

세관내 HCFC계 대체냉매의 압력강하에 관한 연구

손창효* · 이호림* · 정진호* · 최영석* · 오후규**

The Pressure Drop Characteristics in Small Diameter Tubes Using HCFC Alternative Refrigerants

C. H. Son, H. R. Lee, J. H. Jeong, Y. S. Choi, H. K. Oh,

Key Words: Friction factor(마찰계수), Pressure drop(압력강하), Small diameter tube(세관)

Abstract

The pressure drop characteristics of R-22 and R-410A(a mixture of 50 wt% R-32 and 50 wt% R-125) flowing in a small diameter tube with 1.77 [mm] inner diameter and 3.14 [mm] outer diameter was investigated experimentally. The mass fluxes of refrigerants are ranged from 450 to 1050 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] and the qualities are varied from 0.05 to 0.95.

The main experimental results were summarized as follows ; The single-phase liquid friction factors for small diameter tubes are higher than those predicted by the Blasius equation. In case of two-phase flow, the pressure gradient of the small diameter tube increases with increasing mass velocity and vapor quality. The experimental data are not well correlated by predictions which were proposed for the large diameter tube.

	기호설명		μ : Viscosity	[$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$]
A	: Area	[m^2]	ρ : Density	[kg/m^3]
d	: Diameter	[m]	σ : Surface tension	[N/m]
f	: Friction factor	[/]	X_{tt} : Lockhart-Martinelli parameter	[/]
L	: Length of test section	[m]	ψ : Two-phase pressure drop multiplier	[/]
G	: Mass flux	[$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]		
ΔP	: Pressure drop	[kPa]		
R	: Reynolds number	[/]		
s	: Slip ratio	[/]		하첨자
u	: Velocity	[/]		
x	: Quality	[/]	a : Accelerational	
	그리스 문자		exp : Experimental	
α	: Void fraction	[/]	f : Frictional	
β	: Volume flow ration	[/]	g : Gravitational	
			in : Inner	
			l : Liquid, Flow of the liquid phase alone in the tube	
			REF : Refrigerant	
			T : Total	
			v : Vapor, Flow of the liquid phase alone in the tube	

* 부경대학교 대학원

** 정회원. 부경대학교 냉동공조공학과

1. 서론

냉동공조산업에서 작동유체로 많이 사용되어온 CFC계 및 HCFC계 냉매가 오존층 파괴 및 온실 효과의 원인 물질로 밝혀짐에 따라 현재 대부분의 냉동공조장치에서 사용되고 있는 HCFC계 냉매 R-22는 대체되어야 할 것이다. 냉동공조용으로 개발되는 대체냉매는 무엇보다 지구환경에 영향을 미치지 않는 환경친화성 물질이면서 기존의 냉매의 열역학적 성질과 비슷하거나 우수해야 한다. 또한 안전성 및 경제성 측면에 있어서도 우수한 성능을 가진 물질이어야 한다. 이상과 같은 관점에서 R-22에 대한 대체냉매로는 HFC계 혼합냉매와 탄화수소계 자연냉매가 유력시되고 있다. 그 중에서도 HFC계 혼합냉매인 R-410A는 R-22와 비교하여 낮은 독성을 지니고 있으며, 상변화과정 중에 공비혼합냉매의 성격도 지니고 있기 때문에 R-22가 적용되고 있는 대부분의 장치에 가장 적절하다고 보고되고 있다.¹⁾

그리고 냉매 증발관에서도, 지금까지 R-22 대체 냉매에 대한 실험은 대부분이 직경 7 [mm] 이상의 대구경관에서 이루어진 연구이다. 특히 최근 연구중인 세관내의 실험은 극히 드물뿐 아니라 세관내의 전열특성과 압력강하가 종래의 대구경관에서 이루어진 연구결과와 다르다는 보고가 있으므로 이에 대한 전열특성과 압력강하를 명확히 밝히기 위해 더욱더 많은 연구가 요구된다. 특히 세관내의 이상류 압력강하에 대해서 예측할 수 있는 자료나 상관식은 아직 밝혀진 바가 없으며, 기존의 대구경관을 이용한 모델방식을 세관내에 적용하고 있는 실정이다.

