

탄화수소계 냉매의 증발 압력강하에 관한 연구

이광배, 이호생, 문춘근, 김재돌*, 윤정인**
부경대학교 대학원, 동명대학*, 부경대학교**

Study on Evaporation Pressure Drop of Hydrocarbon Refrigerants

Lee Kwang Bae, Lee Ho Saeng, Moon Choon-Geun, Kim Jae-Dol*, Yoon Jung-In**
Graduate School of Pukyong National University, Tongmyong College*, Pukyong National University.**

1. 서 론

냉동 공조 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 냉동 공조 산업 기술이 필요하게 되었다^{[1],[2]}. CHC 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 혼합 냉매의 경우는 고장·수리·보수 시에 발생하는 누출로 인한 성분비의 변동이 생기며, 재충전 시에서도 초기 성분비를 재현하기 힘든 등 여러 가지 어려움이 있다^[3].

새로이 개발되는 냉매는 지구 환경을 파괴하지 않으면서 독성이 없고, 가연성이 없으며, 기존의 냉매와 열역학적 성질이 비슷해야 한다. 이러한 관점에서 자연 냉매의 물성치 및 이들 자연 냉매를 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 일본 및 미국 등 다른 선진국들에 의해 탄화수소계 냉매의 사용이 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 운전 주의와 더불어 간단한 안전장치로 해결될 수 있는 것으로 보고되고 있다^[4].

Gursaran D. Mathur^[5]은 R-12와 탄화수소계 냉매 R-290, R-600a, R-290/R-600a를 작동유체로 하여 증발압력강하를 실험하여 탄화수소계 냉매가 R-12보다 압력강하가 높음을 보고하고 있으며, Mark W. Spatz^[6]등은 R-22와 R-410A, R-404A, R-290을 작동유체로 하여 증발열전달률 및 압력강하에 대해 실험을 하였으며, Adrana Greco^[7]등은 평활관에서 R-22, R-507C를 작동유체로 하여 실험하여 R-507C가 R-22보다 항상 압력강하가 적음을 보고하고 있다.

그러나 탄화수소계 냉매를 실제 냉동·공조 장치에 적용하기 위한 기초 자료는 아직 대단히 부족한 실정이며, 증발 압력강하에 대한 연구도 그 중 하나이다. 이에 본 연구에서는 HCFC계 냉매인 R-22를 기본 작동유체로 한 냉동·공조장치를 내관 외경 12.70 mm와 9.52 mm로 제작하여 탄화수소계 냉매인, R-1270 (propylene), R-600a (iso-butane), R-290 (propane)으로 작동유체를 변화시켜 평활관에서의 증발 압력강하를 실험적으로 비교 분석하여 탄화수소계 냉매를 대체냉매로 사용하는 증발기의 설계를 위한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 실험방법

2-1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험 장치로서 압축기, 응축기, 팽창장치, 증발기 및 주변장치로 구성된 기본적인 냉동·공조 시스템이며, 크게 냉매가 순환되는 경로와 증발기 및 응축기의 열원수가 순환되는 경로로 구성되어 있다. 그리고 시험구간으로 사용한 열교환기인 증발기는 내관으로 냉매가 흐르고, 내관과 외관사이의 환상구간으로 열원수가 냉매 흐름과 반대 방향으로 흐르는 이중관형 열교환기이다.

