

〈 논문 〉

## 액체과냉도가 하부폐쇄 수직환상공간 내부의 풀비등 열전달에 미치는 영향

강 명 기\*

(2004년 10월 14일 접수, 2004년 12월 17일 심사완료)

### Effects of Liquid Subcooling on Pool Boiling Heat Transfer in Vertical Annuli with Closed Bottoms

Myeong-Gie Kang

**Key Words:** Subcooled Boiling(과냉비등), Annuli(환상공간), Closed Bottoms(하부폐쇄)

#### Abstract

Effects of subcooling on pool boiling heat transfer in vertical annuli with closed bottoms have been investigated experimentally. For the test, a tube of 19.1mm diameter and the water at atmospheric pressure have been used. Three annular gaps of 7.05, 18.15, and 28.20 have been tested in the subcooled water and results of the annuli are compared with the data of a single unrestricted tube. The increase in pool subcooling results in much change in heat transfer coefficients. At highly subcooled regions, heat transfer coefficients for the annuli are much larger than those of a single tube. As the heat flux increases and subcooling decrease, a deterioration of heat transfer coefficients is observed at the annulus of 7.05mm gap. Single-phase natural convection and liquid agitation are the governing mechanisms for the single tube while liquid agitation and bubble coalescence are the major factors at the bottom closed annuli.

————— 기호설명 —————

$D$  : 가열 튜브 직경  
 $h_b$  : 열전달 계수  
 $I$  : 공급전류  
 $L$  : 가열 튜브 길이  
 $q''$  : 열유속  
 $s$  : 틈새간격  
 $T_{sat}$  : 포화온도  
 $T_W$  : 튜브 표면 온도

$T_{wat}$  : 수조 내부 물 온도  
 $T_{wi}$  : 환상공간 내부 물 온도  
 $V$  : 공급전압  
 $\Delta T_{sat}$  : 과열도(=  $T_W - T_{sat}$ )  
 $\Delta T_{sub}$  : 과냉도(=  $T_{sat} - T_{wat}$ )

#### 1. 서 론

지난 수십 년에 걸쳐 풀비등열전달은 광범위하게 연구되어져 왔다. 풀비등열전달의 적용 영역 중 하나는 신형원전의 피동열교환기를 들 수 있다.<sup>(1)</sup> 피동열교환기는 안전계통에 설치되어 최종 열침원의 역할을 담당한다. 안전과 공간의 관점에서 설계를 고려할 때 주요한 두 가지 변수는 (1) 액체의 과냉도가 풀비등열전달에 미치는 영향

\* 회원, 안동대학교 기계교육과  
 E-mail : mgkang@andong.ac.kr  
 TEL : (054)820-5483 FAX : (054)823-1766

**Table 1** Summary of the previous works

| Author                       | Remarks   |
|------------------------------|---|
| Yao and Chang (1983)         | - heater: stainless steel tube<br>- $D=25.4\text{mm}$ , $L=25.4$ and $76.2\text{mm}$<br>- liquid: R-113, acetone, and water at 1 atm<br>- liquid condition: saturated<br>- geometry: vertical annuli with closed bottoms<br>- gap sizes: 0.32, 0.80, and 2.58mm   |
| Hung and Yao (1985)          | - heater: stainless steel tube<br>- $D=25.4\text{mm}$ , $L=101.6\text{mm}$<br>- liquid: R-113, acetone, and water at 1 atm<br>- liquid condition: subcooled or saturated<br>- geometry: horizontal annuli<br>- gap sizes: 0.32, 0.80, and 2.58mm  |
| Fujita et al. (1988)         | - heater: copper plate<br>- $30 \times 30$ and $30 \times 120\text{mm}$ in width $\times$ length<br>- liquid: water at 1 atm<br>- liquid condition: saturated<br>- geometry: vertical/inclined spaces between surfaces periphery; open, closed sides and bottom<br>- gap sizes: 0.15, 0.60, 2.0 and 5.0mm |
| Bonjour and Lallemand (1998) | - heater: copper plate<br>- $60 \times 120\text{mm}$ in width $\times$ length<br>- liquid: R-113 at 1 atm<br>- liquid condition: saturated<br>- geometry: vertical spaces between rectangular surfaces periphery; sides and bottom are left open<br>- gap sizes: 0.3, 0.50, 1.0 and 2.0mm                 |
| Kang (2001)                  | - heater: stainless steel tube<br>- $D=25.4\text{mm}$ , $L=570\text{mm}$<br>- liquid: water at 1 atm<br>- liquid condition: saturated<br>- geometry: vertical annuli, open/closed bottoms<br>- gap sizes: 3.9 and 15mm  |
| Passos et al. (2004)         | - heater: copper disk (diameter 12mm)<br>- liquid: FC72 and FC87 at 1 atm<br>- liquid condition: subcooled or saturated<br>- geometry: horizontal spaces between disks<br>- gap sizes: 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, and 13mm   |

을 평가하는 것과 (2) 주어진 공간에서 열전달을 향상시키는 방안을 발견하는 것이다. 열교환기가 위치한 수조 내부 액체는 초기에는 과냉상태이며, 열교환 기구(mechanism)는 단상자연대류와 과냉비등을 거쳐 포화비등으로 바뀌게 된다.