따라서, 본고에서는 R-22와 그 대체냉매인 R-410A를 사용하여 세관(1.77 [mm])내 강제대류 응축과정동안의 압력강하특성을 파악함으로써 R-410A용 응축기의 기초설계자료로 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 실험 장치는 냉매 순환루프와 냉각수 순환루프로 구성되어 있다. 냉매는 수액기(9)에서 액상으로 충전된 후 구

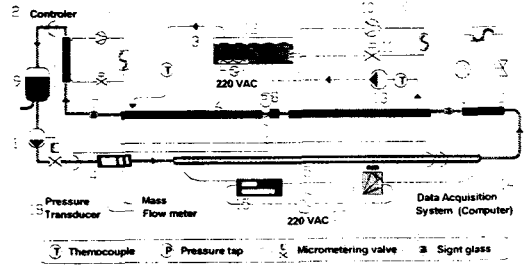


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

동원인 냉매펌프(1)에 의하여 구동되어 전자식 질량유량계(4)로 들어간다. 질량유량계에서 유량이 측정된 냉매액은 전기 히터(16)에 의해 가열되는 증발기(5)로 흡입되어 일정전도를 가진 냉매증기로 증발하게 된다. 증발기를 나온 냉매증기는 시험부인 응축기(6)로 유입되어 응축과정을 거친 후 보조 응축기에서 응축이 완료된다. 보조 응축기에서 응축된 냉매액은 수액기를 거쳐서 재순환된다. 또한, 냉매증기를 응축시키기 위한 냉각수는 냉각수 유량계에서 일정유량으로 조절되어 내관과 외관사이의 환상공간으로 냉매의 흐름과 반대방향으로 흐르게 되어있다.

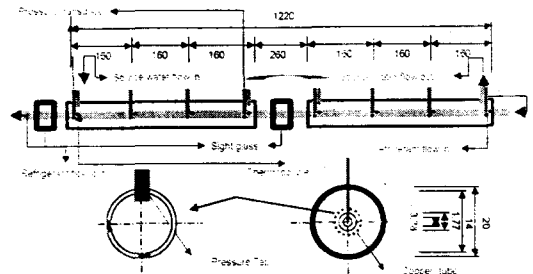


Fig. 2 Specified test section and details.

Fig. 2는 응축기 시험부의 상세도를 나타낸 것이다. 시험부인 응축기는 내관으로 냉매가 흐르고 내관과 외관 사이로 냉각수가 흐르는 이중관형 열교환기이다. 내관은 내경 1.77 [mm], 외경 3.18 [mm], 길이 480 [mm]인 2개의 수평 평활관이며, 외관은 내경 14 [mm], 외경 20 [mm]인 PVC관으로 제작하였다. 테스트부 사이와 끝에 가시화 장치를 연결하여 유동양식을 관찰하였다. 그리고 시험부는 입구에서 160 [mm]씩 동일간격으로 6개 구간으로 나누었으며, 각 구간에는 냉매, 관벽, 냉각수 온도 및 차압을 각각 측정할 수

있도록 하였다. 차압은 관내부에 압력탭을 설치하여 시스템내의 압력변동이 최소화되는 정상상태에 이르렀을 때 DPI 420 차압계를 이용하여 측정하였다. 실험데이터는 장치가 정상상태에 도달하였을 때 온도, 압력과 질량유량을 각각 측정하였다.