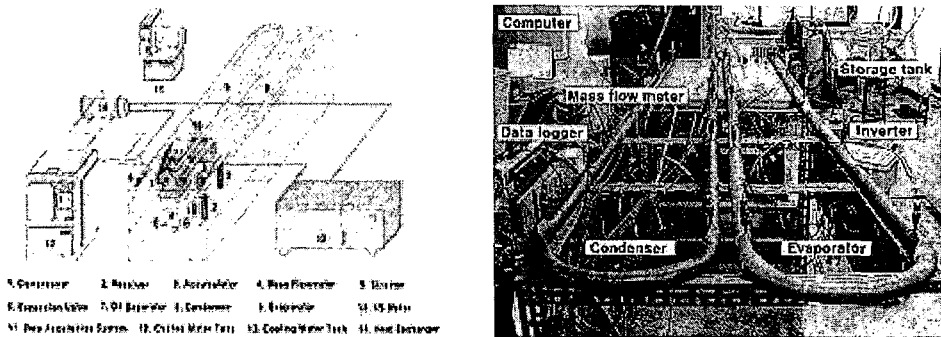


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 2는 시험부인 열교환기로서, 내관의 내경은 10.92 mm, 8 mm 동관으로 제작하였다. 그리고 외관은 두 관경 모두 내경 19.94 mm, 외경 22.22 mm인 동관을 사용하였다. 열교환기는 입구측에서 675 mm 등간격 소구간으로 8구간으로 구분하였으며, U-bend를 지나는 냉매관의 경우 우회하지 않고 동일하게 bending하여 이중관 형태를 취하도록 하였다. 열교환기의 각 소구간에 차압계를 설치하여 냉매관내의 압력강하를 측정할 수 있게 하였다. 열교환기 관내의 내벽면 온도 측정은 각각 소구간별로 8개 지점, 내벽면온도 1개당 상부, 측부, 하부의 3개 지점에서 측정하였다.

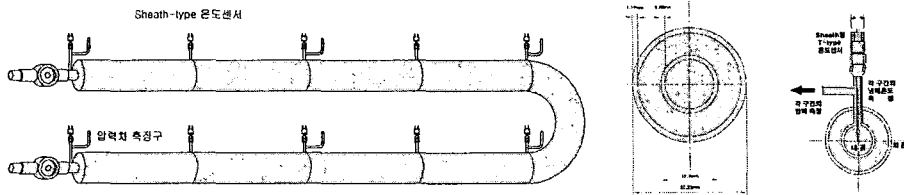


Fig. 2 Test section of the evaporator

2-2 실험방법

본 연구에서는 작동 유체로 규제 대상 냉매인 R-22와 이를 대체할 것으로 판단되어지는 자연 냉매 중 탄화수소계 냉매인 프로판(propane, R-290, 순도 99.5%)과 이소부탄(iso-butane, R-600a, 순도 99.5%), 그리고 프로필렌(propylene, R-1270, 순도 99.5%)을 사용하였다. 결과 분석을 위해 측정된 데이터는 각 소구간에서의 압력과 열교환기 입·출구에서의 압력을 측정하였고, 그 외에도 열교환기에서의 냉매 온도, 열원수 온도, 냉매와 열원수의 유량을 측정하였다. 압력차의 측정에는 차압계(DPI 420)를 사용하였고 압력계는 증발기

의 입구와 출구에 동일간격으로(1.35m) 설치하여 관내에서의 압력 강하를 알 수 있도록 하였다. 온도 측정은 정밀 수은 온도계로 보정하여 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 의 오차 범위를 가지는 T형 열전대(thermocouple)를 사용하였고. 실험장치에서 데이터의 측정점으로 냉매 유량계(OVAL 질량 유량계, $\pm 1\%$)는 응축기에서 응축된 액량을 측정하기 위하여 응축기 출구측에 설치하였고, 응축기 및 증발기에서의 열원수 유량계(ORIFICE FLOW-METER, $\pm 1\%$)는 각각 응축기와 증발기 입구 측에 설치하였다. 실험조건, 즉 작동온도, 질량유속, 열유속등은 냉매 유량, 냉각수의 온도 및 유량 등을 조절시켜 시스템이 정상상태가 된 이후에 측정을 하였다. 그리고 실험 데이터 측정이 완료되면 다시 냉매 유량과 냉각수 유량을 조절하여 반복실험을 하였다. 또한 온도, 압력 및 유량 등을 측정하기 위한 검출신호는 데이터 변환기를 통하여 컴퓨터에 입력시켜 처리하였다. 이 모든 과정은 냉매의 내관경 10.92 mm, 8 mm 두 관경 모두 동일하게 적용하여 실험하였다.

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

Table 1. Experimental conditions

Refrigerant	R-22	R-290	R-1270	R-600a
P_{sat} (kPa)	292~753	352~700	381~845	148~244
Mass flux [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]	150~250			63~150
Tube diameter(ID) [mm]	10.92, 8			
Quality	0.11~0.86			

3. 실험결과 및 고찰

3-1 실험결과

Fig. 3~6은 R-22, R-600a, R-290, R-1270에 대한 단위길이당의 전체압력강하를 건도와 질량유속의 변화에 따라 나타낸 것이다. Fig. 3~6에 나타난 것처럼 건도가 증가함에 따라 압력강하가 증가하였으며, 고질량유속에서 건도의 증가에 따른 압력강하가 저질량유속에서 보다 증가함을 알 수 있다. 이것은 기상성분이 지배적인 고건도영역에서는 냉매증기의 속도가 저건도 영역에 비하여 급격하게 증가하기 때문으로 판단된다.⁽⁸⁾ 그리고 내관경이 8 mm 일때가 내관경 10.92 mm보다 단위길이당 압력강하가 크게 나타났으며 탄화수소계 냉매와 R-22 중에는 R-600a가 가장 큰 압력강하를 보이고 있다.

