

수평 원관의 비등 열전달에서 강제대류의 영향

The effect of forced convection on boiling heat transfer from a horizontal tube

이 승 흥*, 이 역 수**, 정 은 행***
S. H. Lee, E. S. Lee, E. H. Jeong

Key words : Forced convection boiling(강제대류 비등), Local temperature distribution(국소온도분포), Boiling curve(비등 곡선)

Abstract

This paper presents the results of experiments involving external forced convection on boiling heat transfer from electrically heated horizontal tube to water in cross flow. In these experiments, all of the following primary variables were varied: heat flux, cross flow velocity, pressure and degree of subcooling. Local surface temperatures were measured at nine peripheral positions. Surface temperature distributions are classified into four groups as a function of heat flux. The characteristics of the boiling curve at different velocity, degree of subcooling and pressure are examined.

기 호 설 명

a	: 식(2)의 상수	r_o	: 원관의 외부반경, m
b	: 원관의 두께, m	r_i	: 원관의 내부반경, m
D	: 원관의 외경, m	T	: 온도, $^{\circ}C$
h	: 열전달계수, $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$	ΔT_s	: 과열도, $^{\circ}C (= T_w - T_{sat})$
k	: 열전도도, $W/m \cdot ^{\circ}C$	ΔT_{sub}	: 과냉도, $^{\circ}C (= T_{sat} - T_f)$
n	: 식(2)의 상수	V	: 유체의 속도, m/s
P	: 압력, kPa	K^*	: 무차원 계수, $k_{f,r_o}/k_w b$
q''	: 열유속, kW/m^2		상첨자
\dot{q}	: 단위체적당 열발생율, W/m^3	-	: 평균

하첨자

* 정회원, 부산대학교 기계공학부
** 부산대학교 기계기술연구소
*** 부산대학교 대학원 기계설계공학과

b : 비등

c	: 강제대류
f	: 유체
i	: 원관의 내부 표면
o	: 원관의 외부 표면
sat	: 포화상태
sub	: 과냉상태
w	: 원관(고체)표면

1. 서 론

비등은 전도, 복사 등의 다른 열전달 메카니즘에 비하여 매우 효율적인 열전달 방법이다. 관군의 내부 혹은 외부로 유동이 있을 경우의 비등 열전달에 관한 연구는 열교환기나 핵연료봉 등의 설계에 필수조건이다. 많은 증기발생기(열교환기)들 중에서 중요한 영역을 차지하는 셸-튜브 형태의 열교환기들(kettle reboiler, horizontal thermosyphon reboiler 등)은 차폐판들(baffles)이 있기 때문에 유체가 순수하게 원관의 축 방향으로 흐른다고 할 수가 없고, 원관과 직교하는 유동을 고려하여 열전달 현상을 이해하여야 한다.

한 개의 원관 혹은 관군의 내부나 외부로 유체가 유동하는 경제대류 비등 열전달에 대한 이해는 최근에 크게 발전되었다. 그러나 대부분의 연구가 원관들의 축 방향과 평행한 유동이 있는 경우에 대해서 이루어졌고, 직교하는 유동(cross flow)에서 가열되는 원관 주위의 비등 열전달에 대한 연구는 실험장치의 한계 때문에 직경이 작은 원관이나 와이어를 많이 사용하였고, 일정한 표면온도로 가정하는 등 제한적인 연구조건에서 수행하였다.

Fink 등⁽¹⁾은 R-11과 R-113의 혼합냉매를 작동유체로 사용하여 원관에 직교하는 유동조건에서 전기적으로 가열되는 구리 원관을 실험모델로 비등 열전달 실험을 하였는데, 원관은 일정한 표면으로 가정하였다. Fand 등⁽²⁾은 물을 작동유체로 사용하여 직교하는 유동조건에서 비등 열전달 실험을 수행하였다. 직경이 약 12mm 정도의 스테인레스 원관과 티타늄 원관을 저항 가열하여 유체의 속도, 압력 그리고 과냉도 등이 비등 열전달에 영향을 줌을 보여주었는데, 원관의 표면온도는 일정하다고 가정하였다. McKee와 Bell⁽³⁾은 물을 사용

