

세관내 R-134a의 유동특성에 관한 실험적 연구

손창효^{1*}

An Experimental Study on Flow Characteristics of R134a in a Small Diameter Tube

Chang-Hyo Son^{1*}

요 약 본 논문은 세관내 R-134a의 유동특성을 실험적으로 조사한 것이다. 이에 대한 실험장치는 마그네틱 기어 펌프, 증발기, 수액기, 사이트 글라스, 응축기, 계측기로 구성된다. 유동양식을 관찰하기 위한 사이트 글라스는 증발기 입출구에 설치하였다. 실험은 세관내 R-22와 R-134a의 유동특성을 살펴보기 위해서 수행되었다. 이에 대한 실험변수인 냉매질량 유속은 100에서 1000 kg/m²s이고, 포화온도는 30℃이다. 증발과정 중의 유동양식에서 2 mm의 세관내 환상유동은 8 mm관의 대구경관에 비해 저건도와 저질량유속에서 발생하였다. 본 실험결과와 종래의 유동양식 선도와 비교한 결과, 2 mm의 세관내 증발 유동양식은 Baker, Mandhane, Taitel-Dukler의 유동양식 선도와는 큰 차이를 보였지만, Dobson의 유동양식 선도와는 좋은 일치를 보였다.

Abstract The flow characteristics of R-134a in a small diameter tube was investigated experimentally. An experimental apparatus was consisted of a magnetic gear pump, an evaporator, a sight-glass, a condenser and a measurement instruments. The sight-glass for flow pattern observations was located at the inlet and outlet of the evaporator. The experiment was carried out to show the flow characteristics of R-134a in a small diameter tube. Mass flux of refrigerants was ranged from 100 to 1000 kg/m²s, the saturation temperature was 30℃. In the flow patterns during evaporation, the annular flow in a 2 mm inner diameter tube occurred at a relatively lower quality and mass velocity, compared to that in a 8 mm inner diameter tube. The evaporation flow pattern in a small diameter tube has been shown major deviations with the Baker, Mandhane and Taitel-Dukler's flow pattern maps but it was similar to the Dobson's flow pattern map.

Key Words : Annular flow, 환상유동, Flow pattern map, 유동양식 선도, Small diameter tube, 세관

1. 서론

최근 고유가 시대가 다시 도래한 시점에서, 국외로부터 에너지의 전량을 수입에 의존하고 있는 우리나라에서는 더욱더 에너지 절약과 효율적인 에너지 사용을 위한 대책이 시급한 실정이다. 이에 따라, 비약적인 성장을 거듭하고 있는 냉동·공조 산업분야에서도 각종 기기의 고성능화, 소형화 그리고 경량화 등의 대책이 절실히 요구되고 있다. 따라서, 이와 관련한 연구들이 연구소, 학교 및 기업 등에서 활발히 진행되고 있는데, 특히, 냉동·공조 기기의 효율에 큰 영향을 미치는 열교환기의 고성능화, 소형화 등에 관한 연구가 광범위하게 이루어지고 있

다.[1-2]

지금까지는 열교환기의 열전달 성능을 향상시키기 위해서, 복잡한 형상의 전열 촉진관을 사용한 열교환기의 개발이 주류를 이루었지만, 최근 들어 종래의 전열관보다 관경이 작은 세관(수력직경 7 mm 미만)을 이용한 열교환기 개발이 활발히 진행되고 있다. 세관은 종래의 전열관보다 관경이 작기 때문에, 유효 전열 면적의 극대화, 난류 효과의 상승, 가공성의 향상 그리고 유연성 등 여러 가지 열전달 성능상의 장점을 가지고 있다. 이로 인해, 세관 열교환기는 처음에는 우주 항공 분야 및 원자력 산업 등과 같은 제한적인 분야에서만 사용되었으나, 최근에는 넓은 범위에서 사용되고 있다. 예를 들면, 자동차 에어컨용 열교환기는 종래 직류형 서펜틴(serpentine) 형태의 열교환기에서 세관 열교환기인 PFC(parallel flow condenser)로 대체되었으며, 주로 핀-튜브 형태의 열교환기가 사용되던

¹부경대학교 기계공학부

*교신저자: 손창효(sonch@pknu.ac.kr)