가열형상이 좁은 공간에 제한되지 않은 경우는 다양한 연구 결과가 발표되었다. Judd 등<sup>(2)</sup>은 핵비등영역에서 과냉도가 비등열전달에 미치는 영향을 조사하였다. 그들은 이전의 결과들을 정리하여 과냉도와 과열도 사이의 관계를 이론적으로 연구하였다. Celata 등<sup>(3)</sup>은 풀비등과 강제대류비등의 비교를 통한 연구결과를 발표하였다. 그들은 이성분혼합물을 선정하여 혼합비, 과냉도, 그리고

유체속도의 영향을 살펴보았다. 최근에 Kang<sup>(4)</sup>은 대기압 상태의 수조 내부에 수직으로 설치한 19.1mm의 스테인리스강 튜브를 이용하여 과냉도가 풀비등열전달에 미치는 영향과 수조 내부 열적혼합에 대한 약간의 연구결과를 발표하였다.

과냉도가 환상공간 내부의 유동비등에 미치는 영향은 널리 연구되어져왔음<sup>(5,6)</sup>에 비해 과냉도가 환상공간 내부의 풀비등에 미치는 영향을 연구한 것은 매우 드문 실정이다. 틸새 효과가 풀비등열전달에 미치는 영향에 대한 이전 연구 중 주요 결과는 Table 1에 요약된 것과 같다. 틸새 공간과 관련된 주된 형상은 환상공간<sup>(7-9)</sup>과 평판<sup>(10-12)</sup>이다. 약간의 형상에서는 하부폐쇄 조건에 대한 연구결과도 포함하고 있다.<sup>(7,9,10)</sup> 기존의 자료들을 살펴보면 환상공간에서 과냉도가 풀비등 열전달에 미치는 영향을 취급하고 있는 연구는 거의 전무한 실정이다. Hung과 Yao<sup>(8)</sup>는 단지 25℃의 과냉도에 대한 연구를 통하여 동일한 벽면 온도에 대해 과냉비 등의 경우가 높은 열유속을 가진다는 것을 발표하였다.

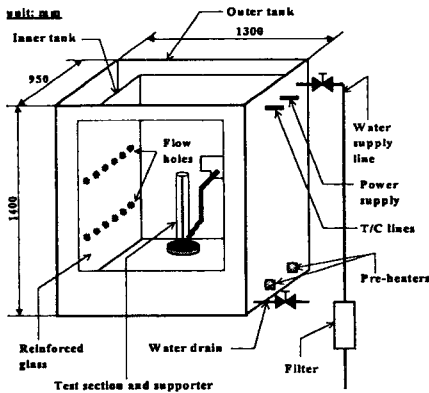
이전의 연구 결과들을 정리하면 과냉도가 비등열전달에 미치는 영향은 유체가 강제순환의 조건이거나 형상이 좁은 공간에 제한되어 있지 않은 경우에는 많은 연구가 진행되어져 왔음을 알 수 있다. 그렇지만 저자가 아는 한, 과냉도가 하부폐쇄 환상공간 내부의 풀비등 열전달에 미치는 영향을 취급한 연구는 아직까지 발표된 적이 없다. 강제대류 비등에 대한 기구는 풀비등과 서로 다르며,<sup>(1)</sup> 제한된 공간에 대한 비등은 제한되지 않은 경우와는 서로 다르다. 따라서, 본 연구는 하부폐쇄 환상공간 내부의 과냉풀비등 열전달에 대해 연구함으로써 주요 열전달기구를 규명함과 아울러 성능이 향상된 피동형열교환기를 설계하기 위한 실마리를 제안하는 것을 그 목적으로 하고 있다.

