

## 수평관내 R-290과 R-600a의 증발 열전달 특성

손창효<sup>1\*</sup>

### Evaporation heat transfer characteristics of R-290 and R-600a in the horizontal tubes

Son Chang Hyo<sup>1\*</sup>

**요약** 본 논문은 수평 이중관식 열교환기 내 프레온계 냉매의 대체냉매인 탄화수소계 냉매(R-290과 R-600a)의 증발 열전달 계수에 대한 실험적 결과를 나타내었다. 증발기의 내관 내경은 각각 10.07 mm와 6.54 mm의 2가지를 사용하였다. 증발실험은 질량유속 35.5~210.4 kg/m<sup>2</sup>s이고, 냉각용량 0.95~10.1 kW인 조건에서 수행하였다. 실험결과를 요약하면, 탄화수소계 냉매 R-290과 R-600a의 증발 열전달 계수가 프레온계 냉매 R-22보다 높았다. 즉, R-22의 증발 열전달 계수에 비해, R-290과 R-600a는 각각 56.7~70.1%와 46.9~59.7% 정도 높았다. 실험데이터와 종래의 상관식을 비교한 결과, 모든 냉매와 관경에 대해서 Kandlikar 상관식이 가장 좋은 일치를 보였다.

**Abstract** This paper presents the experimental results of evaporation heat transfer coefficients of HC(e.g. R290 and R600a), R-22 as a HCFCs refrigerant in horizontal double pipe heat exchangers, having four different inner diameters of 10.07 mm and 6.54 mm respectively. The experiments of the evaporation process were conducted at mass flux of 35.5~210.4 kg/m<sup>2</sup>s and cooling capacity of 0.95~10.1 kW. The main results were summarized as follows : The average evaporation heat transfer coefficient of R-290 and R-600a was higher value than that of R-22. In comparison with R-22, the evaporation heat transfer coefficient of R-290 and 600a is approximately 56.7~70.1% and 46.9~59.7% higher, respectively. In comparison with experimental data and some correlations, the evaporation heat transfer coefficients are well matched with the Kandlikar's correlation regardless of a type of refrigerants and tube diameters.

**Key Words** : Hydrocarbon refrigerant(탄화수소 냉매), Evaporation heat transfer coefficient(증발 열전달 계수), Horizontal tube(수평관)

### 1. 서론

열역학적으로 우수하고 안전한 냉매인 프레온계 냉매(CFCs와 HCFCs)는 1930년대 이후로 냉동공조 장치의 작동유체로 광범위하게 사용되어 왔다. 그러나, 최근 들어 이러한 냉매들은 오존층 파괴와 지구 온난화 지수가 높은 냉매로 분류되어 몬트리올과 교토 의정서와 같은 국제 협의에서 사용을 제한하고 있다. 몬트리올 의정서의 주요 내용은 오존 파괴 물질의 생산과 사용을 금지하는 것이다. 개발도상국에서는 프레온 냉매의 사용을 금지하는 규제가 이루어지고 있으며, 향후 대부분의 나라에서는 프레온계 냉매를 전혀 사용하지 못할 것이다.

이로 인해 많은 연구자들은 대체냉매로서 자연냉매의 실현 가능성을 폭넓게 조사하기 시작했다. 여기서, 자연 냉매란 자연계로부터 손쉽게 얻을 수 있는 즉, 인위적인 합성물이 아닌 천연물질을 의미하는 것으로, 탄화수소(HCs), 질소(N<sub>2</sub>), 헬륨(He), 물(H<sub>2</sub>O) 등이 있다. 이러한 자연냉매 중에 탄화수소계 냉매는 지구 온난화와 오존층 파괴 지수가 0에 가깝기 때문에 프레온계 냉매의 대체냉매로 각광을 받기 시작했다. 그러나, 유럽을 제외한 미국과 일본 등의 선진국에서는 탄화수소의 가연성으로 인해 대체냉매로서 사용하는 것을 고려하지 않고 있다. 하지만, James [1]은 가정용 냉장고의 경우 프레온 냉매에 비해 충전량이 50% 밖에 되지 않기 때문에 가연성에 의한 폭발 가능성은 무시할 수 있다고 하였다. 게다가, 간단한 안전장치만 설치할 경우 대형 냉동장치에서 발생할 수 있는 폭발성은 방지할 수 있다.