가정용 에어컨 열교환기도 전열관의 직경을 4 ~ 6 mm 정도로 축소한 세관 열교환기를 적용하려고 시도하고 있다. 그러나, 최적의 세관 열교환기를 개발하기 위해서는 세관 내 이상 유동, 열전달 그리고 압력 강하 특성 등에 대한 연구가 선행되어야 한다. 하지만, 지금까지의 이와 관련한 연구는 미흡하거나 체계적이지 못하다. 이로 인해, 세관 열교환기의 설계가 대부분 경험에 의해서 이루어지고 있는 실정이다.[3]

지금까지의 유동 양식에 대한 연구는 주로 수평·수직 평활 원형관(수력직경 7 mm 이상)에서 일어나는 이상 유동에 대해서 많이 알려져 왔지만, 최근 들어 물과 공기를 이용한 세관 내 이상 유동 실험 결과가 발표되고 있다. 그러나, 증발·응축 현상과 같은 상변화를 수반하는 세관 내 이상 유동 실험은 매우 부족한 실정이다. 세관 내 이상 유동과 관련한 주요한 연구로 Wambsganss 등[4]은 19.05 × 3.18 mm 장방형(종횡비 6, 0.17, 수력 직경 5.44 mm) 관을 수평으로 설치하고, 물과 공기를 이용하여 이상 유동 실험을 하였다. 그들은 실험을 통해서, 종래 대구경관 내 이상 유동에서 관측되는 플러그 혹은 기포류에서 슬러그류로의 천이 현상이 세관 내 이상 유동에서도 유사한 천이 영역에서 발견된다고 보고하고 있다. 하지만, 세관 내 이상 유동에서는 대구경관 내 이상 유동에서 발견되는 슬러그류에서 환상류, 슬러그류에서 파상류 그리고 파상류에서 환상류로의 천이 현상과 같은 이상 유동 특성은 명확하게 나타나지 않는다고 보고하였다. 그리고 Fujita 등[3]은 질소와 에탄올 수용액을 이용하여 5 개의 장방형 관에서 이상 유동 실험을 하였다. 그들은 종래의 대구경관 내 이상 유동과 세관 내 이상 유동의 천이 영역이 서로 다름을 밝히고 있으며, 그 차이는 유체의 유속이 감소할수록 커진다고 밝혔다. 그들은 이러한 세관 내 이상 유동이 대구경관 내 이상 유동과 다른 특성을 가지는 이유를 장방형 관의 기하학적 모양에 따라서 에탄올 수용액의 표면 장력의 영향이 유동에 다르게 미치기 때문이라고 설명하였다. Lin 등[6]은 종래 이상 유동과 관련한 연구를 정리하고, 2.1 mm 관에서 물과 공기를 이용하여 수직 이상 유동 실험을 하였다. 실험 결과로부터, 세관 내 이상 유동은 종래의 대구경관 내 이상 유동에 비해 낮은 유속에서 환상류로 천이가 발생하며, 종래에 제시된 유동 양식 선도로는 세관 내 이상 유동을 설명할 수 없다고 밝혔다. 이와 같이 위에서 살펴본 종래의 연구 결과들로부터 세관 내 유동은 대구경관 내 유동과 차이가 있고 이에 대한 폭넓은 연구가 필요함을 알 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 이상과 같은 현실적 필요성과 문제 해결을 위해, 내경 8 mm 와 내경 2 mm 관에서, R-134a를 작동 유체로 하여 세관 내 증발 이상 유동 특성

을 밝히고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

그림 1은 유동 가시화 실험 장치도의 상세도를 각각 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 실험 장치는 강제 순환식 사이클이며, 냉매가 순환되는 경로와 브라인이 순환되는 경로로 구성되어 있다. 자기 펌프(Tuthill 사) 및 질량 유량계(Oval 사)를 통과하는 냉매는 바이패스 관을 통해서 일정한 유량으로 조절되어 예열기 및 증발기 혹은 항온조에 유입된다. 증발 열전달 실험에서, 냉매는 예열기에서 일정한 건도로 조절되어 증발기로 흡입되며, 액단상 열전달 실험의 경우, 냉매는 항온조에서 일정한 온도로 가열된다. 예열기 및 증발기 혹은 항온조를 통과한 냉매는 다시 가시화부와 응축부로 유입된다. 가시화부(사이트 글라스) 전·후에는 관경의 100 배 이상 되는 길이의 유도부를 설치하여 냉매의 유출입시 가시화부 내 유동의 안정화를 도모하였다. 응축기에 유입된 냉매는 내관과 외관 사이의 환상 공간으로 흐르는 브라인에 의해 응축되고 수액기로 흘러간다. 이때, 냉매를 응축시키기 위한 브라인은 별도로 설치된 냉동기 유니트에서 일정한 온도와 유량으로 조절되어 시험부에 냉매 흐름 방향과 반대 방향(대향류)으로 유입된다. 본 실험 장치는 열침입 및 열손실을 최소화할 수 있도록 석면, 스티로폼 등으로 충분히 단열 되어져 있으며, 냉매의 온도, 압력 및 유량 등이 일정하게 유지되는 정상 상태 하에서 모든 실험을 실시하였다.