Table 1 Experimental conditions

Refrigerant	R-22	R-410A
Test section	Horizontal copper tube	
I.D of test section [mm]	1.77	
Quality [/]	0.94~0.13	
Mass flux [kg/(m ² · s)]	450~1050	450~1000
P _{sat} [kPa]	1763~1185	2522~1875
T _{REF} [°C]	44~35	41~32

3. 데이터 해석

3.1 물성치 계산

압력강하를 계산하기 위해서 컴퓨터 데이터 처리 프로그램을 사용하여 측정된 온도, 압력 등을 분석하였다. 그리고 유체의 모든 물성치는 시험구간의 입·출구에서 측정된 온도의 평균값으로 계산하였다.

3.2 단상류 압력강하

원형관내 완전히 발달된 층류와 난류의 액단상에 대한 마찰압력강하는 아래의 식으로 계산하였다.

$$\Delta P_f = f \cdot \frac{L}{d_{in}} \cdot \frac{\rho_{REF} u_{REF}^2}{2} \quad (1)$$

위의 식에서 f는 마찰인자로서 식(2)와 같다.

$$f = 2 \frac{d_{in}}{L} \cdot \frac{\Delta P_f}{\rho_{REF} u_{REF}^2} = \frac{d_{in}}{4L} \cdot \frac{\Delta P_f}{G^2 / 2\rho_{REF}} \quad (2)$$

여기서 L은 시험구간의 전체길이, d_{in}은 내관의 내경, ρ_{in}은 튜브내측을 흐르는 냉매의 밀도이다.

3.3 이상류 압력강하

응축관내 기액이상류에 있어서 단위길이당의 전체압력강하((ΔP/ΔL)_T)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_T = \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_f + \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_a + \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_g \quad (3)$$

여기서, (ΔP/ΔL)_f는 마찰에 의한 압력강하, (ΔP/ΔL)_a는 운동량에 의한 압력강하, (ΔP/ΔL)_g중력에 의한 압력강하이다. 수평관에서는 중력에 의한 압력강하((ΔP/ΔL)_g)는 무시할 수 있으므로 다음과 같다.

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_T = \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_f + \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_a \quad (4)$$

운동량에 의한 압력강하((ΔP/ΔL)_a)는 기상과 액상의 속도가 동일하다는 가정하에서 운동량식으로 유도한 균질유동모델을 이용하면 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_a = -G_{REF}^2 \left[\frac{x^2}{\alpha \cdot \rho_v} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha) \cdot \rho_l} \right] \quad (5)$$

여기서, G_{REF}는 냉매질량유속이고, α는 보이드율이다. 최근 Triplett et al.¹²은 미소채널내에서 유동양식과 보이드율에 대해서 실험한 결과, 기상의 속도가 빠른 처연류와 환상류영역에서는 Premoli 등이 제안한 보이드율식과 잘 일치하고, 미소채널내의 유동양식은 대부분 환상류영역이 지배적으로 나타난다고 보고하였다. 따라서 본 실험에는 Triplett 등이 추천한 보이드율식(6)을 이용하여 운동량변화에 따른 압력강하를 계산하였다.

$$\alpha = \frac{x}{x + s \cdot (1-x) \rho_v / \rho_l} \quad (6)$$

$$s = 1 + E_1 \left[\left(\frac{v}{1 + yE_2} - yE_2 \right) \right] \quad (7)$$

$$y = \frac{\beta}{1-\beta} \quad (8)$$

$$E_1 = 1.578 \left(\frac{G \cdot d_{in}}{\mu_l} \right)^{-0.19} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.22} \quad (9)$$

$$E_2 = 0.0273 \left(\frac{G \cdot d_{in}}{\mu_l} \right)^{-0.51} \left(\frac{G^2 d_{in}}{\sigma \rho_l} \right) \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{-0.08} \quad (10)$$

여기서, σ 는 냉매의 표면장력, μ 는 점성계수, β 는 체적유량비(volume flow ratio)이다.