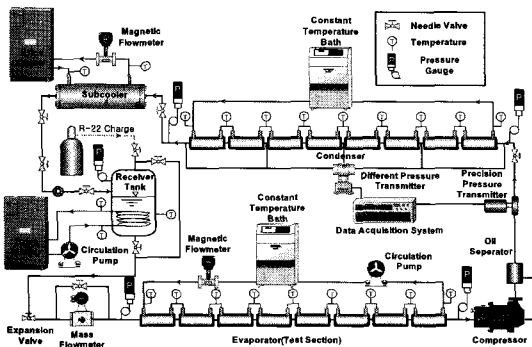
<sup>1</sup>부경대학교 기계공학부

\*교신저자: 손창효(sonch@pknu.ac.kr)

지금까지 발표된 논문들 중에서 탄화수소 냉매를 적용한 냉동공조 시스템의 성능에 관한 연구는 많이 발표되어 있지만, 증발 열전달에 관한 연구는 부족한 실정이다. 따라서, 본 논문은 증기 압축식 열펌프 시스템의 작동유체로서 탄화수소에 대한 지식을 넓히고 이에 대한 기술을 개발하기 위해 R-600a와 R-290에 대한 전열 특성을 파악하고자 한다. 특히, R-22 냉매에 대한 대체냉매로서 열펌프 시스템용 증발기의 열전달 특성을 실험적으로 연구함으로써 최적설계를 위한 기초자료를 제공하고자 한다. 이를 위해 수평 이송관식 증발기를 가진 열펌프 장치를 제작하여 대체냉매로서 탄화수소 R-600a와 R-290의 실험 가능성을 확인하고자 실험적으로 조사하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

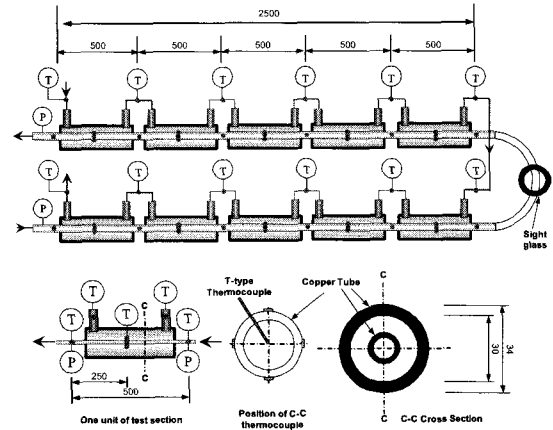
실험장치는 그림 1에서와 같이 물을 열원으로 하는 가장 기본적인 증기 압축식 열펌프 사이클을 구성하고 있으며, 크게 냉매가 순환되는 경로와 열원수(2차유체)가 순환되는 경로로 구성되어 있다. 냉매는 압축기, 응축기, 보조응축기, 질량유량계, 팽창밸브, 증발기, 압축기의 순으로 순환된다. 2차유체는 열원수 공급 장치, 온도 조절기, 물 펌프, 수유량계, 시험 구간인 증발기의 순으로 순환된다.



[그림 1] 실험장치의 전체적인 개략도

그림 2는 시험부인 증발기로서, 내관의 내경은 10.07 mm, 6.54 mm로 내경이 서로 다른 2가지의 동관으로 제작되었다. 그리고 외관은 내경 29 mm, 외경 34 mm인 동관을 사용하였다. 또, 시험부 입구측에서 500 mm 등간격 소구간으로 10구간으로 구분하였으며, U-bend를 지난 출구측에 1000 mm의 한구간으로 구분하였다. 이와 같이 1000 mm의 소구간으로 구분한 것은 이 구간에서 작동유

체의 유동이 환상류에 의한 영향보다 슬러그류에 의한 영향이 지배적이므로, 상변화에 의한 열전달 계수가 거의 발생하지 않을 것이라고 예측해서 구분하였다.



