

# 만액식 증발기의 열전달 촉진관에서 저온 비등열전달의 이력현상 특성

윤 필 현<sup>†</sup>, 박 종 익<sup>\*</sup>, 정 진 회, 강 용 태<sup>\*</sup>

LG전선(주) 기계연구소, <sup>\*</sup>경희대학교 기계공학과

## Hysteresis on Boiling Heat Transfer at Low Temperature on Enhanced Tubes in a Flooded Evaporator

Pil-Hyun Yoon<sup>†</sup>, Jong-Ick Park<sup>\*</sup>, Jin-Hee Jeong, Yong-Tae Kang<sup>\*</sup>

Machinery Research Lab., LG Cable Ltd., Gyeonggi 431-080, Korea

<sup>\*</sup>Mechanical and Industrial Systems Engineering, Kyung-Hee University, Gyeonggi 449-701, Korea

(Received September 19, 2002; revision received February 24, 2003)

**ABSTRACT:** The boiling characteristics for R134a are studied to clarify the hysteresis at low temperature on enhanced tubes of a flooded evaporator. Initial boiling conditions, refrigerant temperature, and inlet temperature of the chilled water are considered as the key parameters of the experiments. Unlike previous studies of the boiling heat transfer with uniform heat flux and uniform wall temperature, the wall temperature was varied along the tube. In this study, it was found that the hysteresis of the temperature overshoot (TOS) at the onset of nucleate boiling initially at the inlet section of the tube. It is also concluded that the abnormal operation can be avoided during the low temperature boiling if the refrigeration system is started with LMTD larger than 3.4°C at initial stage and larger than 1.0°C at normal stage.

**Key words:** Pool boiling(풀비등), Hysteresis(이력현상), R134a, Flooded evaporator(만액식 증발기), Enhanced tube(전열촉진관)

### 기 호 설 명

$A$  : 전열면적 [ $m^2$ ]  
 $A_i$  : 내측 전열면적  
 $d_i$  : 내측 직경  
 $d_o$  : 외측 직경  
 $C_p$  : 정압비열 [ $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ]  
 $h_i$  : 내측 열전달계수  
 $k$  : 열전도도 [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]  
 $L$  : 전열관 길이

$\dot{m}$  : 질량유량 [ $kg/s$ ]  
 $\dot{Q}$  : 열전달량 [ $W$ ]  
 $q$  : 단위면적당 열유속,  $\dot{Q}/A$  [ $W/m^2$ ]  
 $T$  : 온도 [ $^\circ C$ ]  
 $\Delta T_{LM}$  : 대수평균온도차, LMTD [ $^\circ C$ ]  
 $U$  : 총합 열전달계수 [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]  
 $v$  : 유속 [ $m/s$ ]  
 $+$  : 증가  
 $-$  : 감소

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-31-450-8396; fax: +82-31-450-8361

E-mail address: phyoon@cable.lg.co.kr

하첨자

$cw$  : 냉수, chilled water

- i* : 입구
- o* : 출구
- ref* : 냉매
- w* : 관외측 벽면

1. 서 론

비등열전달 현상은 온도차에 의존하는 현열열전달에 비해 상변화할 때의 잠열효과와 증기기포의 교란에 의한 강제대류효과가 복합적으로 작용하여 열전달 성능을 향상시킨다. 특히 핵비등영역에서 그 효과가 매우 크므로 산업체나 빌딩의 대형 냉동기에서 널리 사용되는 만액식 증발기 등의 열전달 성능 향상에 적용되고 있다. 과거로부터 열전달 성능을 향상시키기 위해 기계적 성형 가공을 통해 촉진관에서의 비등열전달 향상 및 증기기포의 생성, 이탈 등의 메커니즘 연구가 진행되어 왔다.

