

12.7mm 내면핀관을 이용한 R-1270의 열전달특성

윤정인† · 성광훈* · 심규진* · 진병주* · 백승문* · 문춘근*

(원고접수일 : 2007년 12월 27일, 심사완료일 : 2008년 4월 18일)

Heat Transfer Characteristics of R-1270 using 12.7mm Inner Fin Tube

Jung-In Yoon† · Gwang-Hoon Seong* · Gyu-Jin Shim* · Byoung-Ju Jin* · Seung-Moon Baek* ·
Choon-Geun Moon*

Abstract : This paper deals with the heat transfer characteristics of R-290 (Propane), R-600a (Iso-butane) and R-1270 (Propylene) as an environment friendly refrigerant and R-22 as a HCFC's refrigerant for evaporating. The experimental apparatus has been set-up as conventional vapor compression type refrigeration and air-conditioning system. The test section is a horizontal double pipe heat exchanger. Evaporating heat transfer measurements were performed for smooth tube with the outer diameters of 12.70, 9.52 and 6.35 mm and micro-fin tube 12.70 mm, respectively.

For the smooth and micro-fin tubes measured in this study, the evaporating heat transfer coefficient was enhanced according to the increase of the mass flux and decrease of the tube diameter. The local evaporating heat transfer coefficients of hydrocarbon refrigerants were superior to those of R-22 and the maximum increasing rate of heat transfer coefficient was found in R-1270. The average evaporating heat transfer coefficients in hydrocarbon refrigerants showed 20 to 28% higher values than those of R-22. Also, the evaporating heat transfer coefficients of R-22 in the tube diameter of the 12.70 mm smooth and micro-fin tube were compared. Generally, the local heat transfer coefficients for both types of tubes increased with an increase of the mass flux. The heat transfer enhancement factor (EF) between smooth and micro-fin tube varied from 1.9 to 2.7 in all experimental conditions.

Key words : Hydrocarbon refrigerant(탄화수소계 냉매), Evaporation(증발), Inner fin tube(내면핀관), Heat transfer(열전달)

1. 서 론

현재 CFC계 냉매는 오존층 파괴와 지구 온난화

의 환경적인 문제로 인하여 전세계에 걸쳐 규제받고 있다^{(1),(2)}. 따라서, 이의 대체 냉매로서 HFC계 또는 비공비 혼합냉매로 대체되어 지고 있다. 그러

† 교신저자(부경대학교 기계공학부, Email : yoonji@pknu.ac.kr, Tel. 051)629-6180)

* 부경대학교 대학원 냉동공조공학과

나 HFC계 냉매의 경우 햇빛에 의해 성분들이 분해될 때 독성 물질이 발생할 수도 있다^{[3],[4]}. 그리고 HFC계 냉매는 오존층파괴지수(ODP)는 0이지만 지구온난화지수(GWP)가 여전히 높다. 게다가 비공비 혼합 냉매의 경우에는 고장 및 수리 시에 냉매의 누설로 인해 조성 성분비의 변동이 발생하게 되고, 재충전 시에도 초기의 성분비를 맞추기가 매우 힘들어 사용하기에 비효율적인 단점이 있다. 따라서, 새로운 대체 냉매는 지구 환경을 파괴하지 않으면서 독성이 없고, 가연성이 없으며, 기존의 냉매와 열역학적 성질이 비슷해야 한다.

이러한 점에서 현재 기존 냉매를 대체할 만한 냉매로 각광받고 있는 탄화수소(Hydrocarbon)계 냉매는 암모니아(NH₃), 이산화탄소(CO₂), 질소(N₂), 헬륨(He), 물(H₂O), 공기 등과 함께 자연 냉매에 속해 있는 냉매로서 가격이 저렴하며, 사용이 용이할 뿐만 아니라 기존의 광물질 윤활유들과의 호환성 역시 뛰어나 프로판과 이소부탄의 경우 대체 냉매로서 널리 사용되고 있다^[5]. 또한 프로판과 이소부탄의 혼합 냉매는 포화 온도 및 압력 곡선뿐만 아니라 냉동능력 또한 R-22와 매우 유사한 값을 얻을 수 있어, 대체 냉매로서 연구가 활발히 진행되어 왔다^[6].

그러나 이들 냉매가 냉동 산업에 의해 국제적으로 받아들여지기 위해서는 우선적으로 열교환기 및 냉동시스템의 최적 설계를 위해 이들 냉매의 기본적인 열 및 물질전달 특성에 대한 연구가 선행되어야 한다. 따라서 최근 저자들은 평활관 내에서의 탄화수소계 냉매들의 응축 열전달 특성 및 압력강하 특성에 대한 연구를 수행했으며 선행 논문을 통하여 발표하였다^[7]. 포괄적인 연구과제의 한 부분으로서, 본 논문에서는 평활관과 내면핀관에서 탄화수소계 냉매의 증발 열전달 현상에 대하여 R-22와 비교·분석하고자 한다. 비록 수치적인 열전달의 기본적인 관점을 다룬 유용한 연구들이 있지만^[8], 탄화수소계 냉매의 증발 열전달에 대한 연구는 아직 많이 부족한 상태이며, 개선된 표면에 대하여 유용하게 사용할 수 있는 실험적인 데이터 또한 많이 부족한 실정이다.