[그림 2] 증발기의 상세도

증발기에서의 열량과 열전달 특성을 알기 위하여 냉각수의 온도 및 유량, 냉매의 온도 및 유량, 응축기 내관벽면온도 등을 측정하였는데, 그림 2에 나타난 바와 같이 평활관에서 냉매, 냉각수 및 열교환기 내관의 벽면 온도 측정은 각각 소구간별로 11 지점, 내관의 벽면온도는 1개 지점당 원주방향 90°간격으로 상부, 측부, 하부의 3 지점에서 측정하였다. 그리고 등간격으로 구분된 소구간 사이의 30 mm의 간격을 두어서 관벽온도를 측정하였다. 냉매온도는 이들 각 지점마다 관의 상부에서 관경 3/4위치까지 열전대를 삽입하여 포화온도에 근접하게 감지할 수 있도록 하였다. 또한 압축기의 입출구에 설치된 압력계로 시스템의 저압 및 고압을 측정하였고, 증발기 및 응축기 입출구에 설치된 압력계로는 냉매의 관내의 압력강하를 측정할 수 있게 하였다. 표 1은 실험조건을 정리한 것이다. 본 논문의 불확실도에 대한 결과는 표 2에 나타내었다.

[표 1] 실험조건

Parameters	R-22	R-290	R-600a
Test section	Horizontal smooth tube		
I.D. of test section(O.D.), mm	10.07(12.07), 6.54(7.93)		
Mass flux (kg/m <sup>2</sup> s)	50.0~210.4	35.5~165.1	35.5~178.8
Evaporation temperature (K)	263 ~ 283		

[표 2] 불확실도에 대한 결과값

Parameters	Uncertainty
Temperature (°C)	± 0.1°C
Pressure (kPa)	± 2kPa
Water flow rate (kg/s)	± 1%
Refrigerant flow rate (kg/s)	± 1%
Mass velocity (kg/m <sup>2</sup> s)	± 1%
Vapor quality	± 7.5%
Heat flux (kW/m <sup>2</sup> )	± 7.8%
Heat transfer coefficient (kW/m <sup>2</sup> K)	± 9.1%

### 3. 데이터 정리

본 연구에서 사용한 R-22와 그 대체 냉매인 R-290, R-600a의 열물성값 계산은 NIST에서 개발한 냉매 물성 계산 프로그램인 'REFPROP (version 6.01)[2]'를 이용하였고, 이러한 열물성값을 이용하여 증발 열전달 특성을 파악하기 위한 실험 데이터의 분석에는 다음과 같은 계산식을 사용하였다. 우선, 증발기에서의 열교환량은 다음의 식 (1), (2)와 같이 계산하였다.

$$Q_{ew} = m_{ew} \cdot c_{p,ew} \cdot (T_{e,out} - T_{e,in}) \quad (1)$$

$$Q_{er} = m_{er} \cdot (i_{e,in} - i_{e,out}) \quad (2)$$

여기서,  $Q_{ew}$ 와  $Q_{er}$ 는 각각 열원수에 의한 열교환량과 냉매의 엔탈피차에 의한 열교환량이고,  $m_{ew}$ 와  $m_{er}$ 은 각각 증발기측 열원수의 유량과 냉매의 순환량이다. 그리고  $T_{e,in}$ 과  $T_{e,out}$ 는 각각 증발기측 열원수의 입구와 출구 온도를 나타내며,  $c_{p,es}$ 는 증발기측 열원수의 비열을 나타낸다. 또  $i_{e,in}$ 과  $i_{e,out}$ 는 각각 증발기 입구와 출구에서의 포화 냉매액 및 포화 냉매 증기의 엔탈피를 나타낸다.