## 2. 실험

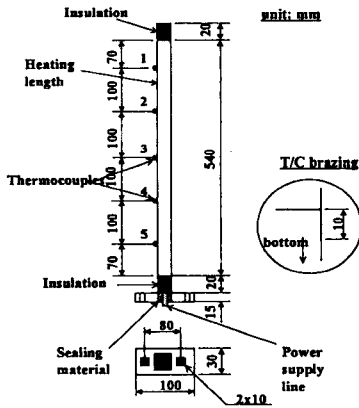
실험 장치의 개도는 Fig. 1과 같다. 수조[Fig. 1(a)]의 재질은 스테인리스강이며, 사각형 단면적(950×1300mm)과 1400mm의 높이를 가지고 있다. 이 수조의 전면은 관찰 및 사진 촬영을 위해 유리로 되어 있으며 가로×세로가 1000×1000mm이다. 수조는 이중 벽 구조로 되어 있다. 안쪽 수조

Table 2 Test matrix

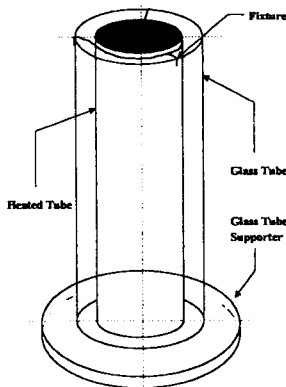
| Gap $s$ , mm | Bond number | Heat flux $q''$ , kW/m <sup>2</sup> | Subcooling $\Delta T_{sub}$ , °C |
|--------------|-------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| $\infty$     | -           | 0-120                               | 0-50                             |
| 7.05         | 2.81        | 0-120                               | 0-50                             |
| 18.15        | 7.24        | 0-120                               | 0-50                             |
| 28.20        | 11.25       | 0-120                               | 0-50                             |



(a)



(b)



(c)

크기는 800×1000×1000mm(깊이×폭×높이)이며, 벽면에는 외부 수조로부터 유체가 유입되도록 하기 위해 여러 개의 구멍(직경 28mm)을 가지고 있다. 내부와 외부 수조의 바닥면 사이 공간에는 물을 예열하기 위해 히터당 용량이 5kW/m<sup>2</sup>인 4개의 보조히터를 설치했다.

열손실을 줄이기 위해 수조의 좌, 우, 그리고 뒷면은 50mm 두께의 유리섬유로 단열처리 하였다. 열교환 튜브는 Fig. 1(b)에 나타낸 것과 같은 전기저항히터(가열길이×직경=540×19.1mm)로서 조사하였다. 히터의 표면은 비평가공을 거쳐서 매끈하게 가공하였으며, 220V의 교류 전원은 시편의 하부를 통하여 공급하였다.

튜브 표면온도는 직경 1.5mm인 5개의 T-형식 열전대를 사용하여 측정하였다. 정확한 온도 측정을 위해 열전대의 끝 부분을 10mm 정도 직각으로 굽힌 후 굽힌 부분을 튜브 표면에 청동으로 접합하였다. 수조 내부 물온도를 측정하기 위하여 6개의 T-형식 열전대(직경 1.5mm)를 내부 수조의 바닥면으로부터 상부방향으로 180mm 간격으로 설치하였다. 모든 열전대는 물의 포화온도에서 교정하였다. 예열히터 및 가열시편에 공급되는 전압 및 전류를 각각 측정하고 제어하기 위하여 전압 및 전류를 디지털 값으로 읽을 수 있는 3개의 채널로 구성된 두 대의 전력공급계를 사용하였다. 각 채널당 용량은 10kW이다.

열교환 시편은 Fig. 1(a) 수조 내부에 있는 지지대에 수직으로 조립하였다. 그런 다음 Fig. 1(c)에 나타낸 유리관지지대를 수조 내부의 지지대에 조립한 다음 최종적으로 유리관을 유리관지지대에 고정하였다. 유리관의 고정을 위하여 유리관 지지대에 유리관의 내경 및 외경을 고려한 깊이 10mm 가량의 홈을 원형으로 가공하여 유리관이 그 틈새에 끼워지도록 하였다. 한편, 유리관 조립부로 유로가 형성되는 것을 방지하기 위하여 지

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

지대와 유리관 접합부를 실리콘으로 밀봉하였다. 환상공간을 구현하기 위하여 Table 2에 나타낸 것과 같이 세 개의 서로 다른 유리관을 사용하였다. 한편, 유리관과 가열 시편 사이에 균일한 간격이 유지되도록 하기 위하여 Fig. 1(c)에 나타낸 것과 같이 가는 강선으로 만들어진 고정구를 유리관과 시편 사이공간에 끼워 넣어 지지하였다.