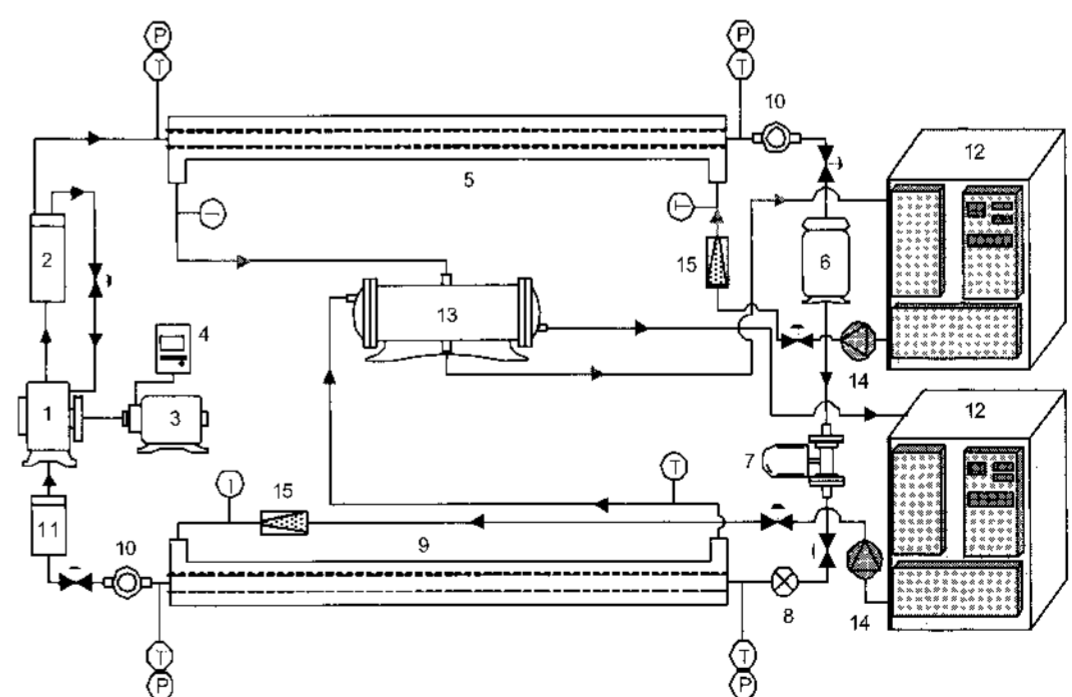
본 연구의 목적은 R-22를 기본 작동유체로 한 기본적인 냉동·공조 시스템에서 탄화수소계 냉매(R-290, R-600a, R-1270)의 증발 열전달 특성에 대하여 실험적으로 비교·분석함으로써 탄화수소계 냉매를 사용한 증발기 설계에 있어서의 기초적인 자료를 제공하고자 함에 있다. 또한 추가적으로 12.7 mm 평활관과 전열 촉진관에 대하여 비교·분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험 장치로서 압축기, 응축기, 팽창 장치, 증발기 및 주변 장치로 구성된 기본적인 냉동·공조 시스템이며, 크게 냉매가 순환되는 냉매 순환 부분과 증발기 및 응축기의 열원수가 흐르는 열원수 순환 부분으로 구성되어 있다. 그리고 시험구간으로 사용한 열교환기인 증발기는 내관으로는 냉매가 흐르고, 내관과 외관 사이의 환상구간으로는 열원수가 냉매의 흐름과 반대 방향으로 흐르는 이중관형 열교환기이다.

시험구간에서의 내관은 각각 외경 12.7, 9.52, 6.35 mm 동관으로 제작하였다. 그리고 외관은 세 관경에 대하여 모두 내경 19.94 mm, 외경 22.22 mm인 동관을 사용하여 제작하였다.

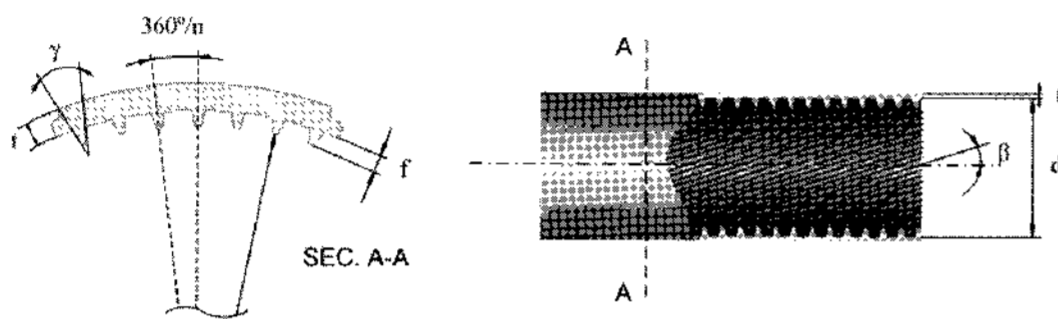


1 Compressor 2 Oil-separator 3 VS motor 4 Inverter
 5 Condenser 6 Receiver tank 7 Refrigerant flow meter 8 Expansion valve
 9 Evaporator 10 Sight glass 11 Accumulator 12 Constant temperature tank
 13 Heat exchanger 14 Water pump 15 Water flow meter

