

출구유로 단면적이 수직 환상공간 내부의 풀비등에 미치는 영향

강 명 기*†

* 안동대학교 기계교육과

Effects of Outflow Area on Pool Boiling in Vertical Annulus

Myeong-Gie Kang*†

* Dept. of Mechanical Engineering Education, Andong Nat'l Univ.

(Received September 6, 2012 ; Revised January 21, 2013 ; Accepted January 21, 2013)

Key Words: Heat Transfer(열전달), Pool Boiling(풀비등), Annulus(환상공간), Vertical Tube(수직 튜브), Outflow Area(출구유로 단면적)

초록: 출구유로 단면적이 수직 환상공간 내부의 풀비등 열전달에 미치는 영향을 규명하기 위하여 세 가지 서로 다른 유동제한장치를 실험적으로 연구하였다. 가열 튜브는 매끈한 표면을 가지는 스테인리스강이며 대기압 상태 하에 있는 물을 사용하였다. 환상공간의 하부유로 조건은 개방과 폐쇄된 경우 두 가지를 모두 고려하였으며 유동제한장치를 설치한 환상공간에 대한 결과를 유동제한장치가 없는 환상공간에 대한 결과와 서로 비교하였다. 출구유로 단면적을 축소하는 것은 열전달의 감소를 초래하지만, 출구 유로가 아주 작은 경우 열전달계수가 증가하는 경우도 관찰되었다. 이러한 경향은 기포군집의 형성과 이동에 따른 액체교란의 차이로서 설명되며, 유동대류, 맥동류 발생, 기포 군집 하부의 미세충증발이 중요한 열전달 기구인 것으로 확인하였다.

Abstract: To identify the effects of an outflow area on pool boiling heat transfer in a vertical annulus, three different flow restrictors were studied experimentally. For the test, a heated tube of smooth stainless steel and water at atmospheric pressure were used. Both annuli with open and closed bottoms were considered. To validate the effects of the outflow area on the heat transfer, the results of the annulus with the restrictor were compared with the data for the plain annulus without the restrictor. The reduction of the outflow area ultimately results in a decrease in the heat transfer. As the outflow area is very small, a slight increase in heat transfer is also observed. The major cause of this tendency is explained as the difference in the intensity of liquid agitation cause by the movement of coalesced bubbles. It is identified that the convective flow, pulsating flow, and evaporative mechanism are considered as the important mechanisms.

- 기호설명 -

A_{gap} : 환상공간의 유로 단면적, m^2

A_{out} : 출구유로 단면적, m^2

A_r : 단면적비(= A_{out}/A_{gap})

A_T : 데이터 수집 오차, $^{\circ}C$

D : 가열튜브 외경, m

D_i : 환상공간의 외부 튜브 내경, m

d : 유동제한장치의 내경, m

h_b : 비등열전달계수, $W/m^2^{\circ}C$

h_r : 열전달계수 사이의 비율

I : 공급전류, A

L : 가열 튜브 길이, m

P_T : 정밀도 한계, $^{\circ}C$

q'' : 열유속, W/m^2

s : 틈새간격, m

s_t : 유동제한장치 주변의 틈새간격, m

T_{sat} : 포화온도, $^{\circ}C$

T_W : 튜브표면온도, $^{\circ}C$

V : 공급전압, V

w : 유동제한장치의 길이, m

ΔT_{sat} : 과열도(= $T_W - T_{sat}$), $^{\circ}C$

1. 서론

향상된 열교환 성능을 가지는 열교환기 설계 등의 목적을 이루기 위한 방안의 하나로 풀비등(pool boiling) 열전달은 수십 년 동안 꾸준히 연구되어져 오고 있다.^(1,2) 비록 많은 연구자들이

† Corresponding Author, mgkang@andong.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

기하학적 인자가 풀비등열전달에 미치는 영향에 대하여 연구를 지속해 오고 있지만 제한된 공간 내부의 풀비등에 대한 연구는 매우 드물다.⁽³⁾ 기존에 발표된 결과들에 의하면, 열전달을 향상시키는 효과적인 방안 중의 하나는 제한된 공간을 고려하는 것이다.^(4,5)

튜브 표면에 형성되는 얇은 액막(liquid film)의 증발과 증가된 기포운동(bubble activity)이 제한된 공간 내부에서 발생하는 향상된 열전달의 주요 원인인 것으로 판단된다.^(5,6) 튜브 표면으로부터 기포로 열이 전달될 때 기포 하부에 형성되는 액막은 주된 열저항을 형성하므로 액막 두께가 감소되면 열전달이 증가한다.⁽⁶⁾ Cornwell과 Houston⁽⁷⁾에 따르면 가열 튜브 표면을 따라 미끄러지는 기포들은 주변의 액체들을 교란한다. 제한된 공간 내부에서는 기포들에 의해 맥동류(pulsating flow)가 발생하며, 그 결과 매우 활동적인 액체교란(liquid agitation)이 생성된다.⁽⁸⁾ 액체교란의 정도가 증가하면 열전달이 향상된다.

제한된 공간 내부에서는 고열유속 영역에서 열전달이 둔화(deterioration)되는 현상이 때때로 관찰된다.^(6,9) 이러한 둔화현상의 주된 이유는 환상공간의 상부 영역에서 기포 군집 형성에 따라 액체의 유입이 원활하지 않은데 기인하는 것으로 이해되고 있다.⁽⁸⁾ 고 열유속 영역에서 기포 군집이 지속적으로 형성되면 가열표면이 기포 덩어리로 둘러싸이게 된다.⁽⁵⁾ 만일 환상공간 밖으로 빠져나오는 기포들의 출구유동(outflow)이 방해받으면 이들 기포들은 환상공간의 내부를 상하로 이동하는 맥동류를 형성하면서 환상공간의 하부로부터 상부로 이동하는 기포들과 지속적으로 결합하면서 큰 기포로 성장하게 된다.⁽³⁾

