

# 원형 세관내 대류비등열전달에 관한 실험적 연구

추 원 호, 방 광 현\*

한국해양대학교 대학원 냉동공조공학과, \*한국해양대학교 냉동공조공학과

## An Experimental Study of Flow Boiling Heat Transfer inside Small-Diameter Round Tubes

Won-Ho Choo, Kwang-Hyun Bang\*

Department of Mechanical Engineering Graduate School, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

\*Department of Mechanical Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

(Received March 5, 2004; revision received July 1, 2004)

**ABSTRACT:** Flow boiling heat transfer in small-diameter round tubes has been experimentally studied. The experimental apparatus consisted mainly of refrigerant pump, condenser, receiver, test section of a 1.67 mm inner-diameter round tube and pre-heater for control of refrigerant quality at the inlet of test section. To investigate the effect of bubble nucleation site characteristics of different tube materials, three different tubes of copper, aluminum and brass were used. The ranges of the major experimental parameters were 5~30 kW/m<sup>2</sup> of the wall heat flux, 0.0~0.9 of the inlet vapor quality and the refrigerant mass flux was fixed at 600 kg/m<sup>2</sup>s. The experimental results showed that the flow boiling heat transfer coefficients in small tubes were affected only by heat flux, but independent of mass flux and vapor quality. The effect of tube material on flow boiling heat transfer was observed small.

**Key words:** Flow boiling(대류비등), Heat transfer(열전달), Heat exchanger(열교환기), R-22

### 기 호 설 명

Bo : Boiling 수,  $q''/h_{fg} \cdot G$

$c_p$  : 정압비열 [kJ/kgK]

$D_h$  : 수력직경 [mm]

$G$  : 질량유속 [kg/m<sup>2</sup>s]

$h$  : 열전달계수 [kW/m<sup>2</sup>K]

$h_{fg}$  : 증발잠열 [kJ/kg]

$k$  : 열전도도 [W/mK]

$L$  : 시험부의 유효가열길이 [m]

$\dot{m}$  : 질량유량 [kg/s]

$P_i$  : 원형 세관 내부 접속길이 [m]

$\dot{Q}$  : 열전달률 [W]

$\dot{q}$  : 시험부에 공급되는 가열량 [W]

$q''$  : 열유속 [kW/m<sup>2</sup>]

$r^*$  : 공동의 반경 [m]

$T$  : 온도 [K]

$v$  : 비체적 [m<sup>3</sup>/kg]

We : Weber 수,  $G^2 \cdot D_h / \rho_f \cdot \sigma$

$x$  : 건도

† Corresponding author

Tel.: +82-51-410-4365; fax: +82-51-405-4790

E-mail address: khbang@hanara.kmaritime.ac.kr

그리스 문자

$\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

$\sigma$  : 표면장력 [N/m]

**하첨자**

$f$  : 액체상태

$g$  : 기체상태

$in$  : 입구

$PH$  : 예열기

$r$  : 냉매

$sat$  : 포화상태

$w$  : 관내벽

**1. 서 론**

최근 들어 오존층 파괴 및 지구 온난화와 같은 환경문제와 에너지 소비에 따른 에너지 부족문제가 예상되면서 산업 전 분야에 걸쳐 에너지 절약이 주요 연구과제로 대두되고 있다. 이에 따라 냉동공조 분야에서도 대체냉매를 적용하기 위한 열교환기의 새로운 설계기술 및 고성능 열교환기의 개발에 대한 연구가 요구되고 있으며 이는 냉매의 봉입량을 감소시키고 열교환기의 소형·경량화를 위한 세관에 대한 연구로 이어지고 있다.

세관을 사용한 증발기 및 응축기의 체적축소 기술이 가장 효과적인 방안으로 제시되고 있으나 세관에서의 압력손실이 크게 증가할 수 있고, 각 분기관에서의 불균등한 냉매유량과 그에 따른 불균등한 증발량에 따른 기술적 문제가 발생할 수 있다.

이러한 문제들을 해결하기 위하여 최근 10여년 동안 수력 직경 1.0~3.0 mm 정도의 직경을 갖는 세관에서의 증발 및 응축 열전달에 대한 실험적 연구가 활발히 진행되어 오고 있다.