그림 2는 증발 유동을 사진 촬영하기 위해 사용한 가시화부(사이트 글라스)의 상세도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 가시화부는 내경 2 mm 와 8 mm 인 파이렉스 관으로 각각 구성되어 있으며, 사진 촬영은 정상 상태 하에서 5 회 이상 촬영하였다.

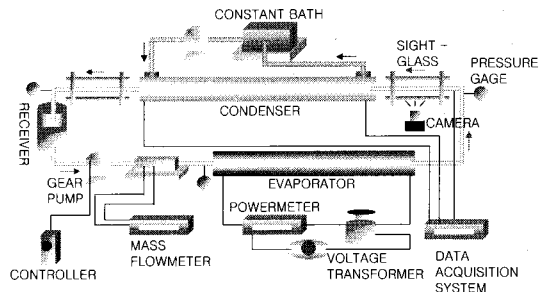


그림 1. 유동양식 실험장치의 상세도.

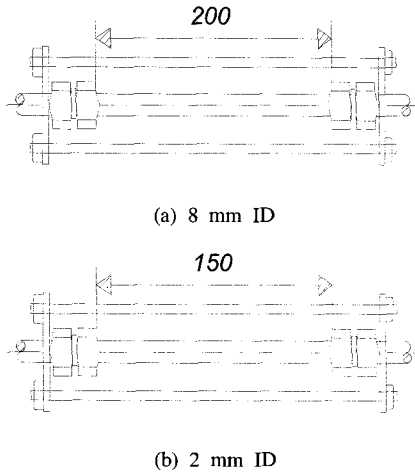


그림 2. 사이트 글라스의 상세도.

표 1. 이상류 유동양식에 대한 실험조건.

Refrigerant	R-134a
Test section	Horizontal pyrex glass tube
ID of tube (mm)	2, 8
Saturation Temperature (°C)	30
Mass velocity (kg/m ² s)	100 ~ 1000
Quality	0 ~ 1

2.2 실험조건 및 데이터 처리

본 실험에서 사용한 R-134a에 대한 열물성치는 NIST (National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 냉매 물성 계산프로그램인 REFPROP (version 6.02)[6]를 이용하였다. 그리고 표 1에는 실험 조건을 나타내었으며, 이상 유동 실험을 실시하기에 앞서, 증발기 내 가열 열선이 내관 외벽면에 공급하는 전열량 Q_{coil} [kW]과 냉매가 내벽면으로부터 공급받는 전열량 Q_c [kW] 사이의 열평형 결과를 나타내었다. 그리고 각각의 전열량은 식 (1)과 식 (2)로 구할 수 있다.

$$Q_{coil} = \zeta \cdot V \cdot I \quad (1)$$

$$Q_c = M_{e,r} \cdot c_{p,e,r} \int_{T_{e,r,in}}^{T_{e,r,out}} dT \quad (2)$$

여기서, ζ 는 가열 효율, V 는 입력 전압[V]이고 I 는 입력 전류[A]이다. 그리고 $M_{e,r}$ 은 냉매의 질량 유량 [kg/s]

이며 $T_{e,r,in}$ 과 $T_{e,r,out}$ 는 냉매의 입구와 출구 온도 [K]를 나타내며, $c_{p,e,r}$ 는 냉매의 비열 [kJ/kg·K]을 나타낸다.

가열코일에 의해 증발기로 전달되는 전열량 Q_{coil} 을 제어하고, 증발기 입·출구의 에너지 평형 방정식으로부터 식 (3)으로 가시화부 입구 건도 x 를 구한다.

$$x = \frac{Q_{coil}}{M_{e,r} \cdot i_{fg}} \quad (3)$$

여기서, i_{fg} 는 냉매의 증발 잠열이다.