하여 풀비등과 직교하는 유동에서 강제대류 비등 열전달 실험을 수행하였다. 스테인레스 원관들을 저항 가열하여 원주방향(peripheral)으로 90° 간격으로 국소온도를 측정하였는데, 그들도 국소온도들은 큰 변화가 없다고 결론지었다. 그리고 Yilmaz와 Westwater⁽⁴⁾는 냉매(R-113)를 작동유체로 사용하여 스팀 가열되는 6.4mm 직경의 수평 원관에 대한 강제대류 비등 열전달 실험을 하였다. 그들도 역시 원관의 표면온도는 일정하다고 가정하였다.

그러나 Wege와 Jensen⁽⁵⁾은 냉매(R-113)를 작동유체로 사용하여 직경 12.7mm의 원관에 원주방향으로 45° 간격으로 국소온도를 측정하면서 비등 열전달 실험을 수행하였는데, 원주방향으로 국소열전달계수의 차이가 있음을 보여주었다. 또한 Lee 등^(6,7)은 두께와 재질이 다른 원관을 저항 가열하여 공기속에서 강제대류 열전달 실험과 냉매 R-113을 작동유체로 풀비등 열전달 실험을 수행하였다. 이들은 원주방향의 열전도의 영향을 나타내는 무차원 계수 $K^*(=k_{f,o}/k_{w,b})$ 가 국소 표면온도 분포에 영향을 미칠 수 있음을 보여주었다. 최근의 연구는 고체의 전도 열전달과 유체의 대류 열전달이 서로 복합적(conjugated)으로 관련된 열전달 문제로서 다루고 있다.

본 연구에서는 원관에 직교하는 유동조건에서, 물을 작동유체로 사용하고 국소 온도를 측정하면서 비등 열전달 실험을 수행하였다. 실험을 통해 유체의 속도, 과냉도 그리고 유체의 압력이 비등 열전달에 미치는 영향을 연구해 보고자 한다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 비등 열전달 루프 실험장치

본 실험장치의 크기는 대략 10m×5m 정도이고, 내경 76.2mm의 스테인레스 강관과 연결구들로 순환 루프 시스템을 이루며, 원심펌프(1,750RPM, 15HP, Duririon Canada)로 유체를 순환시킨다(Fig.1 참조). 펌프에서 수직으로 토출된 작동유체는 3인치 글로우브 밸브(V1)를 통하여 주 순환라인을 통과하거나, V2 밸브를 통하여 바이패스 라인으로 통과하게 된다. 주 순환라인으로 흐르는 작동유체는 유량 계측장치, 예열장치와 시험부(test section),