그러나 이러한 핵비등 열전달의 뛰어난 성능에 반해 공학장치에의 적용에 있어 좋지 않은 영향을 끼치는 이력현상(hysteresis)도 존재한다는 것이 밝혀졌다. 1950년대에 Corty and Foust<sup>(1)</sup>는 Temperature Overshoot(TOS)라는 이력현상을 공식적으로 처음 발표한 이후로 Oktay<sup>(2)</sup>는 이력현상이 전자장비냉각 등 비등을 이용한 냉각기술의 공학적 이용에 제한을 준다는 결과를 발표했다. 1970년대에 들어 가공 표면에서 이력현상이 현저함을 실험적으로 증명했으며,<sup>(3)</sup> 1990년대에 이르러 핵비등의 지연 또는 벽면과열도의 급격한 감소로 정의되는 “TOS 이력현상”과 열유속의 증가와 감소시에 비등곡선상의 이탈을 의미하는 “Temperature Deviation Hysteresis(TD)” 두 형태로 이력현상을 일반화하였다.<sup>(4)</sup> 이력현상이 나타나는 메커니즘과 원인에 대해서도 연구가 진행되어 왔는데 비등액체의 표면장력과 관련한 물성치, 비등액체와 표면의 조건, 시스템 압력 등이 이력현상의 원인으로 알려지고 있다.<sup>(5)</sup> 또한, 이력현상은 높은 열유속에서의 열전달에 비해 상대적으로 저온인 전자부품 냉각 및 저온 냉동기 등에서 더욱 심각하다고 알려졌다.<sup>(2)</sup>

Fig. 1에 TOS와 TD 이력현상에 대한 비등 특성곡선이 나타나 있다. TOS 이력현상은 비등 초기에 발생하는 현상으로 비등 표면에 열유속이 균일하게 증가할 때 핵비등의 시작이 지연되고, 어

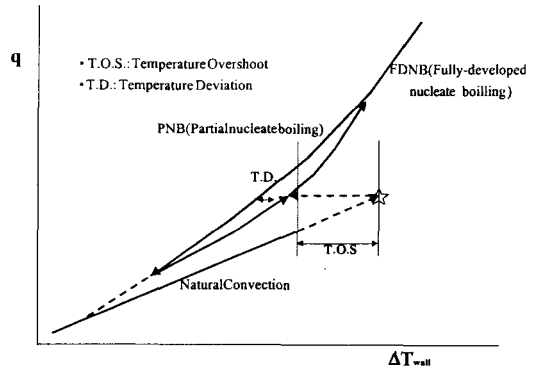


Fig. 1 Characteristic curves of nucleate pool boiling hysteresis.

느 순간 표면에서 작동유체의 순간적인 비등이 일어나면서 벽면과열도가 감소하는 현상이다. 이에 반해 TD 이력현상은 부분핵비등과 완전히 발달된 핵비등 사이의 천이영역에서 발생하고, 열유속의 증가와 감소시 동일한 열유속에 대해 벽면과열도의 차이가 생기는 것이다. 두 이력현상의 원인으로 표면에서 핵생성 능력을 결정짓는 비등액체의 표면장력과 표면노화, 비등액체와 표면간의 열물성치, 표면거칠기, 미세공동의 크기 및 분포 등이 복합적으로 작용한다.

과거의 이력현상에 대한 연구결과들은 대부분 전기적 열원을 사용하여 전체 비등 표면에 균일한 열유속이 전달되는 조건에서 진행되었고 불균일한 열유속이 전달되는 비등 표면에서의 이력현상에 대한 연구결과는 부족한 실정이다. 실제로 국내에서 개발된 빙축열용 R123 저온터보냉동기의 증발기에서 비등이 일어나지 않는 이상동작이 발생했다. R134a 저온터보냉동기에서도 운전 후 전원을 내리고 재가동시 비등이 일어나지 않는 증발기의 이상현상이 확인되었다. 따라서 본 연구에서는 Turbo-B형 성형가공관을 제작하여 R134a의 비등실험을 통해 이력현상을 규명하고, 산업용 냉동기에 적용시 이력현상을 피하기 위한 운전조건을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

