

탄화수소계 냉매의 응축 열전달 및 압력강하 특성

이호생·이광배·문춘근⁺·김재돌⁺⁺·윤정인⁺⁺⁺

Characteristics of Condensing Heat Transfer and Pressure Drop of HCs Refrigerants

Ho-Saeng Lee, Kwang-Bae Lee, Choon-Geun Moon⁺, Jae-Dol Kim⁺⁺ and Jung-In Yoon⁺⁺⁺

Abstract : Experimental results for heat transfer characteristic and pressure gradient of HCs refrigerants R-290, R-600a, R-1270 and HCFC refrigerant R-22 during condensing inside horizontal double pipe heat exchangers are presented. The test sections which have one tube diameter of 12.70 mm with 0.86 mm wall thickness, another tube diameter of 9.52 mm with 0.76 mm wall thickness are used for this investigation. 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 those of R-22 in 12.7 mm and 9.52 mm. This 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 : Hydrocarbon(탄화수소계), Pressure drop(압력강하), Natural refrigerant(자연냉매), Condensation(응축), Heat transfer coefficient(열전달 계수)

기호설명

C_a : Specific heat, kJ/kg·K
 d : diameter, m
 h : Heat transfer coefficient, kW/m²·K
 m : Mass flow rate, kg/h
 P : Pressure, kPa
 Q : Heat capacity, kW
 q : Heat flux, kW/kg
 x : Quality

1. 서론

냉동 공조 산업에서 각종 환경문제를 일으키고 있

는 CFC 및 HCFC 계열의 냉매들을 대체할 수 있는 새로운 냉매의 개발과 에너지 소비를 줄일 수 있는 고성능 열펌프 기기의 개발이 필요하다^{[1],[2]}. CFC 및 HCFC 계열의 냉매들을 대체할 수 있는 새로운 냉매로는 HFC계 냉매나 비공비 혼합냉매가 권장되고 있으나 HFC계 냉매의 경우 오존층 파괴지수(ODP)는 0이지만 지구 온난화지수(GWP)가 높아 환경적 측면에서 이의 사용은 바람직하지 않는 것으로 알려지고 있다. 비공비 혼합 냉매의 경우는 고장·수리·보수 시에 발생하는 누출로 인한 성분비의 변동이 생기며, 재충전 시에서도 초기 성분비를 재현하기 힘들다는 등 여러 가지 어려움이 있다^[3].

그러므로 새로이 개발되는 냉매는 지구 환경을 파괴하지 않으면서 독성이 없고, 가연성이 없으며, 기

+ 이호생, 이광배, 문춘근, 부경대학교 냉동공조공학과 대학원

++ 김재돌, 동명대학 냉동공조과

+++ 윤정인(부경대학교 기계공학부), yoonji@pknu.ac.kr, Tel: 051)620-1506

존의 냉매와 열역학적 성질이 비슷해야 한다. 이러한 관점에서 자연 냉매의 물성치 및 이들 자연 냉매를 사용하는 시스템에 관한 연구가 최근 많이 진행되고 있다. 이들 자연냉매 중 탄화수소계 냉매는 ODP 및 GWP 가 거의 0에 가깝고 사용이 간편하며, 일반적인 광물 질 윤활유와 잘 혼합되지만 가연성 때문에 유럽을 제외한 다른 선진국들에서는 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]. 기존 HFC계나 HCFC계 냉매에 대한 열전달 및 압력강하에 대한 연구에 있어서 Wijaya와 Spatz^[5]는 길이 3.05 m, 내경 7.75 mm인 평활관에서 응축과 증발에 대해서 연구하였다. 이들 데이터는 R-410A의 응축열전달율이 R-22보다 약간 높게 나타나는 것으로 보고되었으며, Fujii 등^{[6],[7]}은 2중관 대향류형 응축기에서의 R-22, R-123, R-134a의 응축전열특성 실험에서 마찰압력강하에 대한 예측식을 제안하고 있으나, 그 정도에 대해서는 아직 검증되지 않고 있다. A. Cavallini 등^[8]은 수평관에서 HFC계 냉매들의 압력강하에 대해서 응축포화온도 40℃에서 R-134a가 R-22보다 압력강하가 크며, R-32, R-410A, R-125은 R-22보다 압력강하가 작음을 보고하고 있다.