외부 수조 바닥면으로부터 1100mm 높이가 되도록 수조 내부에 물을 채운 후 4개의 예열히터를 작동하여 물을 가열하였다. 가열과정 중 물의 온도를 측정하였다. 물의 온도가 실험을 위한 과냉도에 도달하였을 때 예열시편에 대한 전원공급을 차단하고 가열시편을 작동하였다. 가열시편에 공급되는 열유속을 변화시키면서 원하는 실험값을 측정하였다. 실험 수행 도중 내부 수온에 대한 과냉도 변화는 거의 없는 것을 확인하였다. 실험이 완료되면 다른 과냉도 및 틈새간격에 대한 실험을 수행하였다.

전기적으로 가열한 튜브 표면에서의 열유속은 공급된 교류전원에 대한 측정값과 튜브의 형상으로부터 결정할 수 있으며 다음과 같다.

$$q'' = \frac{VI}{\pi DL} = h_b \Delta T \quad (1)$$

$$\Delta T = T_W - T_{wat} \quad : \text{단일튜브}$$

$$\Delta T = T_W - T_{wi} \quad : \text{환상공간}$$

여기서  $V$ 와  $I$ 는 공급한 전압과 전류를 각각 나타내며,  $D$ 와  $L$ 은 각각 튜브 내경과 가열길이를 의미한다.  $T_W$ 는 튜브 표면온도를 의미하며,  $T_{wat}$ 와  $T_{wi}$ 는 수조 및 환상공간 내부에서 측정

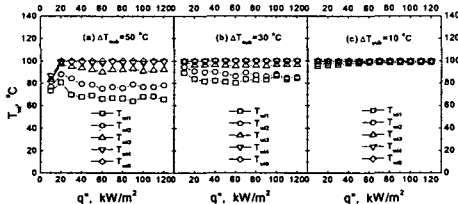


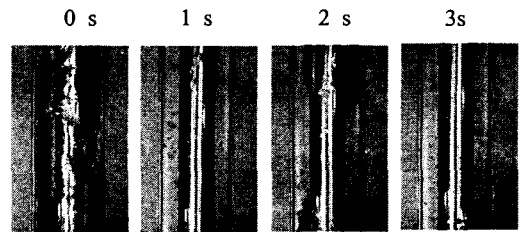
Fig. 2 Changes in local water temperatures in the annulus ( $s=7.05\text{mm}$ )

한 물 온도를 각각 나타낸다.  $T_{wat}$ 는 수조 내부에 수직 방향으로 설치한 열전대 읽음값을 산술 평균한 값을,  $T_W$ 와  $T_{wi}$ 는 일정시간(약 90초 정도) 동안 취득한 실험값을 시간 평균한 값을 사용하였다.

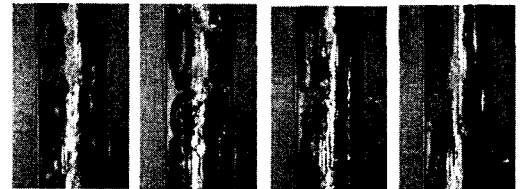
측정한 전압 및 전류에 대한 불확실도는 각각 0.5% 이다. 열유속에 대한 불확실도는 시편 치수에 대한 불확실도를 무시하면 전달한 동력의 불확실도와 같아지므로 전압과 전류의 곱으로부터 구할 수 있다. 따라서, 열유속은  $\pm 1.0\%$ 의 불확실도를 가진다. 측정된 온도에 대한 불확실도는 열전대 접점의 오차, 접합부 오차, 그리고 계측기 변환오차의 합으로 나타낼 수 있으며, 그 값은  $\pm 0.3^\circ\text{C}$  이다. 한편, 열전달계수에 대한 불확실도는  $q''/\Delta T$ 의 계산을 거쳐서 결정되며,  $\pm 10\%$  정도의 값을 가지는 것으로 평가된다.

### 3. 결과 및 토론

환상공간 내부의 액체 온도를 측정하기 위하여 내부 가열튜브와 외부 유리관 사이의 틈새 공간에 다섯 개의 열전대를 설치하였다. 열전대 설치 위치는 튜브 표면에 설치된 열전대의 위치와 동일하게 하였다. 측정된 온도는 불연속적인 유체