이력현상에 대한 과거의 실험적 연구에서는 대부분이 전기적 열원을 사용하여 비등 표면 전체

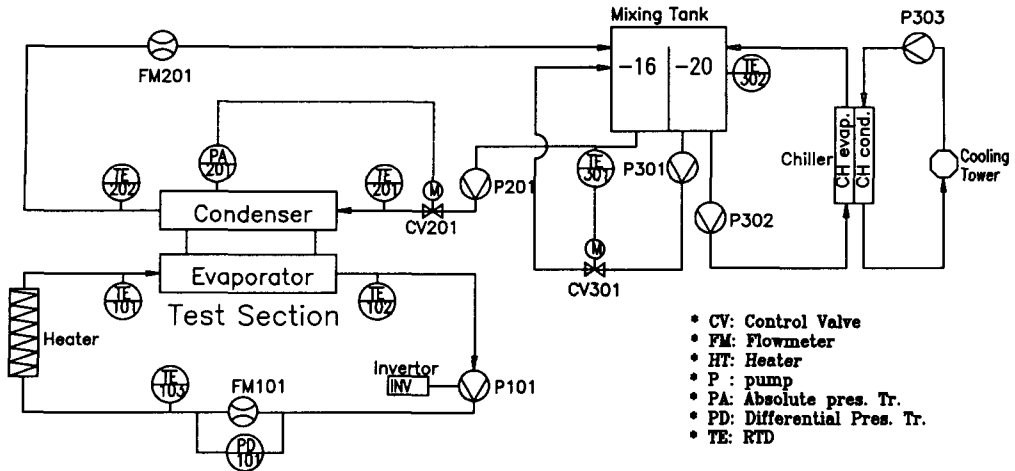


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

에 균일한 열유속이 공급되는 장치를 설계하여 사용했다. 그러나 본 실험에서는 실제 냉동기 조건과 동일하게 냉수가 열원으로 이용되어 전열관 외측의 냉매로 열전달이 이루어져서, 전열관 전체 표면에서 냉수 하류로 갈수록 온도가 낮아지고 열유속 및 열전달계수가 불균일하게 나타난다. 이러한 실험장치 구성도를 Fig. 2에 나타내었다.

비등시험부인 증발기는 쉘-튜브형으로 전열관 내부로 냉수가 흐르고 외측에서 냉매 R134a의 풀비등이 일어난다. 비등용기는 동관과 플랜지를 사용하여 기밀에 주의하며 실험 전열관 교체가 용이하도록 밀폐형으로 제작되었으며 전열관의 비등 성능 확인 및 냉매의 수위를 관찰하기 위하여 고압용 유리로 된 관측창을 설치하였다.

Fig. 3에 나타난 바와 같이 증발기 내에는 길이 2100 mm, 외경 25.4 mm인 4개의 전열관들이 수

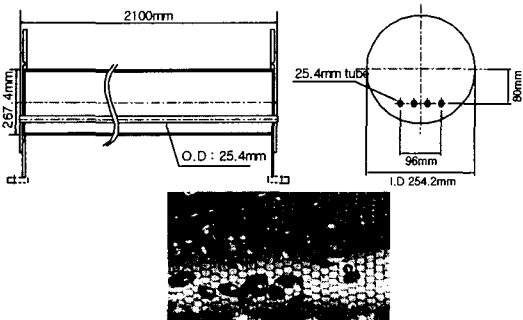


Fig. 3 Test section and photograph of enhanced surface.

평으로 배치되었다. 시험부에서 증발한 냉매증기는 상부에 위치한 응축기에서 응축된 후 증력에 의하여 시험부 하부로 되돌아오게 된다. 응축기 또한 쉘-튜브형 열교환기로 관 내측에는 항온수 조로부터 공급되는 냉각수가 흐르고 관 외측의 냉매증기를 응축시킨다. 모든 유체의 작동온도 조건이 영하의 온도이므로 냉각수는  $-20^{\circ}\text{C}$  이하에서도 얼지 않도록 에틸렌글리콜 46.45%, 물 53.55%을 혼합하고, 냉수는  $-10^{\circ}\text{C}$  내외에서 얼지 않도록 에틸렌글리콜 29.76%, 물 70.24%를 혼합하여 사용하였다. 냉수의 유량은 인버터를 연결한 펌프를 장착하여 조절하고, 직경 80 mm의 냉수 배관에 노즐목 직경비가 0.3인 노즐과 차압계를 설치하여 노즐에서 측정된 차압을 변환하여 유량을 계산하였다. 압력계로 측정되는 비등시험부의 압력신호는 냉각수 라인에 설치된 유량제어밸브로 보내짐으로써 냉각수의 유량조절과 응축기에서의 열교환을 통해 증발기 내의 압력이  $\pm 0.2\%$  이내에서 항상 일정하도록 조절된다. 10 RT급 왕복동 냉동기에 연결되어 항온수조로 사용한 1000 L 용량의 혼합탱크는 내부를 둘로 나누었고 중간에 유량제어밸브를 둬으로써 응축기로 들어가는 냉각수가 일정한 온도를 유지할 수 있도록 하였다.