Yan-Lin<sup>(5)</sup>은 내경 2.0 mm의 원형 세관에서 수행한 증발열전달 실험에서 증발열전달계수는 열유속, 질량유속, 건도의 영향을 모두 받는 것으로 나타내고 있다. Kuwahara et al.<sup>(6)</sup>이 내경 0.84 mm, 2.0 mm에 대한 증발열전달 실험에서 열전달계수는 세관의 치수에는 크게 영향을 받지 않는다는 결과를 보이고 있다. Hong et al.<sup>(10)</sup>이 내경 1.77 mm, 3.36 mm, 5.35 mm의 원형관에서 수행한 실험에서는 관경이 작아짐에 따라 증발열전달계수가 소폭 향상함을 보여준다.

Wambsganss et al.,<sup>(1)</sup> Kim et al.,<sup>(3)</sup> Hwang et al.<sup>(6)</sup>이 내경 2.92 mm, 1.76 mm, 2.02 mm의 원형 세관에서의 증발열전달 실험을 통하여 증발열전달 특성을 고찰하였는데, 세관에서는 증발열전달계수가 열유속의 영향을 많이 받으며, 질량유속이나 건도에 따라서는 거의 변하지 않음을 보였다. 또한 Bao et al.<sup>(7)</sup>이 내경 1.95 mm인 구리 원형 세관에서 실험한 경우에도 열전달계수가 질량유속에 비해 열유속의 영향을 많이 받는 결과를 보이고 있으며, Park et al.<sup>(12)</sup>이 내경 1.67 mm의 원형 세관에서 수행한 실험결과에서도 증발열전달계수는 질량유속과 건도의 영향보다는 열유속의 영향을 많이 받는 것으로 나타나고 있다. 이들 선행연구에서의 주요 실험인자는 Table 1에 정리한 바와 같다.

Table 1 Summery of past work on flow boiling in small-diameter tube

| Authors                           | $D_h$<br>(mm) | Fluid         | $G$<br>(kg/m <sup>2</sup> s) | $q''$<br>(kW/m <sup>2</sup> ) | Tubes                         | Major findings                                      |
|-----------------------------------|---------------|---------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---|
| Wambsganss et al.<br>(1993, 1996) | 2.4~2.9       | R12,<br>R113  | 50~830                       | 3.6~90                        | Round & rect.<br>Brass, S. S. | $h = f(q'')$ , $\neq f(x, G)$                       |
| Yan-Lin<br>(1998)                 | 2.0           | R134a         | 50~200                       | 5~20                          | Round<br>Copper               | $h = f(q'', G, x)$ , $h \downarrow$ as $x \uparrow$ |
| Bao et al.<br>(1999)              | 1.95          | R11,<br>R123  | 50~1800                      | 5~200                         | Round<br>Copper               | $h = f(q'', P)$ , $\neq f(x, G)$                    |
| Ken Kuwahara<br>(2000)            | 0.84, 2.0     | R134a         | 100~600                      | 1.2~47                        | Round<br>S.S.                 | $h = f(q'', G, x)$ , $h \uparrow$ as $x \uparrow$   |
| Hong et al.<br>(2000)             | 1.77~5.35     | R22,<br>R134a | 300~400                      | 20~30                         | Round<br>Copper               | $h = f(q'', G, x)$ , $h \uparrow$ as $x \uparrow$   |
| Park et al.<br>(2002)             | 1.67          | R22           | 300~600                      | 10~20                         | Round<br>Brass, Al.           | $h = f(q'')$ , $\neq f(x, G)$                       |

지금까지 발표된 세관에서의 증발열전달계수 실험데이터는 건도의 증가에 관계없이 거의 일정한 값을 보이는 경우와 건도의 증가에 따라 드라이아웃(dryout) 지점까지 계속 증가하는 경우의 두 가지 경향을 보이고 있으며, 이 차이는 전자의 경우 핵비등이 주도하는 비등열전달 특성으로, 후자는 대류비등이 주도한다는 정성적 설명이 제시되고 있지만, 아직 정확한 비교를 할 수 있는 체계적인 데이터가 없는 실정이다.