이상유동의 마찰압력강하는 이상류 마찰압력구배($\Delta P/\Delta L)_i$)와 전체유량이 액상으로만 흐르는 경우의 단상마찰압력구배($\Delta P/\Delta L)_v$)의 비인 이상류 마찰배수(two-phase frictional multiplier)의 형태로 나타내는 것이 일반적이다. 즉,

$$\phi_v^2 = \frac{(\Delta P/\Delta L)_f}{(\Delta P/\Delta L)_v}, \quad \phi_i^2 = \frac{(\Delta P/\Delta L)_f}{(\Delta P/\Delta L)_i} \quad (11)$$

여기서 아래첨자 i 은 냉매액이 관을 가득차서 흐른다고 가정한 값이고, v 은 냉매증기가 관을 가득차서 흐른다고 가정한 값이다. Lockhart and Martinelli는 이상류 마찰손실배수(X)를 아래와 같이 정의하고,

$$X = \frac{\phi_v^2}{\phi_i^2} = \frac{(\Delta P/\Delta L)_v}{(\Delta P/\Delta L)_i} \quad (13)$$

낮은 압력상태에서 등은 이상류 2성분유체에 대해서 다음과 같은 경험식을 제시하였다.

$$\phi_v^2 = 1 + CX + X^2 \quad (14)$$

위의 식(14)에서 C 는 기상과 액상의 레이놀즈수가 층류($Re < 2000$)인지 난류($Re > 2000$)인지에 따라 정해지는 값으로 아래의 표. 2에 나타내었다. 관내의 이상류 유동은 액상과 기상이 대부분 난류이고, 본 실험으로 구한 액상과 기상의 Re 수는 모두 난류임을 확인하여 아래의 식으로 계산하였다.

$$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.9} \left(\frac{\mu_l}{\mu_v} \right)^{0.1} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.5} \quad (15)$$

여기서 x 는 관내측의 건도이고, μ 는 액상과 기상의 점성계수이다.

Table 2 Constant C depending upon the flow type

Vapor	Liquid	Indices of X	C
laminar	laminar	ll	5
laminar	turbulent	lt	10
turbulent	laminar	tl	12
turbulent	turbulent	tt	20

4. 실험결과 및 고찰

4.1 단상류 압력강하

Fig. 3은 각 냉매에 대하여 단위 길이당 압력강하를 레이놀즈수의 증가에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 레이놀즈수가 증가함에 따라 단위길이당 압력강하는 증가하는 경향으로 나타났고, R-22의 압력강하는 R-410A에 비해서 60~120%정도 크게 나타났다. 그 이유는 R-22가 R-410A보다 냉매의 액상점도가 더 크기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 레이놀즈수가 증가함에 따라 냉매별 압력강하의 폭이 증가함을 알 수 있었으며, R-410A와 비교해서 R-22의 단위길이당 압력강하가 지수적으로 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 높은 레이놀즈수가 요구되는 시스템에서 R-410A가 유리하리라 판단된다.

Fig. 4는 Blasius 상관식과 식(2)로 계산한 마찰인자를 레이놀즈수에 따라 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 레이놀즈수가 증가함에 따라 마찰인자가 감소하는 경향을 보였고, Blasius 식과 비교해볼 때 R-410A가 R-22보다 큰 이탈 정도를 보였다. 따라서 세관내에 액단상에 대한 새로운 상관식을 제안할 필요가 있음을 알 수 있다.

4.1 이상류 압력강하

Fig. 5~6은 R-22와 R-410A의 전체압력강하를 건도와 질량유속의 변화에 따라 나타낸 것이다.

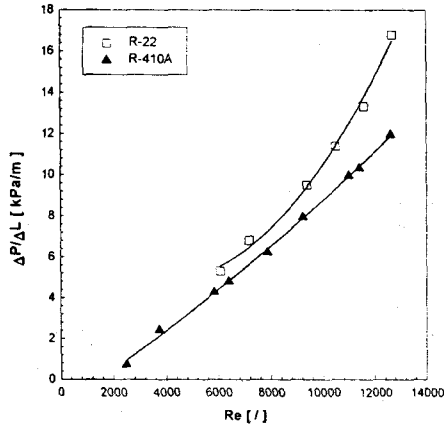


Fig. 3 Pressure drop with equivalent Reynolds number for R-22 and R-134a.