또한 열전달량을 계산하는데 있어서 가장 중요한 인자는 증발기 및 응축기에서의 순환수의 입출구 온도차로서 대개  $2^{\circ}\text{C}$  이내고 미세한 열손실 및 오차도 비등 열전달계수에 큰 영향을 미치므로 정확한 측정을 위해 정확도  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 의 RTD를 정밀 온도계를 사용하여 바이어스 오차가 0에 가

Table 1 Geometric details of test tube

Inner surface		Outer surface (Turbo-B type)		
Rib height (mm)	Rib angle	Cavity size (mm)	Cavity depth (mm)	Crest/inch
0.67	45°	0.15±0.03	0.85	40

갑도록 보정하여 냉수 입출구 온도계의 차이가 최대 ±0.001℃ 이내가 되도록 한 후 각 열교환기의 입출구 온도를 직접 측정하였다. 냉수의 증발기 입구 온도 조절 및 일정한 열유속의 공급은 증발기 입구에 장착된 열선히터와 이와 연결된 제어판에서 조절된다. 압력 및 온도 등 모든 데이터는 데이터 수집/처리장치를 통해 출력신호를 환산하여 퍼스널 컴퓨터에 저장된다.

실험에 사용된 전열관의 외측 형상은 Tuber-B 형으로 제작된 전열관으로 전열관의 제원을 Table 1에 나타내었다.

2.2 실험방법

실험은 세 가지 형태로 수행되었다.

(1) 증발기 내의 압력과 냉수의 유량을 조절하여 열유속 및 냉매의 포화온도 등 동일한 열적 조건에서 초기 비등 정도가 각기 다른 세 가지 초기상태를 설정한다. 각각의 초기조건마다 냉수에 공급하는 열량을 단계적으로 증가시킨 후 감소시키며 온도 및 압력을 측정한다. Table 2에 각각의 초기 비등조건을 나타내었다.

(2) 냉매의 포화온도를 -8℃로 유지하도록 비등시험부의 시스템 압력을 설정하고 증발기 입구의 냉수에 단계적으로 열량을 증가시킨 후 감소시킨다. 이후 냉매의 포화온도 -9℃, +5℃ 각각에 대해서도 위와 같이 반복한다. 세 경우에 대해 냉수의 유속은 1.94 m/s로 항상 일정하다.

(3) 처음에 높은 열량을 냉수에 공급하여 비등이 매우 활발한 상태가 되도록 만든 후 단계적으로 열량을 감소시킨 후 다시 증가시킨다. 냉수의 유속을 변화시키고 위의 과정을 반복한다.

비등시험부의 냉수에서 냉매로의 열전달률과 총합열전달계수, 대수평균온도차는 다음과 같은 식

Table 2 Boiling conditions for each case

Case No.	Case 1	Case 2	Case 3
Initial boiling	Active	Weak	Inactive
No. of active cavities	Many	Several	Few

으로 계산한다.

$$\dot{Q} = \dot{m} C_{p,cw} (T_{cw,i} - T_{cw,o}) = UA \Delta T_{LM} \quad (1)$$

여기서,

$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{ref} - T_{cw,i}) - (T_{ref} - T_{cw,o})}{\ln\left(\frac{T_{ref} - T_{cw,i}}{T_{ref} - T_{cw,o}}\right)} \quad (2)$$

$$q = \dot{Q}/A \quad (3)$$

$$U = \frac{\dot{Q}}{A \cdot \Delta T_{LM}} \quad (4)$$

비등특성을 확인하기 위하여 벽면과 냉매와의 온도차가 필요하다. 벽면온도를 예측하기 위하여 Wilson Plot 방법을 이용하여 내측 및 외측열전달계수의 실험식을 구성하였다.<sup>(6)</sup> 본 실험의 특성상 벽면온도는 하류로 갈수록 감소하지만 여기서는 그 평균온도를 이용하여 특성을 파악하고자 한다. 냉수와 냉매의 평균온도차이를 LMTD로 표현한다면 평균벽면온도와 냉매와의 온도차는 열흐름 방정식을 이용하여 식(5)와 같이 구할 수 있다.