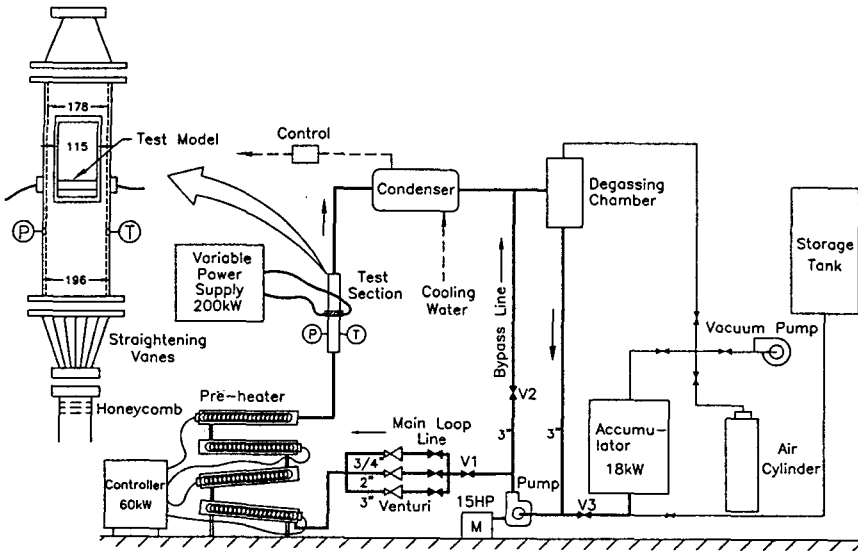


Fig.1 Schematic diagram of boiling heat transfer loop

그리고 응축 열교환기와 기체 제거장치(degassing chamber)를 통과하여 펌프로 돌아오게 된다. 펌프의 흡입구쪽은 속도를 낮추며 압력을 회복시키고, 포화상태 근방에서의 공동현상 방지와 충분한 액체를 공급하기 위해서 내경 101.6mm의 관으로 연결하였다. 예열장치에는 스텐레스강 케이스속에 15kW 전기히터 4개를 사용하여 합계 60kW 용량의 전기가열장치를 설치하였다. 예열장치의 보호를 위해서 펌프 흡입구쪽에 유동확인 스위치(McDonald and Miller, FS-43)를 설치하여 유량이 상실되는 경우에 예열장치의 전원공급이 자동적으로 차단되도록 설계하였다. 응축을 위한 열교환기는 쉘-튜브형 단일관통로, 역류형이다. 냉각수는 상수를 사용하며 유량은 관경 25.4 mm에 1kg/sec 수준이다. 기체 제거장치의 상단에는 압축기, 진공펌프 및 어큐뮬레이터(accumulator)가 진공밸브를 통하여 서로 연결할 수 있도록 설계하였다. 어큐뮬레이터는 스텐레스강으로 제작하였고, 6kW 히터 3개(총 18kW)가 부착되어 있어 실험장치로 들어가는 실험유체를 예열하는데 사용한다. 어큐뮬레이터에는 안전밸브, 압력계와 수면계가 있으며 2,100kPa 압력까지 쓸 수 있도록 설계하였다. 저장탱크의 체적은 480리터 정도이다. 냉각수의 유량을 구동코터의 냉각수 밸브와 비례식 압력조절기(Honeywell, M944A)

에 의해서 자동적으로 조절한다. 3개(19.05mm, 50.8mm, 76.2mm)의 벤츨리 관들을 유량(0~32l/s)의 측정을 위해서 사용하고, 이들을 차등 압력변환기와 U 자형의 수은 마노미터와 연결하였다.

시험부는 내부 단면의 크기가 178mm×76.2mm 이고 길이 760mm이다. 가로×세로 115mm×153mm, 두께 37mm의 lexan 재질의 투명한 창이 앞 뒤로 2개가 있어서 창의 가운데 위치에 실린더형 수평 실험모델을 설치하여 가시적 관찰이 가능하다. 실험모델과 시험부 사이의 전기적인 절연을 위해서 상호 접촉부분에 테플론을 사용하였고, 시험부 입구의 난류강도를 감소시키고 일정한 속도분포를 위해서 허니콤(honeycomb)과 직선베인(straightening vane)들을 사용하였다.

2.2 실험방법

먼저 미네랄 필터를 통과하여 정류된 작동유체(물)를 비등 열전달 루프 실험장치에 채운다. 작동유체에 녹아있는 공기를 제거하기 위하여 축압기 내의 상부가스의 압력을 약 1기압 정도로 유지하면서 주 순환라인 밸브(V1)와 바이패스 밸브(V2)를 부분적으로 열고 원심펌프로 작동유체를 순환시킨다. 작동유체의 온도를 올리기 위하여 예열장치를 켜서 비교적 높은 열량을 공급하고 동시에 응축 열