이러한 배경에서 본 연구에서는 세관의 관재질에 따른 증발열전달 특성의 차이점을 검토하기 위해 내경 1.67 mm인 황동, 알루미늄, 구리 원형관을 사용해 각각의 R-22 냉매에 대한 증발열전달계수 측정실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험장치의 개략도 및 시험부는 Fig. 1, Fig. 2,

Table 2 Dimensions of the test tubes

| Parameters      | Unit            | Values |
|-----------------|-----------------|--------|
| Length          | mm              | 305    |
| Wall thickness  | mm              | 0.36   |
| Outer diameter  | mm              | 2.38   |
| Inner diameter  | mm              | 1.67   |
| Flow area       | mm <sup>2</sup> | 2.16   |
| Inner perimeter | mm              | 5.22   |

그리고 원형 세관의 사양은 Table 2에 나타난 바와 같다. 실험장치는 냉매펌프, 과냉각기, 질량유량계, 예열기, 시험부 A, 시험부 B, 관찰창, 응축기, 리시버 등으로 구성되어 있다. 마그네틱 기어 펌프는 냉매를 순환시키며, 과냉을 유지하기 위하여 과냉각기를 기어펌프 후단에 장착하였다.

고압용 로타미터 유량계에서 보정곡선을 이용하여 R-22의 유량을 측정한다. 유량계를 거친 냉매는 예열기에서 원하는 건도로 조절되어 세관의 관경까지 일정각도로 좁아지게 가공된 축소 소켓을 통해 2개의 시험부에 차례로 유입되고, 시험

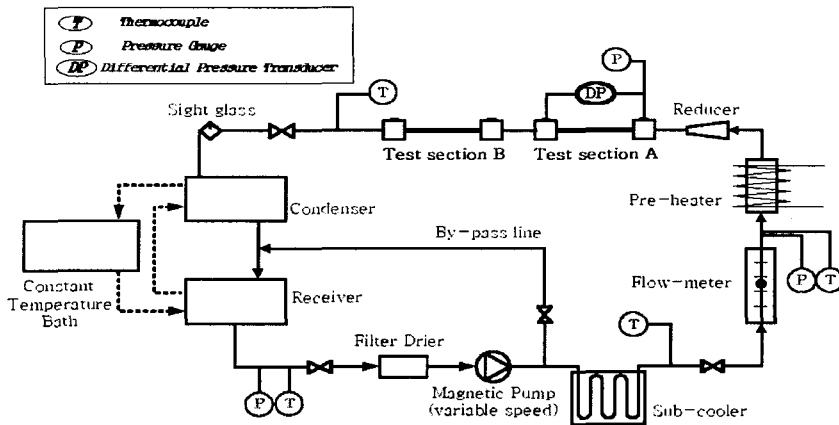


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

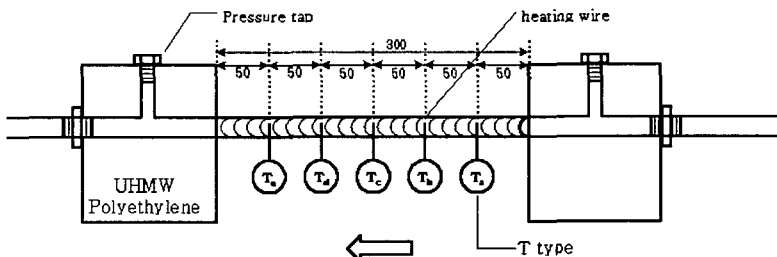


Fig. 2 Schematic diagram of test section.

부에서 증발한 냉매는 응축기를 거치며 과냉되어 리시버로 들어가서 일정온도로 유지된다.

시험부는 내부 직경이 1.67 mm, 두께 0.36 mm이며, 시험부 내 온도측정은 각각 5개의 T-type 열전대에 의하여 벽면온도가 측정되어진다. 시험부 내 압력강하는 시험부 입구와 출구에 압력 탭을 설치하고 차압계를 사용하여 측정하였는데, 최대 98 kPa까지 측정 가능한 YOKOGAWA사의 차압계를 사용하였다. 또한 시험부 입구의 압력은 pressure transducer(OMEGA)로 측정하였다. 시험부 양 끝단으로부터 열손실을 최소화하기 위하여 초고분자 폴리에틸렌을 사용하여 슬릿을 가공한 후, 시편 끝부분에서 각각 3 mm씩 시험부 슬릿에 삽입하고 가공된 플랜지와 O-ring을 이용하여 연결하였다.

