

4.57 mm 세관 열교환기 내 이산화탄소의 증발열전달 특성

구 학 근†

(원고접수일 : 2006년 10월 30일, 심사완료일 : 2007년 3월 8일)

Evaporation Heat Transfer Characteristics of Carbon Dioxide in the Inner Diameter Tube of 4.57 mm

Hak-Keun Ku†

Abstract : The evaporation heat transfer coefficient of CO₂(R-744) in a horizontal tube was investigated experimentally. The main components of the refrigerant loop are a receiver, a variable-speed pump, a mass flow meter, a pre-heater and evaporator(test section). The test section consists of a smooth, horizontal stainless steel tube of inner diameter of 4.57 mm. The experiments were conducted at mass flux of 200 to 500 kg/m²s, saturation temperature of -5 to 5°C, and heat flux of 10 to 40 kW/m². The test results showed the heat transfer of CO₂ has a greater effect on nucleate boiling more than convective boiling. Mass flux of CO₂ does not affect nucleate boiling too much. In comparison with test results and existing correlations, the best fit of the present experimental data is obtained with the correlation of Jung et al. But existing correlations failed to predict the evaporation heat transfer coefficient of CO₂, therefore, it is necessary to develop reliable and accurate predictions determining the evaporation heat transfer coefficient of CO₂ in a horizontal tube.

Key words : Carbon dioxide(이산화탄소), Design of heat exchanger(열교환기 설계), Evaporation heat transfer coefficient(증발열전달 계수)

기호설명

d : 관경, m

G : 질량유속, kg/m²s

h : 열전달 계수, W/m²K

P : 압력, Pa

Q : 전열량, kW

q : 열유속, kW/m²

T : 온도, °C

x : 건도

Δz : 소구간의 길이, m

하첨자

cp : 임계점

† 교신저자(동명대학교 환경설비공학과), E-mail : hgkur@tu.ac.kr, Tel : 051)620-3521

- e : 증발
- i : 내측
- in : 입구
- loc : 국소값
- re : 냉매
- rp : 환산
- sat : 포화
- w : 관벽

1. 서 론

CFC계 및 HCFC계 냉매가 오존층 파괴 및 온실효과의 원인 물질로 밝혀짐에 따라 자연냉매에 관심이 높아지고 있고, 이와 같은 상황에 CO₂ (R-744)는 자연냉매이고, 환경 친화적이며, 주위 환경에서 쉽게 구할 수 있기 때문에 서구 선진국을 중심으로 주목을 받기 시작했다. 그러나 CO₂를 냉동-공조 장치에 적용할 경우, 시스템 압력이 상당히 높아지기 때문에 압축기와 열교환기(증발기와 응축기)를 재설계할 필요가 있다. 특히 CO₂를 작동유체로 사용하는 냉동공조 시스템에서 증발기는 중요한 구성요소이므로 증발기에서의 열전달 특성을 파악하는 것은 필수적이다. 수평관내 CO₂의 증발 열전달에 있어서 작동매체인 CO₂의 비체적, 비열, 밀도, 표면장력 등의 물성치가 크게 변화하므로 기존의 프레온계 냉매의 증발열전달 특성과는 상당히 다른 결과를 보고하고 있다⁽¹⁾⁻⁽³⁾. 현재 CO₂의 증발과정 중에 발생하는 전열 기구에 대한 규명은 CO₂의 복잡한 유동형태 와 물성치로 인해 아직 정확한 이론이 확립되어 있지 않은 실정이다. 그리고 CO₂ 냉매의 증발열전달 특성에 대한 연구는 대단히 부족한 상태이다.

따라서, 본 논문에서는 CO₂를 작동유체로 사용하여 내경 4.57 mm 관에서 증발과정 중의 열전달 특성을 분석하고, 기존 상관식과도 비교·검토함으로써 CO₂용 증발기의 기초설계 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험 장치를 나