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specific of inner tube

Parameter	Unit	Micro-fin	Bare
Outside diameter	[mm]	12.70	12.70
Inside diameter	[mm]	11.40	11.42
Average thickness	[mm]	0.65	0.64
Fin height	[mm]	0.25	-
Fin angle	[°]	30	-
Inclination angle	[°]	10	-
Number of fin	[-]	60	-

**Fig. 2 Shape of Micro-fin tube****Table 2 Experimental conditions**

Refrigerant	R-22, R-290 R-600a, R-1270
Tube type	Bare & inner-fin tube
O.D. of inner tube [mm]	12.7, 9.52, 6.35
Mass flux [kg/m ² s]	50 ~ 250
Evaporating temp. [°C]	-5 ~ 5

Table 1과 Fig. 2는 관의 종류에 따른 열전달 특성을 비교·분석하기 위해 사용된 내면핀관의 형상 및 수치를 나타내며, 또한 Table 2는 본 연구의 실험 조건에 대하여 나타낸 것이다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 작동 유체로 규제 대상 냉매인 R-22와 이를 대체할 것으로 판단되어지는 자연냉매인 R-290(propane, 순도 99.5%), R-600a(iso-butane, 순도 99.5%), 그리고 R-1270(propylene, 순도 99.5%)을 사용하였다. 증발 열전달 특성을 분석하기 위해 열교환기에서 냉매, 열원수, 그리고 내관 외벽 온도를 각각 측정하였다.

열교환기는 수평의 이중관식 열교환기로 제작하였으며, 관의 직경의 변화에 따른 증발 열전달 특성에 대하여 실험하였다. 그리고 열교환기에서의 냉매, 이차유체, 관벽 온도뿐만 아니라 냉매, 이차유체의 유량 또한 각각 측정하였다.

모든 온도는 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 의 오차범위를 갖는 T형 열전대를 사용하여 측정하였으며, 압력 측정을 위해 각 구간별로 부르돈식 압력계를 설치하였다. 실험 장치에서 데이터의 측정점으로 냉매 유량계(OVAL 질량유량계, $\pm 1\%$)는 응축기에서 응축되어 증발기로 유입되는 액량을 측정하기 위하여 증발기 입구 측에 설치하였고, 응축기 및 증발기에서의 수유량계(ORIFICE FLOW-METER, $\pm 1\%$)는 응축기와 팽창밸브 입구 측에 각각 설치하였다.

각 데이터는 온도와 냉매 및 이차유체 유량을 조절된 후 온도, 압력, 유량 등 관련된 모든 실험 변수들이 정상상태에서 2시간 이상동안 유지된 후 시스템이 정상상태일 때 최소한 30분 동안의 데이터를 측정하였다. 그리고 첫 번째 조건에서의 실험이 완료되면 다시 냉매 유량과 냉각수 유량을 조절하여 첫 번째와 똑같은 방법으로 반복실험을 하였다. 또한 온도, 압력 및 유량 등을 측정하기 위한 검출 신호는 데이터 변환기(MX100, Yokogawa Company)를 통하여 컴퓨터에 입력시켜 처리하였다. 그리고 저장된 데이터는 관련식을 통하여 각각 계산하였다^[9].

3. 결과 및 고찰

3.1 평활관에서의 증발열전달

Fig. 3은 냉매질량유속이 $150 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 일 때 내관 외경 12.7, 9.52, 6.35 mm인 평활관에서의 각 냉매별 국소 증발 열전달계수의 변화를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이, 국소 증발 열전달계수는 냉매의 종류에 상관없이 모든 관경에 대하여 건도가 증가할수록 증가하는 일반적인 경향을 보였다. 게다가 냉매질량유속이 증가함에 따라 국소 증발 열전달계수는 증가하지만, 건도가 0.85