이에 본 연구에서는 HCFC계 냉매인 R-22를 기본 작동유체로 한 냉동 공조장치를 외경 12.70mm와 9.52mm로 제작하여 탄화수소계 냉매인, R-1270 (propylene), R-600a (iso-butane), R-290 (propane)으로 작동유체를 변화시켜 평활관에서의 응축전열특성 및 압력강하를 실험적으로 비교 분석하여 탄화수소계 냉매를 대체냉매로 사용하는 응축기 설계를 위한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험 장치의 개략도로 압축기, 응축기, 팽창장치, 증발기 및 주변장치로

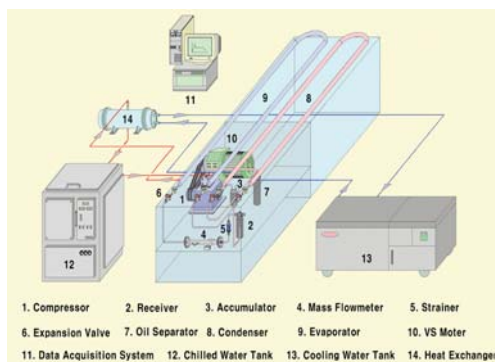


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

구성된 기본적인 냉동시스템이며, 크게 냉매가 순환되는 경로와 증발기 및 응축기의 열원수가 순환되는 경로로 구성되어 있다. 그리고 시험구간으로 사용된 열교환기인 응축기는 내관으로 냉매가 흐르고, 내관과 외관사이의 환상구간으로 열원수가 냉매 흐름과 반대 방향으로 흐르는 2중관형 열교환기이다.

시험부인 열교환기는 내관의 내경은 10.92 mm, 8 mm의 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 2중관 형태를 취하도록 하였다. 열교환기의 각 소구간에 차압계를 설치하여 냉매관내의 압력강하를 측정할 수 있게 하였다. 열교환기 관내의 내벽면 온도 측정은 각각 소구간별로 8개 지점, 내벽면 온도 1개당 상부, 양 측부, 하부의 4개 지점에서 측정하였다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 작동 유체로 HCFC계 냉매인 R-22와 이를 대체할 것으로 판단되어지는 자연냉매 중 순도 99.5%의 탄화수소계 냉매인 프로판, 이소부탄 그리고 프로필렌을 사용하였다. 결과 분석을 위해 측정된 데이터는 각 소구간에서의 압력과 열교환기 입·출구에서의 압력을 측정하였고, 그 외에도 열교환기에서의 냉매 온도, 냉각수 온도, 냉매와 냉각수의 유량을 측정하였다. 압력차의 측정에는 차압계(DPI 420, ± 0.2kPa)를 사용하였고 압력계는 응축기의

Table 1. Experimental conditions

Refrigerant	R22	R290	R1270	R600a
P_{sat} [kPa]	1357 ~ 1378	1191 ~ 1245	1372 ~ 1488	440 ~ 434
Condensing temperature[K]	309 ~ 337	309 ~ 327	310 ~ 335	308 ~ 317
Mass flux [$kg/m^2 \cdot s$]	150 ~ 250			62 ~ 150
Tube diameter(ID) [mm]	10.92, 8			
Cooling water				
Temp. of Con. Inlet [K]	300 ~ 310			
Mass flow rate[kg/s]	0.17 ~ 0.25			

입구에서 출구까지 동일간격으로(1.35 m) 설치하여 관내에서의 압력 강하를 확인할 수 있도록 하였다. 온도 측정은 정밀 수은 온도계로 보정하여 $\pm 0.1^\circ C$ 의 오차 범위를 가지는 T형 열전대(thermocouple)를 사용하였고, 실험장치에서 데이터의 측정점으로 냉매 유량계(OVAL 질량유량계, $\pm 1\%$)는 응축기에서 응축된 액량을 측정하기 위하여 응축기 출구측에 설치하였고, 응축기 및 증발기에서의 수유량계(ORIFICE FLOW-METER, $\pm 1\%$)는 각각 응축기와 증발기입구 측에 설치하였다. 실험조건, 즉 작동온도, 질량유속, 열유속 등은 냉매 유량, 냉각수의 온도 및 유량 등을 조절시켜 시스템이 정상상태가 된 이후에 측정을 하였다. 냉매별 drop-in 기준은 응축온도 $40^\circ C$ 로 하고, 응축기 출구는 과냉이 $3 \sim 5^\circ C$ 가 되도록 각 냉매의 질량유속, 냉각수의 온도와 유량을 조절하였다. 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 열교환기의 내관경 10.92 mm, 8 mm 두 관경 모두 동일하게 적용하여 실험하였다.

본 연구에서 사용한 R-22와 그 비교 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.