타낸 것이다. 실험 장치는 강제 순환식 폐 루프이고, CO₂ 순환 루프와 냉각수 순환 루프로 구성되며 다음과 같은 경로로 이루어진다. 수액기에 액상으로 충전된 냉매액은 구동원인 냉매펌프에 의하여 구동되어 전자식 질량유량계로 들어간다. 질량유량계에서 유량이 측정된 냉매액은 전기 히터에 의해 가열되는 예열기로 흡입되어 일정 건도를 가진 냉매증기로 된다. 예열기를 나온 냉매증기는 시험부인 증발기로 유입되어 증발과정을 거친 후, 응축기에서 응축이 완료된 후 수액기로 흡입되도록 하였다. 이렇게 수액기로 순환된 냉매액은 냉매펌프로 재순환 된다. 증발기 시험부의 상세도는 Fig. 2에 나타내었다. 시험부는 냉매가 흐르는 내관과 냉각수가 흐르는 외관으로 이루어진 이중관형 열교환기이다. 내관은 내경 4.57 mm, 외경 6.53 mm, 길이 4200 mm인 수평 평할 관으로 제작하였다. 그리고 시험부는 압출구를 제외하고, 입구에서 400 mm씩 동일간격으로 10개 구간으로 나누었으며, 각 구간에는 냉매, 관벽, 냉각수 온도 및 차압을 각각 측정할 수 있도록 하였다. 각 실험데이터는 장치가 정상상태에 도달하였을 때 온도, 압력과 질량유량을 각각 측정한다. Table 1은 실험조건을 정리한 것이다. 본 연구에서 사용된 CO₂에 대한 물성치는 냉매 물성치 계산 프로그램인 REFPROP(version 6.02)를 이용하여 계산하였다.

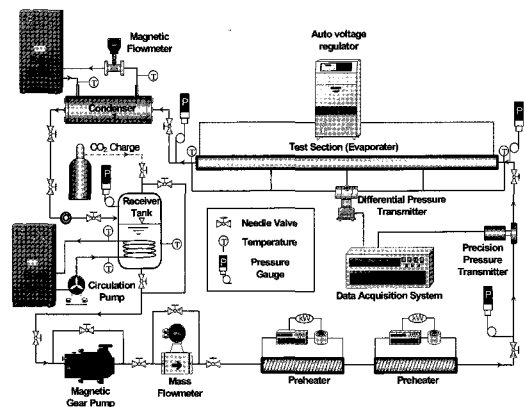


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for evaporation heat transfer test

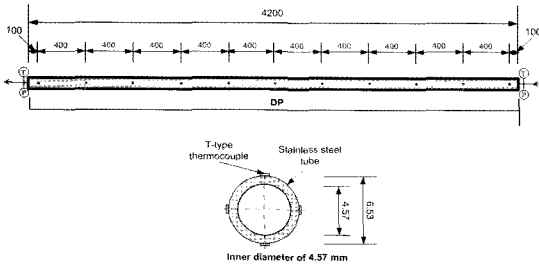


Fig. 2 Schematic diagram of test section for evaporation heat transfer test

Table 1 Test conditions

Contents	R-744(CO ₂)
$T_{e,sat}$ (°C)	-5, 0, 5
G_{re} (kg/m ² · s)	200, 300, 400, 500
d_i (mm)	4.57
q_e (kW/m ²)	10, 20, 30, 40

2.2 데이터 처리방법

증발과정에서 관의 원주 방향으로의 열전달 계수는 시스템의 성능에 많은 영향을 미치므로, 원주 방향으로의 열전달 계수를 계산할 필요가 있는데, 이러한 국소 열전달 계수는 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$h_{e,loc} = \frac{q_e}{T_{e,w,in} - T_e} \quad (1)$$

여기서, $h_{e,loc}$ 은 증발기의 국소 열전달 계수 [kW/m²·K]를 나타내며, T_e 은 증발기에서의 냉매 온도 [K]이고, $T_{e,w,in}$ 은 증발기에서의 관벽 내표면 온도 [K]이다. 증발기의 외벽면에 설치된 열선으로 공급되는 열유속 q_e [kW/m²]는 다음과 같은 식(2)로부터 계산하였다.

$$q_e = \frac{Q}{\pi \cdot d_i \cdot \Delta z} \quad (2)$$

식(2)에서, Q 는 열평형식으로 계산되는 전열량 [kW], d_i 는 평균 관내경 [m]이고, Δz 는 소구간의 길이 [m]를 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 국소 증발열전달