최근에, Kang^(3,10)은 하부유로가 개방되거나, 폐쇄된 환상공간의 유입유동(inflow)이 풀비등열전달에 미치는 영향을 살펴보았다. Kang^(3,10)은 환상공간 상부 영역의 틈새간격(gap size)을 변화시키면서 감소된 틈새 간격의 영향은 열유속이 증가함에 따라 분명하게 관찰되는 것을 규명하였다. 환상공간의 상부 영역에서 유로 단면적이 감소하는 것은 상업용 원자로의 운전조건에서 조사특성(irradiation behavior)을 조사하는데 중요한 노내시험부(in-pile test section)등에서 찾아볼 수 있다.⁽¹¹⁾ 환상공간의 내부 유로 단면적이 줄어들어 기포의 자유로운 유동이 제한을 받는 추가적인 연구는 Kang⁽¹²⁾에 의하여 이루어졌다. Kang⁽¹²⁾은 하부유로를 폐쇄한 환상공간의 외부를 형

성하는 배관 상부 영역의 크기를 줄여서 단을 만든 후 그 영향을 살펴보았다. Kang의 이전 연구들^(3,10,12)에 의하면 환상공간의 출구유로 단면적을 변화하는 것은 환상공간 내부에서 발행하는 풀비등열전달에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

수직 환상공간의 상부 영역에서 유로 단면적의 변화가 풀비등에 미치는 영향을 규명하는 것은 유사한 형상을 가지는 설비들의 열적 해석에 매우 중요하므로 이에 대한 추가적인 연구를 수행하여 그 영향 및 전반적인 경향을 상세하게 규명해 볼 필요가 있다. Kang의 기존 연구들을 살펴보면 출구유로 단면적이 줄어드는 경우 흐름을 방해하는 유동제한장치(FR, flow restrictor)의 형상에 따라 풀비등에 미치는 영향이 서로 다르게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 새로운 형상에 대한 연구를 수행한 후 이전 결과들과의 비교를 통하여 환상공간의 출구유로 단면적(outflow area)이 풀핵비등(nucleate pool boiling) 열전달에 미치는 영향을 종합적으로 상세하게 규명하고자 한다. 이러한 형태의 연구는 Kang의 이전 연구를 제외하면 거의 이루어진 바가 없으므로 그 결과가 관련 분야 열설계에 어느 정도 기여할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

2. 실험

실험 장치에 대한 대략적인 그림은 Fig. 1과 같다. 물 저장용 수조의 치수는 가로×세로×높이(내부길이)가 각각 1300×950×1400mm이다. 균일한 온도 유지를 위하여 2중벽 구조로 구성하였다. 안쪽과 바깥쪽 수조 사이의 공간에 용량이 5kW인 예열용 히터 4개를 설치하였다.

시편에 전달되는 열전달량을 조절/측정하기 위하여 공급되는 전압(V)과 전류(I)가 숫자로 표시되는 출력 조절장치를 제작하여 사용하였다. 시편에 대한 개도는 Fig. 2와 같다. 그림에서 case1^(3,10)[Fig. 2(a)]과 case2⁽¹²⁾[Fig. 2(b)]는 이전의 연구에서 수행된 시편이며, 본 연구에서 사용한 시편은 case3[Fig. 2(c)]에 나타낸 것과 같다. 시편은 내부에 전기저항선을 갖는 스테인리스강 튜브($L=0.5\text{m}$, $D=19.1\text{mm}$)로 되어 있으며, 표면을 버핑(buffing)가공하여 아주 매끈하게 만들었다. 환상공간을 구현하기 위하여 유리관을 사용하였다. 유리관의 내경(D_i)은 55.4mm이므로 틈새 간격(s)은 18.2mm이며, 유리관의 길이는 600mm이다.

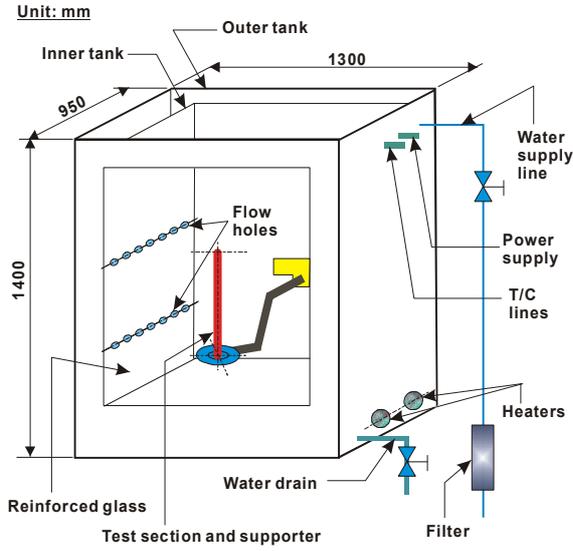


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

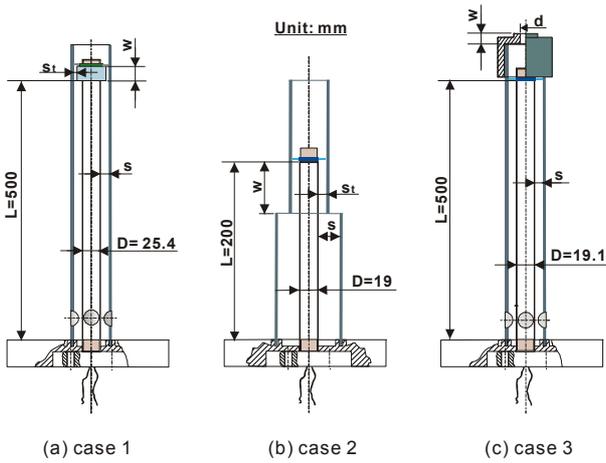


Fig. 2 Schematics of assembled test sections

출구유로 단면적을 조절하기 위한 유동제한장치는 환상공간의 상부 영역에 설치하였으며, 유동제한장치의 내경(d)을 변경하여 출구유로단면적(A_{out})을 변화하였다. 단면적간의 비율을 나타내는 A_r 은 A_{out} 을 환상공간에서의 유로단면적 [$A_{gap} = \pi(D_i^2 - D^2)/4$]으로 나눈 $A_r = A_{out}/A_{gap}$ 으로 정의된다. 선행 연구와 본 연구에 대한 시편별 A_{out} 은 다음 식과 같다.