교환기로 냉각수를 흘리며 비등과 응축을 동시에 하는 작업을 약 10~12시간 정도 반복한다. 이런 과정 중에 작동유체에 녹아있던 가스가 기체 제거 장치에 모이게 되고 진공펌프를 사용하여 제거한다. 기체 제거작업 후에 진공펌프의 작동을 멈추고, 실험장치 내부의 압력, 유동 속도, 작동유체의 온도 등의 실험조건을 맞추어 정상상태에 이르기 위해서 대략 1시간 정도의 시간이 필요하다. 작동유체의 속도는 주 순환라인 밸브(V1)와 바이패스 밸브(V2)를 이용하여 조절할 수 있다. 작동유체의 온도는 예열장치의 공급열량과 응축 열교환기의 냉각수 유량을 조절함으로써 제어한다. 압력은 어큐뮬레이터에 압축기를 연결하여 어큐뮬레이터 내부 윗쪽의 공기압력과 작동유체의 온도를 제어함으로써 조절할 수 있다.

2.3 실험모델과 데이터 산출

본 실험에서 사용한 실험모델과 열전대의 위치는 Fig.2와 같다. 실험모델은 직접 전기저항 가열이 가능하도록 이음매 없는 SUS 304 재질의 원관을 사용하였고, 원관의 두께는 0.8mm, 외경은 15mm, 길이는 178mm이다. 구리 재질의 터미널은 원관과 용접으로 연결하였으며, 실험모델은 200kW, 5000A 직류 전원공급장치로 가열시킨다. 실험모델에 공급되는 열유속을 평가하기 위해서 실험모델의 중심에서 좌우로 30mm의 위치에서, 즉 전체길이 60mm

에서 전압을 측정하였다. 이것은 열유속 평가에서 실험모델의 축 방향으로 열량손실을 작게하여 측정의 불확실성을 줄인다. 열유속의 평가에서 오차는 대략 $\pm 1\%$ 이내이다.

원관의 표면거칠기가 비등에 영향을 줄 수 있으므로, 국소 온도를 측정하기 위해서 실험모델 중심 단면의 내부표면에서 좌반구는 원주방향으로 30° 간격으로, 대칭성을 확인하기 위해 우반구는 60° 간격으로 열전대(copper-constantan; T-type, 36 Gauge)를 실린더형의 테플론으로 압착하여 고정시켰다.(Fig.2 참조) 여기서 열전대와 실험모델을 전기적으로 절연시키기 위하여 열전대성 수지(thermal bond, omega)로 열전대 접점들을 얇게 코팅하였다. 시험부 입구와 출구의 유체온도, 실험모델의 국소온도들, 그리고 전압, 전류값은 데이터 로거(Digistrip 4SPLUS, Kaye, 32 isolated status input)에서 동시에 측정하고 컴퓨터를 통해서 저장한다. 또한 속도와 압력도 동시에 측정하면서 실험을 수행하였다. 국소 온도들은 최대 열유속 부근($q'' \approx 1,000 \text{ kW/m}^2$)에서 $\pm 0.2^\circ\text{C}$, 최소 열유속 부근($q'' \approx 100 \text{ kW/m}^2$)에서 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 의 오차를 가진다.

실험모델의 표면거칠기에 특히 주의가 요구되므로, 사포로 번호 800~1200까지 사용하여 표면처리를 하였다. 그리고 직육식 표면거칠기 측정기(Mitutoyo, SV-400)로 원주방향으로 돌려가면서 표면거칠기를 측정된 결과, 기준길이 2.5mm, 컷오프값