3.1.1 건도의 영향

Fig. 3은 내경 4.57 mm 수평관에서 얻은 국소 열전달 계수를 건도의 변화에 따라 나타낸 것이고, Table 2는 R-22와 R-744의 물성치를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 나타낸 것처럼, 건도가 증가할수록 국소 증발열전달 계수는 감소하는 경향을 보였다. 이와 같은 현상에 대해 Hihara 등⁽⁴⁾과 윤 등⁽⁵⁾도 동일한 연구결과를 보였는데, 그 이유는 Table 2에서 보는 바와 같이, 동일 포화온도에서 CO₂의 액상 점성계수와 표면장력이 작기 때문에 관내벽면에서 발생하는 기포의 생성과 이탈이 활성화되고, 이로 인해 저건도 영역에서 활발한 핵비동의 영향으로 높은 열전달 계수를 얻을 수 있다. 고건도 영역에서는 기포류에서 환상류로 전이되는 강제 대류에 의한 영향이 작아서 열전달 계수가 감소하는 것으로 판단된다.

또한, Fig. 3에서 알 수 있듯이, 증발기 입구 영역에서 높은 질량유속과 낮은 열유속 조건에서 CO₂의 증발열전달 계수가 낮은 상태로 유입된다. 이는 과냉액 상태의 CO₂ 냉매가 빠른 유속으로 증발관내로 유입되어 낮은 열유속에 민감하게 반응하지 않아서 나타나는 현상으로 판단된다. 과냉액 상태로 유입된 냉매는 건도가 증가할수록 증발열전달 계수가 약간 상승하는 것을 알 수 있다. 이는 부가된 열유속으로 인한 충분한 열교환에 의해서 핵비동이 활성화되고 이로 인해 열전달 계수가 상승하는 것으로 판단된다.

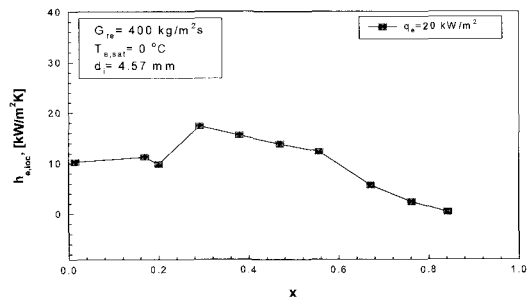


Fig. 3 Variation of evaporation heat transfer coefficients with respect to quality

Table 2 Thermophysical properties of refrigerants investigated

Refrigerant		R-744	R-22
Saturation density, [kg/m ³]	Liquid	-5°C	956.7
		0°C	928.1
		5°C	896.7
	Vapor	-5°C	83.14
		0°C	97.32
		5°C	114.1
Saturation viscosity, [μ Pa·s]	Liquid	-5°C	115.2
		0°C	105.4
		5°C	95.84
	Vapor	-5°C	13.85
		0°C	14.31
		5°C	14.83
Surface tension, [mN/m]	-	-5°C	5.51
	-	0°C	4.55
	-	5°C	3.64

3.1.2 열유속의 영향

Fig. 4는 일정한 질량유속과 포화온도에서 CO₂의 국소 증발열전달 계수를 건도 변화에 대해서 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 열유속이 증가할수록 국소 증발열전달 계수가 증가하고, 이러한 현상은 저건도와 고건도 영역에서 뚜렷하게 관찰된다. 이러한 경향은 유사한 실험조건에서 실험한 Choi 등⁽⁶⁾의 연구결과와 일치하는 것으로, 이는 저건도에서만 발생하는 핵비등 현상이 열유속과 함께 고건도에서도 나타난다는 것을 의미한다. 그 이유는 CO₂의 액상에 대한 기상의 비체적이 프레온계 냉매보다 작고, 기상의 속도가 액상의 속도에 비해서 크지 않기 때문에 고건도 영역에서도 증발열전달 계수는 강제대류보다는 핵비등의 영향을 받는다. 이에 대해 Zhao 등⁽⁷⁾은 유사한 실험조건에서 동일한 연구결과를 보였다. 내경 7.75 mm에 대한 이전 연구논문⁽⁸⁾에서는 dry out점이 발생하지 않았지만, Fig. 4에서 살펴보는 바와 같이, 관내경이 4.57 mm인 경우 드라이 아웃 부분이 나타나고, 열유속이 낮을수록 드라이 아웃점이 저건도 영역에서 발생함을 알 수 있다. 이는 관경이 작아질수록 관내벽면에 형성되는 액막이 얇아져서 쉽게 깨지기 때문인 것으로 판단된다. 또한 Fig. 4에서 알 수 있듯이 4.57 mm의 국소 증발열전달 계수는 건도와 함께 증가하지만, 드라이 아웃점 이후에서는 감

소하는 경향을 보인다. 이는 관경이 작아질수록 유동양식이나 열전달 메카니즘이 달라지기 때문에 이러한 경향이 나타나는 것으로 판단된다.

