



# 마이크로핀관에서 프로판과 이소부탄의 증발 열전달 특성에 관한 연구

노건상\* · †손창효

\*동명대학교 냉동공조공학과, 부경대학교 기계공학부  
(2007년 9월 15일 접수, 2007년 11월 26일 채택)

## Evaporation Heat Transfer Characteristics of Propane and Iso-butane in Micro-fin Tubes

Geon-Sang Roh\* · †Chang-Hyo Son

\*Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Tong Myong University, Busan 608-711, Korea  
School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea  
(Received September 15 2007, Accepted November 26 2007)

### 요 약

본 연구는 마이크로핀관에서 이소부탄과 프로판의 증발 열전달 특성에 대해 실험적으로 조사하였다. 시험부는 외경 12.70 mm이고, 높이가 0.25 mm인 75개 핀이 원주방향으로 삽입되어 있다. 실험결과, 탄화수소계 냉매의 평균 열전달계수는 프레온계 냉매인 HCFC22보다 높은 것으로 나타났고, 높은 질량유속에서는 이소부탄 > 프로판 순으로 나타났다. 마이크로핀관에서 증발 열전달 계수는 평활관에 비해 약 80~100% 정도가 향상되었다. 이러한 본 연구의 결과로부터 탄화수소계 냉매를 냉동·공조 시스템의 냉매로 사용하여 열교환장치를 설계할 경우에는 유리하리라 생각된다.

**Abstract** – In this paper, evaporation heat transfer characteristics of propane and iso-butane in micro-fin tubes were investigated experimentally. Test section has a micro-fin tube with outside diameter of 12.70 mm, and 75 fins with a fin heights of 0.25 mm. The experimental results summarize as the followings : The average evaporation heat transfer coefficients of HC's refrigerants is higher than those of HCFC22, and appeared in the order of iso-butane, propane with respect to the approaching of the high mass flux. The evaporation heat transfer coefficient of micro fin tube is about 10~80% higher than those of smooth tube. This results from the study can be used in the case of designing heat transfer exchanger using hydrocarbons as the refrigerant for the air-conditioning systems.

**Key words** : HC refrigerant, R290, R600a, Evaporation heat transfer coefficient

### I. 서 론

지금까지 냉동·공조분야에 광범위하게 사용되어온 CFC계 냉매는 지구 온난화 및 오존층 파괴의 원인인 지구환경 유해물질로 밝혀졌기 때문에 2010년부터는 사용이 전면 폐지된다. 또한 이를 대체하기 위해 개발된 증장기 대체물질인 HCFC계 및 장기 대체물질인 HFC계 냉매도 대기권에서 산과 독성물질을 형성하는 것으로 보고되고 있어서[1] 안전한 환경 친화성 냉매라 할 수 없다. 따라서 냉동·공조용 작동유체로 개발되

는 대체물질은 무엇보다 지구 환경을 파괴하지 않는 환경 친화성 물질이면서 기존 냉매의 열역학적 성질과 비슷하거나 우수해야 한다. 이와 같은 관점에서 합성 화합물인 프레온계 냉매가 사용되기 이전에 작동유체로서 많이 사용되던 프로판, 암모니아 등의 천연냉매에 대한 관심이 증가되고 있다. 특히, 우수한 열역학적 성질, 광물질 유희유와의 친화성, 경제성 등의 측면에서 탄화수소계 물질인 프로판, 부탄 등이 냉동·공조장치의 대체냉매로서의 사용 가능성에 대한 연구가 증가하고 있으며[2-4], 유럽을 중심으로 탄화수소계 냉매의 사용을 권장하는 추세에 있다. 그러나 이들 천연냉매를 사용하는 냉동·공조용 열교환기의 전열 특성 규명에

\*주저자:sonch@pkmu.ac.kr

대한 자료는 부족한 실정이다.

또한 최근에는 에너지 유효 이용의 측면에서 냉동·공조장치에서 보다 높은 효율을 얻기 위한 구성요소 기기의 고효율화를 위한 연구로 열교환기의 형상을 가공하거나 변형시킴으로서 전열촉진효과를 얻거나 혹은 세관을 사용함으로써 장치의 소형화, 봉입 냉매량의 감소 등 여러 가지 장점을 얻기 위한 연구도 활발히 진행되고 있다[5].

