

세관내 R-22와 R-410A의 응축 압력강하

손창효[†]

*부경대학교 기계공학부

The Condensation Pressure Drop of R-22 and R-410A in Small Diameter Tube

CHANG HYO SON[†]

**School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, San 100, Yongdang-dong, Nam-gu, Busan-Si, 608-739, Korea*

ABSTRACT

The condensation pressure drop for R-22 and R-410A flowing in a small diameter tube was investigated. The test section is a counterflow heat exchanger with refrigerant flowing in the inner tube and coolant flowing in the annulus. The test section consists of 1220 mm length with horizontal copper tube of 3.38 mm outer diameter and 1.77 mm inner diameter. The refrigerant mass fluxes ranged from 450 to 1050 kg/m² · s and the average inlet and outlet qualities were 0.05 and 0.95, respectively. The main experimental results were summarized as follows : In the case of two-phase flow, the pressure drop increases with increasing mass flux and decreasing quality. The pressure drop of R-22 is slightly higher than that of R-410A for the same mass flux. Most of correlations proposed in the large diameter tube showed enormous deviations with experimental data.

KEY WORDS : Evaporation(증발), Heat transfer coefficient(열전달 계수), Supercritical cycle(초월임계 사이클)

Nomenclature

A : Area, m²
d : Diameter, m
f : Friction factor
G : Mass flux, kg/m²s
L : Length of test section, m

ΔP : Pressure drop, kPa
Re : Reynolds Number, Gd/ μ
s : Slip ratio
u : Velocity, m/s
x : Quality

Greek symbols

α : Void fraction
 β : Volume flow ratio

[†]Corresponding author : sonch@pknu.ac.kr

- μ : Viscosity, kg/ms
- ρ : Density, kg/m³
- σ : Surface tension, N/m
- X_{tt} : Lockhart-Martinelli parameter
- Φ : Two-phase friction parameter

Subscripts

- a : acceleration
- cw : coolant
- f : friction
- g : weight
- in : inner
- l : liquid
- r : refrigerant
- sat : saturation
- T : total
- v : vapor

1. 서 론

CFC계 및 HCFC계 냉매가 오존층 파괴 및 온실효과의 원인 물질로 밝혀짐에 따라 현재 대부분의 냉동공조장치에 사용되고 있는 HCFC계 냉매 R-22를 대체하기 위해서 HFC계 순수냉매와 혼합냉매에 대한 연구^{1~4)}가 활발히 진행되고 있다. 이에 대한 연구는 대부분이 직경 7 mm이상의 대규경관에 대한 것으로서 HFC계 순수냉매와 혼합냉매의 전열특성 및 여러 가지 장단점에 대해서는 어느 정도 밝혀져 있는 실정이다. 그러나 최근까지 세관에 관련된 대체냉매의 연구는 극히 드물며, 열교환기의 설계에 적용할 수 있는 자료는 더욱더 부족하다. 또한, 세관⁵⁾내 압력강하는 종래의 대규경관에서 이루어진 연구결과와 다르다^{6~7)}는 보고가 있으므로, 이에 대한 압력강하를 명확히 밝히기 위해서는 상당히 많은 연구가 요구된다.

따라서, 본고에서는 R-22의 대체냉매인 혼합냉매 R-410A를 작동유체로 사용하여 세관(1.77 mm)내 압력강하특성에 대한 새로운 자료와 R-22 대체냉매용 세관열교환기 설계에 대한 기초자료를 제공하고자 한다.