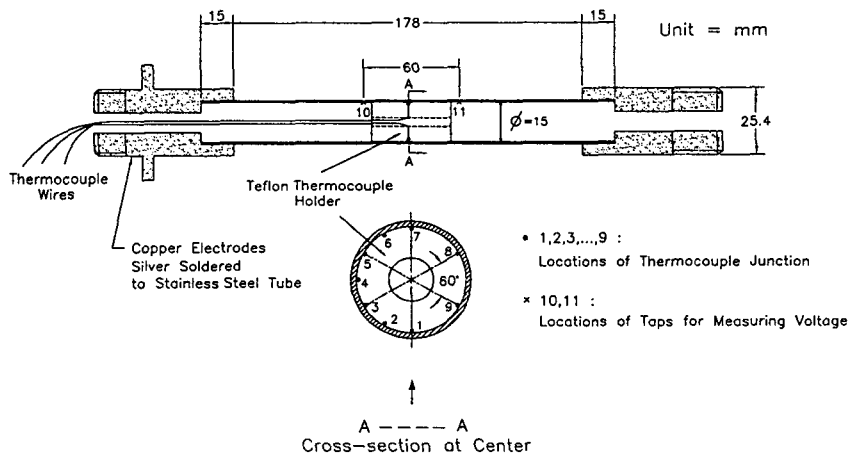


Fig.2 Details of test model(heater) and the detailed locations of thermocouples

0.8mm에서 중심선 평균 표면거칠기는 $0.03\mu\text{m} \sim 0.04\mu\text{m}$ 정도이다. 실험모델의 외부표면의 온도는, 측정된 원관의 내부 표면온도를 기준으로 원관(고체 내부)에서 열발생이 있는 정상상태 열전도 방정식을 풀면 구할 수 있다. 실험결과는 반경방향 열전달에 대한 원주방향의 열전달이 상대적으로 무시할 수 있음을 보여줌으로 원관의 외부 표면온도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_w = T_i - \frac{\dot{q}}{2k_w} \left[\frac{1}{2}(r_o^2 - r_i^2) + \ln \frac{r_i}{r_o} \right] \quad (1)$$

여기서 T 는 온도, r 은 반경방향 좌표를 나타내고, $\dot{q}(\text{W}/\text{m}^2)$ 는 단위체적당 발생하는 열량이다. 평균 표면온도 \bar{T}_w 는 국소 표면온도를 산술 평균한 값이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 강제대류 핵비등 가시화

시험부의 투명한 창을 통해서 강제대류 핵비등 가시화 실험과 온도 측정실험을 동시에 수행하였다. 본 연구에서 유체의 속도, 압력 그리고 과냉도의 범위는 Table 1과 같다.

전기적으로 일정한 열유속으로 가열되는 수평 원관 주위로 아래쪽에서 위 쪽으로(수직방향) 액체 상태의 물이 원관에 직교하여 유동할 때, Table 1의 네 번째 실험조건에서 원관에 공급하는 열량을 증가시키면서 비등 현상을 관측하였다.(Fig.3 (a)~

(e) 참조) 모든 사진은 4,000frames/sec의 고속으로 촬영하였다. 낮은 열유속에서는 원관 표면에서 열전계층의 가벼운 상호간섭을 볼 수 있다. Fig.3 (a)에서 비등이 일어날 수 있을 만큼 충분히 열유속이 증가함에 따라 아주 작은 기포들이 원관 후반부의 핵발생 지점들에서 독립적으로 불규칙하게 나타난다. Fig. 3 (b)에서 열유속이 증가함에 따라 핵발생 지점이 점점 많아지고 기포들이 원관 표면에서 분리된다. Fig.3 (c)에서 열유속이 더 증가함에 따라 핵발생 지점이 원관의 전반부쪽으로 확산되어 원관의 전 영역에서 비등이 일어난다. Fig.3 (d)에서 원관의 전반부에서 발생한 기포들은 유동에 의해 원관 표면에 붙어서 후반부로 미끄러지듯 이동하면서 성장하고, 원관의 후반부에서 발생한 기포들과 간섭·합병을 일으켜 그 크기가 커진다. 이렇게 성장한 기포들은 후류영역에서 제트나 기둥 형태로 주기적으로 표면에서 떨어져 나옴을 관측할 수 있다. 기포의 크기는 유체의 속도가 작을수록, 과냉도가 작을수록 상대적으로 커짐을 관측할 수 있었다. Fig.3 (e)에서 기포의 발생이 활발하여 원관 표면의 전 영역이 기포로 둘러싸이게 된다. 그리고 기포들은 원관 표면에서 분리되어 유동장을 타고 상층하다가 곧 응축되는 것을 관찰하였다.