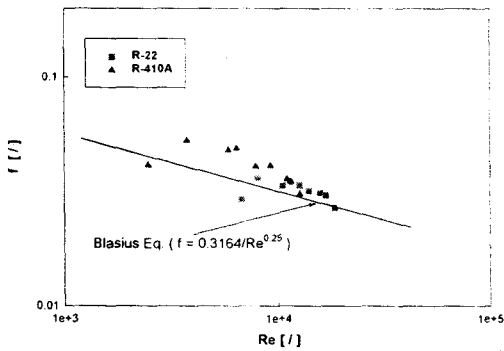


Fig. 4 Comparison of experimental data with Blasius-equation for R-22 and R-410A.

건도가 증가함에 따라 압력강하가 증가하였으며, 고질량유속에서 건도의 증가에 따른 압력강하가 저질량유속에서 보다 커짐을 알 수 있었다. 이는 기상성분이 지배적인 고건도영역에서는 냉매 증기의 속도가 저건도영역에 비하여 급격하게 증가하기 때문으로 판단된다.

Fig. 7은 단일성분냉매 R-22와 혼합냉매 R-410A의 전체압력강하를 건도와 질량유속의 변화에 따라 나타낸 것이다. 두 냉매 모두 건도와 질량유속이 증가할수록 압력강하가 증가하는 경향으로 나타났으며, 전체질량유속 범위에 대하여 단일성분 R-22의 압력강하가 혼합냉매 R-410A의 압력강하에 비하여 큰 경향으로 나타났다.

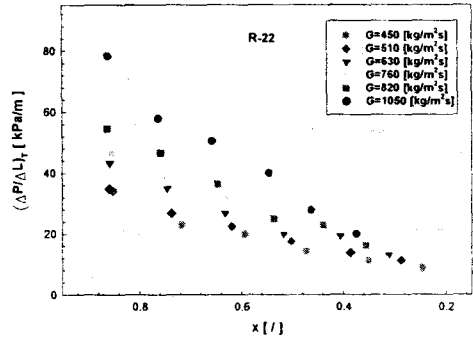


Fig. 5 Pressure drop variations with mass flux and quality for R-22.

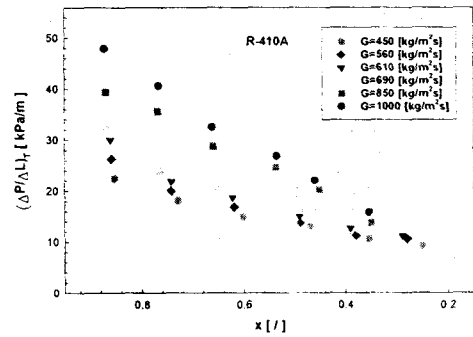


Fig. 6 Pressure drop variations with mass flux and quality for R-410A.

특히 두 냉매 모두 고건도영역에서 압력강하의 폭이 커지는데 그 이유로는 건도가 증가함에 따라 R-410A의 증기밀도가 R-22의 증기밀도보다 40~60%정도 높아지기 때문이다. 즉 증기밀도가 작은 냉매일수록 큰 압력강하를 겪게 된다. 이러한 결과는 Halim 등⁽³⁾의 연구결과와 유사하다.