본 연구에서는 천연냉매인 프로판과 이소부탄을 사용하는 열펌프용 증발기의 최적 설계를 위해 비등전열 특성을 규명하고, 이들 천연냉매의 프레온계 냉매 대체 가능성을 확인하고자 하였다. 또한 전열촉진관인 마이크로핀관에서 전열특성을 규명하고, 전열촉진관 사용에 따른 냉동·공조기기의 소형 경량화에 대한 가능성을 확인하고자 하였다.

## II. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도로, 물을 열원으로 하는 가장 기본적인 증기압축식 열펌프 사이클에 대해 냉매가 순환되는 경로와 증발기의 열원

수가 순환되는 경로로 구성되어 있다. 실험에 사용한 압축기는 HCFC22용 2기통 왕복동식이며, 인버터를 이용하여 압축기 회전수를 변화시킴과 동시에 압축기 회전수 및 토크를 측정하기 위하여 디지털 타코메타를 설치하였다. 또한 흡입 배관에는 전기 히터를 설치하여 압축기로 흡입되는 냉매 가스의 온도가 일정하게 유지될 수 있도록 하였다. 냉매는 압축기, 응축기, 냉매 유량계, 팽창 밸브, 시험 구간인 증발기, 액 분리기, 압축기의 순으로 유동되고, 증발기에서의 열원수는 수도수 공급 장치, 온도 조절기, 물 펌프, 수유량계, 시험 구간인 증발기의 순으로 유동된다.

### 2.2. 시험부

Fig. 2는 시험구간인 증발기의 상세도를 나타낸 것으로, 내경 10.07 mm, 외경 12.07 mm인 평활 동관 및 Fig. 3의 외경 12.70 mm, 핀 높이 0.25 mm, 핀 수 75개인 마이크로핀관을 내관으로 하고, 외관은 내경 45 mm, 외경 50 mm인 PVC관으로 제작한 동심 2중관형 열교환기이다. 증발기는 각 소구간을 연결하는 부위까지 포함하여 전체를 글래스울로 충분히 단열하여 외기와의 열교환을 무시할 수 있도록 하였다.

실험을 수행하여 시험구간내의 온도와 압력이 실험

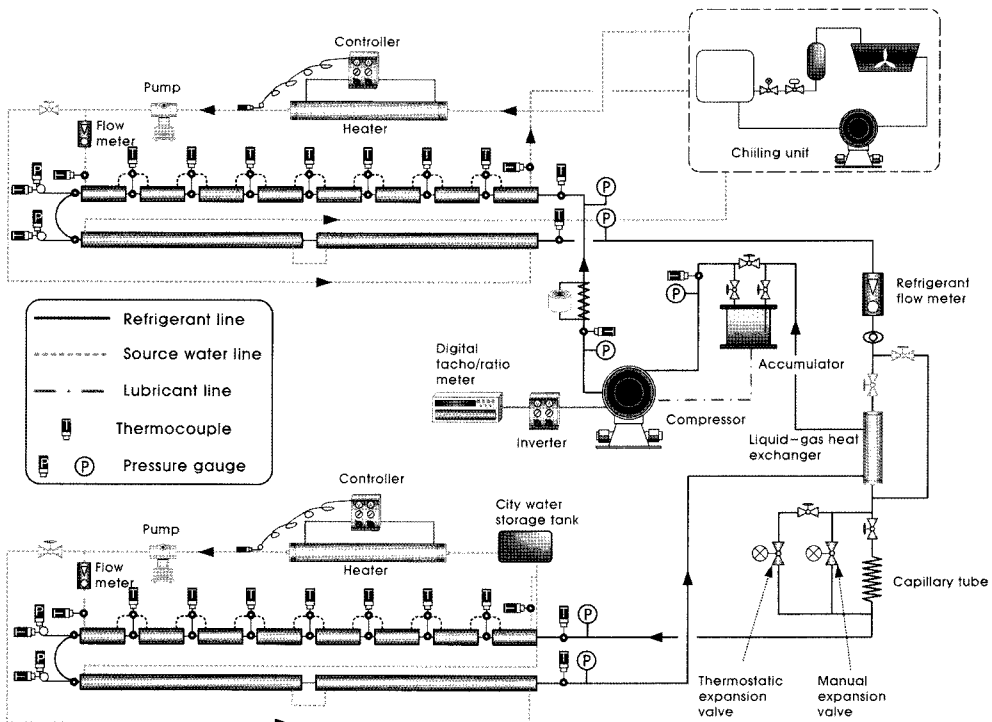


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

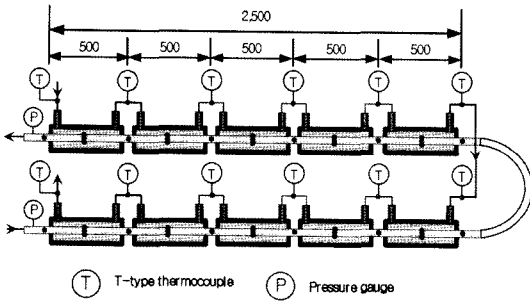


Fig. 2. Detail of test section.