(a)  $\Delta T_{sub} = 30^\circ\text{C}$



(b)  $\Delta T_{sub} = 10^\circ\text{C}$

Fig. 3 Photos of boiling at  $q'' = 70\text{kW/m}^2$

유입으로 인해 일정범위 내에서 요동하는 값을 가지므로 실험부에서 설명한 것과 같이 초기 일정시간 동안 측정된 값을 시간 평균한 값을 사용하였다. Fig. 2는 틈새간격( $s$ )이 7.05mm 인 경우에 대해 열유속 변화에 따른 내부 액체의 온도 변화를 과냉도의 함수로써 나타낸 것이다. 열유속이  $20\text{kW/m}^2$  이상인 경우 환상공간의 최하부에서 측정된 액체온도( $T_{ws}$ )는 수조 내부 액체의 과냉도와 무관하게 거의 포화온도에 가까운 값을 가짐을 알 수 있다. 과냉도가 감소하거나 열유속이 증가하면 최상부액체온도( $T_{wtl}$ )와 최하부액체온도( $T_{ws}$ ) 사이의 차이는 줄어드는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 하부영역에서는 외부 액체 유입의 영향을 거의 받지 않으므로 포화상태에 근접하는 조건을 유지하며, 열유속이 증가하거나 과냉도가 줄어들면 기포 유동에 의한 액체교란이 증가함에 따른 것이다. 환상공간 내부 액체의 평균온도를 결정하기 위하여 Fig. 2에 나타낸 국소온도를 산술적으로 평균하였다.

가시적인 관찰을 위하여 표면에서의 비등에 대한 사진을 촬영하고 열유속이  $70\text{kW/m}^2$ 이며, 과냉도가  $30^\circ\text{C}$ 와  $10^\circ\text{C}$ 일 때의 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 사진들은 열전대 2의 위치에서 촬영하였다. 하부유로가 폐쇄된 환상공간 내부에서 발생하는 풀비등은 비정상상태(unsteady state)이므로 초기 3초 동안의 비등현상을 나타내었다. 비록, 짧은 시간 동안은 비정상상태이지만 일정 시간 동안 관찰하면 비등현상은 일정 주기를 가지며 반복적으로 발생하는 것을 알 수 있었다. 액체가 포화상태에 접근하면 기포덩어리의 형성 빈도는 점점 증가하게 된다. 커다란 기포덩어리는 아주 낮은 열유속에서도 관찰되곤 하는데 이러한 경향은 구속되지 않은 단일튜브나 하부유로가 개방되어 있는 경우에는 관찰되지 않는다. 초기에는 단지 작은 기포만이 관찰되다가 하부영역으로부터 많은 기포의 발생이 갑자기 시작된다. 이 기포들은 환상공간 내부에 커다란 기포덩어리를 형성한 후, 상부로 이동하면서 튜브 표면에 빠른 유동류를 형성한다. 기포 덩어리가 상부유로를 통하여 빠져나간 후 외부의 과냉액체가 환상공간 내부로 갑작스럽게 밀려들어온다. 밀려들어온 액체가 환상공간 내부에서 포화온도 근방에 도달하게 되면 갑작스러운 기포의 형성이 다시 시작되며, 이러

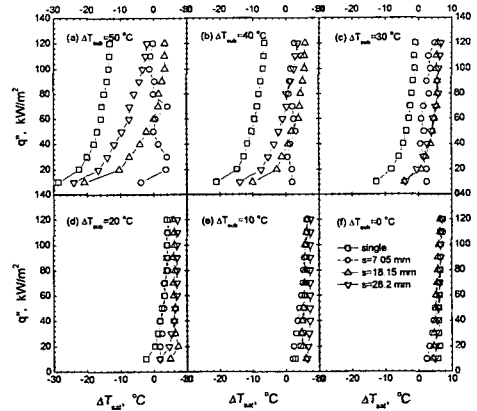


Fig. 4 Curves of  $q''$  versus  $\Delta T_{sar}$

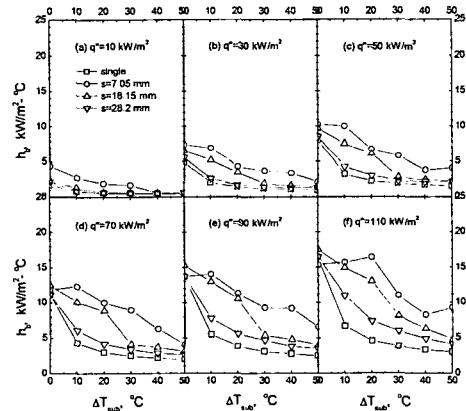


Fig. 5 Curves of  $h_b$  versus  $\Delta T_{sar}$

한 일련의 과정들이 환상공간 내부에 기포와 액체의 주기적인 맥동류(pulsating flow)를 형성한다. 따라서 매우 강한 액체교란 효과가 하부폐쇄 환상공간에서 발생하게 된다. 유동주기는 열유속과 과냉도에 의존한다. 과냉도가 높거나 열유속이 낮을수록 주기가 증가하게 된다. 과냉도가 줄어들면 기포 발생 빈도가 증가하며 기포덩어리가 환상공간 내부를 거의 채우게 된다. 과냉도가 높은 경우 주된 열전달 기구는 액체교란이며, 액체가 포화상태에 근접할수록 튜브 표면에서의 기포 군집 형성이 점점 더 주된 기구로 등장한다.