$$A_{out} = \frac{\pi [D_i^2 - (D_i - 2s_t)^2]}{4} : \text{case 1 \& 2} \quad (1)$$

$$A_{out} = \frac{\pi d^2}{4} : \text{case 3} \quad (2)$$

Table 1 Geometries of previous and present studies

test section	bottom condition	D mm	L mm	s mm	w mm	s_t mm	d mm	A_r
case 1 ⁽¹⁰⁾	open	25.4	500	15	-	-	-	-
	open	25.4	500	15	10	7.7	-	0.42
	open	25.4	500	15	10	5.2	-	0.26
	open	25.4	500	15	10	2.7	-	0.13
	open	25.4	500	15	30	7.7	-	0.42
	open	25.4	500	15	30	5.2	-	0.26
	open	25.4	500	15	30	2.7	-	0.13
case 1 ⁽³⁾	closed	25.4	500	15	-	-	-	-
	closed	25.4	500	15	10	7.7	-	0.42
	closed	25.4	500	15	10	5.2	-	0.26
	closed	25.4	500	15	10	2.7	-	0.13
	closed	25.4	500	15	30	7.7	-	0.42
	closed	25.4	500	15	30	5.2	-	0.26
	closed	25.4	500	15	30	2.7	-	0.13
case 2 ⁽¹²⁾	closed	19	200	15.5	50	3.5	-	0.15
	closed	19	200	10.1	50	3.5	-	0.27
	closed	19	200	10.1	-	-	-	-
	closed	19	200	15.5	-	-	-	-
case 3 (present)	open	19.1	500	18.2	-	-	-	-
	open	19.1	500	18.2	15	-	10	0.04
	open	19.1	500	18.2	15	-	15	0.08
	open	19.1	500	18.2	15	-	20	0.15
	open	19.1	500	18.2	15	-	25	0.23
	open	19.1	500	18.2	15	-	30	0.33
	open	19.1	500	18.2	15	-	38	0.53
	closed	19.1	500	18.2	-	-	-	-
	closed	19.1	500	18.2	15	-	10	0.04
	closed	19.1	500	18.2	15	-	15	0.08
	closed	19.1	500	18.2	15	-	20	0.15
	closed	19.1	500	18.2	15	-	25	0.23
	closed	19.1	500	18.2	15	-	30	0.33
	closed	19.1	500	18.2	15	-	38	0.53

본 실험에서 A_r 은 0.04~0.53의 값을 가지며, 시편별 A_r 값은 Table 1에 나타난 것과 같다. 다양한 형상 조건에 대한 분석을 위하여 (1) 환상공간의 하부에 위치한 유입유로를 개방한 것과 폐쇄한 것으로 구분하였으며, (2) 유동제한장치의 내경을 6가지로 변형하면서 살펴보았다.

튜브 표면과 수조 내부 물의 온도는 T-형식(지름=1.5mm)열전대를 사용하여 측정하였으며, 튜브 표면 온도를 측정하기 위하여 5개의 열전대를 가열 표면에 설치하였다. 보다 정밀한 표면 온도

측정을 위하여 열전대 끝 부분을 대략 10mm 정도 튜브 표면에 접합하였다. 물 온도는 표면에 등 간격으로 열전대를 접합한 튜브를 수조 구석에 수직으로 세워 측정하였다.

실험은 대기압 상태 하에 있는 수조 내부에 일정 높이(1.1m)로 물을 채운 후 예열히터를 이용해 포화상태(100℃)까지 가열하였다. 포화상태에 도달 후 공기 등을 제거할 목적으로 약 30분 정도 추가적인 가열을 수행한 후 시편의 열유속(q'')을 변화시키면서 표면 온도를 측정하였다. 정밀한 온도 산출을 위해 측정값을 산술평균하였으며, 그것을 그 열유속에 대한 온도로 결정하였다. 하나의 유동제한장치 및 유입유로 조건에 대한 실험이 끝나면 다른 유동제한장치 및 유입유로 조건에 대해 실험을 수행하였다.

전기적으로 가열한 튜브 표면에서의 열유속은 공급전력을 열전달면적으로 나눈 것이며, 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$q'' = \frac{VI}{\pi DL} = h_b \Delta T_{sat} = h_b (T_W - T_{sat}) \quad (3)$$

여기서, V 와 I 는 각각 공급한 전압과 전류이며, D 와 L 은 각각 가열튜브 외경과 길이를 나타낸다. 그리고 T_W 와 T_{sat} 는 각각 튜브 표면 온도와 물의 포화온도를 나타낸다. 식 (3)에 사용된 온도는 측정된 온도를 산술평균한 것이다. Fig. 2의 case3 시편에 대한 열유속(kW/m^2)에 따른 전압(V) 및 전류(A)의 분포는 Table 2와 같다.

측정값에 대해 오차확산법칙(error propagation law)⁽¹³⁾을 사용하여 불확실도를 분석하였다. 데이터 수집 오차($A_T, \pm 0.05^\circ\text{C}$) 및 정밀도 한계($P_T, \pm 0.1^\circ\text{C}$) 값을 온도에 대한 불확실도 분석 시 고려하였다. 95% 신뢰도 범위에서 측정된 온도에 대한 불확실도는 $(A_T^2 + P_T^2)^{1/2}$ 로 계산되며 그 값은 $\pm 0.11^\circ\text{C}$ 이다. 열유속에 대한 불확실도는 $\pm 0.7\%$ 이다. 비등열전달계수는 $q''/\Delta T_{sat}$ 으로, 그 값을 통계분석하여 오차확산법칙을 적용한 불확실도는 $\pm 6\%$ 이다.