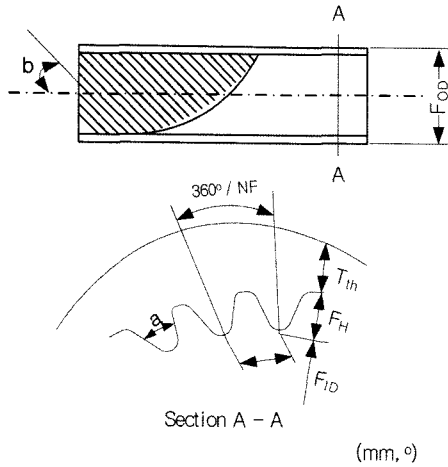


Fig. 3. Detail of micro-fin tube.

조건에 도달한 후 2분 이상 평형상태로 유지될 때 실험을 시작하였다. 즉, 냉매 온도와 압력, 질량유속, 냉매 유량, 냉각수의 온도 및 유량 등을 조절시켜 시스템이 정상상태가 유지됨을 확인한 후에 측정하였으며, 실험조건이 바뀔 때마다 이러한 과정을 반복하였다. 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.

실험에 사용한 작동유체는 프레온계 냉매인 HCFC22와 천연냉매인 프로판(순도 99.5%), 이소부탄(순도 99.5%)를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 HCFC22와 프로판, 이소부탄의 열물성값 계산은 REFPROP[6]를 이용하였다.

2.3. 자료정리

증발 열전달 특성을 규명하기 위한 건도, 열유속 등

의 계산에 필요한 증발열량은 냉매의 엔탈피차에 의한 계산방법과 열원수의 온도차에 의한 계산방법이 있다. 냉매의 엔탈피차로 구한 증발열량을 사용하는 것이 이상적일 수 있으나, 계산의 편의상 본 연구에서는 냉각수의 온도차로 구한 증발열량을 이용하였다. 이러한 계산의 타당성을 검토하기 위하여 냉매 엔탈피차로 구한 증발열량과 열원수 온도차로 구한 증발열량을 비교한 결과, 열평형은 약 ±5% 이내에서 일치하고 있음을 확인하였다. 실험에서 측정된 냉매유량, 열원수량, 온도 및 압력으로부터 시험 소구간에서의 출구건도(quality)  $x$ 는 다음과 같이 계산하였다.

$$x = x_{IN} + \frac{\pi \cdot d_{IN}}{m_{ES} \cdot i_{fg}} \int_{z_{IN}}^{z_{OUT}} q dz \quad (1)$$

여기서,  $x_{IN}$ 는 소구간의 입구건도,  $d_{IN}$ 는 전열관의 내경,  $i_{fg}$ 는 증발잠열,  $m_{ES}$ 는 증발기의 열원수량,  $q$ 는 소구간의 열유속이다. 열유속  $q$ 와 증발열량  $Q_E$ 는 각각 다음 식으로 계산하였다.

$$q = \frac{Q_E}{\pi \cdot d_{IN} \cdot \Delta z} \quad (2)$$

$$Q_E = m_{EW} \cdot c_{pc} \cdot (T_{EW,OUT} - T_{EW,IN}) \quad (3)$$

여기서  $m_{EW}$ 는 열원수량,  $c_{pc}$ 는 열원수 비열,  $T_{EW,IN}$ ,  $T_{EW,OUT}$ 는 각각 소구간에서의 열원수 입·출구 온도이다. 시험구간 내에서의 관주방향 국소열전달계수,  $h_{E,LOC}$ 와 관 길이방향의 평균열전달계수,  $h_{E,AVG}$ 는 각각 식 (4)와 식 (5)으로부터 계산하였다.

$$h_{E,LOC} = \frac{q_{E,LOC}}{(T_{W,LOC} - T_{SAT})} \quad (4)$$

$$h_{E,AVG} = \frac{\int_{z_{IN}}^{z_{OUT}} h_{E,LOC}}{n} \quad (5)$$

여기서  $T_{W,LOC}$ 는 소구간내 내관벽면의 온도,  $T_{SAT}$ 는 냉매의 포화온도,  $n$ 은 소구간의 개수이다. 이때,  $T_{W,LOC}$ 은 실험에서 측정된 내관 외표면 온도에서 식 (6)을 이용하여 계산하였다.