$$\overline{T_w} - T_{ref} = \Delta T_{LM} - \left( \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi L k} \right) \dot{Q} \quad (5)$$

3. 실험결과 및 고찰

실험은 부하의 변화에 따라 냉매와 전열관 벽면의 온도차뿐만 아니라 냉수 입출구 온도차를 대수평균온도차(LMTD)와의 관계에 초점을 두어 수행하였다. 이러한 이유는 실제 산업용 냉동기의 설계 및 사양이 냉수 입출구 온도와 냉매온도에 따라 이루어지기 때문이다.

냉매의 포화온도를 -8℃로 고정시킨 상태에서 초기 비등의 정도가 다른 경우 냉수에 공급하는 열유속의 증가(q+) 후 감소(q-)에 따른 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Case 1, 2, 3 모두 열량

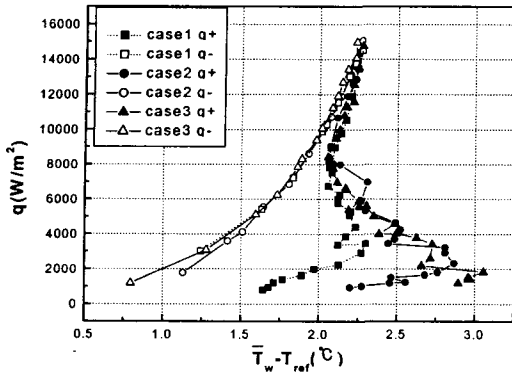


Fig. 4 Boiling curves for each case ( $T_{ref} = -8$  °C).

공급 없이 순환할 때 측정된 증발기 입구에서의 냉수온도는 각각  $-6.29$  °C,  $-5.76$  °C,  $-4.97$  °C이고, 관측창을 통해 초기 비등의 정도는 상대적으로 case 1이 가장 활발하고 냉수와 냉매의 온도차가 큰 case 3은 거의 비등이 일어나지 않는 정도이다. 열량의 증가와 감소에 대하여 비등의 지연에 의한 히스테리시스 현상이 뚜렷이 나타난다. 열량을 단계적으로 증가시켰을 때 전열관 전체로의 비등전과는 case 1에서 가장 활발하다. Case 1의 초기 조건은 증발기의 시스템 온도를  $-8$  °C로 설정하고  $1.94$  m/s의 냉수가 순환하도록 했는데 다른 두 경우에 비해 상대적으로 급작스런 냉수에 의한 열량이 전열관 및 냉매로 전달되어 초기 조건부터 비등이 활발하게 진행되고 따라서 전열관 벽면과 냉매와의 온도차가 상대적으로 낮아도 된다. 냉수로의 공급열량을 증가시키면 초기 비등의 정도가 다르더라도 약  $8000$  W/m<sup>2</sup> 이상의 열유속에서 비등곡선이 거의 일치하게 되어 비슷한 열전달계수를 갖는 결과를 얻었다. 서서히 열유속을 감소시켰을 때에도 비등곡선이 일치하는 결과를 보였다. 그러나  $8000$  W/m<sup>2</sup> 이하에서는 동일한 열유속에 대해 LMTD의 차이가 생기는 이력현상을 보였고 초기 비등상태가 상대적으로 활발한 case 1이 LMTD의 차이가 가장 작고 case 2, case 3의 순서로 이력현상이 크게 나타났다.

Fig. 5는 냉수의 유속을  $1.94$  m/s로 일정하게 유지하고 냉매의 포화온도만을 변수로 하여 증발기 입구에서 냉수에 공급하는 열량을 증가 후 감소시킨 실험결과를 LMTD와 단위면적당 열량의 관계로 나타냈다.