Table 2 Voltage and current variations

q''	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
V	54	79	97	115	128	141	154	165	175	185	194	204
I	5.5	7.6	9.3	10.5	11.7	12.8	13.7	14.6	15.4	16.2	17.0	17.6

3. 결과 및 토론

열유속에 따른 열전달계수의 변화를 Fig. 3~5에 나타내었다. 비교를 위하여 세 가지 시편에 대해 유동제한장치가 있는 경우와 이 장치가 없는 단순한 환상공간에 대한 결과를 함께 나타내었다. 환상공간의 상부에 위치하면서 출구유로를 축소하는 유동제한장치는 열전달을 감소시키는 경향을 나타낸다. 이러한 경향은 유동제한장치의 형상에 무관하게 관찰되며, 하부가 폐쇄된 경우보다 하부가 개방된 경우에 더 분명하게 나타난다.

case1 시편에 대해 살펴보면 $q''=100\text{kW/m}^2$ 이고 $w=10\text{mm}$ 이면 유동제한장치가 없는 경우와 서로 비교할 때, 하부유로가 개방되면 열전달계수가 $21.7\text{kW/m}^2\text{C}$ 에서 $17.8\text{kW/m}^2\text{C}$ 로 17.8% 감소한다. 반면, 하부 유로가 폐쇄된 경우에는 열전달계수가 $23.0\text{kW/m}^2\text{C}$ 에서 $20.7\text{kW/m}^2\text{C}$ 로 10% 감소하는 것을 알 수 있다.

유동제한장치의 폭도 열전달계수에 변화를 초래하는데, 그 경향은 하부유로 조건에 따라 서로 다르게 나타난다. 하부 유로가 개방된 경우에는 폭의 증가가 열전달계수의 둔화를 초래함에 비하여 하부 유로가 폐쇄된 경우에는 $w=30\text{mm}$ 인 경우가 $w=10\text{mm}$ 인 경우보다 열전달이 더 잘되는 특성을 나타내고 있다. 따라서 하부유로의 조건과 유로제한장치의 형상이 복합적으로 열전달계수에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

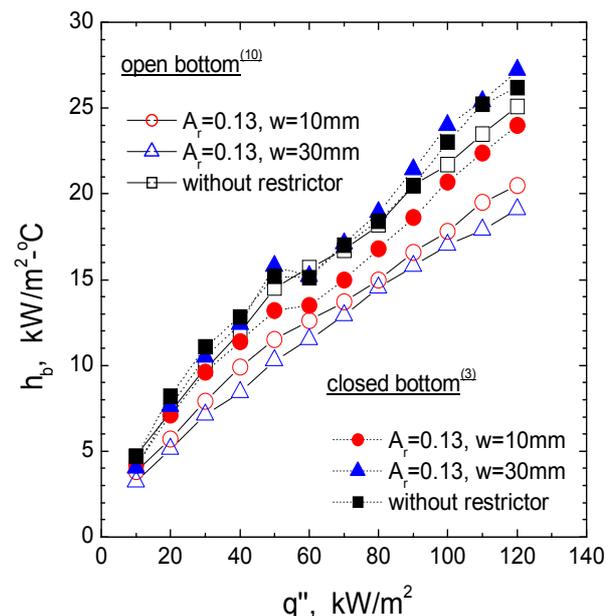


Fig. 3 Curves of h_b versus q'' for case 1

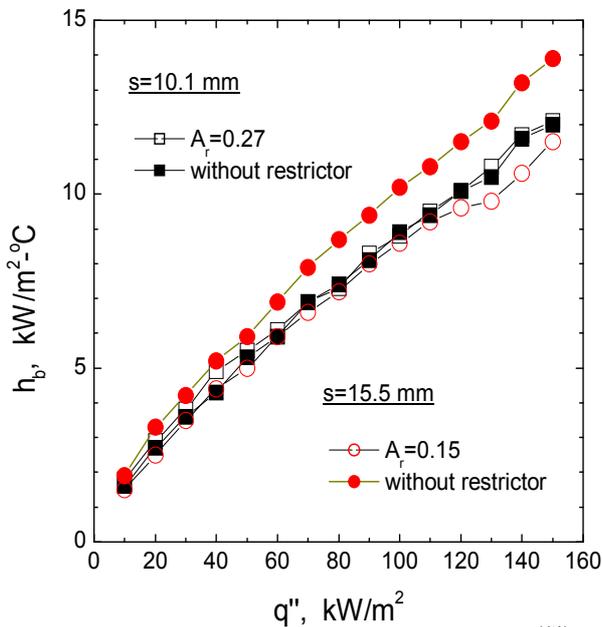


Fig. 4 Curves of h_b versus q'' for case 2⁽¹²⁾

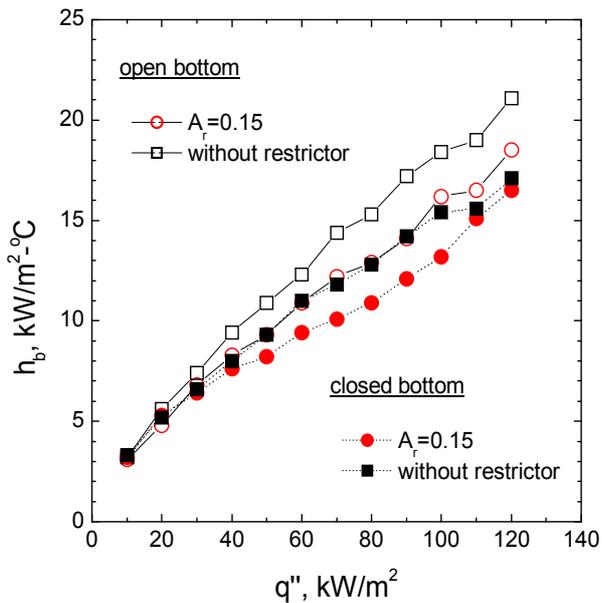


Fig. 5 Curves of h_b versus q'' for case 3

Fig. 4는 하부유로가 폐쇄되면서 환상공간의 외부 튜브가 단이져 있는 case 2에 대한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 동일한 유동제한장치를 가지는 경우 틈새간격 변경에 따른 A_r 의 변화는 열전달계수에 큰 변화를 초래함을 알 수 있다. 한편, 본 연구에서 살펴보고자 하는 case 3 시편에 대한 결과는 Fig. 5에 나타나 있는데, 이 경우 역시 유동제한장치의 존재는 열전달계수의 감소를 초래하며, 환상공간의

하부 유로 조건에 따라 열전달계수의 변화 폭이 서로 다르게 나타남을 알 수 있다.