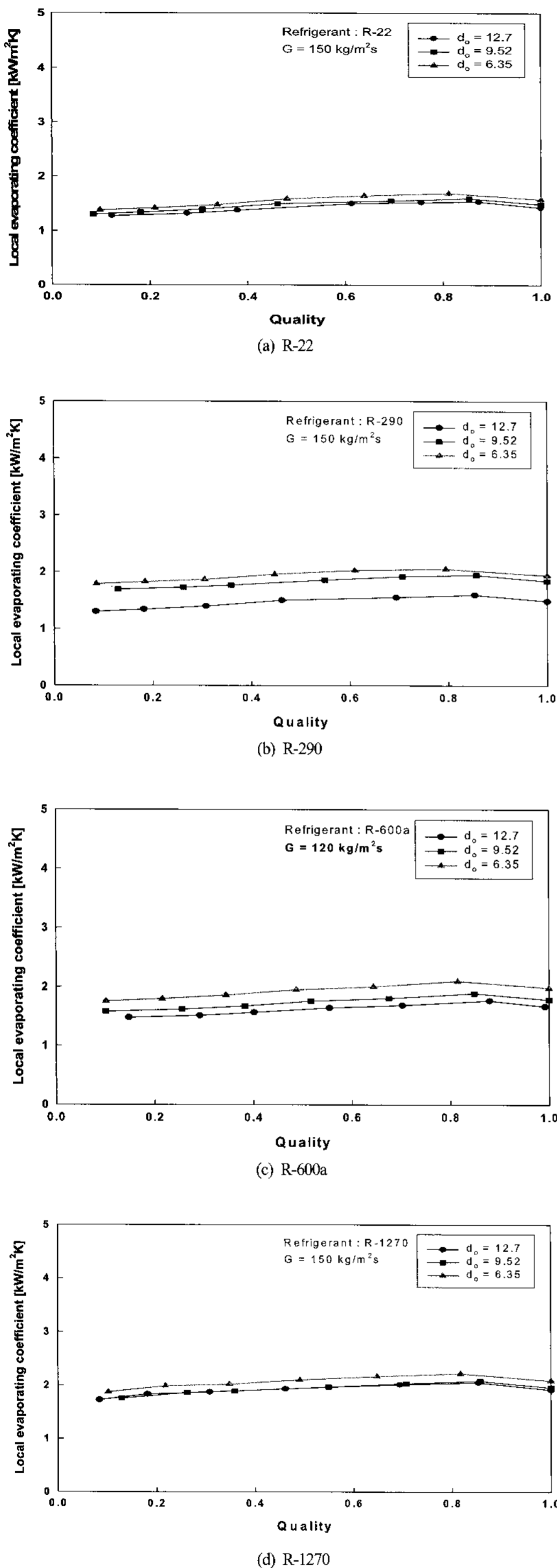


Fig. 3 Local evaporating heat transfer coefficient with respect to tube diameter

부터는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 증발초기의 냉매액이 증발과정을 거치면서 냉매증기가 증가하여 건도 0.85 이후로는 열전달이 감소함에 따른 것으로 사료된다.

또한, 국소 증발 열전달계수는 실험에 사용한 네 가지 냉매에 대하여 관경이 작아짐에 따라 커지는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 관경이 작아짐에 따라 냉매와 관벽 사이의 열전달 촉진 효과가 상승되었기 때문인 것으로 판단된다. 냉매질량유속이 150 kg/m²s일 때 내관 외경 9.52 mm에 대한 냉매별 국소 증발 열전달 계수는 Fig. 4에 나타나 있다. 모든 건도 영역에서 탄화수소계 냉매의 국소 증발 열전달계수는 R-22 보다 더 크게 나타났다. 탄화수소계 냉매의 국소 증발 열전달계수는 모든 건도 영역에서 서로 비슷하게 나타났으며, 실험에 사용된 네 가지 작동유체 중 R-1270이 가장 높은 값을 보였다.

냉매별로 살펴보면 탄화수소계 냉매의 국소 증발 열전달계수는 R-22에 비해 R-290의 경우 25.3%, R-600a는 29%, R-1270은 33% 정도 각각 더 높게 나타났다. 따라서, 탄화수소계 냉매는 R-22에 대한 대체 냉매로서의 가능성이 충분한 것으로 판단되어 진다. 또한 국소 증발 열전달계수는 내관의 관경이 작아짐에 따라 큰 값을 보였다. 따라서 가정용 냉동기 또는 소형 공조기에 대한 작동유체로서 탄화수소계 냉매의 대체는 적합하다고 판단된다. 내관 외경 12.7, 9.52, 6.35 mm로 변화함에 따른 네 가지의 냉매(R-22, R-290, R-600a, R-1270)의 평균 증발 열전달계수를 Fig. 5에 나타나 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 평균 증발