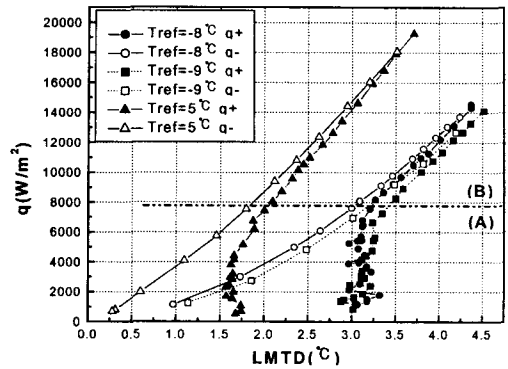


Fig. 5 Boiling curves for each refrigerant temperature ( $v_{cw} = 1.94$  m/s).

냉수에 공급하는 열량을 증가시킨 경우( $q+$ )

비등이 거의 일어나지 않는 조건을 만든 후 열량을 실험범위 내의 최대 열유속까지 단계적으로 증가시켜 가며 얻은 데이터에 대하여 (A), (B) 두 영역으로 구별된다.

앞서 언급하였듯이 비등하는 냉매로 열을 전달하는 열원은 냉수이고 전열관 길이 전체에서 국소 열유속 및 국소 열전달계수가 다르기 때문에 영역 (A)는 열유속이 증가함에 따라 전열관의 길이 방향으로 출구 측까지 활성화된 공동의 수가 늘어나면서 차츰 비등이 전과해 가고, 핵비등영역과 자연대류영역이 동시에 존재하고 있는 영역

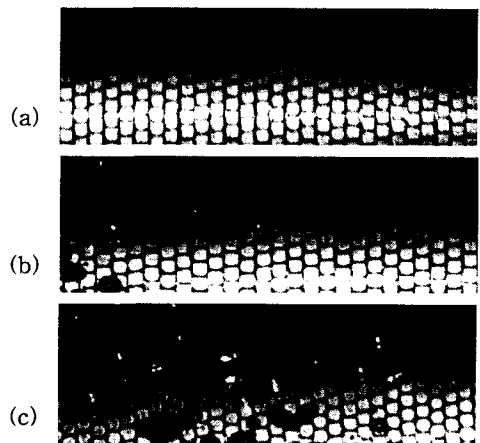


Fig. 6 Photographs for propagation of nucleate boiling: (a) natural convection, (b) propagation of boiling and (c) complete spreading of nucleate boiling.

이다. 비등이 전파해 가능 과정에 대한 이해를 돕기 위하여 Fig. 6에서 관측창을 통하여 사진 촬영으로 증발관 표면에서의 비등현상을 나타냈다. Fig. 6(a)는 자연대류상태로 비등이 일어나지 않는 상태이며 관내의 냉수는 왼쪽에서 오른쪽으로 흐른다. 열량을 증가시키기에 따라 Fig. 6(b)와 같이 전열관 전체에 대해 핵비등이 일어나는 면적이 왼쪽부터 점차 오른쪽으로 늘어나고 반대로 자연대류영역은 차츰 감소해 간다. 약  $8000 \text{ W/m}^2$ 에서 전열관 전체에서 기포가 발생하고 있으나 입구측에서 비등이 활발하고 출구측으로 갈수록 증기기포가 발생하는 공동의 수는 매우 적었다. 또한 공급열량의 증가에 따라 작은 차이로 LMTD의 감소 및 증가가 반복적으로 나타났고 저온에서 그 정도가 훨씬 심하게 나타났다. 열유속이  $8000 \text{ W/m}^2$  이상인 영역 (B)는 전열관 전체가 핵비등 영역으로 발달했으며 점차 활성화된 공동의 수가 증가하여 표면 전체에서 매우 활발하게 비등이 일어나고 있다. 이렇게 전체에서 매우 활발한 비등이 일어나기 시작하는 점, 즉 (A)영역과 (B)영역의 구분이 되는 점을 CSNB(Complete spreading of nucleate boiling)라고 할 수 있다.