Fig. 4는 과냉도 변화에 따른 열유속 대 과열도의 그래프를 나타낸 것이다. 과냉도의 값이 큰 경우 열유속이 증가하면 과열도가 큰 쪽으로 변

화한다. 그러나, 액체가 포화상태에 접근하면 열유속 증가에 따른 과열도 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다. 구속되지 않은 단일튜브의 경우 과열도 증가에 따라 열유속이 증가하는 일정한 경향을 나타냄에 비하여 환상공간이 있는 경우는 그 경향이 일정하지 않다. 특히, 틈새간격이 좁고 과냉도가 클수록 과열도와 열유속 사이의 관계가 매우 불규칙하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 환상공간의 내부에서 유동의 변화가 매우 급격한 것에서 비롯된다. Fig. 3에 나타낸 것과 같이 액체와 기포의 반복 주기가 큰 높은 과냉도의 경우 동일 열유속에서 더 큰 과열도가 나타나게 된다. 한편, 과냉도가 높아도 좁은 틈새의 경우( $s=7.05\text{mm}$ ) 열유속 증가에 따른 과열도의 차이가 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 과냉도가 높아지고 틈새간격이 증가할수록 튜브 표면의 온도가 액체의 포화온도보다 낮아져 과열도가 음의 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이 영역에서는 튜브 표면에서 비등이 관찰되지 않으며, 주된 열전달 기구는 단상자연대류가 되겠다.

Fig. 5는 수조 내부 액체의 과냉도 변화에 따른 열전달계수를 열유속과 틈새간격의 함수로 나타낸 것이다. 구속되지 않은 단일 튜브의 경우를 세 가지 틈새간격에 대한 결과와 서로 비교하였다. 동일 열유속에 대해 액체 과냉도가 감소하면 기포유동에 의한 액체교란 효과가 증가하므로 열전달계수가 증가한다. 열유속이  $70\text{kW/m}^2$ 일 때 과냉도가  $50^\circ\text{C}$ 에서  $0^\circ\text{C}$ 로 감소하면, 단일튜브와  $s=7.05\text{mm}$ 인 환상공간의 경우 열전달계수가 각각  $455\%$ ( $2.0 \rightarrow 1.1\text{kW/m}^2$ )와  $190\%$ ( $4.1 \rightarrow 11.9\text{kW/m}^2$ ) 증가하는 것을 알 수 있다. 열전달계수 대 과냉도의 그래프는 틈새간격이 증가할수록 단일튜브 결과에 접근하는 것을 알 수 있다. 틈새간격이 줄어들거나 열유속이 증가할수록 그래프는 단일튜브의 경우와 비교할 때 많은 차이를 나타낸다. 단일튜브의 경우,  $\Delta T_{\text{sub}} > 10^\circ\text{C}$ 이면, 과냉도가 증가함에 따라 열전달계수는 거의 선형적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 이 영역에서 주된 열전달 기구는 Judd 등<sup>(2)</sup>이 제안한 바와 같이 단상자연대류이다.  $\Delta T_{\text{sub}} \leq 10^\circ\text{C}$ 이면, 열전달계수가 급격하게 증가하면서 주된 열전달 기구는 활성비등핵밀도 증가에 따른 액체교란으로 바뀌게 된다. 하부 폐쇄 환상공간의 경우 전반적인 경향은 단일튜브