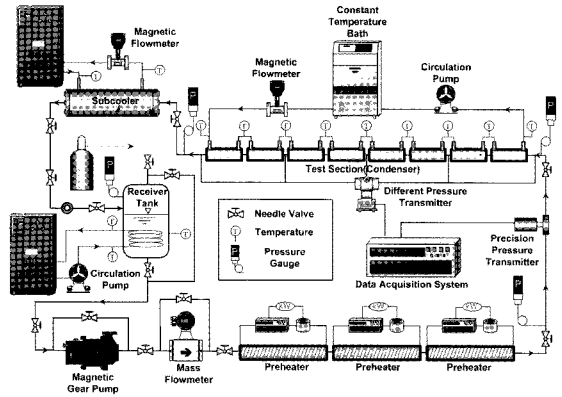


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

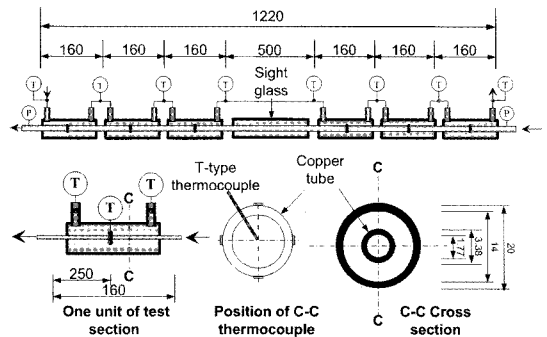


Fig. 2 Specified test section and details.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험장치의 개략도로서 냉매 순환루프와 냉각수 순환루프로 구성되어 있다. 냉매는 수액기에서 액상으로 충전된 후 구동원인 냉매펌프에 의해 전자식 질량유량계로 들어간다. 질량유량계에서 유량이 측정된 냉매액은 전기 히터에 의해 가열되는 증발기로 흡입되어 일정건도로 조절된다. 증발기를 나온 냉매증기는 시험부인 응축기로 유입되도록 구성되어 있다. 또한, 냉매증기를 응축시키기 위한 냉각수는 냉각수 유량계에서 일정유량으로 조절되어 내관과 외관사이의 환상공간으로 냉매의 흐름과 반대방향으로 흐르게 하였다.

Fig. 2는 시험부의 상세도를 나타낸 것으로 내관으로 냉매가 흐르고 내관과 외관 사이로 냉각수가 흐르는 이중관형 열교환기이다. 내관은 내경

Table 1 Experimental conditions

Refrigerant	R-22	R-410A
Test section	Horizontal copper tube	
d_{in} [mm]	1.77	
x [/]	0.05 ~ 0.95	
G_{re} [kg/(m ² s)]	450 ~ 1050	
P_{sat} [kPa]	1534	2424
T_{cw} [°C]	20	

1.77 mm, 외경 3.18 mm, 길이 480 mm인 2개의 수평 평할관이며, 외관은 내경 14 mm, 외경 20 mm인 PVC관으로 제작하였다. 그리고 시험부는 입구에서 160 mm씩 동일간격으로 6개 구간으로 나누었으며, 각 구간에는 냉매, 관벽, 냉각수 온도 및 차압을 각각 측정할 수 있도록 하였다. 온도와 압력은 실험장치가 정상상태에 도달하였을 때 측정하였으며, 차압은 관내부에 압력탭을 설치하여 시스템내의 압력변동이 최소화되는 상태에 이르렀을 때 DPI 420 차압계를 이용하여 측정하였다. Table 1에 본 연구의 실험조건을 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 이상류 압력강하

3.1.1 국소 압력강하

Fig. 3~4는 R-22와 R-410A에 대한 단위길이 당의 전체압력강하를 건도와 질량유속의 변화에 따라 나타낸 것이다. Fig. 3~4에 나타난 것처럼 건도가 증가함에 따라 압력강하가 증가하였으며, 고질량유속에서 건도의 증가에 따른 압력강하가 저질량유속에서 보다 증가함을 알 수 있다. 이것은 기상성분이 지배적인 고건도영역에서는 냉매증기의 속도가 저건도영역에 비하여 급격하게 증가하기 때문으로 판단된다⁸⁾. 또한 Fig. 3과 4에 나타난 것처럼 저건도영역에서 R-22와 R-410A의 압력강하는 질량유속의 영향을 적게 받음을 알 수 있었

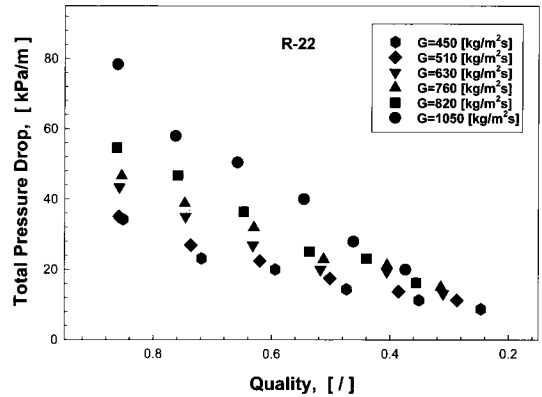


Fig. 3 Pressure drop variations with mass flux and quality for R-22.