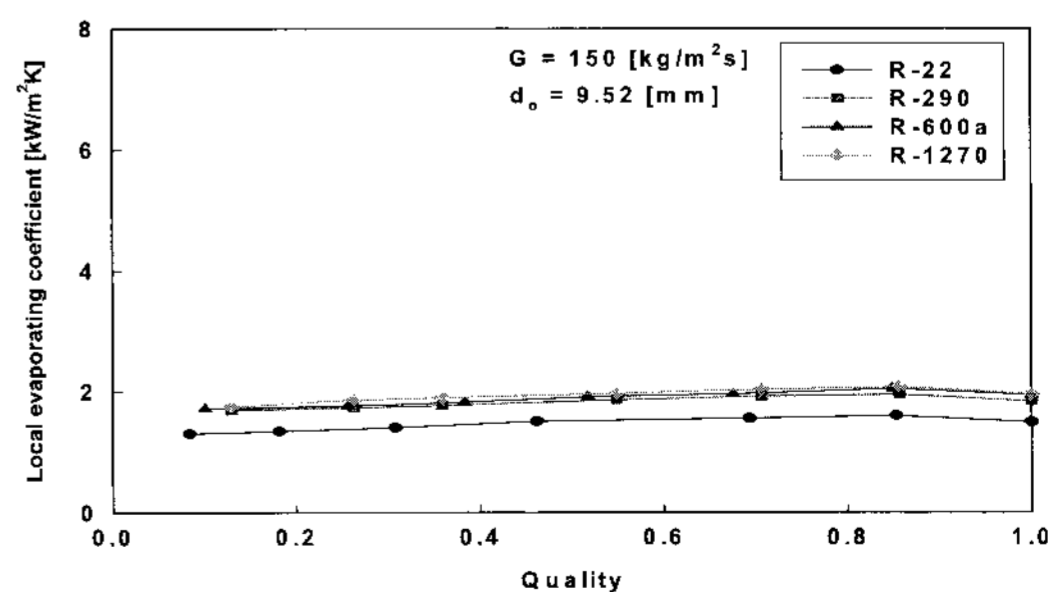


Fig. 4 Local evaporating heat transfer coefficient with respect to refrigerant

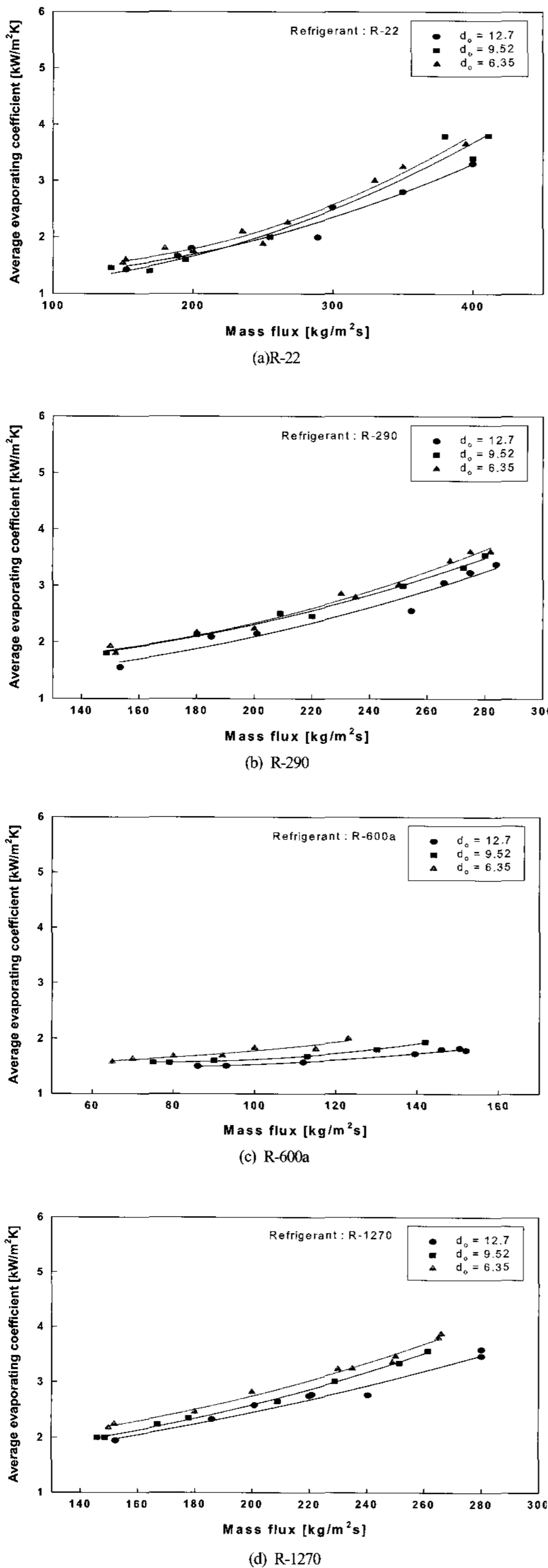


Fig. 5 Average evaporating heat transfer coefficient with respect to tube diameter

열전달계수는 냉매질량유속이 증가함에 따라 일반적으로 증가하는 경향을 보였다. 탄화수소계 냉매의 평균 증발 열전달계수는 CFC계 냉매보다 높게 나타났으며, 고질량유속 영역으로 도달함에 따라 R-1270, R-600a, R-290 순으로 높게 나타났다. 그리고 탄화수소계 냉매의 평균 증발 열전달계수는 냉매질량유속이 증가함에 따라 더욱 향상정도가 높게 나타났다. 따라서 탄화수소계 냉매와 R-22의 평균 증발 열전달계수의 차는 저질량유속 영역에서는 비슷하게 나타났지만, 냉매질량유속이 증가할수록 점점 크게 나타났다. 내관 외경 9.52 mm에서 각 냉매에 대한 평균 증발 열전달계수는 Fig. 6에 나타나 있다. R-600a는 다른 냉매들에 비해 높은 비체적을 가지고 있기 때문에 냉매질량유속 범위가 다르기 때문에 다른 냉매들과는 다르게 나타났다. 그림에서 보는 바와 같이 탄화수소계 냉매의 평균 증발 열전달계수는 냉매질량유속이 증가함에 따라 R-22와 비교했을 때 더욱 높은 증가율을 보였다. 탄화수소계 냉매 R-290, R-600a, R-1270의 평균 증발열전달계수는 R-22에 비해 약 19.9%, 18.6%, 34.2% 정도 각각 높게 나타났다.

3.2 내면핀관과의 비교

냉매질량유속이 150 kg/m²s 일 때 관경 12.70 mm인 건도에 따른 R-22와 R-1270의 국소 증발 열전달계수를 Fig. 7에 나타내었다. 내면핀관과 비교해 보면 평활관에서는 건도에 따른 증발 열전달계수의 변화가 매우 작게 나타났다.