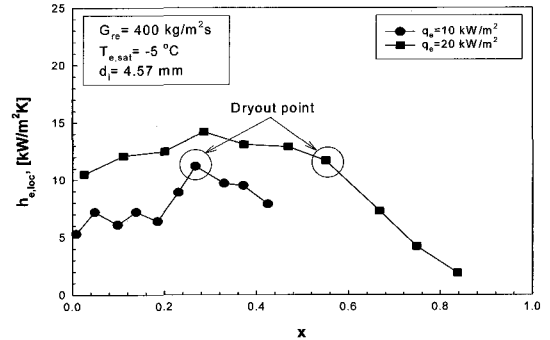


Fig. 4 Variation of evaporation heat transfer coefficients for different heat fluxes at constant mass flux

3.1.3 질량유속의 영향

Fig. 5는 국소 증발열전달 계수를 냉매의 질량유속 변화에 따라 나타낸 것이다. Fig. 5에서 내경 4.57 mm의 경우 질량유속에 의한 열전달 계수의 향상이 다소 나타남을 알 수 있다. 이에 대한 명확한 이유는 추가적인 실험으로부터 알 수 있겠지만, 아마도 관경이 작아질수록 관내 유동형태와 지배적인 열전달 메카니즘이 달라지기 때문인 것으로 보인다.

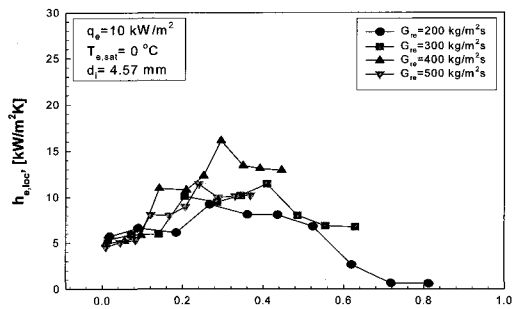


Fig. 5 Variation of evaporation heat transfer coefficients for different mass fluxes at constant heat flux

이와 같이, CO₂의 질량유속 증가는 핵비등 열전달 향상에 큰 영향을 주지 못하고, CO₂의 열전달

계수에 미치는 질량유속의 영향은 적다. 모든 질량 유속에 대해서 증기건도가 증가할수록 증발열전달 계수는 증가하다가 드라이 아웃점 이후에는 다시 감소하는 경향을 보인다.

3.1.4 포화온도의 영향

Fig. 6은 일정한 질량유속에서 냉매의 포화온도 변화에 따른 국소 증발열전달 계수를 나타낸 것이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, 냉매의 포화온도가 증가할수록 열전달 계수는 증가한다. 이에 대해 윤 등^[5]과 Choi 등^[6]도 동일한 연구결과를 발표했다. 핵비등 영역에서 관벽면으로부터 기포의 이탈은 중요하다. 포화온도가 증가할수록 액에 대한 기상의 비체적 비가 증가한다. 이로 인해 기포의 부력은 증가하고 기포의 이탈은 향상되며, 결국 핵비등은 활성화된다. Fig. 6에 나타낸 것처럼, 저건도 영역에서 포화온도의 증가는 핵비등의 활성화로 인해 증발열전달 계수는 증가한다. Cooper^[9]는 핵비등 열전달 계수에 포화압력과 환산압력($P_{rp} = P_{re}/P_{cp}$)이 영향을 미친다고 하였다. 따라서 포화온도가 증가할수록 포화압력과 환산압력이 증가하고, 이로 인해 액상과 기상의 밀도차가 감소한다. 결국에는 액상과 기상의 밀도차가 감소하면 기포의 유동면적이 증가되어 핵비등 증발열전달 계수는 증가한다. 저건도 영역에서 포화온도의 증가는 핵비등의 활성화로 인해 증발열전달 계수는 증가한다.