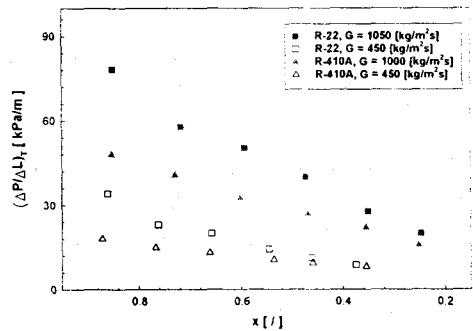


Fig. 7 Pressure drop of R-22 and R-410A with quality

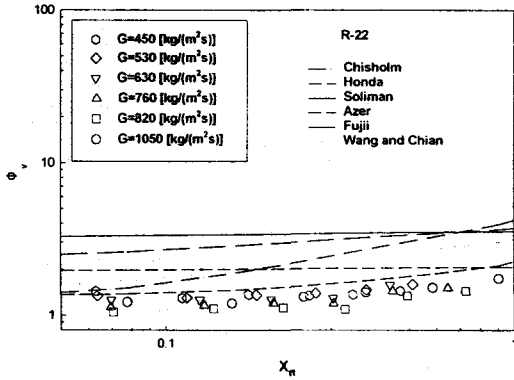


Fig. 8 Comparison for experimental data with present correlation which were proposed in large diameter tubes for R-22.

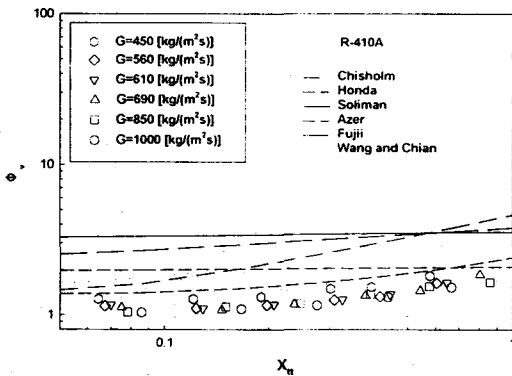


Fig. 9 Comparison for experimental data with present correlation which were proposed in large diameter tubes for R-410A.

Fig. 8~9는 세관내에서 R-22와 R-410A의 압력강하에 대한 실험결과와 대구경관에서 제안한 예측식들과 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 X_{tt} 가 증가할수록 건도가 감소하여 응축이 진행되고 있음을 나타내고 있다. 전체적으로 대구경관에서 제안한 상관식들과는 큰 이탈정도를 보였다. 그 중에서도 Honda가 제안한 상관식과 잘 근사하는 것을 알 수가 있다. Honda식과 비교했을 때, R-22와 R-410A 모두 X_{tt} 가 감소하는 고건도와 저질량유속에서는 이탈정도가 작게 나타났지만, 저건도와 고질량유속에서는 그 이탈정도가 큰 것으로 나타났다.

5. 결론

내경 1.77 [mm]인 이중관식 열교환기를 제작하여 R-22와 대체냉매인 HFC계 혼합냉매 R-410A의 압력강하에 대한 실험을 하였다. 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 압력강하는 단상류와 이상류 모두 R-410A가 R-22에 비해서 현저히 낮게 나타남을 확인할 수 있었다. 따라서 압력강하특성을 볼 때 세관내에서도 R-410A의 R-22에 대한 대체 가능성을 확인할 수 있었다. 그리고 본 실험결과는 일반 대구경관에서 제안된 압력강하 상관식과 상당히 차이가 있는 것을 알 수 있었으며, 세관내 압력강하에 대한 예측식도 불충분한 것으로 판단된다. 따라서 세관내 압력강하를 예측하기 위한 신뢰성 있는 상관식의 개발이 요구되고, 이를 위해 세관내 이상류 유동 압력강하에 대한 많은 데이터의 축적이 요망된다.

후기

본 연구는 에너지자원 기술개발센터와 한서엔지니어링의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다

참고문헌

- (1) NATIONAL REFRIGERANTS INC., 1997, "REFRIGERANT REFERENCE GUIDE", second edition, pp. 5, 50~50, 48~49.
- (2) K. A. Triplett, S. M. Ghiaasiaan, S. I. Abdel-Khalik, A. LeMouel, B. N. McCord, 1999, "Gas-liquid two-phase flow in microchannels", Int. J. of Multiphase Flow, Vol. 25, pp. 395~410.
- (3) Halim Wijaya, Mark W. Spatz, 1995, "Two-phase flow heat transfer and pressure drop characteristics of R-22 and R-32/125", ASHRAE Transaction, Vol. 101, part. 2, pp.