내면핀관의 증발 열전달계수는 평활관에 비하여 R-22의 경우에는 107 ~ 162%, R-1270의 경우에는 73 ~ 132% 정도 더 높게 나타났다. 이는 내면핀관의 경우에는 평활관에 비해 난류 촉진에 의한 효과로 증발 열전달 계수가 향상되기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 8에는 관경 12.70 mm 평활관 및 내면핀관에서의 냉매질량유속에 따른 평균 증발 열전달계수에 대하여 나타내었다. 평균 증발 열전달계수는 관 타입이나 냉매의 종류와 상관없이 질량유속이 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다. 내면핀관에서의 증발 열전달계수의 증가율이 평활관일 때에 비

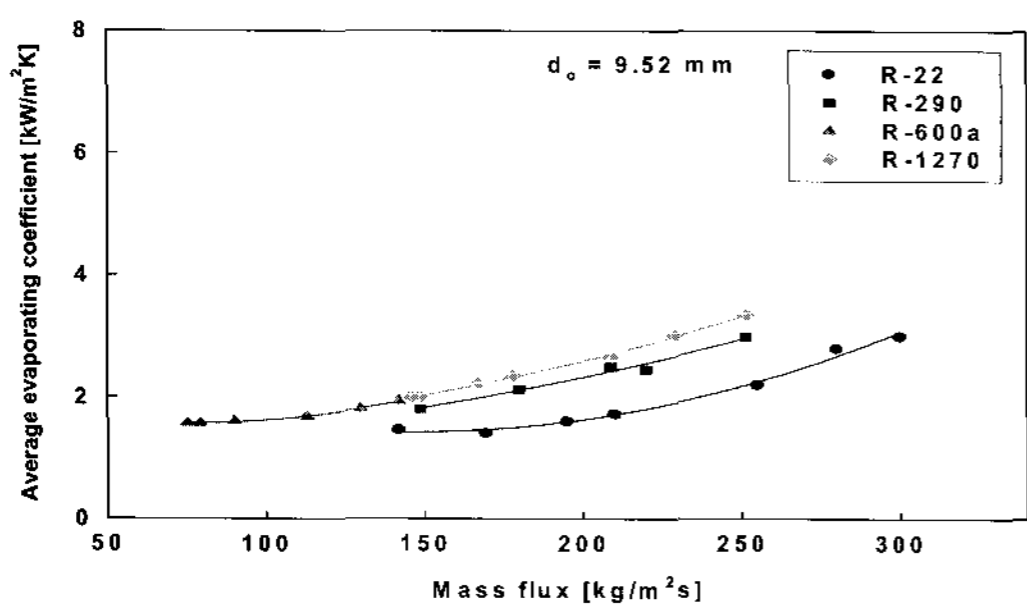


Fig. 6 Average evaporating heat transfer coefficient with respect to refrigerant

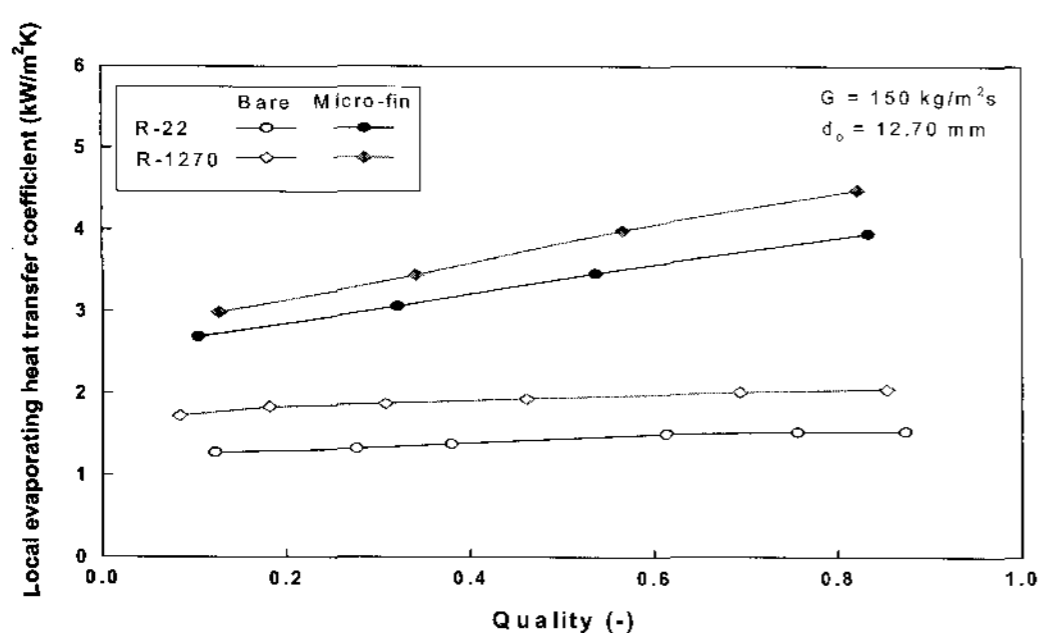


Fig. 7 Comparison of local heat transfer coefficient with respect to tube type

하여 더욱 높음을 알 수 있다. 내면핀관에서 R-1270의 증발 열전달계수는 R-22에 비하여 14% 정도 더 높게 나타났다.