3.2 비등 열전달에서 국소 온도의 분포

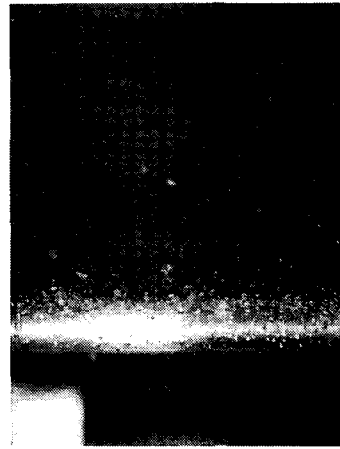
Fig.4는 과냉상태의 핵비등 영역에서, 동일한 열량($q''=400\text{kW}/\text{m}^2$)이 공급되는 원관의 전형적인 국소 표면온도 분포에 대한 유체속도($V=0.3\text{m}/\text{s}$, $0.5\text{m}/\text{s}$, $0.8\text{m}/\text{s}$)의 영향을 보여준다. 여기서 K^* 는 국소 온도분포에 영향을 주는 무차원 계수^(6,7)로서 원주방향의 전도 열전달이 반경방향의 대류 열전달에 미치는 영향을 나타낸다. 극단적인 두가지 경우, 즉 $K^*=\infty$ 인 경우는 원관 표면의 경계조건의 균일 열유속이고, $K^*=0$ 인 경우는 원관 표면의 경계조건이 균일 온도조건이다. 그림에서 국소 표면온도가 0° 와 180° 를 기준으로 거의 대칭임을 알 수 있고, 과냉상태에서 유체의 속도가 빨라지면 동일한 열량이 공급되는 원관의 표면온도들은 낮아짐을 알 수 있다. 국소 표면온도 분포의 형태는 유체의 속도에 따라 다양하게 나타남을 알 수 있는데, 최소 온도는 속도가 상대적으로 클 때는 전방 정체점에

Table 1 Experimental conditions of the test model in water(O.D.=15mm, b=0.8mm, $K^*=0.3832$)

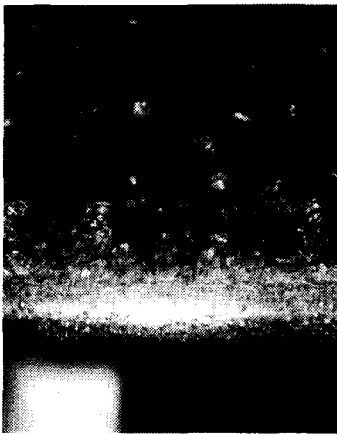
Test No.	Pressure [kPa,abs.]	T_{sat} [$^\circ\text{C}$]	Velocity [m/s]	Degree of subcooling [$^\circ\text{C}$]
1	204.8	120.81	0.3	13.3
2	204.8	120.81	0.5	13.3
3	204.8	120.81	0.8	13.3
4	163.4	113.74	0.3	13.3
5	163.4	113.74	0.3	22.3



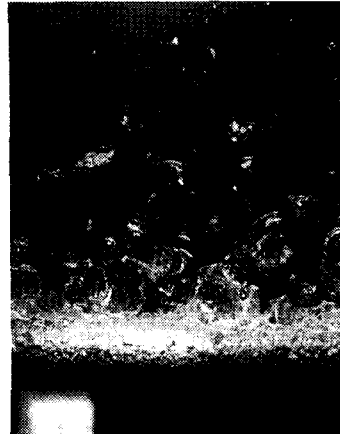
(a) $q'' = 184.03 \text{ kW/m}^2$ $\Delta T_s = 7.56^\circ\text{C}$