Table 1에 본 연구의 실험조건을 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 응축 전열특성

실험장치의 신뢰성을 확인하기 위하여 응축기에서 냉매와 냉각수 사이의 열평형을 검토하였다. Fig. 2 은 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 구간, 내관 외경 12.70, 9.52 mm에서 대체적으로 냉매의 종류와 관경에 관계없이 $\pm 20\%$ 내외에서 거의 일치하였다.

Fig. 3는 냉매 질량 유속이 $150[kg/m^2 \cdot s]$ 일 때 각 냉매별 내관 외경 12.7, 9.52 mm 관경에서의 국소 응축 열전달계수의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 국소 응축 열전달 계수는 건도가 감소함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이는 일반적으로 응축기 입구의 과열증기가 응축기 출구까지 응축이 진행되면서 액막의 두께가 두꺼워지게 되는데, 이와 같이 액막의 두께가 증가함에 따라 기액 2상류의 속도가 감소하기 때문에 열저항이 증가하게 된다. 따라서, 국소 응축 열전달계수는 건도가 감소함에 따라 감소되는 것으로 판단된다. 국소 응축 열전달계수를 R-22의 국소 응축

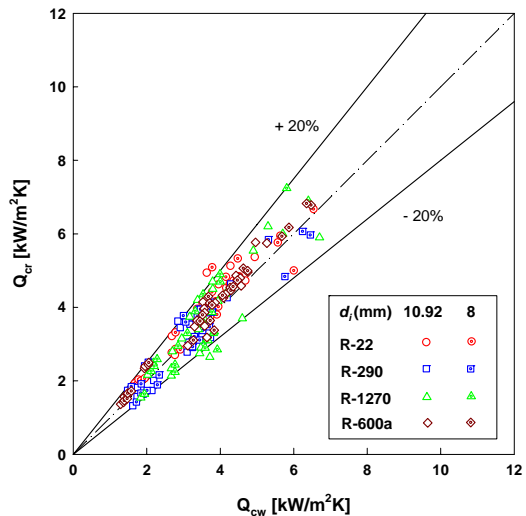


Fig. 2 Heat balance in the condenser

열전달계수와 비교할 경우, 외경 12.7 mm에서는 R-290은 약 16.55%, R-1270은 약 23.44%, R-600a는 22.24% 정도 높게 나타났고, 외경 9.52mm에서는 R-290은 19.34%, R-1270은 약 23.82%, R-600a는 20.17% 정도 높게 나왔다. 그리고 관경별로 보면 9.52 mm에서 12.7mm보다 R-22는 6.82%, R-290은 9.22%, R-1270은 약 7.28%, R-600a는 4.34% 정도 높게 나왔다.

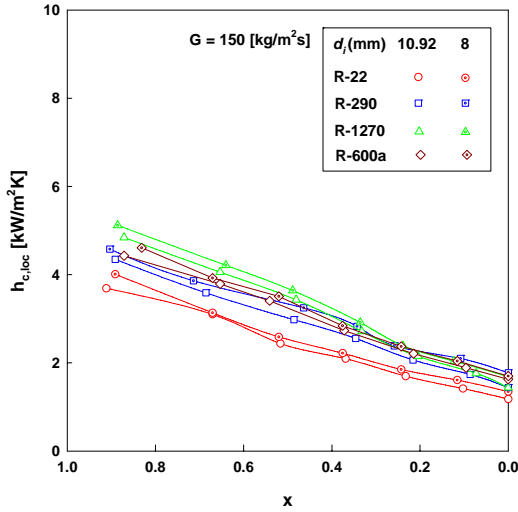


Fig. 3 Local condensing heat transfer coefficient vs. quality

Fig. 4는 외경 12.7mm와 9.52mm에서 네 가지 냉매 (R-22, R-290, R-1270, R-600a)의 질량유속 62 ~ 250[kg/m²s]의 범위에 대한 평균 응축 열전달 계수를 나타낸 것이다. 그림에서 평균 응축 열전달 계수는 질량유속에 비례하여 증가하는 일반적인 경향을 나타내었다. 냉매별로는 탄화수소계 냉매가 프레온계 냉매 R-22보다 높게 나타났다. 탄화수소계 냉매들에 있어서는 냉매 질량 유속이 높아질수록 R-1270, R-600a, R-290순으로 높게 나타났다.