관경 12.70 mm 에 대한 냉매질량유속에 따른 열전달촉진계수(EF)를 Fig. 9에 나타내었다. 여기서, EF(Enhancement Factor)는 같은 작동 조건과 최대 내관경일 때 평활관과 내면핀관에 대한 열전달 계수의 비로 정의된다. 그림에서 보는 바와 같이, 열전달 촉진계수는 질량유속이 50 ~ 200 kg/m²s로 변화함에 따라 R-22의 경우 2.3 ~ 2.7, R-1270의 경우 1.9 ~ 2.4로 나타났다. 냉매별로 비교해 보면 R-22가 R-1270에 비하여 17% 더 높은 수치를 보임을 알 수 있다. 이는 R-1270이 R-22에 비해 표면장력과 액밀도가 더 낮기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 열전달 촉진계수는 질량유속이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있는데, 이는 증기 유속이 높은 영역에서는 유체의 유속으로 인한 난류강도가 충분히 강하기 때문에

열전달 촉진과 관련해서 핀의 효과가 적어지게 된다. 이로 인해 질량유속의 증가는 흡에 붙어 있는 액적을 더욱 많이 떨어뜨리게 되며 이러한 현상은 열전달에 대한 핀의 효과가 감소하기 때문이다.

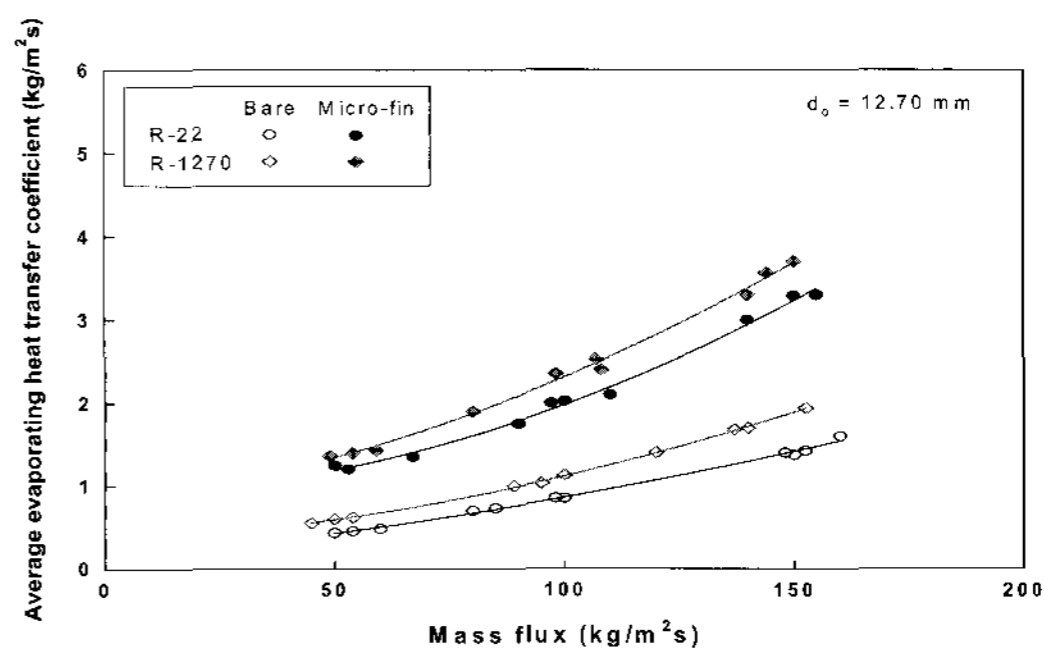


Fig. 8 Comparison of average heat transfer coefficient with respect to tube type

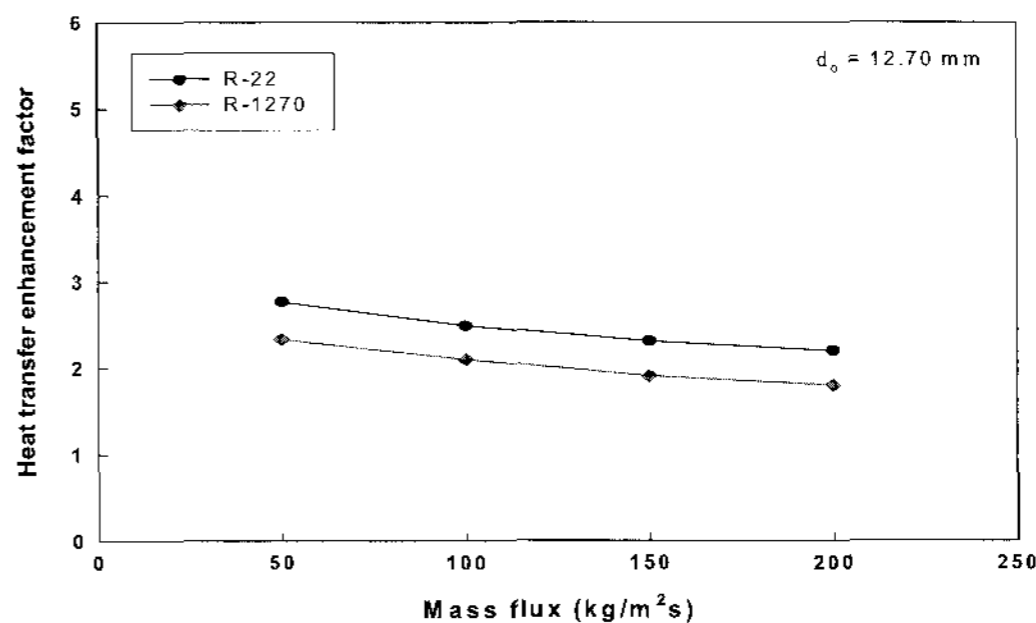


Fig. 9 Comparison of heat transfer enhancement factor

4. 결 론

이상의 결과들로 살펴보면 환경친화적인 측면에서 R-22를 대체할 것으로 기대되어지는 자연 냉매인 탄화수소계 냉매에 대한 결론은 다음과 같다. 탄화수소계 냉매의 국소 증발 열전달계수는 기존의 R-22에 비하여 높게 나타났으며, R-1270은 실험에 사용된 네 종류의 냉매 중 가장 높은 평균 증발 열전달계수를 보였다. 또한 관경 6.35 mm 에서의 증발 열전달을 값이 다른 관경에서보다 높게 나타났다. 또한 관경 12.70 mm 내면핀관과 평활관과의 비교 실험에서는 질량유속이 증가할수록 증발 열전달계수는 더욱 향상되는 것으로 나타났으며,