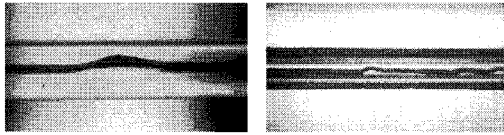
3. 결과 및 토론

3.1 증발 이상 유동

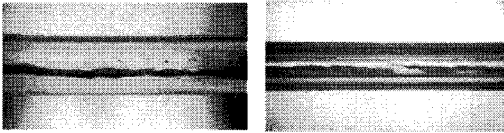
그림 3은 동일 질량 유속에서 R-134a의 내경 2mm와 내경 8 mm 관 내 이상 유동을 나타내었다. 사진에서 알 수 있듯이, 내경 2 mm 관에서는 건도 0.1에서 파상류로 흐르고 있으며, 건도 0.2 ~ 0.3에서는 파상-환상류가 발생하고 있다. 그리고 건도 0.5 이상에서는 뚜렷한 환상류가 나타나고 있다. 하지만, 내경 8 mm 관에서는 건도 0.1에서 성층류, 건도 0.3에서 파상류가 발생하고 있으며, 건도 0.5에서도 파상류가 여전히 유지되고 있다. 따라서, 내경 2mm 관 내 증발 유동에서 내경 8 mm 관 내 증발 유동보다 낮은 건도 영역에서 파상류, 파상-환상류 및 환상류가 발생하는 있는 것으로 보인다. 또한, 내경 2 mm 관 내 증발 유동의 액막이 내경 8 mm 관 내 증발 유동의 액막보다 얇은 것을 확인할 수 있었다. 이는 내경 2 mm 관의 기하학적인 원인으로 인해서 관 내 기-액 경계면에서의 전단 응력의 증가 때문인 것으로 판단된다.

그리고 유동 양식 선도(Flow pattern map)는 2 차원의 선도에 여러 가지 변수를 사용하여 모든 유동 양식을 나타내기 때문에 이상 유동 양식을 예측하는데 불편적으로 사용된다. 그러나 이상 유동 양식의 변화는 많은 영향 인자들에 의해서 지배되는 것으로 알려져 있기 때문에, 2 차원 선도 상에 각각의 유동 양식의 경계를 표시하는 유동 양식 선도는 근본적인 그 적용의 한계를 가지고 있다. 하지만, 유동 양식 선도가 가지고 있는 여러 가지 장점 때문에, 본 실험에서 얻은 결과를 종래 유동 양식 선도와 비교·분석하는 것은 세관 내 증발 유동 특성을 파악하는데 매우 유익하다.

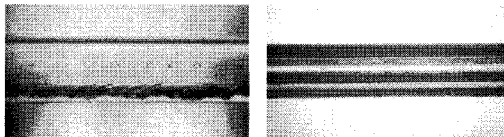
$G = 200 \text{ kg/m}^2\text{s}$, ID 8 mm $G = 200 \text{ kg/m}^2\text{s}$, ID 2 mm



(a) $x = 0.1$ stratified flow (a) $x = 0.1$ wavy flow



(b) $x = 0.3$ wavy flow (b) $x = 0.3$ wavy-annular flow



(c) $x = 0.7$ wavy flow (c) $x = 0.7$ annular flow

← Flow direction

그림 3. 내경 2 mm와 8 mm관내 R-134a의 질량유속에 따른 유동양식 사진.

3.2 실험 결과와 유동 양식선도의 비교

종래 대구경관에서는 대표적으로 Baker[7], Mandhane 등[8] 그리고 Taitel-Dulker[9] 등이 제안한 단일 유동 양식 선도가 있으며, Bennett 등[10]와 Bergles 등[11]이 제안한 증발-응축 유동 양식 선도가 있다. 그리고 최근에는 Wambsganss 등[4]과 Dobson 등[12]이 세관 내 단일 유동 양식 선도와 증발 유동 양식 선도를 각각 제안하였다. 따라서, 본 연구에서는 종래 대구경관에서 가장 일반적으로 널리 사용되고 있는 Mandhane과 Taitel-Dulker 유동 양식 선도, 그리고 본 연구에서 실시한 증발 유동 가시화 실험 조건과 가장 유사한 실험 조건에서부터 제안된 Dobson 등의 유동 양식 선도와 본 실험 결과를 비교하였다.