냉수에 공급하는 열량을 감소시킨 경우( $q-$ )

냉수로의 공급열량을 가능한 최대점까지 증가시킨 후 다시 최소점까지 감소시키며 얻은 결과에서는 열유속을 증가시켰을 때보다 증기기포가 발생하는 공동의 수가 훨씬 증가하였고 열량을 실험범위 내의 최소점까지 낮추어도 전열관 전체에서의 비등은 유지되고 있으나 부분적으로 활성화된 공동의 수가 줄어들어 인해서 점차 약해졌다. 그러나 열유속이 증가할 때보다는 비등이 활발하고 동일한 열유속에 대해 LMTD의 차이를 보이며 이력현상이 나타났다. 포화온도  $-8^\circ\text{C}$ ,  $-9^\circ\text{C}$ 의 실험에서는 전열관 길이방향으로 비등의 시작 및 전파가 LMTD  $3^\circ\text{C}$  이상에서 나타나고 동일한 열유속에서의 LMTD의 차이도 포화온도  $5^\circ\text{C}$ 의 경우보다 크게 나타났다. 이러한 이유는 R134a의 표면장력이 포화온도  $5^\circ\text{C}$ 에 비해  $-8^\circ\text{C}$ 에서 대략 20% 증가함으로써 냉매의 고체 표면에서의 접촉각이 감소하여 그만큼 전열관 표면의 공동이 액체로 채워지게 되기 때문이다. 이에 따라 비등핵으로 작용할 수 있는 가스 또는 증기가 응축되어 핵자리가 줄어들어 공동내 액체의 비등에

필요한 과열도가 증가하게 된다.

위의 결과를 토대로 실제 산업용 저온냉동기에 적용했을 때 낮은 열유속에서 LMTD에 차이가 생기는 이력현상이 문제된다고 할 수 있다. Fig. 5에서 실험에 사용된 전열관을 실제 저온냉동기에 사용할 때 이력현상을 피하여 작동할 수 있는 조건을 다음과 같이 제시할 수 있는데, LMTD를 약  $3.4^\circ\text{C}$  이상에서 냉동기를 기동하고, 약  $1^\circ\text{C}$  이상에서 운전하면 증발기에서의 이상작동을 피할 수 있을 것이고, 냉동기의 압축기가 LMTD를  $4^\circ\text{C}$ 까지 벌어질 수 있도록 설계된다면 이러한 조건제시는 타당하다고 하겠다.

Fig. 7에 각각의 냉수유속에 대한 비등곡선이 나타나 있다. 먼저 과도한 비등이 일어나는 상태를 만들고 차츰 냉수에 공급하는 열량을 감소시킨 후 다시 증가시켜 냉매의 포화온도  $-8^\circ\text{C}$ 에 대해 각각의 냉수유속 1.44 m/s, 1.94 m/s, 2.44 m/s에 대한 실험을 수행하였다. Fig. 7에서는 비등이 활발한 상태에서 냉수로부터 냉매로의 열전달량이 감소 후 증가할 때 벽면 과열도의 차이가 생기는 또 다른 이력현상을 나타내며 이것을 Fig. 1의 TD(Temperature deviation) 히스테리시스라고 할 수 있다. 이것은 이웃의 비등이 일어나는 공동에 의한 핵비등 활성화 에너지에 의존하며 핵비등이 일어나고 있을 때에 필요한 에너지보다는 핵비등을 일으키기 위한 활성화 에너지가 더 큼을 의미한다.

Fig. 8은 각각의 냉매포화온도에 대하여 LMTD의 변화가 U에 미치는 영향을 나타낸다. 각각에 대하여 그래프가 두 개로 나타나는 것은 앞서 언

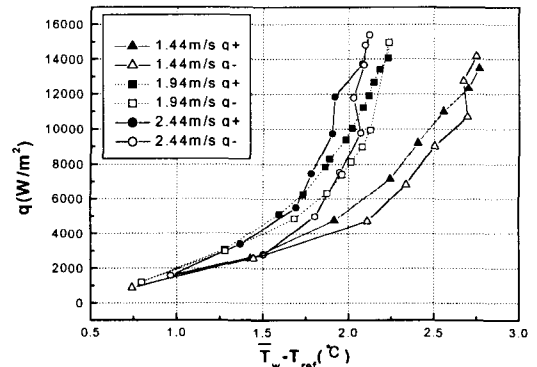


Fig. 7 Boiling curves for each velocity of chilled water ( $T_{ref} = -8^\circ\text{C}$ ).