환상공간 내부에서의 풀비등 열전달 특성은 여러 가지 기구(mechanism)에 의해 결정된다. 가장 먼저 들 수 있는 것은 핵비등밀도(nucleation site density)이며, 열유속 증가에 따라 함께 증가하면서 열전달계수를 증가시킨다. 유동대류(convective flow)도 열전달을 향상시키며, 열유속이 낮은 영역에서 그 효과가 크게 나타난다. 특히, 환상공간의 하부가 개방되어 있는 경우 환상공간의 하부 영역에서 그 영향이 분명하게 관찰되는데, 하부 영역은 기포의 영향을 가장 작게 받는 곳이기 때문이다.⁽¹⁰⁾

한편, 하부 영역에서 발생된 기포는 환상공간의 틈새를 따라 상부로 이동하면서 다른 기포들과 서로 결합(coalescence)하여 큰 기포 덩어리를 형성한다. 기포 덩어리의 형성, 운동 특성, 그리고 이것이 열전달에 미치는 영향은 틈새간격 및 구속조건에 따라 서로 다르게 나타난다.

형성된 기포 덩어리가 이동하면 그 빈 공간을 액체가 채우면서 증기-액체의 교환(vapor-liquid exchange) 및 후류(wake flow)⁽¹⁴⁾ 형성 등에 의해 액체교란이 발생하며, 이 교란은 열전달을 증가시킨다.⁽⁸⁾ 만일, 기포 덩어리가 틈새 간격을 채울 수 있을 만큼 자라게 되면 이 기포는 액체의 원활한 접근을 막는 것은 물론, 특히 하부 유로가 폐쇄된 경우, 기포의 이동 속도를 저하시켜 열전달을 감소시키는 결과를 초래한다.^(3,12) 하부 유로가 폐쇄되면 액체는 기포가 빠져나오는 출구를 통하여 환상공간 내부로 들어가게 되므로 기포와 액체 사이에 간섭이 발생하게 되면서 기포의 정체 및 성장이 가속된다. 이 기포가 이탈하면서 환상공간 내부를 기포가 상하로 운동하는 맥동류(pulsating flow)를 발생하며, 이 유동은 하부 유로를 폐쇄한 환상공간의 열전달이 향상되는 특성에 큰 기여를 한다.⁽³⁾

기포 덩어리가 신속하게 이동하지 못하고 정체 되면 크기가 지속적으로 증가하면서 환상공간의 틈새 내부에서 그 형상이 찌그러지면서 기포 하부에 있는 액체를 압착하게 된다. 그 결과 기포 하부 액막의 두께가 매우 얇아지면서 미세층증발(microlayer evaporation)⁽¹⁴⁾ 현상이 발생하고 열전달계수가 순간적으로 증가하게 된다.⁽¹⁵⁾

환상공간 상부의 출구유로 단면적을 축소하게 되면 환상공간을 이탈하려는 기포의 흐름이 제한

을 받게 되면서 환상공간 내부에 기포 간 결합에 따른 기포 덩어리 형성이 촉진된다. 이러한 경향은 하부로의 유동이 폐쇄된 환상공간에서는 낮은 열유속에서도 분명하게 관찰되며, 하부 유로가 개방된 경우에는 열유속이 증가하면서 관찰된다.

열유속 증가에 따른 기포의 거동은 Fig. 6과 같다. 열유속이 낮은 경우[Fig. 6(a)] 개별기포(single bubble)는 형상을 유지하면서 상부로 이동한다. 열유속이 증가하면 기포 간 결합에 의해 덩어리가 형성되게 되며, Fig. 6(b)와 같이 기포와 액체가 서로 일정 영역을 유지하면서 흐른다. 열유속을 더 높이면 기포 덩어리가 환상공간을 채운다. 기포의 부력이 유입하는 액체와 벽면의 마찰을 이겨낼 만큼 충분하면 상부로 이탈하게 되고 다음 번 이탈하기까지 기포가 성장하는 기간 동안 액체가 유입되는 흐름이 반복된다.

유동제한장치가 열전달에 미치는 영향을 분명하게 살펴보기 위하여 유동제한장치가 있는 환상공간에 대한 열전달계수를 단순한 환상공간에 대한 열전달계수로 나눈 비율을 나타내는 변수인 h_r 을 A_r 의 변화에 따라 표시하였다. Fig. 7과 8은 각각 열유속이 40kW/m^2 와 120kW/m^2 에 대한 결과를 보여주고 있다. 하부유로가 열전달에 미치는 영향을 함께 살펴보기 위하여 각각의 시편에 대한 결과들을 하부 개방과 하부폐쇄로 구분하여 나타내었다.

결과들을 살펴보면 기포 군집의 크기가 증가하게 되면서 다양한 특성들이 나타나고 있다. 특히, 기포와 주변 고체 표면 사이의 마찰이 증가하는 $w=30\text{mm}$ 에 대한 결과와 열유속이 120kW/m^2 인 경우에서 A_r 의 감소에 따라 환상공간에서 나타나는 다양한 열전달기구들을 관찰할 수 있다.