Fig. 7은 질량유속 150[$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]일 때 건도의 변화에 따른 단위길이당의 평균압력강하를 R-22와 R-290, R-1270, R-600a를 비교한 것이다. 0.6에서 압력강하가 가장 큰 이유는 시험부인 증발기의 꼭관부가 위치한 곳이기 때문이라 생각된다. 건도 0.8이후에서 압력강하가 감소하는데 이것은 환상류영역으로 액막이 얇아져서 기액계면에서 마찰손실이 감소하기 때문이라고 생각된다. R-22와 비교해서 건도별로 다른 압력강하는 R-22에 비해 탄화수소계 냉매가 평균 약 46.52% 높게 나타났다. 이것은 탄화수소계 냉매가 R-22보다 증기밀도가 작기 때문이다. 증기밀도가 작아질수록 압력강하는 크게 되는데, 이러한 결과는 Wijaya and spatz⁽⁸⁾와 Torikoshi 등⁽⁹⁾의 연구결과와 유사하다.

Fig. 8은 질량유속이 50~250[$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]일 때 단위길이당 압력강하를 나타낸 것이다. 탄화수소계 냉매의 압력강하가 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 외경 12.70 mm에서 평균 약 47.18%, 9.52 mm에서 평균 약 45.42% 정도 높게 나타났다.

