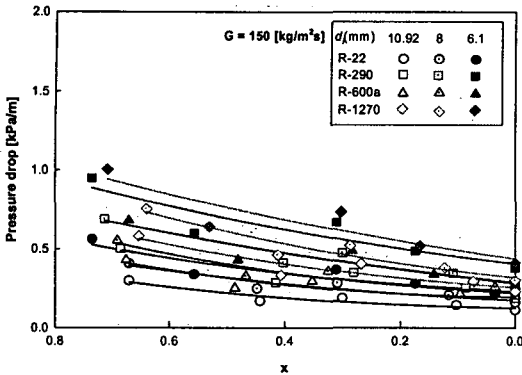


Fig. 7 Pressure drop vs. quality.

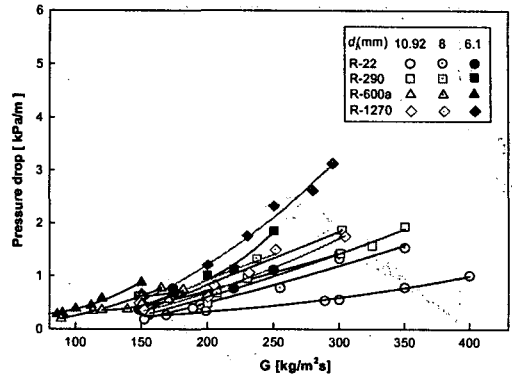


Fig. 8 Average pressure drop vs. mass flux.

에 나타난 바와 같이 R-22에 비해 탄화수소계 냉매의 압력강하가 높게 나타난 이유는 탄화수소계 냉매가 R-22보다 증기밀도가 작기 때문이다. 증기밀도가 작아질수록 압력강하는 크게 되는데, 이러한 결과는 Wijaya and Spatz⁽⁵⁾와 Torikoshi⁽⁹⁾의 연구결과와 유사하다.

Fig. 8은 질량유속이 62~400 kg/m²s일 때 단위 길이당 압력강하를 나타낸 것이다. 탄화수소계 냉매의 압력강하가 동일 질량유속일 때 R-22보다 높게 나타난 이유는 밀도가 매우 낮고, 열전도율이 크고 질량유속이 증가하면 유량의 속도가 커지면서 마찰에 의한 압력강하가 크기 때문이라 생각된다. R-22와 비교해서 탄화수소계 냉매의 평균 압력강하는 내경 10.92 mm에서 평균 약 79.52%, 8 mm에서 74.26%, 6.1 mm에서 72.57% 정도 높게 나타났다.

3.2.2. 이상류 마찰손실 파라메타

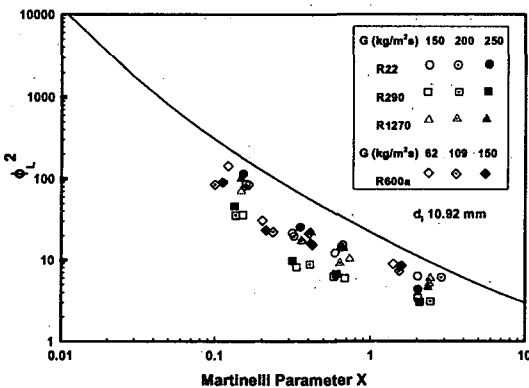
Chisholm에 의해 제안된 수평관에서의 이상류 마찰변수 Φ_L 는 Lockhart-Martinelli가 제안한 파라메타 X_{tt} 를 이용하면 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_L^2 = 1 + \left(\frac{20}{X_{tt}}\right) + \left(\frac{1}{X_{tt}^2}\right) \tag{6}$$

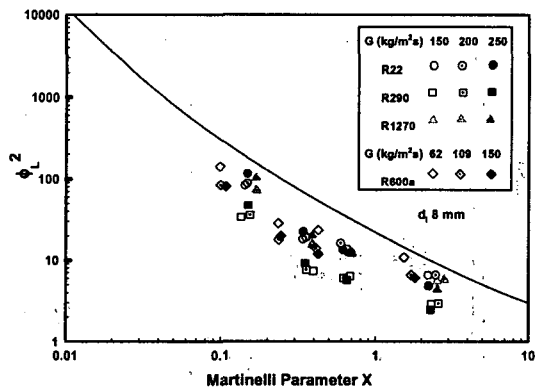
여기서, Lockhart-Martinelli가 제안한 파라메타 X_{tt} 는 아래 식(7)로 나타내어진다.

$$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.9} \cdot \left(\frac{\mu_L}{\mu_v}\right)^{0.1} \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_L}\right)^{0.5} \tag{7}$$

Fig. 9는 내관 내경 10.92, 8 mm에서의 R-22,



(a) $d_i = 10.92$ mm



(b) $d_i = 8$ mm

Fig. 9 Frictional multiplier vs. Martinelli parameter for the experimental data.