3.2 응축압력강하

3.2.1 응축압력강하

Fig. 5는 질량유속 150[kg/m²s]일 때, 건도 변화에 따른 단위길이당의 평균압력강하를 R-22와 R-290,

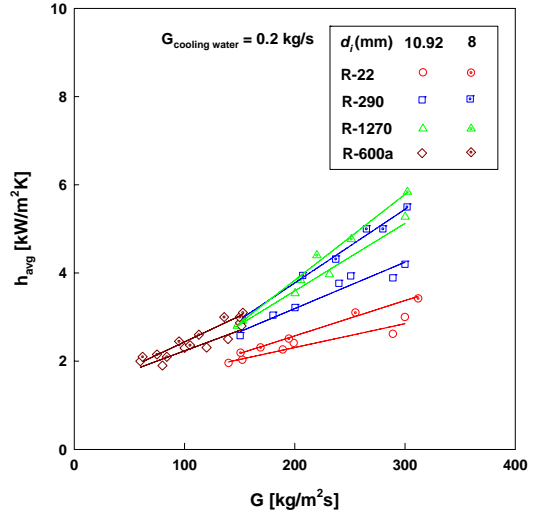


Fig. 4 Average condensing heat transfer coefficient

R-1270, R-600a를 비교한 것이다. 건도가 0.3인 지점에서 압력강하가 이전 건도에서 보다 큰 이유는 시험부인 응축기의 곡관부가 위치한 곳이기 때문이라 생각된다. R-22와 비교해서 건도별에 따른 압력강하는 R-22에 비해 탄화수소계 냉매가 높게 나타났으며, 이는 탄화수소계 냉매가 R-22보다 증기밀도가 작기 때문으로 판단된다. 증기밀도가 작아질수록 압력강하는 크게 되는데, 이러한 결과는 Wijaya and spatz^[5]와 Torikoshi 등^[9]의 연구결과와 유사하게

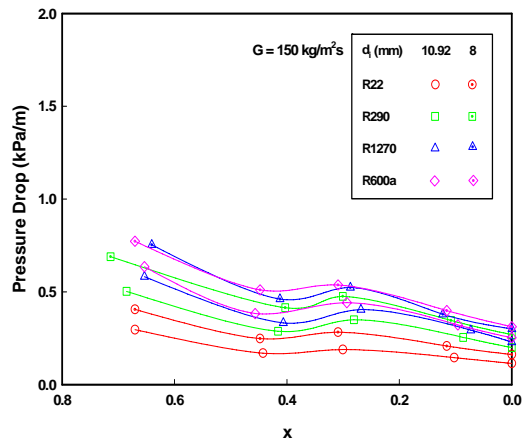


Fig. 5 Pressure drop vs. quality

나타났다.

Fig. 6은 질량유속이 62 ~ 250[kg/m²s]일 때, 단위 길이당 압력강하를 나타낸 것이다. 탄화수소계 냉매의 압력강하가 동일 질량 유속일때, R-22보다 높게 나타난 이유는 밀도가 매우 낮고, 열전도율이 크고 질량유속이 증가하면 유량의 속도가 커지면서 마찰에 의한 압력강하가 크기 때문이라 생각된다.

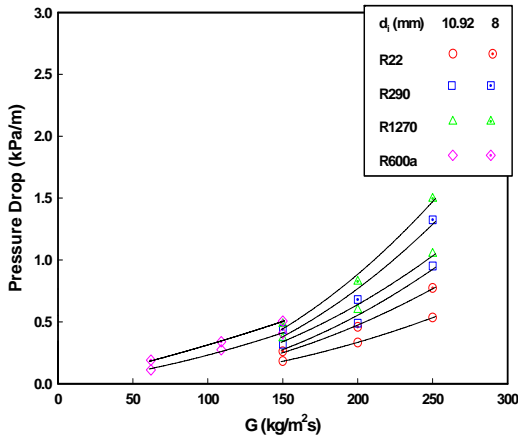


Fig. 6 Average pressure drop vs. mass flux

3.2.2 종래 상관식과의 비교

(dP/dz)_L을 액상성분이 관내를 충만하여 흐른다고 가정한 경우의 압력구배, (dP/dz)_V를 기상성분이 관내를 충만하여 흐른다고 가정한 경우의 마찰 압력 구배라고 할 때, 응축시의 기상 및 액상의 흐름이 난