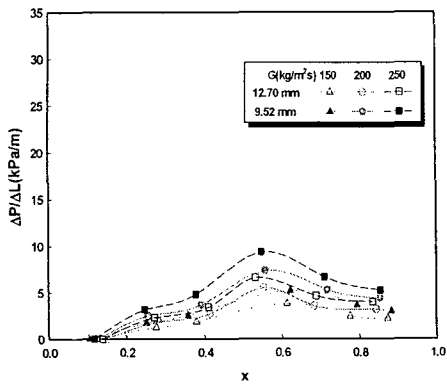


Fig. 3 Pressure drop vs. quality for R-22

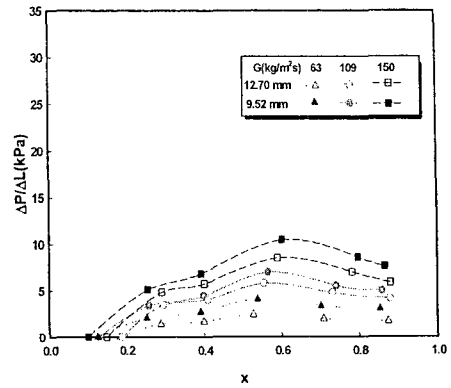


Fig. 4 Pressure drop vs. quality for R-600a

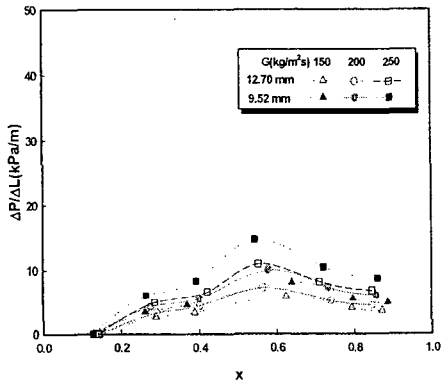


Fig. 5. Pressure drop vs. quality for R-290

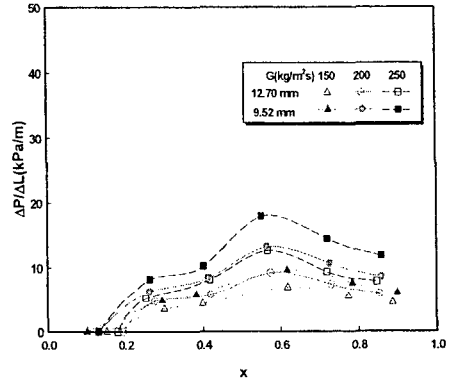


Fig. 6. Pressure drop vs. quality for R-1270

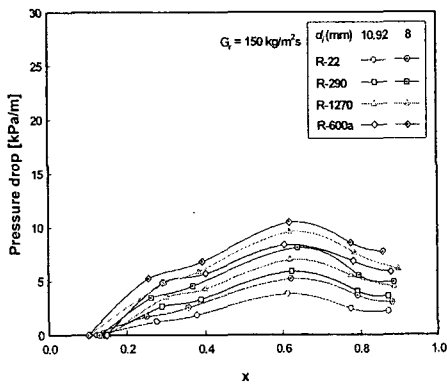


Fig. 7 Pressure drop vs. quality

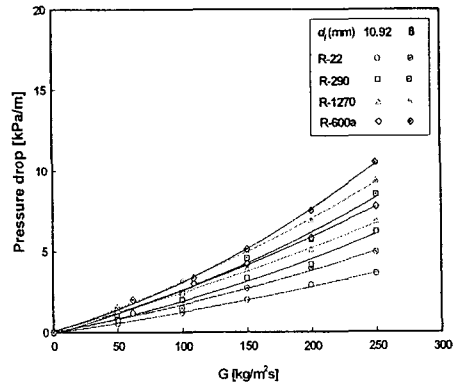


Fig. 8 Average pressure drop vs. mass flux

3-2 종래 상관식과의 비교

$(dP/dz)_L$ 을 액상성분이 관내를 충만하여 흐른다고 가정된 경우의 압력구배, $(dP/dz)_v$ 를 기상성분만이 관내를 충만하여 흐른다고 가정된 경우의 마찰 압력구배라고 할 때, 증발시의 기상 및 액상의 흐름이 난류라고 가정하면 Lockhart-Martinelli가 제안한 파라메타 X_u 와 이상류 마찰변수 ϕ_L 는 다음과 같다.

식 (2)에서 $(dP/dz)_f$ 는 소공간에 있어서의 $(\Delta P/\Delta L)_f$ 와 동일한 것으로 가정하고, $(dP/dz)_L$ 는 평활관내 액상성분에 의한 마찰압력구배에 대한 Colburn식을 이용하면 다음 식과 같이 정리된다. 식 (4)에서 f_f 는 단열 이상유동의 마찰계수이다.

Fig. 9는 내관 직경 12.7 mm, 9.52 mm에서의 R-22, R-290, R-1270, R-600a의 압력강하에 대한 실험 결과와 식 (1), (2)로 계산한 Lockhart-Martinelli 파라메타를 비교한 것이다.

그림에서와 같이 X_u 가 감소할수록 건도가 증가하여 증발이 진행되고 있음을 나타내고 있

$$X_u = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.9} \cdot \left(\frac{\mu_L}{\mu_v}\right)^{0.1} \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_L}\right)^{0.5} \quad (1)$$

$$\phi_L = \left(\left(\frac{dP}{dz} \right)_f / \left(\frac{dP}{dz} \right)_L \right)^{0.5} \quad (2)$$

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_L = - \frac{2 f_f (1-x)^2 G_v^2}{\rho_L d_{in}} \quad (3)$$

$$f_f = \frac{0.046}{(G_v (1-x) d_{in} / \mu_L)^{0.2}} \quad (4)$$

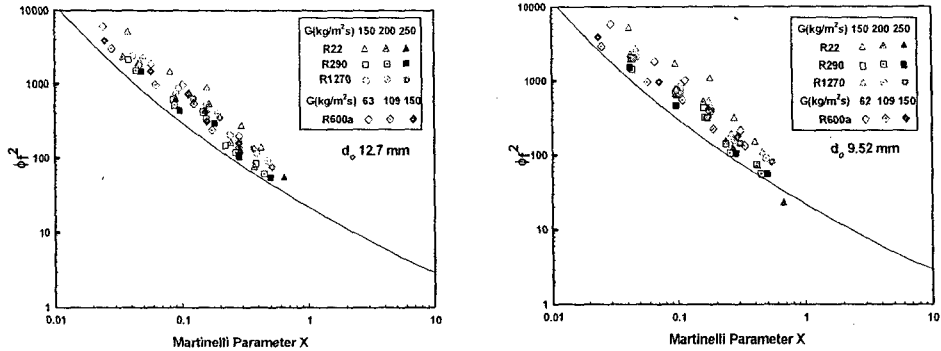


Fig. 9 Frictional multiplier vs. Martinelli parameter for the experimental data

Table 2. Experimental uncertainties

Sensors		
Temperature	±0.1 °C	
Mass flow rate	±1%	
Pressure drop	±0.2 kPa	
Parameters		
	$d_i : 8\text{mm}$	$d_i : 10.92\text{mm}$
Mass velocity, G [kg/m ² s]	±1.01%	±1.03%
Vapor quality, x	±7.26%	±7.26%
Pressure drop, $\Delta P/\Delta L$ [kPa/m]	±1.31%	±1.58%

으며 동일한 질량유속의 범위내에서 R-22의 ϕ 값이 탄화수소계 냉매의 ϕ 값보다 크게 나타났다. 또한, 대상 열교환기의 내경 등의 실험조건 차이로 인해 실험 결과값이 상관식에 의한 값보다 다소 과대 예측되는 경향을 보이고 있으나 전체적으로 유사한 경향을 보였다.