열전달 촉진계수(EF)는 평균적으로 1.9 ~ 2.7의 결과를 보였다.

추후 탄화수소계 냉매의 압력강하에 대한 실험결과를 통해 핀관의 열전달촉진에 따른 압력강하 증가를 종합적으로 검토하여 판단할 수 있는 자료를 제공하고자 한다.

5. 감사의 글

이 논문은 2006학년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었음(PK-2006-062).

참고문헌

- [1] Molina, M.J., Rowland, F.S., 1974, Stratospheric Sink for Chlorofluoro-methanes: Chlorine Atom Catalyzed Destruction of Ozone, Nature, Vol. 249, pp.810-814.
- [2] Kurylo, M.J., 1990, The Chemistry of Stratospheric Ozone: Its Response to Natural and Anthropogenic Influences, International Journal of Refrigeration, Vol. 13, pp. 62-72.
- [3] Didion, D.A., Bivens, D.B., 1990, Role of Refrigerant Mixtures as Alternatives to CFCs, International Journal of Refrigeration, Vol. 13, pp. 163-175.
- [4] Ebner, T., Halozan, H., 1994, Testing the Available Alternative-An Examination of R-134a, R-152a and R-290, IEA HPC Newsletter, Vol. 12, No. 1.
- [5] Thome J.R., 1996, Boiling of new refrigerants: a state-of-the-art review, Int. J. Refrig. 19, pp. 435-457.
- [6] Study on the potential for hydrocarbon replacements in existing domestic and small commercial refrigeration appliances, 1999, United Nations Publication, ISBN 92-807-1765-0.
- [7] Lee H. S., Yoon J. I., Kim J. D., Bansal P. K., 2006, Condensing heat transfer and pressure drop characteristics of hydrocarbon refrigerants, International Journal of Heat and Mass Transfer 49, 1922-1927
- [8] Kandlikar S.G., 1990, A general correlation for saturated twophase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes, Journal of Heat Transfer 112, pp. 219-228.
- [9] H.S. Lee, J.I. Yoon, J.D. Kim, Pradeep Bansal, 2005, Evaporating heat transfer and pressure drop of hydrocarbon refrigerants in 9.52 and 12.70 mm smooth tube, International Journal of Heat and Mass Transfer 48, pp. 2351-2359

저자 소개



윤정인(尹政仁)

1962년생, 1988년 부산수산대학교 냉동공학과 졸업, 1990년 부산수산대학교 대학원 냉동공학과 졸업(공학석사), 1995년 동경농공대 대학원 졸업(공학박사), 현재 부경대학교 기계공학부 냉동공조전공 교수.



성광훈(成光薰)

1979년생, 2006년 부경대학교 냉동공조공학과 졸업(학사), 2008년 부경대학교 대학원 냉동공조공학과 졸업(공학석사) 현, 부경대학교 기계공학부 냉동공조공학전공 조교



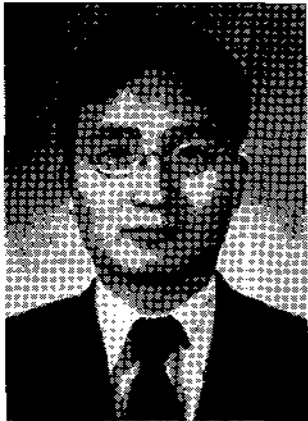
심규진(沈揆珍)

1981년생, 2007년 부경대학교 냉동공조공학과 졸업(학사), 2007년-현재 부경대학교 대학원 냉동공조공학과 재학



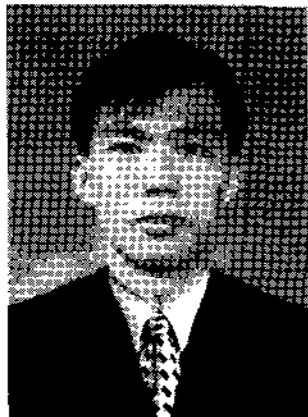
진병주(陳炳柱)

1981년생, 2007년 부경대학교 냉동공조 공학과 졸업(학사), 2007년-현재 부경대학교 대학원 냉동공조공학과 재학



백승문(白承文)

1972년생, 2001년 부경대학교 대학원 냉동공조공학과 졸업(공학석사), 2004년 부경대학교 교육대학원 수산교육과 졸업(교육학석사), 2008년-현재 부경대학교 대학원 냉동공조공학 재학(박사과정)



문춘근(文春根)

1971년생, 1997년 부경대학교 냉동공조 공학과 졸업(학사), 2004년 부경대학교 대학원 냉동공조공학과 졸업(공학박사), 2006년 The University of Auckland 연구원