국소 열전달 계수는 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$h_{e,loc} = \frac{q_e}{T_{e,wi} - T_{er}} \quad (3)$$

증발기 소구간에서의 열유속  $q_e$ 는 다음과 같은 식 (4)로부터 계산하였다.

$$q_e = \frac{Q_{ew}}{\pi \cdot d_i \cdot \Delta z} \quad (4)$$

증발기의 평균 열전달 계수  $h_{e,avg}$ 는 이상의 식을 조합하여 각각 다음의 식 (5)로부터 계산된다.

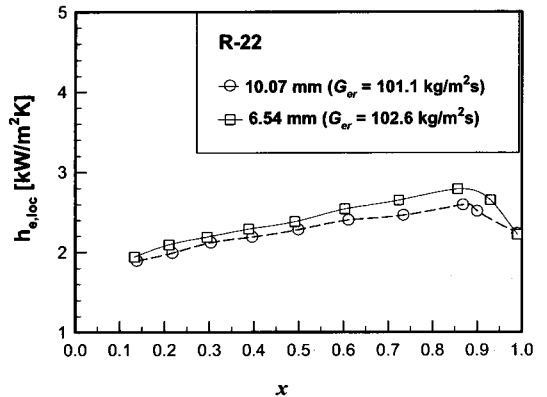
$$h_{e,avg} = \sum \frac{h_{e,loc}}{n} \quad (5)$$

여기서,  $h_{e,loc}$ 은 식 (3)로부터 계산되는 소구간의 국소 열전달 계수 이고,  $n$ 은 소구간의 수이다.

## 4. 실험결과 및 고찰

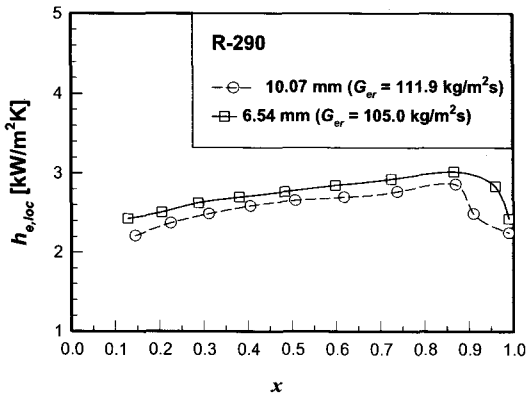
### 4.1 국소 증발 열전달

그림 3-5는 각 냉매별 관경변화에 따른 국소 증발 열전달계수를 나타낸 것이다. 이들 그림에서 세가지 냉매 모두 관경이 작아질수록 국소 증발 열전달계수가 높아지는 경향을 보이고 있다. 이러한 현상은 관경이 작아질수록 냉매와 관벽과의 전열접촉 면적, 즉, 냉매액막과 냉각수 간의 유효전열면적이 증가함으로써 압력강하에 의한 열전달 감소보다 전열촉진 효과가 더 크게 작용함으로써 열전달이 증가되는 것으로 판단된다.

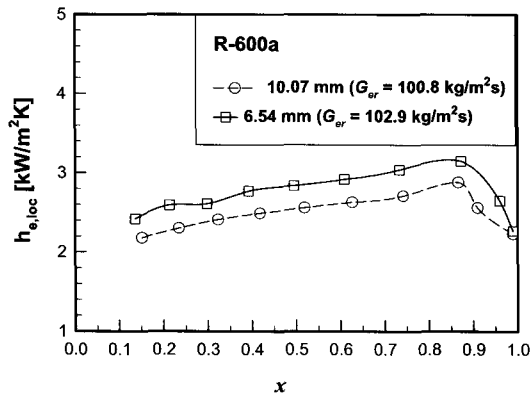


[그림 3] 증기건도와 관경 변화에 따른 R-22의 증발 열전달 계수

그림 3은 동일 질량유속에서 관경변화에 따른 R-22의 국소 증발 열전달계수를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 열전달 계수는 모든 관경에서 건도가 증가함에 따라 증가하다가 건도가 0.9정도 되는 영역이후로 급격히 감소하는 경향을 보였다. 이는 건도 0.9 영역 이후로는 증발이 거의 완료되는 영역으로 냉매액이 냉매증기로 변화하여 관내에 증기가 가득차기 때문이다. 모든 관경에서 건도 0.73-0.87 영역을 제외한 구간에서 거의 비슷한 열전달 계수를 보였다.