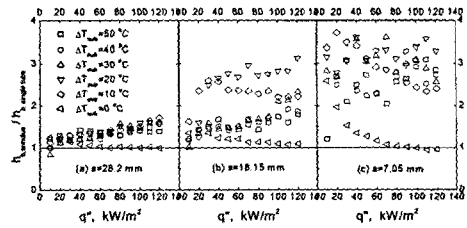


Fig. 6 Plots of  $h_{b,annulus}/h_{b,single\ tube}$  versus  $q''$

와 서로 비슷하지만 틈새간격이 줄어들수록 큰 차이를 나타내게 된다. 환상공간의 경우, 전 과냉도 영역에 걸쳐 단일튜브보다 높은 열전달계수를 가지는 것을 알 수 있다. 특히, 과냉도가 높은 영역에서 양자간의 차이가 크게 나타나며, 고열유속 영역을 제외하면 틈새간격이 작을수록 그 차이가 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 액체교란의 영향에 의한 것이다.  $s=18.15\text{mm}$ 인 경우를 살펴보면, 과냉도 감소에 따라 열전달계수가 급격하게 증가하는 현상을 보여줌으로서 틈새공간에 형성되는 기포의 운동에 따른 액체교란의 증가를 가시적으로 보여준다. 이러한 현상은  $s=7.05\text{mm}$ 인 경우, 보다 낮은 과냉도에서 나타나게 된다. 틈새공간 내에서 지속적인 기포의 증가는 균집형성에 따른 열전달계수의 감소로 나타나게 된다.  $s=7.05\text{mm}$ 인 경우, 과냉도가 감소하면서 열전달계수가 감소하는 경향을 보여주고 있다. 열유속이 클수록 높은 과냉도에서 이러한 현상이 발생한다. 이러한 경향은 Fig. 3에서 살펴본 것과 같은 기포 균집의 형성에 따른 것이다.  $q'' < 50\text{ kW/m}^2$ 인 경우, 튜브 표면을 뒤덮을 정도의 기포 덩어리가 형성되기에는 충분하지 않으므로 과냉도 감소에 따른 열전달계수 감소는 관찰되지 않으며, 액체교란의 증가로 인해 열전달계수가 증가하는 경향을 보여준다.

환상공간 도입에 따른 열전달계수 변화를 확인하기 위해 열전달계수를 서로 비교하고 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 틈새간격이 줄어들면서 양자간 비율 ( $h_{b,annulus} / h_{b,single\ tube}$ )이 증가하는 것을 알 수 있다. 세 가지 틈새간격 모두에 대해  $\Delta T_{\text{sub}}=20^\circ\text{C}$  일 때 비율이 높게 나오는 것을 알 수 있다. 포화상태인 경우,  $s=7.05\text{mm}$ 를 제외하면 비율이 1에 가까운 것을 알 수 있다.  $s=7.05\text{mm}$

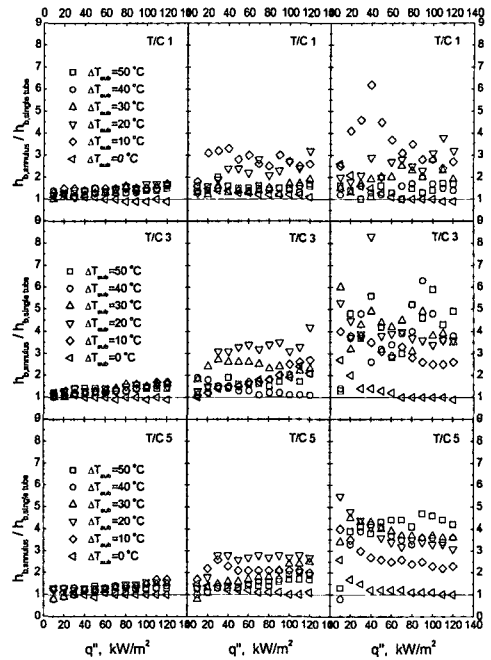
인 경우에는 그 비율이 높게 나오는 것을 알 수 있다. 그렇지만  $q'' > 60 \text{ kW/m}^2$ 이면 양자간의 비가 거의 1에 가깝게 나타나는 것을 알 수 있다. 과냉상태에서  $s=18.15\text{mm}$ 와  $28.2\text{mm}$ 인 경우 열유속 증가에 따라  $h_{b,annulus} / h_{b,single tube}$ 가 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나,  $s=7.05\text{mm}$ 의 경우  $q'' > 50 \text{ kW/m}^2$ 일 때 열유속 증가는 열전달계수비의 감소를 초래하는 것을 알 수 있다.

튜브 표면에서 열전달계수의 변화가 가장 많이 발생하는 위치를 발견하기 위하여 시편 표면의 상(T/C 1), 중(T/C 3), 그리고 하(T/C 5) 세 군데 위치에서 계산한 열전달계수를 환상공간과 단일 튜브에 대하여 계산하고 그 비를 Fig. 7에 나타내었다.  $s=28.2\text{mm}$ 인 경우 열유속 증가에 따른 비율의 변화는 위치에 따라 무관하게 Fig. 6에 나타낸 평균에 대한 비율과 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나, 틈새공간이 줄어들수록 국소값에 대한 비율은 평균값과 서로 큰 차이를 나타낸다.  $s=7.05\text{mm}$ 인 경우를 예로 들면 T/C 3의 위치에 대한 국소값의 비는 최대 8.3 으로서 평균인 경우의 최대값인 3.71의 2배 이상의 값을 가지고 있다. 이러한 결과로부터 기포 유동이 열전달에 미치는 영향은 튜브 위치에 따라 서로 다른 것을 알 수 있으며, 그 영향이 가장 강하게 나타나는 위치는 튜브 중심 부위인 T/C 3인 것을 알 수 있다.