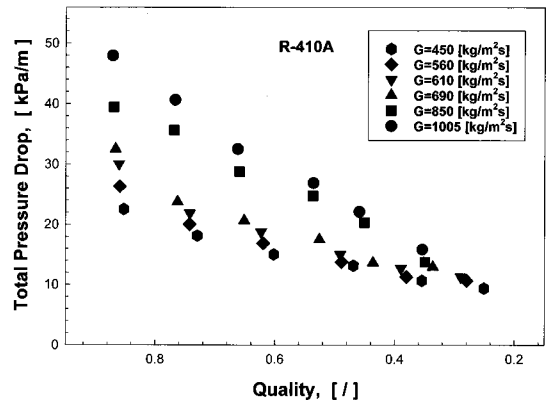


Fig. 4 Pressure drop variations with mass flux and quality for R-410A.

다. 즉, R-22와 R-410A의 경우, 저건도 영역 ($x=0.4$ 이하)에서 질량유속이 증가하더라도 전체적인 압력강하의 값은 크게 증가하지 않았다. 이것은 세관내 이상류의 유동형태와 깊은 관련이 있는데, 저건도 영역에서 R-22와 R-410A는 기상의 속도가 느린 파형류나 성층류가 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

3.1.2 전체 압력강하

Fig. 5는 R-22와 R-410A에 대한 전체압력강하를 건도의 변화에 따라 비교한 것이다. 각각의 냉매는 건도와 질량유속이 증가할수록 압력강하가

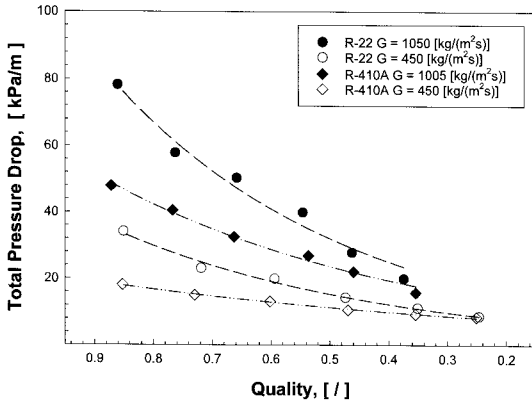


Fig. 5 Pressure drop variation of R-22, R-134a and R-410A with quality

증가하였으며, 전체 질량유속의 범위에 대해 R-22가 R-410A보다 압력강하가 증가함을 알 수 있다. 이것은 건도가 증가함에 따라 R-22의 증기밀도가 R-410A에 비하여 더 낮아지기 때문으로 생각된다. 즉, 증기밀도가 작아질수록 압력강하가 크게 되는데, 이러한 결과는 Wijaya와 Spatz⁸⁾와 Torikoshi 등⁹⁾의 연구결과와 유사하다.

3.1.3 마찰 압력강하

Fig. 6은 세관내에서 R-22와 R-410A에 대한 단위길이당의 마찰압력강하를 질량유속에 따라 나타내었다. Fig. 6에서와 같이 일반적으로 관내 마찰 압력강하($\Delta P/\Delta L$)_f는 실험으로 측정된 전체압력강하($\Delta P/\Delta L$)_t와 식 (1)로 계산한 운동량 압력강하($\Delta P/\Delta L$)_a로 계산할 수 있다. 그리고 수평관일 경우 중력에 의한 압력강하는 무시할 수 있다. 여기서, 운동량에 의한 압력강하(($\Delta P/\Delta L$)_a)는 기상과 액상의 속도가 동일하다는 가정하에서 운동량식¹⁰⁾을 이용하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

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

여기서, G_r 는 냉매질량유속이고, α 는 보이드율이다. 최근 Triplett 등¹¹⁾은 미소채널내에서 유동양식

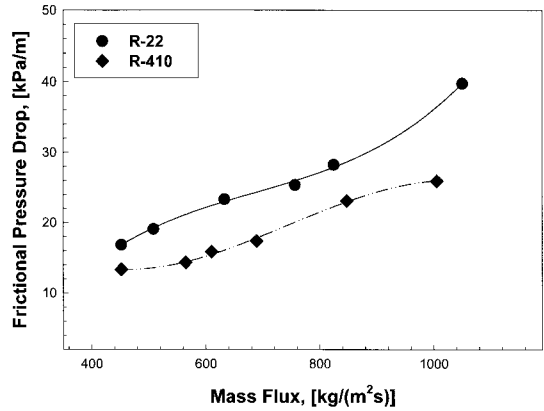


Fig. 6 Friction pressure drop variation with mass flux for R-22, R-134a and R-410A.