[그림 4] 증기건도와 관경 변화에 따른 R-290의 증발 열전달 계수



[그림 5] 증기건도와 관경 변화에 따른 R-600a의 증발 열전달 계수

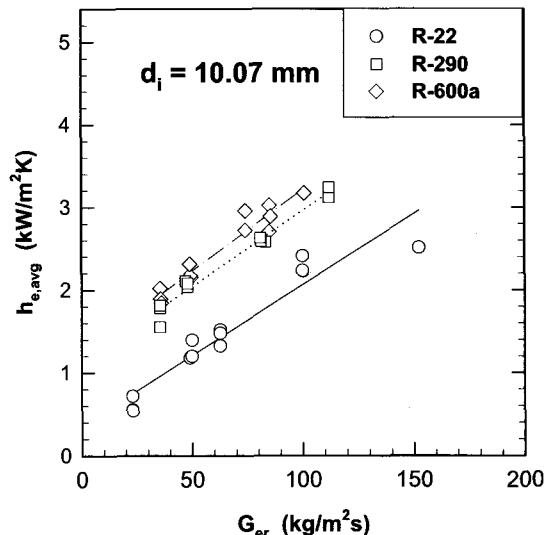
그림 4는 관경변화에 따른 R-290의 국소 증발 열전달 계수를 나타낸 것이다. R-290의 국소 증발 열전달계수는 R-22보다 모든 관경에서 약간 높게 나타났지만, R-22와 유사한 경향을 나타내었다. R-290의 관경변화에 따른 열전달계수의 경향을 살펴보면, 열전달계수가 거의 비슷한 값을 나타내고 있다. 그리고, R-22의 증발 열전달계수와 비교해보면 10.07 mm의 열전달계수는 -1~19% (평균 12.4%), 6.54 mm는 7~25% (평균 14.7%)정도 향상되었다. 그림 5는 관경변화에 따른 R-600a의 국소 증발 열전달 계수를 나타낸 것이다. R-600a는 R-22와 비슷한 경향을 보였으며, R-22와 R-134a보다는 우수한 열전달계수를 나타냈었고, R-290과는 약간 높은 열전달계수를 나타내었다.

R-22의 증발 열전달계수와 비교해보면, 10.07 mm의 열전달계수는 0~16% (평균 10.3%), 6.54 mm는 0~25% (평균 15.3%) 정도 향상되는 경향을 보였다. 특히 고건도 영역에서 열전달계수가 더 많이 향상되는 것을 알 수 있었다. 그러므로, 증발에서는 탄화수소계 냉매인 R-290과

R-600a가 프레온계 냉매인 R-22의 대체 가능성을 확인할 수 있었다. 그리고 소구경관에서 열전달계수가 더욱더 향상되므로 가정용 냉장고나 에어컨과 같은 관경이 작은 소형 냉동공조 기기에 탄화수소계 냉매로의 대체가 적절하다고 생각된다.

#### 4.2 평균 증발 열전달

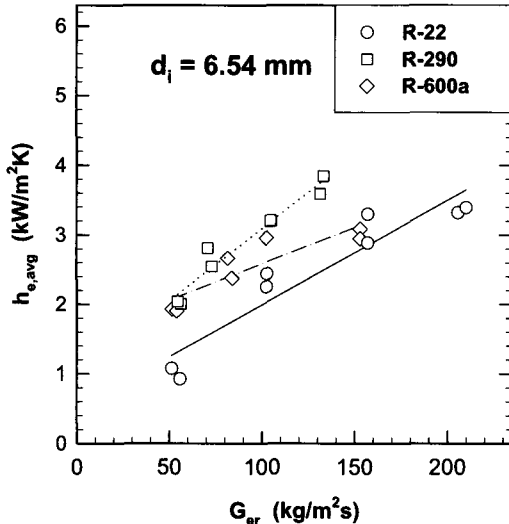
그림 6~7은 관경별로 세가지 냉매 (R-22, R-290, R-600a)의 질량유속  $G_{er}$ 에 대한 평균 증발 열전달계수  $h_{e,avg}$ 를 나타낸 것이다. 평균 증발 열전달계수는 건도  $x$ 에 따른 국소 증발 열전달계수  $h_{e,loc}$ 를 통합한 식 (3)을 사용함으로써 구할 수 있다.