$$T_{W,LOC} = T_W - \frac{Q_{E,LOC} \cdot \ln\left(\frac{d_{OUT}}{d_{IN}}\right)}{2\pi \cdot k_W \cdot \Delta z} \quad (6)$$

여기서  $T_W$ 는 관의 상, 하, 측부의 외표면 온도를 평균한 벽면 온도,  $d_{OUT}$ 와  $d_{IN}$ 는 각각 내관의 외경과 내경이다. 그리고  $k_W$ 는 동관의 열전도율이다.

### III. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 국소 열전달계수

Fig. 4는 열펌프에서 많이 사용되고 있는 전열관의 내경 10.07 mm인 평활관 내에서 건도 변화에 따른 냉매 HCFC22, 프로판, 이소부탄 냉매의 국소 증발열전달계수를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 모든 건도 영역에서 질량유속에 상관없이 프로판과 이소부탄의 증발열전달계수는 HCFC22의 증발열전달계수보다 높게 나타났었다. 따라서 현재 문제가 되고 있는 중저온용 프레온계 냉매 HCFC22를 대체하여 천연냉매인 프로판과 이소부탄의 냉매를 사용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 낮은 질량유속에서 HCFC22의 증발열전달계수에 비해 프로판은 약 40~80%, 이소부탄은 약 30~45% 정도 큰 값을 나타내었고, 높은 질량유속에서는 각각 약 50~80%, 약 35~60% 정도의 값을 나타내었다. 따라서 동일 성능에서의 HCFC22를 사용하는 열교환기에 비해 천연냉매인 프로판이나 이소부탄을 사용할 경우에는 열교환기의 크기를 최소 30% 이상 축소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

증발열전달계수에 미치는 질량유속의 영향에 대해서는 HCFC22의 경우 질량유속이 약 90% 증가했을 때 열전달계수는 약 20~45%가 증가하고 있으며, 프로판은 질량유속이 약 70% 증가했을 때 열전달계수가 25~48% 정도가 증가하였고, 이소부탄은 질량유속이 약 96% 증가했을 때 열전달계수는 약 25~50% 증가하고 있으므로 증발열전달계수에 미치는 질량유속의 영향은 냉매의 종류에 상관없이 거의 일정하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 마이크로핀관에서의 건도 변화에 따른 증발

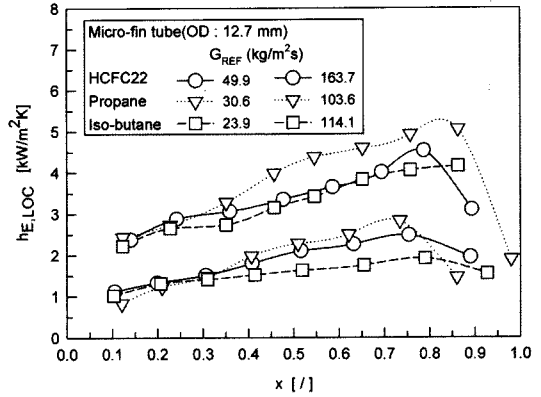


Fig. 5. Local evaporating heat transfer coefficients with respect to qualities for propane and iso-butane in micro-fin tubes.

열전달계수를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 마이크로핀관에서 증발열전달계수의 변화는 평활관의 경우에 비해 큰 차이를 보이고 있지 않으나, 증발이 진행되어 건도 약 0.8 이상에서는 HCFC 및 프로판의 열전달계수가 감소되고 있는 경향을 보이고 있다. 이소부탄의 경우에는 높은 건도영역까지 일정하게 증가하고 있는 경향을 나타내고 있다. HCFC22 및 프로판의 경우에는 핀과 핀사이에서의 활발한 증발로 인해 증기와 접촉되고 있는 데 비해 이소부탄의 경우에는 점성 등의 열물 성치에 의해 어느 정도 액이 남아 있어 열전달계수의 큰 변화가 없는 것으로 판단된다. 따라서 이소부탄을 사용하는 마이크로핀관으로 제작된 열교환기에서는 입구에서 출구까지 일정한 증발효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 3.2. 평균 열전달계수

Fig. 6은 본 실험조건에서 냉매의 질량유속에 따른 R-22, 프로판 및 이소부탄의 평균 증발열전달계수를 나타낸 것이다.