3-3 불확실성

본 실험의 실험결과를 Moffat^[10]와 Holman^[11]이 제시한 방법에 따라 오차해석을 수행하였다. 실험오차는 측정장치 및 센서와 관계가 있으며, 각 실험오차를 합산하는 방식으로 계산하였다. Table 2는 본 실험의 불확실도를 나타낸 것이다.

4. 결 론

지구 환경 보호의 측면에서 R-22의 대체 냉매로 기대되는 탄화수소계 자연냉매인 R-1270과 R-600a, R-290에 대한 증발 압력강하에 관한 실험적 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 증발압력강하는 실험에서 내관 직경 10.92 mm, 8 mm에서 모두 탄화수소계 냉매 모두가 R-22보다 압력강하가 높게 나타났다. 탄화수소계 냉매 중에서는 R-600a의 증발압력강하가 가장 높게 나타났다.
- (2) 동 질량유속에서 건도별 단위길이당 압력강하는 R-600a, R-1270, R-290, R-22 순으로 높게 나타났으며, 저질량유속에서 보다 고질량유속에서 각 냉매별로 압력강하의 차가 더 크게 나타났다.
- (3) 탄화수소계 냉매의 압력강하가 R-22보다 평균 40~50% 높게 나타났으며, 압력강하특성에서는 소구경 원관내 R-22의 대체냉매로서 탄화수소계 냉매 중 압력강하를 가장 적게 보인 R-290이 다른 탄화수소계 냉매보다 타당하다고 생각된다.
- (4) Lockhart-Martinelli 상관식과 다소의 오차를 보였으나 내경 8 mm와 10.92 mm 모두 비슷한 경향을 보였고, 그 중 R-290이 상관식과 가장 좋은 일치를 보였다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 지정 부경대학교 친환경첨단에너지기계연구센터의 지원(과제번호 : R12-2003 -001-01002-0)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

5. 참고문헌

- [1] Molina, M.J. and Rowland, F.S.: "Stratospheric Sink for Chlorofluoromethanes: Chlorine Atom Catalyzed Destruction of Ozone", Nature, Vol. 249, pp. 810~814 (1974.)
- [2] Kurylo, M. J.: "The Chemistry of Stratospheric Ozone: Its Response to Natural and Anthropogenic Influences", Int. J. Ref., Vol. 13, pp. 62~72 (1990)
- [3] Ebner, T. and Halozan, H.: "Testing the Available Alternative-An Examination of R-134a, R-152a and R-290", IEA HPC Newsletter, Vol. 12, No. 1, Sittard, The Netherlands, (1994)
- [4] James, R.W. and Missenden, J.F.: "The Use of Propane in Domestic Refrigerators, International Journal of Refrigeration", Vol. 15, No. 2, pp. 95~100 (1992)
- [5] Gursaran D. Mathur, Ph.D., P.E.: "Hydrodynamic Characteristics of Propane(R-290), Isobutane(R-600a), and 50/50 Mixture of Propane and Isobutane" ASHRAE Transactions

Vol. 106, Part 2, pp. 571~582 (2000)

[6] Mark W. Spatz, Samuel F. Yana Motta: "An evaluation of options for replacing HCFC-22 in medium temperature refrigeration systems" International journal of refrigeration, Vol. 27, No. 5, pp475~483 (2004)

[7] Adrian Greco, Giuseppe peter Vanoli: " Evaporation of refrigerants in a smooth horizontal tube: prediction of R22 and R507C heat transfer coefficients and pressure drop" Applied Thermal Engineering , Vol. 24, pp. 2189~2206 (2004)

[8] Halim Wijaya, Mark W. Spatz: " Two-Phase Flow Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of R-22 and R-32/125", ASHRAE Transaction, Vol. 101, part. 2, pp. 1020~1026 (1995)

[9] Torikoshi., K., Ebisu., T.: " Heat Rtansfer 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 (1993)

[10] Moffat, R. J.: Using Uncertainty Analysis in the Planning of an Experiment, Journal of Fluid Engineering, 107, pp. 173-182 (1985)

[11] Holman, J. P.: " Experimental Methods for Engineering", 5th Ed., Mcgraw Hill (1989)