[그림 6] 내경 10.07 mm관내 질량유속 변화에 따른 증발 열전달 계수의 비교

그림 6은 내경 10.07 mm에서의 평균 증발 열전달계수를 나타낸 것으로서, 질량유속에 비례하여 평균 증발 열전달계수가 증가하는 일반적인 경향을 보이고 있다. 탄화수소계 냉매 (R-290, R-600a)가 프레온계 냉매 (R-22, R-134a)의 평균 증발 열전달계수보다 우수하게 나타났으며, 질량유속에 따른 평균 증발 열전달계수의 향상도 탄화수소계 냉매의 경우에서 보다 더 우수하게 나타났다. 그리고 프레온계 냉매 (R-22)의 질량유속에 따른 평균 증발 열전달계수의 향상도 탄화수소계 냉매 (R-290, R-600a)의 평균 증발 열전달계수의 향상이 더 우수한 것으로 나타났다. 그래서 저질량유속에서는 프레온계 냉매와 탄화수소계 냉매의 차이가 얼마나지 않았지만, 고질량유속으로 갈수록 탄화수소계 냉매의 평균 증발 열전달계수가 점점 더 우수하게 나타나는 경향을 보였다. R-22와

비교해서 각 냉매별 평균 증발 열전달계수를 살펴보면, R-290의 경우에는 약 50~79% (평균 67.7%) 정도 높게 나타났으며, R-600a의 경우에는 약 32~96% (평균 55.4%) 정도 높게 나타났다.



[그림 7] 내경 6.54 mm 관내 질량유속 변화에 따른 증발 열전달 계수의 비교

그림 7은 내경 6.54 mm에서의 평균 증발 열전달계수를 나타낸 것으로서, 10.07 mm의 경우와 비슷하게 R-290이 증가하는 경향을 보였다. 6.54 mm의 경우 R-22와 비교해서 각 냉매별 평균 증발 열전달계수를 살펴보면, R-600a의 경우에는 약 2~110% (평균 약 59.7%) 정도 높게 나타났다.

R-22의 관경 변화에 따른 평균 증발 열전달계수를 살펴보면, 내경 10.07 mm의 경우보다 6.54 mm일 때의 평균 증발 열전달계수는 약 13.5% 정도 높게 나타났으며, R-134a의 경우에는 약 1~15% (평균 6.1%) 정도 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 R-290의 평균 증발 열전달계수는 내경 10.07 mm의 경우보다 6.54 mm일 때, 약 0~14% (평균 11.5%) 정도 증가하였으며, R-600a의 경우에는 약 1~17% (평균 10.47%) 정도 증가하는 것으로 나타났다. 여기에서 관경변화에 따른 평균 증발 열전달계수의 향상 정도는 세가지 냉매가 모두 유사한 정도를 보였다. 그리고 모든 관경에서 평균 증발 열전달계수는 R-600a와 R-290이 높게 나타났다.

#### 4.3 종래의 증발 열전달 상관식과 비교

증발기에서의 실험에 의해서 얻은 결과를 Kandlikar[3], Gungor-Winterton[4], Jung 등[5], 그리고

Shah[6]의 상관식과 비교하였다. 이들 상관식을 이용하여 동일질량유속에서 관경과 작동유체 (R-22, R-290, R-600a)를 변화시켜 서로 비교한 결과를 표 3에 나타내었다. 표 3에서 알 수 있듯이, 모든 관경과 냉매에 대해 큰 이탈정도를 보였다. 그 중에서 Shah의 상관식이 가장 큰 차이를 보인 반면에 Kandlikar 상관식과는 가장 좋은 일치를 나타내었다.