R-290, R-1270, R-600a의 압력강하에 대한 실험 결과와 식(6)~(7)로 계산한 Lockhart-Martinelli 파라메타를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 X_{tt} 가 증가할수록 전도가 감소하여 응축이 진행되고 있음을 나타내고 있다.

4. 결 론

(1) 국소 응축 열전달계수는 세 가지 관경에서 탄화수소계 냉매 모두가 기존의 R-22보다 높게 나타났으며, 탄화수소계 냉매 가운데에서는 R-1270의 국소 응축 열전달계수가 R-22보다 내관 내경 10.92 mm에서 23.4%, 8 mm에서 23.82%, 6.1 mm에서 19.09%로 가장 높게 나타났다.

(2) 탄화수소계 냉매는 R-22보다 우수한 응축 전열성능을 나타내었고, 관경별로 보면 내관 내경 6.1 mm에서 8 mm와 10.92 mm보다 R-22는 16.21%, 25.22%, HC계 냉매들은 8.85%, 18.51% 정도 높게 나왔다.

(3) 평균 응축 압력강하는 내관 내경 10.92 mm에서 79.52%, 8 mm에서 74.26%, 6.1 mm에서 72.57%로 탄화수소계 냉매가 R-22보다 압력강하가 높게 나타났으며, 탄화수소계 냉매 중에서는 R-600a의 압력강하가 가장 높게 나타났다.

(4) 동 질량유속에서 전도별 단위길이당 압력강하는 R-600a, R-1270, R-290, R-22 순으로 높게 나타났으며, 저질량유속에서보다 고질량유속에서 각 냉매별로 압력강하의 차가 더 크게 나타났다.

후 기

이 논문은 2006년도 누리사업에 의하여 일부 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Molina, M. J. and Rowland, F. S., 1974, Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom catalyzed destruction of ozone, *Nature*, Vol. 249, pp. 810-814.
- Kurylo, M. J., 1990, The chemistry of stratospheric ozone: Its response to natural and anthropogenic influences, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 13, pp. 62-72.
- Ebner, T. and Halozan, H., 1994, Testing the available alternative — An examination of R-134a, R-152a and R-290, *IEA HPC Newsletter*, Vol. 12, No. 1, Sittard, The Netherlands.
- James, R. W. and Missenden, J. F., 1992, The use of propane in domestic refrigerators, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 15, No. 2, pp. 95-100.
- Wijaya, H. and Spatz, M. W., 1995, Two-phase flow heat transfer and pressure drop characteristics of R-22 and R-32/125, *ASHRAE Transaction*, Vol. 101, Pt. 2, pp. 1020-1026.
- Haraguchi, H., Koyama, S. and Fujii, T., 1994, Condensation of refrigerant HCFC22, HFC134a and HCFC123 in a horizontal smooth tubes (1st Report, Proposals of empirical expression for the local friction pressure drop, *Trans. of the JSME (B Series)*, Vol. 60, No. 574, pp. 2111-2116.
- Haraguchi, H., Koyama, S. and Fujii, T., 1994, Condensation of refrigerant HCFC22, HFC134a and HCFC123 in a horizontal smooth tubes (2nd Report, Proposals of empirical expression for the local friction pressure drop, *Trans. of the JSME (B Series)*, Vol. 60, No. 574, pp. 2117-2124.
- Cavallini, A., Censi, G., Del Col, D., Doretti, L., Longo, G. A. and Rossetto, L., 2001, Experimental investigation on condensation heat transfer and pressure drop of new HFC refrigerants, *International Journal of Refrigerants*, Vol. 24, No. 1, pp. 73-87.
- Torikoshi, K. and Ebisu, T., 1993, Heat transfer characteristics and pressure drop characteristics of R-134a, R-32 and a mixture of R-32/R-134a inside a horizontal tube, *ASHRAE Transaction Research*, Vol. 99(2), pp. 90-96.