시험부에 균일한 열유속을 공급하기 위하여 에나멜 코팅되어진 직경 0.6 mm, 길이 4.0 m의 구리선을 길이 305 mm의 세관에 각각 균일하게 감았다. 여기에 직류전원을 공급하여 전류와 전압으로 전력량을 측정하게 된다.

실험데이터는 냉매의 유량 및 시험부의 출구온도와 압력이 일정하게 유지되는 정상상태 하에서 시험부 출구온도 및 시험부 입구압력, 시험부의 벽면온도를 1초 간격으로 데이터 취득장치에 의하여 기록하였다. 전체 실험장치는 열침입 및 열손실을 최소화하기 위해 유리섬유 및 아티론으로 단열하였고 별도의 물을 사용한 에너지 균형 실험을 통해 열손실이 5% 이내임을 확인했다.

2.2 데이터 처리

시험부 입구 건도  $x$ 는 다음과 같은 식(1)을 이용하여 산출한다.

$$x = \frac{\dot{Q}_{PH} - \dot{m}_r c_p (T_{sat} - T_{PH,in})}{\dot{m}_r h_{fg}} \quad (1)$$

여기서,  $T_{sat}$ 는 시험부 내부압력의 포화온도이다.

시험부에 사용된 원형 세관의 열전달계수를 결정하기 위하여 열유속, 냉매의 포화온도, 원형 세관의 내벽온도  $T_w$ 를 알아야 한다. 냉매의 포화온도는 시험부의 압력 및 차압을 측정된 후, 이 압력으로부터 각각의 위치에서의 포화온도를 구

하였다. 시험부 내벽면온도는 시험부의 외벽면에 열전대를 부착하여 측정된 온도를 사용하였다. 이때 황동, 알루미늄, 구리의 열전도도가 각각 110 W/m·K, 237 W/m·K, 401 W/m·K로 크기 때문에 내벽온도는 외벽온도와 거의 동일하다고 볼 수 있다.

냉매측의 열전달계수는 식(2)와 같이 구한다.

$$h = \frac{q''}{T_w - T_{sat}} \quad (2)$$

$q''$ 는 전열선에 의해 유입된 열유속을 나타내며, 식(3)과 같이 정의된다. 특히, 원형 세관의 끝부분의 접촉은 초고분자 폴리에틸렌과 접촉을 하고 있으므로 ( $k=0.33$  W/m·K) 열손실이 무시할 정도로 적음을 확인하였다.

$$q'' = \frac{\dot{q}}{P_i \times L} \quad (3)$$

시험부 관벽의 온도는 길이방향으로 다섯 지점에서 측정되며, 따라서 열전달계수는 각 지점에서 계산된 값의 평균값으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

원형 세관 내 비등열전달에서 관 재질이 열전달계수에 미치는 영향 및 그 특성을 분석하기 위해 내경이 1.67 mm로 동일한 황동, 알루미늄, 구리관에 열유속을 5 kW/m<sup>2</sup>, 10 kW/m<sup>2</sup>, 20 kW/m<sup>2</sup>, 30 kW/m<sup>2</sup>으로 변화시켜 가면서 각각의 조건에서 건도에 따른 열전달계수를 측정하였다. 질량유속은 600 kg/m<sup>2</sup>s로 고정된 상태에서 하였으며, 이는 Park et al.<sup>(12)</sup>에 의한 열전달계수에 미치는 질량유속의 영향이 거의 없다는 근거에서이다.

시험부 내부의 관내 거칠기를 살펴보기 위해 레이저 스캔과 전자현미경을 이용하여 시험부 내벽을 촬영하였다. 레이저 스캔을 통한 관내의 거칠기 정도를 Fig. 3에 나타내었고, 핵비등이 예상되는 공동(cavity)의 수를 파악하여 Fig. 4에 나타내었다. 열전달에서의 핵비등 발생은 공동의 크기와 관련이 있으며 공동의 크기에 관한 상관식을 식(4)에 나타내었다.