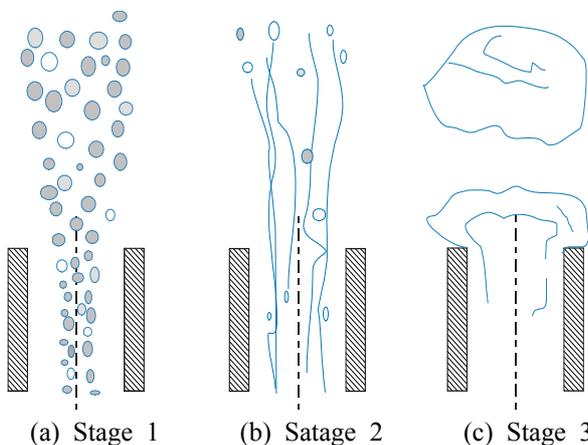


Fig. 6 Schematic of outflow as heat flux increases

특히, 하부유로가 폐쇄되면 유입하는 액체와 기포 사이의 마찰 저항이 추가되어 기포들 간의 결합에 따른 기포 크기 증가 현상이 가속된다. 최종적인 열전달계수의 크기는 전술한 여러 가지 열전달 기구의 결합으로 나타나지만, 각각의 경우에 있어서 주도적으로 작용하는 열전달 기구를 도출해 볼 수 있다.

case1 시편 중 하부유로가 폐쇄된 $w=30\text{mm}$ 에 대한 결과를 살펴보면 $q''=40\text{kW/m}^2$ 인 경우에는 $A_r \leq 0.26$ 에서 h_r 값이 증가하는 경향을 보이고 있으며, 열유속이 120kW/m^2 인 경우에는 $A_r \leq 0.42$ 일 때부터 h_r 값이 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 하부 유로가 개방되어 있는 경우에는 열유속의 크기에 관계없이 A_r 의 감소에 따라 h_r 값이 감소하는 경향을 보여준다. 기포와

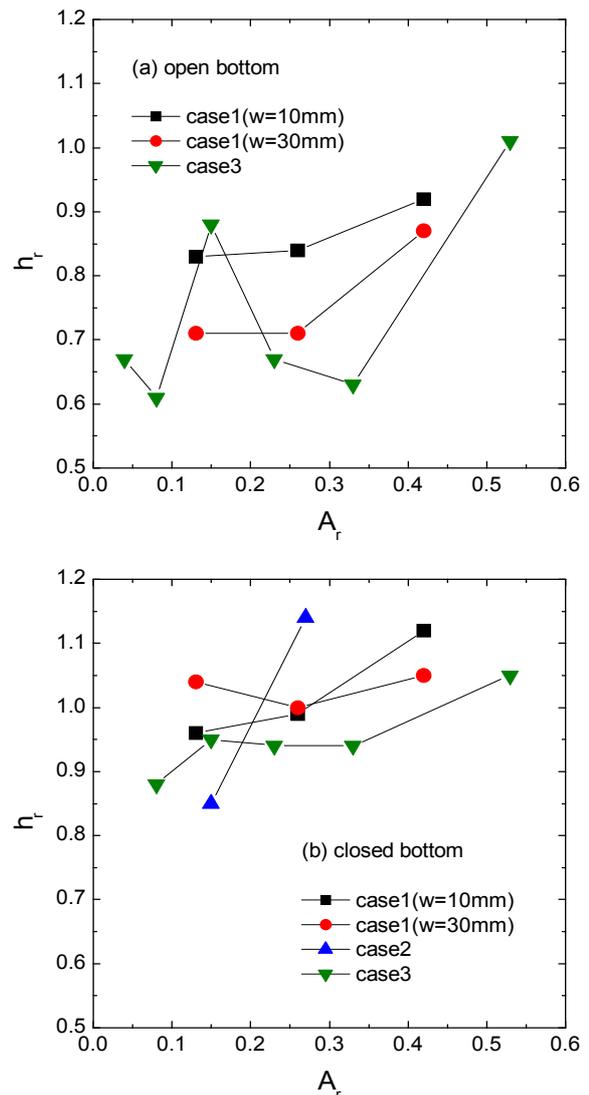


Fig. 7 Plots of h_r versus A_r ($q''=40\text{kW/m}^2$)

고체벽면 사이의 저항이 상대적으로 작은 $w=10\text{mm}$ 에 대한 결과도 열유속이 120kW/m^2 인 하부유로 폐쇄 조건에서 $A_r \leq 0.26$ 에서 h_r 값이 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 균집 형성에 따른 기포 크기 증가에 따라 열전달계수가 감소하다가 기포 크기가 어느 정도 증가하면서 환상공간을 이탈하는 기포가 Fig. 6에 나타난 stage3의 방식으로 전환되면서 환상공간 내부에 강력한 액체교란을 유발하게 되고, 그 결과 열전달이 증가하는 특성을 보이는 것으로 이해된다.

case2 시편은 A_r 의 감소에 따라 h_r 값이 급격하게 감소하는 경향을 보여준다. 유동제한장치의 길이가 상대적으로 작은 case1($w=10, 30\text{mm}$)과 case3($w=15\text{mm}$)에 비해 case2 시편은 출구유로가 좁아지는 영역의 길이가 50mm 로 길어 환상공

간을 빠져나가는 기포가 큰 저항을 받게 된다. 그 결과 기포 균집이 빠르게 형성되면서 h_r 값이 급감하는 경향을 나타낸다. 또한, 가열튜브의 길이는 200mm 로 $L=500\text{mm}$ 인 다른 두 경우보다 훨씬 짧음에 따라 액체교란이 열전달 증가를 유발하는 효과를 크게 볼 수 없어 기포 균집 형성에 따른 열전달 감소 효과가 지배적으로 작용한다.