전체적인 경향은 냉매의 질량유속이 증가할수록 평균 증발열전달계수가 증가하고 있음을 알 수 있다. 평활관의 경우 낮은 질량유속 범위에서 프로판 및 이소부탄의 열전달계수는 HCFC22에 비해 최소 50% 이상 증가 효과를 나타내고 있으며, 높은 질량유속 범위에서는 최소 30% 이상 증가효과를 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 프로판과 이소부탄을 HCFC22 대체냉매로 사용이 충분히 가능할 것으로 기대되며, 아울러 적절한 안전장치가 구비된 가정용 및 중소형 열펌프에서 프로판 및 이소부탄을 사용하게 되면 열펌프 크기를 소형화시킬 수 있을 것으로 기대된다.

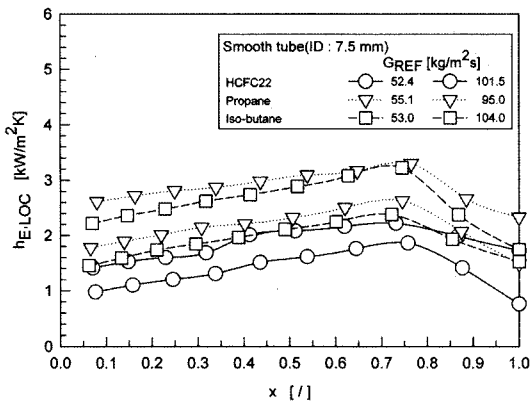


Fig. 4. Local evaporating heat transfer coefficients with respect to qualities for propane and iso-butane at smooth tubes.

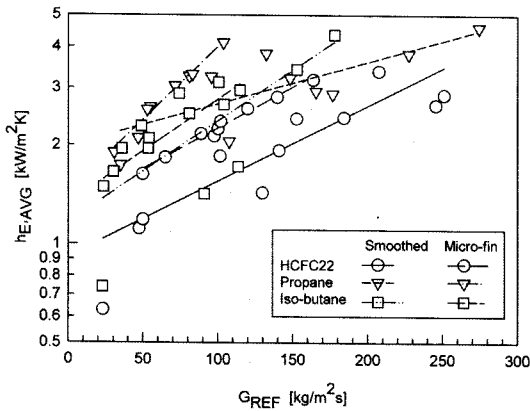


Fig. 6. Average evaporating heat transfer coefficients with respect to mass velocity for propane and iso-butane.

### 3.3. 전열 촉진효과

Schlager 등[7]은 여러 가지 전열 촉진관에 대한 실험을 통해 전열 촉진도, EF(enhancement factor)를 이용하여 전열촉진관에 대한 전열 촉진효과를 평가하였다. 본 연구에서는 Schlager 등이 제안한 전열 촉진도를 식 (7)과 같이 정의하여 마이크로핀관의 평균 열전달계수에 대한 전열 촉진도를 비교하였다.

$$EF = \frac{\text{전열 촉진관의 평균 증발열전달계수}}{\text{평활관의 평균 증발열전달계수}} \quad (7)$$

Fig. 7은 식 (7)과 같이 정의된 마이크로핀관의 관주 방향 평균 열전달계수에 대한 전열 촉진도를 비교한 것이다. 그림 중의 점선은 평활관에 대한 마이크로핀관의 전열면적 증가율(AMF/AS=1.34)를 나타낸 것이다.

그림에서와 같이 HCFC22는 전열면적 증가비율과

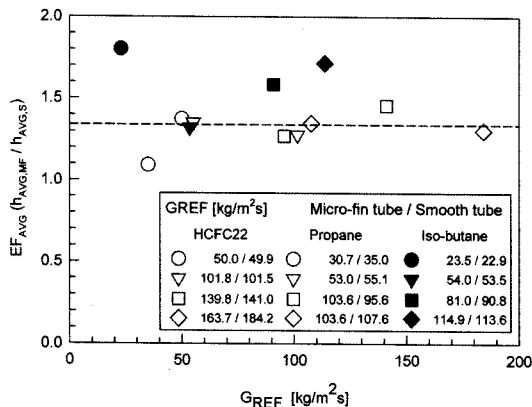


Fig. 7. Comparison of enhancement factor of HCFC22, propane and iso-butane with respect to mass flux.