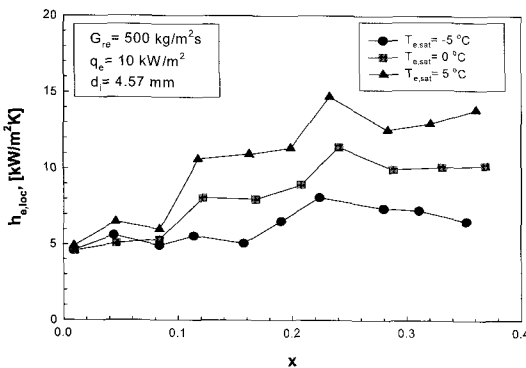


Fig. 6 Variation of evaporation heat transfer coefficients with different saturation temperature for constant heat and mass flux

3.2 종래의 증발열전달 상관식과 비교

수평 증발관내 국소 열전달 계수를 예측하기 위해서 제안된 타 연구자들의 예측식에는 Shah^[10], Gungor-Winterton^[11], Kandlikar^[12], Jung 등^[13], Liu-Winterton^[14] 등이 있다. 본 절에서는 이들 상관식들과 증발 데이터를 비교검토하고, 그 적용 가능성에 대해서 고찰하였다.

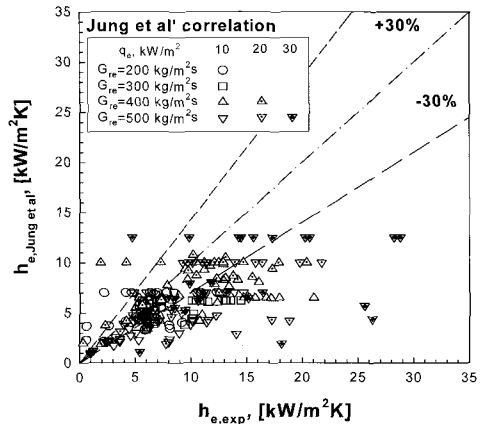


Fig. 7 Comparison between calculated and measured heat transfer coefficients in the evaporator of inner diameter tube of 4.57 mm

Table 3 Deviations of heat transfer coefficients in carbon dioxide of inner diameter tube of 4.57 mm

Authors	Deviation	Average deviation(%)	Mean deviation(%)
Shah(1982)		-13.87	55.7
Gungor-Winterton(1986)		-30.3	30.6
Jung et al.(1989)		16.56	38.4
Kandlikar(1989)		-34.8	39.4
Liu-Winterton(1991)		51.2	78.85

Fig. 7은 수평관내 CO₂의 증발열전달에 대한 결과 중에 Jung 등의 상관식과 비교한 것이다. 그림에서와 같이 모든 상관식들은 실험으로 측정된 증발 열전달 계수보다 과소 예측된다. 그리고 Table 3에서 알 수 있듯이 Shah, Gungor-Winterton, Kandlikar의 상관식은 본 실험값보

다 30%이상 과소 예측하는 경향을 보인다. 상관식들 중에서 실험값과 가장 근접한 것은 Jung 등의 상관식으로 평균이탈정도가 16.56%였다. 그림에서 알 수 있듯이, 동일한 실험조건에서 질량유속과 열유속이 증가할수록 기존의 상관식과의 이탈정도는 큰 것으로 나타났다.

4. 결 론

CO₂를 이용한 냉동공조 시스템용 열교환기의 최적 설계를 위해서 CO₂ 냉매의 증발과정 중에 열전달 특성에 대해서 실험한 결과, 다음과 같이 정리하였다.

(1) 저건도 영역에서는 핵비등이 지배적이기 때문에 증발열전달 계수는 약간 증가하였고, 고건도 영역으로 갈수록 증발열전달 계수는 감소하는 경향을 보였다.

(2) 열유속의 변화에 따른 CO₂의 증발열전달 계수는 열유속이 증가할수록 향상되었다. 이는 CO₂의 액상에 대한 기상의 비체적이 프레온계 냉매보다 작고, 기상의 속도가 액상의 속도에 비해서 크지 않기 때문에 고건도 영역에서도 증발열전달 계수는 강제대류보다는 핵비등의 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

(3) 질량유속 변화에 따른 CO₂의 증발열전달 계수는 거의 증가하지 않음을 할 수 있었다. 그 이유는 CO₂의 액상과 기상의 밀도비가 작아서 강제대류비등보다 핵비등의 영향을 많이 받지만, 핵비등은 질량유속의 증가에 큰 영향을 받지 않기 때문인 것으로 판단된다.