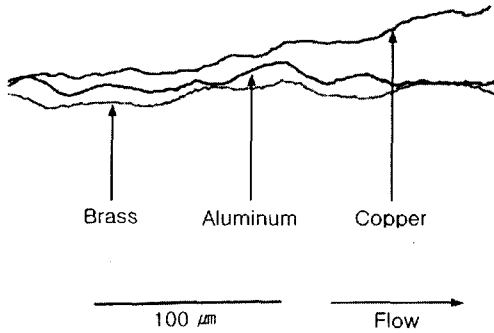


Fig. 3 Tube inner surface roughness.

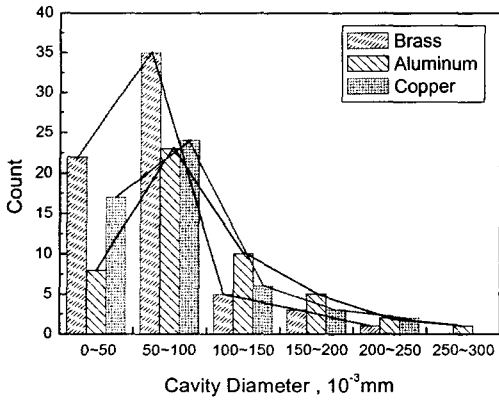
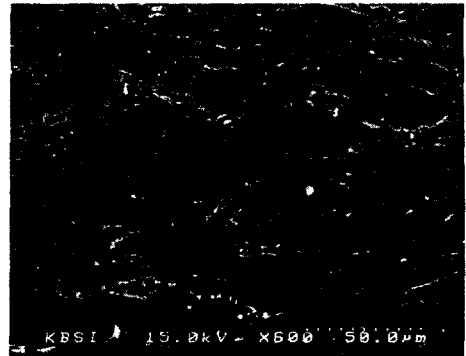


Fig. 4 Cavity size distribution.

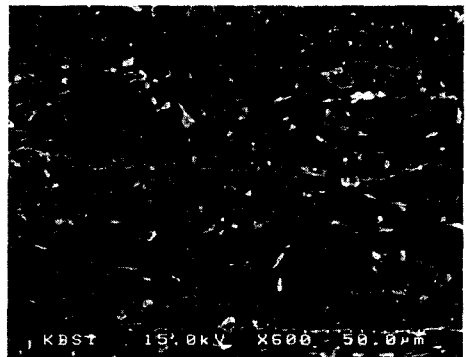
$$r^* = \left[ \frac{2 \sigma T_{sat} v_g k_f}{q'' h_{fg}} \right]^{1/2} \quad (4)$$

본 실험조건에서의 활성공동의 최소반경을 식 (4)를 이용하여 구해 보면 반경은 약 5 μm이며, 반경 5 μm 이상의 공동에서 핵생성이 이루어짐을 알 수 있다. 관 내부 표면을 촬영한 것을 Fig. 5에 나타내었으며, 전자현미경을 통하여 600배율로 살펴본 것으로 수평방향이 유체 유동방향이며 사진의 가로방향이 200 μm이다. 그림을 살펴보면 공동의 크기분포가 각 재질간 뚜렷한 차이 없이 비슷한 표면조건을 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 핵비등이 예상되는 공동의 차가 거의 없음을 예상하게 한다.

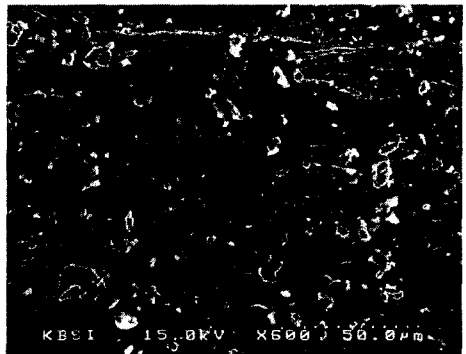
열유속이 5 kW/m<sup>2</sup>, 10 kW/m<sup>2</sup> 때의 건도에 따른 냉매의 열전달계수의 변화를 Fig. 6에, 열유속이 20 kW/m<sup>2</sup>, 30 kW/m<sup>2</sup> 때의 건도에 따른 냉매의 열전달계수의 변화를 Fig. 7에 나타내었다.