case 3 시편은 유동제한장치 하부에 일종의 완충을 위한 공간을 가지고 있으며, 환상공간을 떠난 기포들이 이 곳 공간에 모이게 된다. 기포가 이탈하게 되면 이 공간에 들어있는 유체를 뒤흔들게 되므로 액체교란 효과가 훨씬 분명하게 관찰된다. 하부유로가 개방된 경우, $A_r=0.33$ 까지는 열전달이 감소하며, 이후 $A_r=0.15$ 에 달할 때까지 h_r 값이 증가하는 경향을 보인다. A_r 을 계속 감소하면 h_r 값이 감소하는 경향을 나타낸다. 하부유로가 개방된 환상공간의 경우에는 내부에 맥동류가 발생하지 않는 것이 일반적이다. 그렇지만 본 연구와 같이 출구유로 단면적을 줄여 기포의 흐름을 방해하게 되면, 기포 크기가 증가하게 되고 이 기포가 이탈하면서 내부에 맥동류를 일으켜 열전달 향상을 유발한다. A_r 감소 과정에서 관찰되는 열전달 향상은 맥동류 발생에 따른 액체교란 증가와 관계가 있다. 하부 유로가 폐쇄된 경우 맥동류 발생에 따른 열전달 향상이 가장 주된 열전달 향상 기구이므로, A_r 감소에 따라 열전달 향상 효과가 관찰되기는 하지만 하부 개방의 경우처럼 큰 폭의 증가는 관찰되지 않는다.

기포의 크기가 지속적으로 증가하면, 기포가 환상공간 상부의 틈새 공간을 채우게 되며 이 경우, Hung 과 Yao,⁽⁶⁾ 그리고 Kang⁽¹⁵⁾이 살펴본 것처럼 기포 하부에 얇은 액막이 생기며 이 액막이 기포 영역으로 증발하면서 열전달이 향상되는 미세층증발 현상이 나타난다. 이러한 현상은 상부 영역에서 주로 관찰되며, 열유속 증가나 A_r 의 감소에 의해 기포의 크기가 지속적으로 증가하게 되면 짧은 순간에 임계 열유속(critical heat flux)을 발생시킨다. case 3 시편에서 하부유로를 폐쇄 하고 A_r 이 0.1보다 작으면, 열유속이 100 kW/m^2 보다 작은 경우에도 임계열유속 값⁽¹⁶⁾의 10%에도 미치지 못하는 작은 값이다. Fig. 9는 환상공간의 상부가 기포로 완전히 둘러싸인 것을 사진으로 촬영한 것으로 하부 영역이 기포와 액체로 혼합되어 있는 것과 분명하게 구별된다.

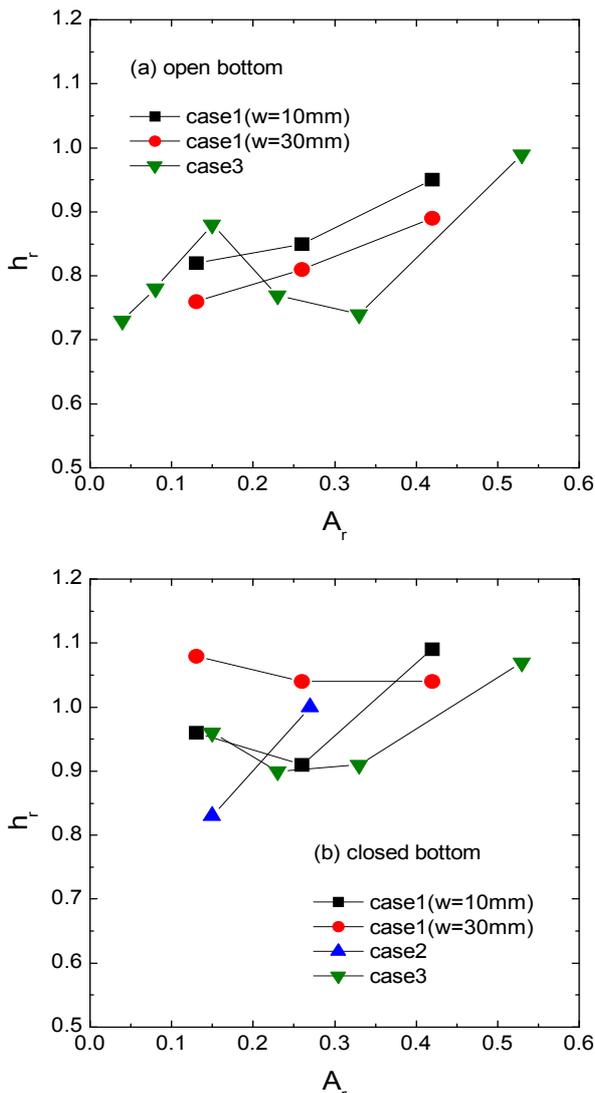


Fig. 8 Plots of h_r versus A_r ($q''=120\text{kW/m}^2$)