과 보이드율에 대해서 실험한 결과, 기상의 속도가 빠른 처연류(churn flow)와 환상류 영역(annular flow)에서는 Premoli 등¹²⁾이 제안한 보이드율식과 잘 일치하고, 미소채널내의 유동양식은 대부분 환상류영역이 지배적으로 나타난다고 보고하였다. 따라서 본 실험에는 Triplett 등이 추천한 Premoli 등의 보이드율식을 이용하여 운동량 변화에 따른 압력강하를 계산하였다. 즉,

$$\alpha = \frac{x}{x + s \cdot (1-x)\rho_v/\rho_l} \quad (2)$$

여기서 s 는 슬립비(slip ratio)로서 아래와 같다.

$$s = 1 + E_1 \left[\left(\frac{y}{1 + yE_2} - yE_2 \right) \right] \quad (3)$$

식(3)에서 y 는 체적 유량비(volume flow ratio)의 함수로서 식 (4)와 같다. 그리고 E_1 과 E_2 는 기상과 액상의 물성치와 질량유속에 의존하는 값으로서 식 (5) 및 (6)과 같다.

$$y = \frac{\beta}{1 - \beta} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{x\rho_1}{x\rho_1 + (1-x)\rho_v} \quad (5)$$

$$E_1 = 1.578 \left(\frac{G \cdot d_{in}}{\mu_1} \right)^{-0.19} \left(\frac{\rho_1}{\rho_v} \right)^{0.22} \quad (6)$$

$$E_2 = 0.0273 \left(\frac{G \cdot d_{in}}{\mu_1} \right)^{-0.51} \left(\frac{G^2 d_{in}}{\sigma \rho_1} \right) \left(\frac{\rho_1}{\rho_v} \right)^{-0.08} \quad (7)$$

여기서, σ 는 냉매의 표면장력, μ 는 점성계수, β 는 체적 유량비이다.

Fig. 6에서 알 수 있듯이 마찰압력강하는 전체 압력강하의 경우와 유사한 경향으로 나타났으며, 동일질량유속의 범위내에서 R-22의 마찰압력강하는 R-410A보다 큰 값을 나타내었다. 이때, 450~1050 kg/m²s의 전체질량유속의 범위내에서 R-22와 R-410A 냉매의 마찰압력강하는 Fig. 5의 전체 압력강하에 86~92 %정도가 됨을 알 수 있었다.

3.2 종래의 상관식과 비교

$(dP/dz)_l$ 을 액상성분이 관내를 충만하여 흐른다고 가정한 경우의 마찰 압력구배, $(dP/dz)_v$ 를 기상 성분만이 관내를 충만하여 흐른다고 가정한 경우의 마찰 압력구배라고 할 때, 응축시의 기상 및 액상의 흐름이 난류라고 가정하면 Lockhart-Martinelli가 제안한 파라메타 X_{tt} 와 이상류 마찰변수 Φ_v 는 다음과 같다.

$$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.9} \cdot \left(\frac{\mu_l}{\mu_v} \right)^{0.1} \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.5} \quad (8)$$

$$\Phi_v = \left(\frac{(dP/dz)_f}{(dP/dz)_v} \right)^{0.5} \quad (9)$$

식(9)에서 $(dP/dz)_f$ 는 소구간에 있어서의 $(\Delta P/\Delta L)_f$ 와 동일한 것으로 가정하고, $(dP/dz)_v$ 는 평활관 내 기상성분에 의한 마찰압력구배에 대한 Colburn 식을 이용하면 식 (10)과 같이 정리된다.