Brass



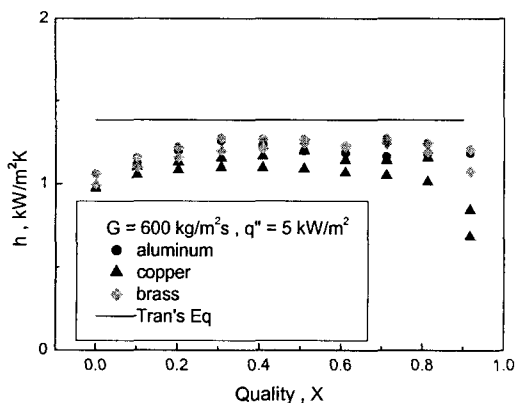
Aluminum



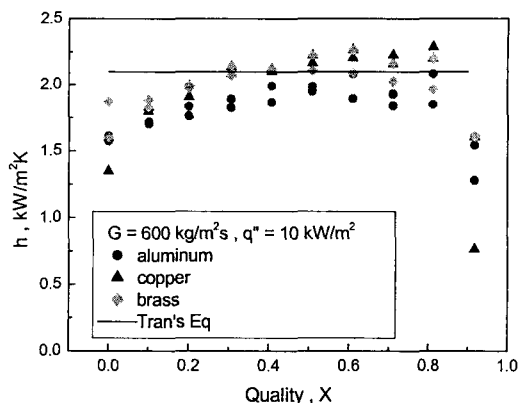
Copper

Fig. 5 SEM Image of tube inner surface.

먼저 건도가 증가함에 따라 황동, 알루미늄, 구리 세관의 국소 열전달계수는 미소한 차를 나타내긴 하지만 거의 일정함을 나타낸다고 판단할 수 있으며 열유속이 증가할수록 일정 폭 열전달계수가 증가함을 보이고 있다. 또한 건도의 변화에 대해 열전달계수는 건도가 0.8 정도까지 대체적으로 일정하며 건도 0.8 이후에서는 드라이아

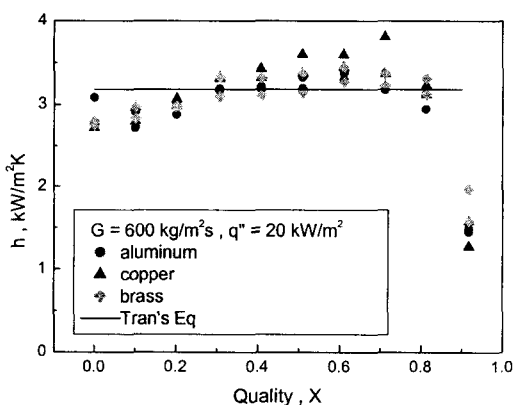


(a)  $q'' = 5 \text{ kW/m}^2$

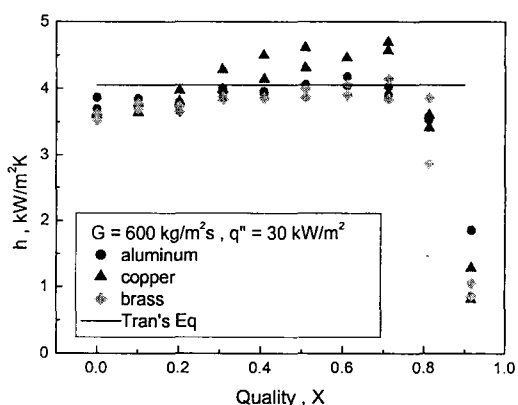


(a)  $q'' = 10 \text{ kW/m}^2$

Fig. 6 Variation of heat transfer coefficient with respect to heat fluxes.



(a)  $q'' = 20 \text{ kW/m}^2$



(b)  $q'' = 30 \text{ kW/m}^2$

Fig. 7 Variation of heat transfer coefficient with respect to heat fluxes.

웃(dryout)의 발생으로 열전달계수가 감소함을 볼 수 있다. 건도의 변화에 따라 열전달계수가 대략 10% 이내에서 거의 일정하게 나타남을 통해 핵비등이 대류비등에 비해 주요 모드로 작용하는 것으로 판단할 수 있다.

앞에서 언급한 것과 같이 황동, 알루미늄, 구리 세관의 핵비등이 예상되는 공동의 차이는 크게 나타나지 않는다. 이러한 관 내부 표면의 거칠기의 작은 차이는 핵비등 영역에서의 차이가 거의 없음을 나타내는 것이며, 이는 본 실험결과가 10% 이내에서 잘 일치함을 보이는 사실과 비교하여 실험이 핵비등이 주요모드인 점을 감안하면 관 재질에 따른 열전달계수의 차는 미미한 것임을 판단하게 한다.