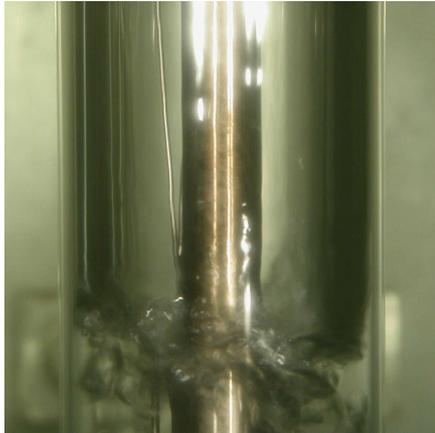


Fig. 9 Photo of boiling for case 3

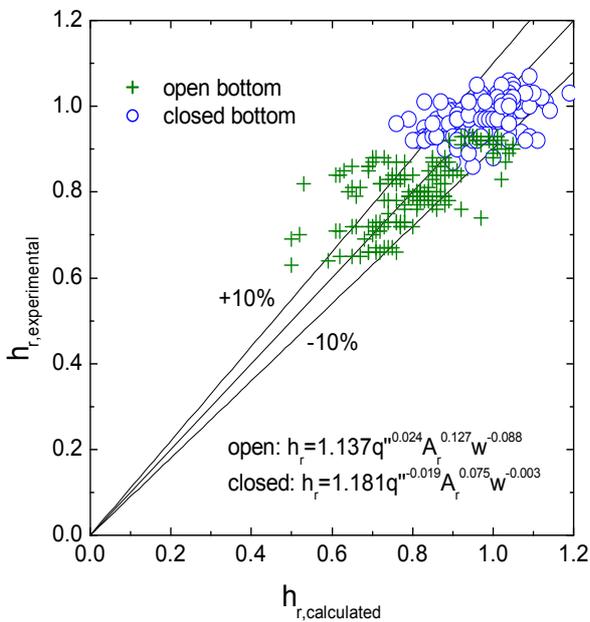


Fig. 10 Comparison of experimental data to calculated heat transfer coefficients

실험을 통하여 여러 가지 변수들의 조합에 대해 327(하부 개방=167, 하부 폐쇄=160)개의 실험값을 취득하였다. 출구유로단면적의 형상이 열전달에 미치는 영향을 살펴보기 위해 실험값과 최소자승법을 사용하는 회귀분석기법을 사용하여 다음과 같이 실험적상관식을 구하였다. 상관식은 하부 유로 조건에 따라 개방과 폐쇄를 구별하여 $h_r = f(q'', A_r, w)$ 의 형태로 개발하였으며, 결과 식들은 다음과 같다.

$$h_r = 1.137q''^{0.024} A_r^{0.127} w^{-0.088} \quad \text{: 하부 개방} \quad (4)$$

$$h_r = 1.181q''^{-0.019} A_r^{0.075} w^{-0.003} \quad \text{: 하부 폐쇄} \quad (5)$$

$$h_r = h_{b, \text{ with FR}} / h_{b, \text{ without FR}}$$

$$A_r = A_{out} / A_{gap}$$

위 식에서 q'', w 변수들에 대한 단위는 각각 kW/m^2 과 mm 이다. 매개변수 h_r 과 A_r 은 무차원수이다. 위의 식은 본 실험의 결과를 정량화하는 과정에서 제안된 것이므로, 본 연구에서 수행한 실험값 범위 내에서만 유효하다.

개발한 상관식을 살펴보면 h_r 은 A_r 에 정비례하고 w 에 반비례하여 변화하는 경향을 나타낸다. 열유속 증가는 하부유로가 개방된 경우 h_r 을 증가시키는 정비례 관계를 가짐에 비해 하부유로가 폐쇄된 경우에는 h_r 을 감소하는 반비례 관계를 나타낸다. 주요 변수들이 h_r 에 미치는 민감도는 하부 유로를 개방한 경우 더 크게 나타난다. 제안된 상관식들은 실험을 통해 규명한 주요 변수들이 열전달에 미치는 영향을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.

개발된 상관식들의 정당성을 규명하기 위하여 실험에서 결정된 열전달계수비($h_{r, \text{ experimental}}$) 대비 식(4) 및 (5)를 이용해 계산한 값($h_{r, \text{ calculated}}$)에 대한 그래프를 Fig. 10에 나타내었다. 개발된 상관식들은 일부 값을 제외하면 실험값을 $\pm 10\%$ 오차 범위 내에서 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

대기압 상태하의 포화수 속에 설치된 환상공간의 출구부에 설치한 유동제한장치가 열전달에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 세 가지 서로 다른 형상을 고려하였다. 본 연구에서 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 출구유로 단면적이 감소하면 기포와 고체면 또는 액체와의 마찰을 증가하여 열전달의 감소를 초래한다.

(2) A_r 의 감소와 w 의 증가는 h_r 을 감소시키는 경향을 나타낸다. 열유속 증가는 하부유로가 개방된 경우 h_r 을 증가시키며, 하부유로가 폐쇄된 경우에는 h_r 을 감소시키는 경향을 나타낸다.

(3) 열전달에 영향을 미치는 주요 기구는 기포 군집의 크기와 그 운동 특성이다. 맥동류가 형성되면 열전달계수가 크게 향상되며, 기포가 매우 큰 경우 미세충증발도 열전달 향상에 기여한다.

후 기

이 논문은 2012학년도 안동대학교 학술연구조

성비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Shoji, M., 2004, "Studies of Boiling Chaos: a Review," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 1105~1128.
- (2) Gupta, A., Kumar, R. and Kumar, V., 2010, "Nucleate Pool Boiling Heat Transfer over a Bundle of Vertical Tubes," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 178~181.
- (3) Kang, M. G., 2010, "Effects of the Upper Inflow Area on Pool Boiling in a Vertical Annulus with Closed Bottoms," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, pp. 2555~2560.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) Cornwell, K. and Houston, S. D., 1994, "Nucleate Pool Boiling on Horizontal Tubes: a Convection-based Correlation," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 303~309.
- (8) Kang, M. G., 2002, "Pool Boiling Heat Transfer in Vertical Annular Crevices," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 3245~3249.
- (9) 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.
- (10) Kang, M. G., 2009, "Pool Boiling Heat Transfer in a Vertical Annulus with a Narrower Upside Gap," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 41, pp. 1285~1292.
- (11) Park, K. N., Cho, Y. G., Lee, Y. S., Sim, B. S., Lee, J. M., Chi, D. Y., Park, S. K., Lee, H. H., Whang, D. K. and Lee, C. Y., 2005, "As-built Measurement of the In-pile Structure for the Installation of In-pile Test Section in HANARO," *Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*.
- (12) Kang, M. G., 2011, "Pool Boiling Heat Transfer in a Vertical Annulus with a Stepped Outside Tube," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 4817~4822.
- (13) Coleman, H. W. and Steele, W. G., 1999, *Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers*, 2nd Ed., John Wiley & Sons.
- (14) Ginoux, J. J., 1978, *Two-Phase Flows and Heat Transfer with Application to Nuclear Reactor Design Problems*, Hemisphere Publishing Corporation.
- (15) Kang, M. G., 2004, "Local Pool Boiling Coefficients on the Inside Surface of a Horizontal Tube," *ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 126, pp. 638~641.
- (16) Holman, H. W., 1997, *Heat Transfer*, 8th ed., McGraw-Hill.