그림 4는 R-134a의 내경 2 mm 관 내유동 양식을 Taitel-Dulker의 유동 양식 선도에 나타난 것이다. 선도 내 실선은 각각의 유동 양식의 영역 경계를 지시하고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, Taitel-Dulker 선도는 파상환상류와 환상류 영역에서는 실험 결과를 잘 예측하고 있지만, 파상류 영역의 실험 결과와는 많은 차이를 나타내었다. 이는 세관 내 이상 유동에서는 종래 대구경관 내 유동보다 낮은 진도에서부터 파상류가 발생하여 높은 F 값을 가지기 때문이다. 따라서, Taitel-Dulker 선도가 비록 유

체의 물성치와 관경의 변화를 고려하고 있지만, 증발 현상과 같은 상 변화와 세관의 기하학적 형상에 의한 유동 양식의 변화 등을 충분히 고려하지 못하는 것으로 보인다. 따라서, Taitel-Dulker 선도를 세관 내 증발 유동에 적용 시에는 신중한 고려가 필요한 것으로 판단된다.

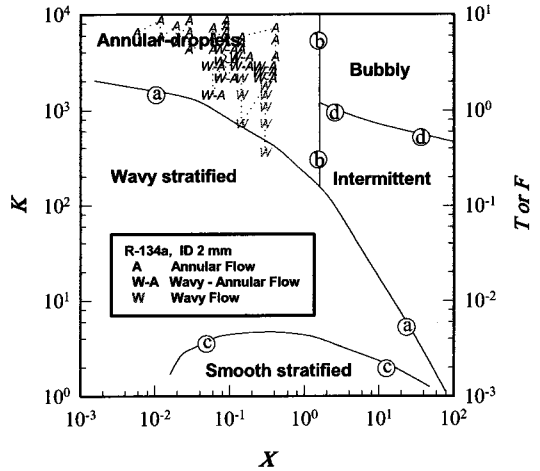


그림 4. Taitel-Dulker의 유동양식 선도에 내경 2 mm관에 대한 유동형태와 비교.

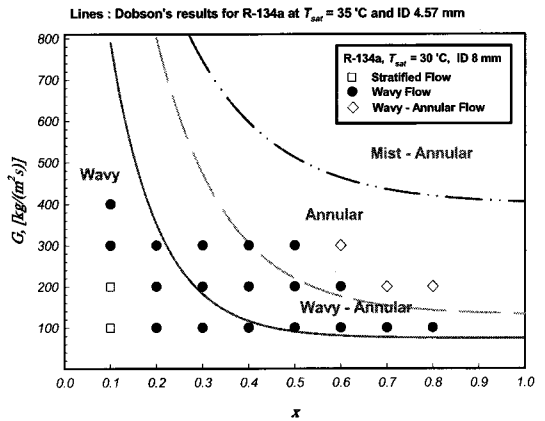


그림 5. Dobson의 유동양식 선도에 내경 8 mm관에 대한 유동형태와 비교.

그림 5는 내경 8 mm 관에서 관찰한 증발 유동 양식을 Dobson의 유동 양식 선도에 나타낸 것이다. Dobson의 유동 양식 선도는 R-134a를 작동 유체로 하여, 내경 4.57 mm 인 수평 평할관 내 증발 유동 실험에서 얻은 결과를 가지고 제안한 유동 양식 선도이다. 그림에서, 횡축은 건도를 나타내고 종축은 유체의 질량 유속을 나타낸다. 그리고 3 가지 선은 각각의 유동 양식을 구분하는 영역 경

계를 지시한다. 그림에서 알 수 있듯이, Dobson의 유동 양식 선도가 내경 8 mm 관 내 증발 유동 양식과 많은 차이가 나타남을 알 수 있는데, 특히, 저 건도 영역($x = 0.4$ 이하)과 고 질량 유속($G = 200 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ 이상)에서 실험 결과와 많은 차이가 발생하였다. 그림 6은 내경 2 mm 관에서 관찰한 증발 유동 양식을 Dobson의 유동 양식 선도에 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, Dobson의 유동 양식 선도가 건도 0.1이며, 고 질량 유속($G = 600 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ 이상) 영역에서 실험 결과와 잘 일치하지 않으며, 파형-환상류 영역에서 환상류가 발견되고 있지만, 전반적으로 실험 범위에서 내경 2 mm 관 내 증발 유동을 잘 예측하고 있음을 알 수 있었다. 이는 Dobson의 유동 양식 선도가 내경 4.57 mm 관 내 증발 유동 실험으로부터 제안되었기 때문에, 여러 가지 세관 내 증발 유동 특성을 충분히 고려하고 있기 때문이라고 여겨진다. 따라서, 세관 내 증발 유동 양식을 예측하는데 있어서, Mandhane과 Taitel-Dukler 유동 양식 선도를 적용하는 것보다는 세관 내 증발 유동 실험으로부터 제안된 Dobson의 유동 양식 선도를 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