최근 들어 주요 현안으로 대두하고 있는 신형 원전 설계시 고유 안전성 관점에서 채택이 필수적으로 고려되는 피동형 원자로잔열제거시스템의 경우 수조가 과냉상태인 초기 1~2시간 정도의 기간동안 효과적으로 열제거를 수행하는 것이 원자로 안전에 매우 중요하므로,<sup>(4)</sup> 하부폐쇄 환상공간을 열교환기 설계에 도입하면 과냉 영역에서 단일튜브보다 높은 열전달계수를 가지므로 매우 효과적인 방안이 될 수 있을 것으로 생각한다.

#### 4. 결론

풀 내부의 액체 과냉도가 대기압 조건하에 있는 물의 풀비등에 미치는 영향을 규명하기 위하여 세 가지 서로 다른 틈새간격(7.05, 18.15, 28.2 mm)을 가지는 하부폐쇄 환상공간에 대한 실험을 실시하고 그 결과를 단일튜브에 대한 결과와 서



(a)  $s=28.2\text{mm}$  (b)  $s=18.15\text{mm}$  (c)  $s=7.05\text{mm}$

Fig. 7 Plots of  $h_{b,annulus}/h_{b,single tube}$  versus  $q''$  at local points on tube surface

로 비교하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 과냉도가 증가하면 열전달계수에 많은 변화를 초래한다. 단일튜브인 경우, 과냉도가 50°C에서 0°C로 변하면, 열전달계수가 45% 증가한다.
- (2) 과냉도가 10~20°C일 때 환상공간 도입에 따른 열전달계수 증가가 뚜렷하게 관찰된다. 이러한 경향은 틈새간격이 작을수록 분명하게 나타나는 것을 알 수 있다.
- (3)  $s=7.05\text{mm}$ 인 경우 과냉도가 감소하면 열전달계수가 감소하는 경향을 보이며, 열유속이 클수록 높은 과냉도에서 이러한 현상이 발생한다.
- (4) 주요 열전달 기구는 단일튜브인 경우 단상 자연대류와 액체교란인 것에 비하여 환상공간의 경우에는 액체교란과 기포군집형성인 것을 확인하였다.
- (5) 하부폐쇄 환상공간을 피동형 열교환기 설계에 도입하면 과냉 영역에서 효과적으로 열제거를 수행할 수 있다.

## 참고문헌

- (1) Chun, M. H. and Kang, M. G., 1998, "Effects of Heat Exchanger Tube Parameters on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer," *ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 120, pp. 468 ~ 476.
- (2) Judd, R.L., Merte, H. and Jr. Ulucakli, M.E., 1991, "Variation of Superheat with Subcooling in Nucleate Pool Boiling," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 201 ~ 208.
- (3) Celata, G.P., Cumo, M. and Setaro, T., 1994, "A Review of Pool and Forced Convective Boiling of Binary Mixtures," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 9, pp. 367 ~ 381.
- (4) Kang, M.G., 2002, "Thermal Mixing in a Water Tank During Heating Process," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 4361 ~ 4366.
- (5) Gungor, K.E. and Winterton, H.S., 1986, "A General Correlation for Flow Boiling in Tubes and Annuli," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 29, No. 3, pp. 351 ~ 358.
- (6) Liu, Z. and Winterton, R.H.S., 1991, "A General Correlation for Saturated and Subcooled Flow Boiling in Tubes and Annuli, Based on a Nucleate Pool Boiling Equation," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No. 11, pp. 2759 ~ 2766.
- (7) Yao, S.C. and Chang, Y., 1983, "Pool Boiling Heat Transfer in a Confined Space," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 26, pp. 841 ~ 848.
- (8) Hung, Y. H. and Yao, S. C., 1985, "Pool Boiling Heat Transfer in Narrow Horizontal Annular Crevices," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 107, pp. 656 ~ 662.
- (9) Kang, M.G., 2002, "Pool Boiling Heat Transfer in Vertical Annular Crevices," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 45, No. 15, pp. 3245 ~ 3249.
- (10) Fujita, Y., Ohta, H., Uchida, S. and Nishikawa, K., 1988, "Nucleate Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux in Narrow Space Between Rectangular Spaces," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, No. 2, pp. 229 ~ 239.
- (11) Bonjour, J. and Lallemand, M., 1998, "Flow Patterns During Boiling in a Narrow Space Between Two Vertical Surfaces," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 24, pp. 947 ~ 960.
- (12) Passos, J.C., Hirata, F.R., Possamai, L.F.B., Balsamo, M. and Misale, M., 2004, "Confined Boiling of FC72 and FC87 on a Downward Facing Heating Copper Disk," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 25, pp. 313 ~ 319.