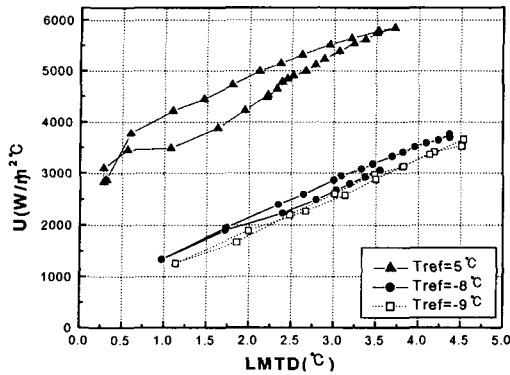


Fig. 8 U versus LMTD for each refrigerant temperature ( $v_{cw}=1.94$  m/s).

급한 TD 히스테리시스를 의미한다. R134a의 포화온도  $5^{\circ}\text{C}$ 보다 저온인  $-8^{\circ}\text{C}$ ,  $-9^{\circ}\text{C}$ 에서 총합 열전달계수가 대략 1/2로 줄어든 결과를 보여주고 있다. 이는 비등이 상온에 비해 저온에서 비등의 시작이 상대적으로 더디게 발생하고, 더 큰 LMTD를 필요로 하게 되어 기포 교반에 의한 강제대류효과가 저온에서 훨씬 감소하기 때문이다. 또한, 저온에서 밀도 등 물성치 변화에 의해 분자운동량이 줄어들어 열전달률이 낮아져 실험결과 총합열전달계수가 약 50% 정도로 감소했다.

#### 4. 결론

본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 비등 표면에 불균일한 열유속이 전달되는 조건일 때 동일한 열유속에서 점차 열유속을 증가시키면 초기비등의 정도가 다르더라도 비등곡선이 거의 일치하는 일정 열유속점(CSNB)이 나타난다.

(2) 특정 열유속(CSNB) 이하에서는 동일한 열유속에서 활성화된 공동의 상태가 다르므로 벽면과 냉매와의 온도차가 상이하게 나타나는 이력현상이 발생한다. 이는 핵비등의 시작에서 나타나는 벽면과열도의 급격한 감소(TOS 이력현상)가 넓은 영역에서 조합된 형태로 나타난 결과로 볼 수 있다.

(3) 상온에 비해 영하의 포화온도에서 총합 열전달계수가 낮고 이력현상도 상대적으로 크게 나타난다. 실험에 사용된 전열관은 총합 열전달계

수가 저온에서 약 1/2로 감소했다.

(4) 이 전열관을 실제 냉동기에 사용할 경우  $3.4^{\circ}\text{C}$  이상의 LMTD 조건에서 냉동기를 기동하고, 약  $1^{\circ}\text{C}$  이상에서 운전하면 증발기의 이상 동작을 피할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부에서 후원하는 “냉동공조기기의 고효율화 기술개발” 중기거점과제의 일환으로 추진중인 “고효율 저온/상용 터보냉동기 개발” 과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Corty, C. and Foust, A. S., 1955, Surface variables in nucleate boiling, Chem. Eng. prog. symp. ser. V. 51, No. 16, pp. 1-12.
2. Oktay, S., 1988, Departure from natural convection (DNC) in low-temperature boiling heat transfer encountered in cooling microelectronic LSI devices, Heat Transfer Eng., Vol. 9, No. 3, pp. 93-100.
3. Marto, P. J. and Lt. Lapere, V. J., 1982, Pool boiling heat transfer from enhanced surfaces to dielectric fluids, ASME J. Heat Transfer V. 104, pp. 292-299.
4. Wang, B. X., Ma, J. and Shi, M. H., 1992, Hysteresis characteristics of nucleate pool boiling heat transfer, 3rd National Conference incorporating 1st European Conference on Thermal Science, Birmingham University, U.K., pp. 16-18.
5. Shi, M. H., Ma, J. and Wang, B. X., 1993, Analysis on hysteresis in nucleate pool boiling heat transfer, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 18, pp. 4461-4466.
6. Yoon, P. H., Jeong, J., Park, J. I. and Kang, Y. T., 2002, Experimental Equations of R134a Evaporator Tubes and Design of Flooded Evaporators, Automatic Control Lecture Meeting of SAREK, pp. 17-25.