(4) 냉매 포화온도 변화에 따른 CO₂의 증발열전달 계수는 증가하는 경향을 보였다. 이는 포화온도가 증가할수록 액상에 대한 기상의 비체적 비가 증가하고 이로 인해 기포의 부력상승과 이탈 회수의 증가되며 결국 핵비등이 활성화되기 때문이다.

(5) 수평관내 CO₂의 증발열전달에 대한 실험으로 획득한 결과를 Shah, Gungor-Winterton, Kandlikar, Jung 등, Liu-Winterton에 의해서 제안된 상관식과 비교한 결과, Jung 등의 상관식이 평균오차 16.56%로 가장 좋은 일치를 보였다.

참고문헌

- [1] S. H. Yoon, "Studies on the characteristics of evaporation and supercritical gas cooling heat transfer of carbon dioxide", Seoul National University, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, 2002.
- [2] L. Yun, Y. C. Kim and M. S. Kim, "Two-phase flow patterns of CO₂ in a narrow rectangular channel", International Congress of Refrigeration 2003, Washington D. C., pp. 1-7, 2003.
- [3] Z. Yuan, M. Michael and D. Jafer, "Forced Convection Boiling Heat Transfer of CO₂ in Horizontal Tubes", Xth ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conference, 1999.
- [4] E. Hihara and S. Tanaka, "Boiling Heat Transfer of Carbon dioxide in Horizontal Tubes", Proc. 4th IIR-Gustav Lorentzen Conf. On Natural Working Fluids, Purdue University, USA, pp. 279-284, 2000.
- [5] 윤백, 박현연, 유국철, 김용찬, "관순법을 이용한 공조기 사이클 시뮬레이션", 대한설비공학회, 제11권, 제4호, pp. 490-510, 1999.
- [6] J. Y. Choi, A. M. Kedzierski and A. P. Domanski, "A Generalized pressure drop correlation for evaporation and condensation of alternative refrigerants in smooth tube and micro-fin tube", NISTIR 6333, pp. 7-15, 1999.
- [7] Y. Zhao, M. M. Ohadi, S. V. Dessiatoun, M. Molki and J. Darabi, "Forced convection boiling heat transfer of CO₂ in horizontal tube", in : AJTE99-6249, Proc. 5th ASME/JSME

Joint Thermal Engineering Conference, San Diego, California, 1999.

- [8] C. C. Son, D. H. Kim, S. M. Choi, Y. R. Kim and H. K. Hoo, "Evaporation heat transfer characteristics of CO₂ in a horizontal tube", International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 13, No. 4, pp. 167-174, 2005.
- [9] M. G. Cooper, "Heat Flow Rates in Saturated Nucleate Pool Boiling a Wide-ranging Examination Using Reduced Properties", Advances in Heat Transfer, Vol. 16, pp. 157-239, 1984.
- [10] M. M. Shah, "A general correlation for heat transfer during film condensation inside pipes", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 22, pp. 157-165, 1979.
- [11] K. E. Gungor and R. H. S. Winterton, "Simplified General Correlation for Flow Saturated Boiling and Comparisons of Correlations with Data", Chem. Eng. Res. Des., Vol. 65, pp. 148-156, 1987.
- [12] Kandlikar, S. G., "A general correlation for saturated two-phase flow boiling horizontal and vertical tubes", Trans. ASME, Vol. 112, pp. 219-228, 1990.
- [13] D. S. Jung, M. Mclinden, R. Radermacher and D. Didion, 1989, "A Study of Flow Boiling Heat Transfer with Refrigerant Mixtures", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 32, No. 9, pp. 1751-1764, 1989.
- [14] Z. Liu and R. H. S. Winterton, "A General Correlation for Saturated and Sub cooled Flow Boiling in Tubes and Annuli, Based on a Nucleate Pool Boiling Equation", International

Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 34, No. 1, pp. 2759-2766, 1991.

저 자 소 개



구학근 (具學根)

1983년 부산수산대학교 냉동공학과 졸업, 1989년 부산수산대학교 냉동공학과 대학원 졸업(공학석사), 1994년 부산수산대학교 냉동공학과 대학원 졸업(공학박사), 현재 동명대학교 공과대학 환경설비공학과 교수