비슷한 전열 촉진도를 나타내고 있다. 프로판의 전열 촉진도는 낮은 질량유속에서 전열면적 증가비율보다 약간 감소하지만, 질량유속이 증가할수록 전열면적 증가비율에 근접하는 경향을 보이고 있다. 이소부탄은 전열면적 증가비율보다 높은 전열 촉진도를 보이고 있으며, 이는 이소부탄의 점성과 같은 물성치로 인해 전열 촉진관에서 나타나는 일반적인 현상 중의 하나인 핀에 의한 액막 두께의 감소 및 난류 촉진효과가 가장 지속되기 때문으로 판단된다. 따라서 열펌프의 소형화 및 경량화를 위해서는 이소부탄을 작동유체로 사용하고, 열교환기를 마이크로핀관과 같은 전열 촉진관을 사용하면 유리할 것으로 판단되었다.

## IV. 결 론

HCFC22 냉매의 대체냉매의 가능성을 확인하고, 탄화수소 냉매를 이용한 열펌프 시스템의 최적 설계와 소형·경량화를 위해 평활관과 마이크로핀관 내에 프로판과 이소부탄을 작동유체로 사용하여 증발 열전달에 대한 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 증발 열전달 측면에서 전열관의 형태와 질량유속의 변화에 상관없이 열펌프용 작동유체로 프로판과 이소부탄을 HCFC22의 대체냉매로 사용할 수 있을 것으로 기대된다.
- 2) 동일한 전열관과 질량유속에서 냉매들의 증발 열전달계수를 비교한 결과, 프로판 > 이소부탄 > HCFC22의 순으로 나타났다.
- 3) 열펌프의 소형화와 경량화를 위한 측면에서는 평활관보다 마이크로핀관을 사용하여 열교환기를 제작하고, 작동유체로는 이소부탄을 사용하는 것이 유리하리라 판단된다.

## 참고문헌

- [1] Ebner, T. and H. Halozan, "Testing the Available Alternative - An Examination of R-134a, R-152a and R-290", IEA HPC Newsletter, 12(1), Sittard, The Netherlands, (1994)
- [2] Kruse, H., "European Research and Development Concerning CFC and HFC Substitution", AHRAE/NIST Refrigerant Conference, 41-54, (1993)
- [3] Kim, M.S., W.J. Mulroy and D.A. Dididon, "An Experimental Evaluation of the Flammability and Performance Potentials of Two Azeotropic Refrigerant Mixtures", Transport Phenomena in Thermal Engineering, 446-451, (1993)

[4] James, R.W. and J.F. Missenden, "The Use of Propane in Domestic Refrigerators", *International Journal of Refrigeration*, **15**(2), 95-100, (1992)

[5] Roh, G.S. and H.K. Oh, "Study on the Evaporation Heat Transfer Characteristics of R-134a in Small Diameter Tubes", *J. Korean Society of Marine Engineering*, **31**(3), 224-234, (2007)

[6] McLinden, M.O., S.A. Klein, E.W. Lemmon and A.P. Peskin, NIST Thermodynamic Properties and Refrigerant Mixtures Database (REFPROP), Version 6.01, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, U.S.A., (1998)

[7] Schlager, L.M., M.B. Pate and A.E. Bergles, "Evaporation and Condensation of Refrigerant-Oil Mixtures in a Smooth Tube and a Micro-fin Tube", *ASHRAE Transaction*, **94**(1), 149-166, (1988)

### 기호설명

$A$  : area [ $m^2$ ]  
 $cp$  : specific heat [ $kJ/kgK$ ]  
 $G$  : mass velocity [ $kg/m^2s$ ]  
 $h$  : heat transfer coefficient [ $kW/m^2K$ ]  
 $ID$  : inner diameter [ $m$ ]  
 $i$  : enthalpy [ $kJ/kg$ ]

$k$  : thermal conductivity [ $kW/mK$ ]  
 $L$  : tube length [ $m$ ]  
 $m$  : mass flow rate [ $kg/h$ ]  
 $n$  : number of local tube  
 $OD$  : outer diameter [ $m$ ]  
 $Q$  : heat capacity [ $kW$ ]  
 $q$  : heat flux [ $kW/m^2$ ]  
 $T$  : temperature [ $K$ ]  
 $x$  : quality [ $]$   
 $z$  : tube length [ $m$ ]

### 하첨자

$AVG$  : average  
 $CAL$  : calculated  
 $E$  : evaporator  
 $ES$  : source water of evaporator  
 $EXP$  : experimental  
 $IN$  : inner, inlet  
 $L$  : liquid, local  
 $OUT$  : outer, outlet  
 $SAT$  : saturated  
 $W$  : wall