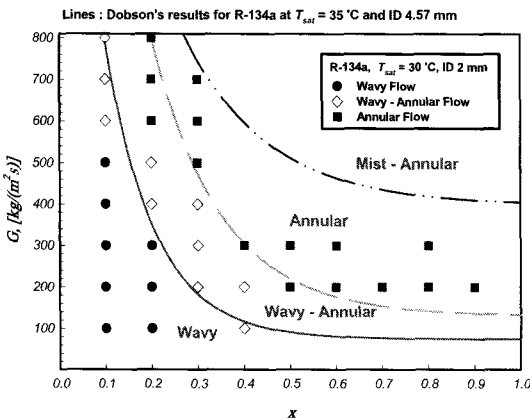


그림 6. Dobson의 유동양식 선도상에 내경 2 mm관에 대한 유동형태와 비교.

4. 결론

내경 8 mm의 대구경관과 내경 2 mm 세관 내 R-134a의 증발 유동 실험을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 내경 2 mm 관의 경우가 내경 8 mm 관보다 낮은 건도 영역 ($x = 0.1 \sim 0.2$) 및 낮은 질량 유속 영역 ($G = 100 \sim 200 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$)에서부터 파상류, 파상-환상류 그리고 환상류가 발생하였다.

- (2) 내경 2 mm 관 내 증발 유동 양식은 종래의 대구경 관에서 제안된 Baker, Mandhane 그리고 Taitel-Dukler의 이상 유동 양식 선도와 큰 차이를 나타내었으며, 반면에, Dobson의 유동 양식 선도는 세관 내 증발 유동을 비교적 잘 예측할 수 있었다. 그러나, 세관을 적용하는 열교환기의 합리적인 설계를 위해서는 세관 내 이상 유동 양식을 예측할 수 있는 신뢰성 높은 새로운 유동 양식 선도의 개발과 더불어 이 분야의 보다 많은 기초 연구가 요망된다.

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", International Journal of Refrigeration, Vol. 13, pp. 62-72, 1990.
- [3] Yasunobu Fujita, "Boiling heat transfer and its mechanism", J. HTST, Vol. 30, No. 141, pp. 27-39, 1987.
- [4] M. W. Wambsganss, and J. A. Jendrzejczyk, "Determination and characteristics of the transition to two-phase slug flow in small horizontal channels", Trans. ASME, Vol. 116, March, pp. 140-146, 1994.
- [5] S. Lin, P. A. Kew and K. Cornwell, "Two-phase flow regimes and heat transfer in small tubes and channels", Proceedings of 11th IHTC., Vol. 2, pp 45-50, 1998.
- [6] J. Gallagher, M. McLinden, G. Morrison and M. Huber, "NIST Thermodynamic Properties and Refrigerant Mixtures Database (REFPROP)", Version 6.02, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, U.S.A, 1996.
- [7] O. Baker, "Design of pipe lines for simultaneous flow of oil and gas", Oil and Gas J. 53, pp. 185-195, 1954.
- [8] J. M. Mandhane, "A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes", Int. J. Multiphase flow, Vol 1, pp. 537-554, 1974.
- [9] Y. Taitel and A. E. Dukler, "A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near

horizontal gas-liquid flow", A.I.Ch.E. J. 22, pp. 47 - 55, 1976.

- [10] A. W. Bennett, G. F. Hewitt, H. A. Kearsley, R. K. F. Keays and P. M. C. Lacey, "Flow visualization studies of boiling at high pressure", Proc. Inst. Mech. Eng., 184, Pt 3C-Boiling Heat Transfer, pp. 260-270, 1966.
- [11] A. E. Bergles, R. F. Lopina and M. P. Fiori, "Critical-heat-flux and flow pattern observation for low-pressure water flowing in tubes", Trans. ASME, Ser. C, 89-1, pp. 69-74, 1967.
- [12] M. K. Dobson, J. C. Chato, D. K. Hinde and S. P. Wang, "Experimental evaluation of internal condensation of refrigerations R-12 and R-134a", Trans. ASHRAE, No-94-5-3, pp. 744-754, 1994.

손 창 효(Chang-Hyo Son)

[정회원]



- 1998년 2월 : 여수수산대학교 냉동공학과 (공학사)
- 2000년 2월 : 부경대학교 냉동공조공학과 (공학석사)
- 2004년 8월 : 부경대학교 냉동공조공학과 (공학박사)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 부경대학교 기계공학부 누리계약교수

<관심분야>

냉동공조용 열교환기 설계 및 제작, 냉동 및 열펌프 시스템 설계