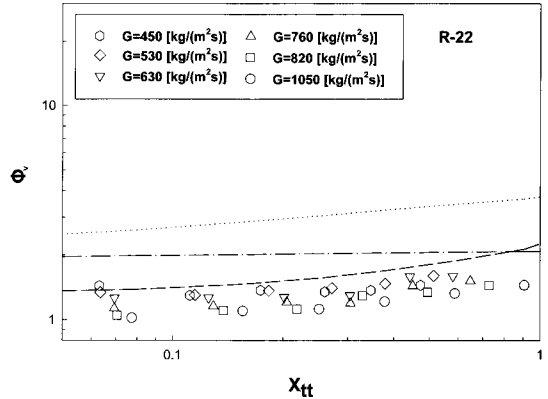


Fig. 7 Comparison for experimental data with present correlation proposed in large diameter tubes for R-22.

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_v = - \frac{2 f_f x^2 G_r^2}{\rho_v d_{in}} \quad (10)$$

$$f_f = \frac{0.045}{(G_r \times d_{in} / \mu_v)^{0.2}} \quad (11)$$

식(11)에서 f_f 는 단일 이상유동의 마찰계수이다.

Fig. 7~8은 세관내 R-22와 R-410A의 압력강하에 대한 실험 결과와 식 (8)과 (9)로 계산한 Lockhart-Martinelli 파라메타를 비교한 것이다. Fig. 7~8에서 긴파선은 Honda 등¹³⁾이 내경 14 mm의 수평 및 수직관내 R-11과 R-113을 작동유체로 하여 냉각수의 평행류 열교환에 의한 실험으로 유도된 상관식으로 식 (12)와 같다.

$$\Phi_v = 1 + 0.5 \left[\frac{G_r}{\sqrt{g d_{in} \rho_v (\rho_l - \rho_v)}} \right]^{0.75} X_{tt}^{0.35} \quad (12)$$

일점쇄선은 Azer 등¹⁴⁾이 내경 12.7 mm의 수평 관내 R-12의 응축 환상류 영역에 대한 상관식으로 아래와 같다.

$$\Phi_v = 1 + 1.09 X_{tt}^{0.039} \quad (13)$$

그리고, 파선은 Fujii 등¹⁵⁾이 내경 16 mm의 수평관내 R-11의 응축실험으로부터 유도한 상관식으로 식 (14)와 같다.

$$\Phi_v = 1 + aX_{tt}^{0.2} \quad (14)$$

여기서, a 값은 $G_r/\sqrt{\rho_l\rho_v} \leq 1.5$ 인 경우 $a = 1.21(G_r/\sqrt{\rho_l\rho_v})^{0.7}$ 이고, $G_r/\sqrt{\rho_l\rho_v} > 1.5$ 인 경우 $a = 1.65$ 이다.

Fig. 7~8에서 알 수 있는 것처럼 X_{tt} 가 증가할수록 건도가 감소하여 응축이 진행되고 있음을 나타내고 있으며, X_{tt} 가 동일한 경우, 질량유속이 증가할수록 Φ_v 의 실험치가 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 동일한 질량유속의 범위내에서 R-22의 Φ_v 값은 R-410A보다 약간 큰 값으로 나타났다. 따라서, Fig. 7~8에서 알 수 있듯이 전체적으로 대구경관에서 제안한 상관식들과는 큰 차이를 보였다. 그 중에서 R-22와 R-410A의 경우는 큰 차이를 보였다. 즉, R-22와 R-410A 모두 X_{tt} 가 감소하는 고건도 영역과 저질량유속에서는 Honda 식과의 차이가 작게 나타났지만, 저건도와 고질량유속에서는 그 차이가 큰 것으로 나타났다. 이는 대상 열교환기의 기하학적 형상과 내경 등의 실험조건이 다르기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

4. 결론

내경 1.77 mm인 세관 이중관식 열교환기를 제작하여 R-22의 대체냉매인 혼합냉매 R-410A의 압력강하에 대해서 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

세관내에서 R-410A의 압력강하는 R-22보다 60~90 %정도 저하하였다. 따라서 압력강하특성에서는 세관내 R-22의 대체냉매로서 R-410A가 타당하다고 생각된다. 종래의 일반 압력강하 상관식으로 세관내의 압력강하를 예측하는데 상당한 오