본 실험에서 나타난 과열도는 대략 7~10°C 정도로 나타났으며, 이는 Tran et al.<sup>(2)</sup>이 제시한 것처럼 벽면 과열도가 2.75°C보다 클 경우 열전달계수는 질량속도나 건도의 영향은 미미하게 받는 반면 열유속의 영향을 주로 받는다는 점과 일치하고 있다. 이는 Tran et al.<sup>(2)</sup>이 제시한 식(5)와 잘 맞음을 보여주고 있다.

$$h = (8.4 \times 10^5) (Bo^2 We_f)^{0.3} \left( \frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{-0.4} \quad (5)$$

재질간 실험결과와 전체적인 경향이 비슷하고, 건도변화에 대해 10% 이내에서 비슷한 열전달계수를 보이고 있음을 감안하여 동일한 열유속에

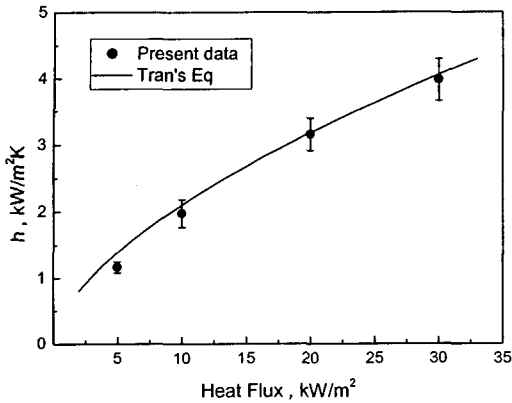


Fig. 8 Comparison of experimental data with Tran et al.'s correlation.

대한 모든 실험결과와 평균치를 Tran et al.<sup>(2)</sup>이 제시한 상관식(5)와 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 낮은 열유속인  $5 \text{ kW/m}^2$ 인 경우 실험결과값보다 상관식의 계산값이 조금 높게 나타나지만, 열유속이 높아질수록 상관식의 계산값이 실험결과값과 잘 맞음을 볼 수 있다.

일반적으로 직경이 큰 관에서의 열전달계수는 증발 초기에 핵비등의 영향으로 인하여 큰 증가를 가지다가 증발이 진행되면서 핵비등의 감소로 인하여 급격히 감소한 후 건도가 커짐에 따라 대류비등의 영향이 지배적이 되면서 다시 증가하는 경향을 나타낸다. 하지만, 본 실험의 경우에서와 같이 직경이 작은 관에서는 건도에 따라 증발열전달계수의 변화가 전 영역에서 크지 않음을 볼 수 있다. 대류비등열전달에 있어 관의 크기에 대한 구분은 열전달계수의 경향이 크게 바뀌는 영역을 기준으로 구분할 수 있으며, 그 하나의 예가 Kandlikar et al.<sup>(13)</sup>에 의해 제안된 다음의 구분을 들 수 있다.

일반관:  $D_h > 3 \text{ mm}$

세 관:  $3 \text{ mm} > D_h > 200 \mu\text{m}$

마이크로관:  $D_h < 200 \mu\text{m}$

이는 Yan et al.<sup>(5)</sup>의 논문에서와 마찬가지로 세관에서의 열전달은 상대적으로 직경이 큰 관에서의 열전달과는 차이가 있음을 의미한다. 이 같은 차이는 큰 원형관에서와 달리 세관에서는 미소한 관 직경으로 인하여 관내 표면의 액막의 두께가

매우 얇은 슬러그-환상류로의 천이가 빨라졌기 때문이라고 여겨진다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 수력직경이  $1.67 \text{ mm}$ 인 원형 황동, 알루미늄, 구리 세관을 사용하여 R-22의 열전달 특성을 고찰하였다. 질량유속을  $600 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 로 고정하고, 열유속이  $5 \sim 30 \text{ kW/m}^2$ 일 때 각각 건도를 0에서 0.9까지 변화시켜 가면서 열전달계수를 측정하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 직경이  $1.67 \text{ mm}$ 인 원형 세관에서의 증발열전달계수는 열유속  $5 \sim 30 \text{ kW/m}^2$  범위에서  $1000 \sim 5000 \text{ W/m}^2\text{K}$  정도로 나타났다.