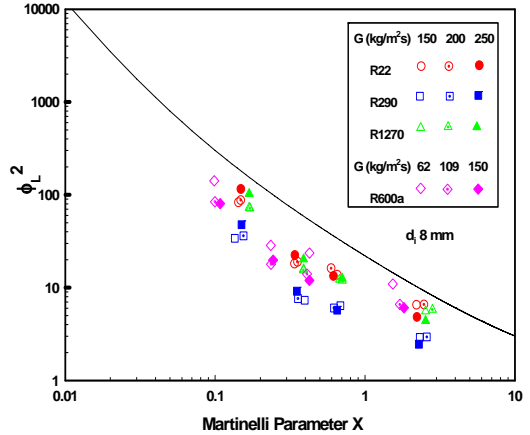
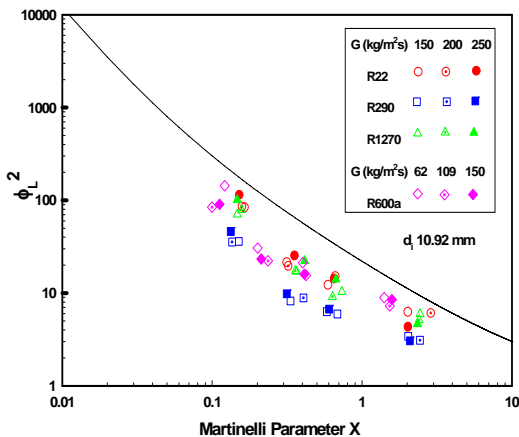


Fig. 7 Frictional multiplier vs. Martinelli parameter for the experimental data

류라고 가정하면 Lockhart -Martinelli가 제안한 파라메타 X_{tt} 와 2상류 마찰변수 Φ_L 로 비교한다.

Fig. 7은 내관 내경 10.92, 8 mm에서의 R-22, R-290, R-1270, R-600a의 압력강하에 대한 실험 결과와 계산한 Lockhart-Martinelli 파라메타를 비교한 것이다. Fig. 7에서와 같이 X_{tt} 가 증가할수록 건도가 감소하여 응축이 진행되고 있음을 나타내고 있으며 동일한 질량유속의 범위 내에서 R-22의 Φ_L 값이 탄화수소계 냉매의 Φ_L 값보다 높게 나타났다. 또한, 대상 열교환기의 내경 등의 실험조건 차이로 인해 실험결과 값이 상관식에 의한 값보다 작게 예측되는 경향을 보이고 있으나 전체적으로 상관식과 유사한 경향을 보였다.

4. 결 론

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

(1) 국소 응축열전달계수는 실험에서 외경 12.70 mm, 9.52 mm에서 모두 탄화수소계 냉매 모두가 기존의 R-22보다 높게 나타났으며, 탄화수소계 냉매 가운데에서는 R-1270의 국소 응축 열전달계수가 R-22보다 내관 외경 12.70 mm에서 23.4%, 9.52 mm에서

23.82%로 가장 높게 나타났다.

(2) 탄화수소계 냉매는 R-22보다 우수한 응축전열 성능을 나타내었고, 관경별로 보면 9.52 mm에서 12.7 mm보다 R-22는 6.82%, 탄화수소계 냉매들은 6.94% 정도 높게 나왔다.

(3) 평균 응축압력강하는 실험에서 내관 외경 12.70 mm에서 79.52%, 9.52 mm에서 74.26%로 탄화수소계 냉매가 R-22보다 압력강하가 높게 나타났으며, 탄화수소계 냉매 중에서는 R-600a의 압력강하가 가장 높게 나타났다.

(4) 동일 질량유속에서 건도별 단위 길이당 압력강하는 R-600a, R-1270, R-290, R-22 순으로 높게 나타났으며, 저질량유속에서 보다 고질량유속에서 각 냉매별로 압력강하의 차가 더 크게 나타났다.

참고문헌

- [1] M. J. Molina and F. S. Rowland, "Stratospheric Sink for Chlorofluoromethanes: Chlorine Atom Catalyzed Destruction of Ozone", *Nature*, Vol. 249, pp. 810-814, 1974.
- [2] M. J. Kurylo, "The Chemistry of Stratospheric Ozone: Its Response to Natural and Anthropogenic Influences", *Int. J. Ref.*, Vol. 13, pp. 62-72, 1990.
- [3] T. Ebner and H. Halozan, "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] R. W. James and J. F. Missenden, "The Use of Propane in Domestic Refrigerators", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 15, No. 2, pp. 95-100, 1992.
- [5] 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.
- [6] Haraguchi, H., Koyama, S., and Fujii, T.: "Condensation of Refrigerant HFC22, 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, 1994.
- [7] Haraguchi, H., Koyama, S., and Fujii, T.: "Condensation of Refrigerant HFC22, 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, 1994.
- [8] A. Cavallini, G. Censi, D. Del Col, L. Doretti, G. A. Longo, L. Rossetto: "Experimental investigation on condensation heat transfer and pressure drop of new HFC refrigerants", *International Journal of Refrigerants*, Vol. 24, No. 1, pp. 73-87, 2001.
- [9] Torikoshi, K., Ebisu, T.: "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, 1993.