[표 3] 상관식으로 구한 예측값과 실험에 의한 측정값의 오차

Author	Refrigerant	Average deviation, [%]	
		10.07 mm	6.54 mm
Shah	R-22	3.8	1
	R-290	15.4	17
	R-600a	17	25.8
Jung et al.	R-22	9.5	9.1
	R-290	3.8	1.9
	R-600a	8.7	20.7
Gungor-Winterton	R-22	11.3	11.7
	R-290	3.8	1.9
	R-600a	23.4	20.2
Kandlikar	R-22	4.7	9.8
	R-290	4.1	5.2
	R-600a	9	11.8

## 5. 결론

본 장에서는 R-22의 대체 냉매로 기대되는 탄화수소계 자연냉매인 R-290과 R-600a의 관경변화에 따른 증발 전열 특성에 대한 실험을 한 결과를 다음과 같이 정리하였다.

냉매별 관경변화에 따른 국소 증발 열전달계수의 변화는 세가지 냉매 모두 관경이 작아질수록 열전달계수가 높게 나타나는 경향을 보였다. 국소 증발 열전달계수는 모든 관경에서 건도가 증가함에 따라 증가하다가 건도 0.9 정도 되는 영역이후로 급격히 감소하는 경향을 보였다. 그리고 냉매들의 국소 증발 열전달계수는 R-600a와 R-290이 가장 높았으며, R-22의 순으로 나타났다.

평균 증발 열전달계수에 있어서는 실험에 사용된 관경 (10.07 mm와 6.54 mm)에서 모두 R-600a와 R-290이 R-22 보다 우수하게 나타났다. 그리고 R-22와 비교해서 각 냉매들의 평균 증발 열전달계수의 향상정도를 살펴보면, R-290은 약 25~104%, R-600a는 약 2~178% 정도 높게 나타났다. 평균 증발 열전달계수는 질량유속에 비례하

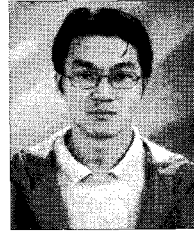
여 증가하는 일반적인 경향을 나타내고 있다. 그리고 관경 변화에 따른 평균 증발 열전달계수를 내경 10.07 mm와 내경 6.54 mm를 비교한 결과, 내경 6.54 mm에서 모든 냉매들이 유사한 정도를 보이면서 증가하였다. 또 실험에 의한 증발 열전달 계수를 Shah, Gungor-Winterton, Kandlikar, Jung 등의 상관식과 비교한 결과 모든 관경에서 Kandlikar 상관식과 좋은 일치를 보였다. 그리고 Gungor-Winterton, Shah 상관식과도 어느 정도 일치하는 것을 보였다.

## 참고문헌

- [1] James, R. W., Missenden, J. F., The use of propane in domestic refrigerators, International Journal of Refrigeration 15 (2) 95~100, 1992.
- [2] McLinden, M. O., Klein, S. A., Lemmon, E. W., Peskin, A. P., NIST Thermodynamic Properties and Refrigerant Mixtures Database(REFPROP), Version 6.01, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, U.S.A., 1998.
- [3] Kandlikar, S. G., A general correlation for saturated two-phase flow boiling horizontal and vertical tubes, Trans. ASME, Vol. 112, pp. 219~228, 1990.
- [4] Gungor, K. E. and Winterton, R. H. S., Simplified General Correlation for Flow Saturated Boiling and Comparisons of Correlations with Data, Chem. Eng. Res. Des., Vol. 65, pp. 148~156, 1987.
- [5] Jung, D. S., McLinden, M., Radermacher, R., and Didion, D., 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.
- [6] Shah, M. M., Chart Correlation for Saturated Boiling Heat Transfer Equations and Further Study, ASHRAE Transactions, Vol. 88, pp. 185~196, 1982.

손 창 호(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