(2) 측정된 증발열전달계수는 질량유속과 건도의 변화에는 무관하게 일정하였고 열유속의 변화에 영향을 받음을 보였다. 이는 핵비등 주요 모드의 열전달 특성을 보임을 알 수 있다.

(3) 세관에서 측정된 증발열전달계수는 Tran et al.<sup>(2)</sup>이 제시한 상관식과 잘 일치하였다.

(4) 관 재질에 따른 열전달계수의 변화는 미미한 것으로 나타났다.

세관에서의 비등열전달은 상대적으로 직경이 큰 관( $D_h > 3 \text{ mm}$ )에서의 열전달 특성과는 차이를 나타내어 대류비등이 아닌 핵비등이 주요 모드로 작용함을 알 수 있었으며, 황동, 알루미늄 및 구리의 관 재질에 의한 영향은 극히 미미한 것으로 나타났다.

지금까지 세관에서의 열전달에 대한 많은 연구가 이루어졌음에도 불구하고 세관에서의 열전달 패턴과 상관식 정립에 있어 뚜렷한 근거가 부족한 실정이었다. 본 실험을 통한 결과들이 부족했던 부분에 대한 유용한 자료로 사용되어질 것으로 사료되며, 더 체계적이고 다양한 실험들을 통한 상관식의 체계적 정립이 요구된다.

#### 후 기

본 논문은 한국과학재단 지정 부경대학교 친환경 경첨단에너지 기계연구센터의 지원(과제번호: R12-2003-001-01005-0)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Wambsganss, M. W., France, D. M., Jendrzejczyk, J. A. and Tran, T. N., 1993, Boiling heat transfer in a horizontal small-diameter tube, *J. of Heat Transfer*, 115, pp. 963-972.
2. Tran, T. N., Wambsganss, M. W. and France, D. M., 1996, Small circular and rectangular channel boiling with two refrigerants, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 22, No. 3, pp. 485-498.
3. Kim, J. S., 1998, Development of small-diameter-tube heat exchangers, *Proceedings of Heat Exchanger Workshop*, Busan, pp. 1-10.
4. Sin, J. Y., 1996, Convective boiling heat transfer of pure refrigerants and refrigerant mixtures, Ph.D Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
5. Yan, Y. Y. and Lin, T. F., 1998, Evaporation heat transfer and pressure drop of refrigerant R-134a in a small pipe, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 4183-4194.
6. Hwang, Y. W., Yoon, S. H. and Kim, M. S., 1999, A study of the characteristics of evaporative heat transfer for R-143a in a small diameter tube, *Proceedings of the KSME*, Spring, pp. 572-575.
7. Bao, Z. Y., Fletcher, D. F. and Haynes, B. S., 2000, Flow boiling heat transfer of Freon R-11 and HCFC123 in narrow passages, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 3347-3358.
8. Kuwahara, K., Koyama, S. and Hashimoto, Y., 2000, Characteristics of evaporation heat transfer and flow pattern of pure refrigerant HFC134a in a horizontal capillary tube, *Proceeding of the 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference*, October 1-6, Kobe, Japan.
9. Kim, J. M. and Bang, K. H., 2000, An experimental study on evaporation heat transfer of R-22 in small square tubes, *Proceedings of the SAREK*, Summer, pp. 72-77.
10. Hong, J. W., Park, S. J., Oh, J. T. and Oh, H. K., 2000, Evaporation heat transfer characteristics of R-22, R-134a in small diameter tubes, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 12, No. 12, pp. 1081-1089.
11. Kim, J. M., 2001, An experimental study on the evaporation heat transfer of R-22 in small tubes, MS Thesis, Korea Maritime University, Busan, Korea.
12. Park, K. S., Choo, W. H. and Bang, K. H., 2003, Flow boiling heat transfer of R-22 in small-diameter horizontal round tubes, *Thermal Science & Engineering*, Vol. 11, No. 6, pp. 67-72.
13. Kandlikar, S. and Balasubramanian, P., 2003, Extending the applicability of the flow boiling correlation to low Reynolds number flows microchannels, *Proceedings of the 1st Int. Conf. on Microchannels and Minichannels*, Rochester, pp. 603-608.