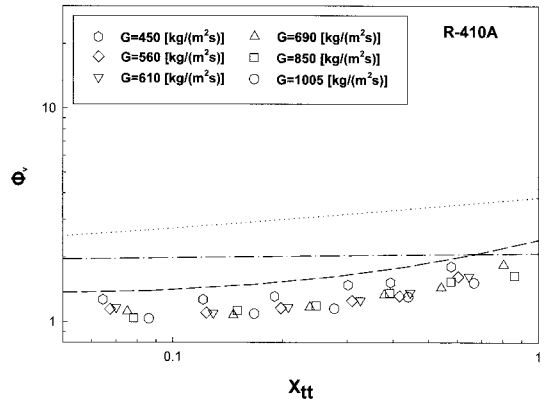


Fig. 8 Comparison for experimental data with present correlation proposed in large diameter tubes for R-410A.

차가 있음을 알 수 있었다. 따라서 현재 세관내 응축압력강하 예측식은 대단히 불충분한 실정이므로 세관내 압력강하를 예측하기 위해서는 무엇보다도 신뢰성 있는 상관식의 개발과 함께 보다 많은 데이터 축적이 요망된다.

참고문헌

- (1) 황수민, 김경기, 정동수, 김종보, “열전달 촉진관에서 R22 대체냉매의 외부 응축열전달계수,” 대한기계학회논문집, 제23권, 제 4호, 1999, pp. 459-469.
- (2) 윤석호, 김민수, “액정을 이용한 R-22와 R-407C의 원주방향 증발열전달계수의 측정,” 대한기계학회논문집, 제23권, 제4호, 1999, pp. 502-510.
- (3) 김만희, 신정섭, 임병환, “외경 9.52 mm 평활관 및 미세핀관내 R22와 R410A의 증발열전달 특성,” 대한기계학회논문집(B), 제22권, 제10호, 1998, pp. 1454-1464.
- (4) 신지영, 김민수, 노승탁, “순수 및 혼합냉매의 원관내 증발열전달 실험,” 대한기계학회논문집(B), 제20권, 제2호, 1996, pp. 730-740.
- (5) Yan, Y. Y., Lin, T. F., “Condensation Heat

- Transfer and Pressure Drop of Refrigerant R-134a in a Small Diameter Pipe,” *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, 1999, pp. 697-708.
- (6) Yand, C. Y., Webb, R. L., “Friction Pressure Drop of R-12 in Small Hydraulic Diameter Extruded Aluminum Tubes with and without Micro-fins,” *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 4, 1996, pp. 801-809.
- (7) Mala, G. M., Li, D. and Dale, J. D., “Heat Transfer and Fluid Flow in Micro Channels,” *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, 1997, pp. 149-157.
- (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, 1995, pp. 1020-1026.
- (9) Torikoshi., K., Ebisu., T., “Heat Transfer 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), 1993, pp. 90-96.
- (10) 이상용, 김병우, 김무환, 이상유동 열전달 (Two-Phase flow Heat Transfer), 대영사, 1993, pp. 79-80.
- (11) Triplett, K. A., Ghiaasiaan, S. M., Abdel Khalik, S. I., LeMouel, A., McCord, B. N., “Gas-Liquid Two-Phase Flow in Micro Channels,” *Int. J. of Multiphase Flow*, Vol. 25, 1999, pp. 395-410.
- (12) Premoil, A., Francesco, D., Prina, A., “A Dimensionless Correlation for Determining the Density of Two Phase Flow Mixtures,” *Lo Termotecnica* 25, 1971, pp. 17-26.
- (13) Honda, H., Nozu, S., Matusuoka, Y., and Nakata, H., “Condensation of R-11 and R-113 in the Annuli of Horizontal Double-Tube Condensers with an Enhanced Inner Tube,” *Experimental Thermal and Fluid Science* 2 : 173, 1989.
- (14) Azer, N. Z., Abis, L. V., and Soliman, H. M., “Local Heat Transfer Coefficients Curing Annular Flow Condensation,” *ASHRAE Trans.*, Vol. 78, Part. 2, 1972, pp. 135-143.
- (15) 藤井哲, 本田博司, 長田孝志, 野律滋, “冷媒 R-11의 水平管内凝縮(第 1報, 流動樣式 및 壓力降下),” *日本機械學會論文集(B編)*, 第 42卷, 第 363號, 1976, pp. 3541-3548.