(b) $q'' = 350.93 \text{ kW/m}^2$ $\Delta T_s = 13.69^\circ\text{C}$



(c) $q'' = 553.06 \text{ kW/m}^2$ $\Delta T_s = 15.11^\circ\text{C}$



(d) $q'' = 853.06 \text{ kW/m}^2$ $\Delta T_s = 16.99^\circ\text{C}$



(e) $q'' = 1,044.92 \text{ kW/m}^2$ $\Delta T_s = 17.61^\circ\text{C}$

Fig.3 Photograph of forced convection nucleate boiling at $P=163.4 \text{ kPa}$, $\Delta T_{\text{sub}}=13.3^\circ\text{C}$, $V=0.3 \text{ m/s}$

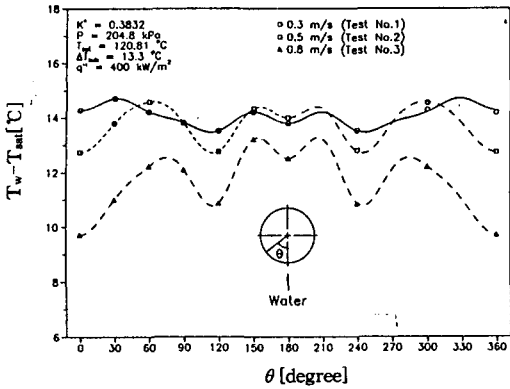


Fig.4 Circumferential wall temperature distribution

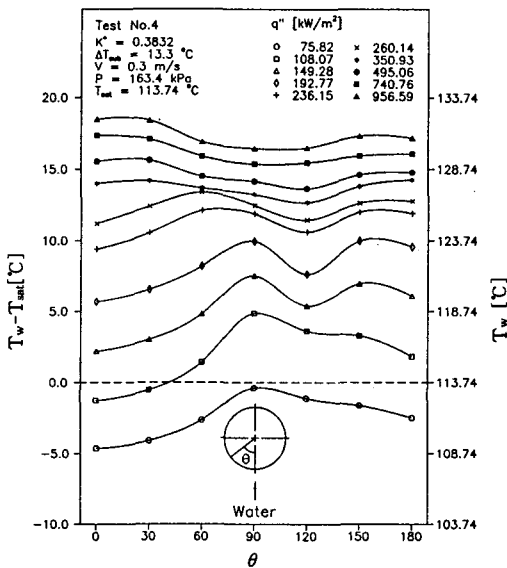


Fig.5 Circumferential wall temperature distribution for increasing heat flux in flow boiling

서 발생하지만 속도가 작을 때는 120° 부근에서 나타남을 보여준다. 그리고 유체의 속도가 증가할수록 국소 온도분포들의 변화의 정도(최고 온도와 최저 온도의 차이)가 커짐을 알 수 있다.

강제대류의 영향과 비등의 영향을 동시에 받은 강제대류 비등 열전달(네번재 실험)에서 열유속이 증가함에 따른 원관의 국소 과열도를 Fig.5에서 보여주고 있다. 열유속 q'' 값이 증가하면 표면온도들이 전체적으로 상승함을 알 수 있고, 본 연구의

범위에서는 국소 표면온도 분포의 형태는 열유속이 증가함에 따라서 대략 4가지 종류로 분류할 수 있다.

(i) q'' 값이 75.82kW/m²과 108.07kW/m²의 경우는, 표면온도가 포화온도보다 낮은 강제대류영역과 비등 초기에서 측정된 국소 표면온도의 분포로서, 레이놀즈 수 100,000 이하의 단상 강제대류 유동에서 나타나는 전형적인 국소 온도분포의 형태⁽⁸⁾를 나타내고 있다. 전방 정체점에서 최소값을 가지고 단조 증가하여 90° 부근에서 최대값을 가지고, 다시 단조 감소한다. 또한 국소 온도의 변화 폭이 비교적 큼을 보여주고 있다.

(ii) q'' 값이 149.28kW/m²의 경우는, 초기의 비등 영역으로서 열유속이 증가함에 따라서 원관의 후반부에서 부분적으로 비등이 생기기 시작한다.(Fig.3 (a) 참조) 국소온도분포는 단상 강제대류 유동에서의 국소 온도분포와는 다르게 120° 부근 영역에서 표면온도 분포의 극소값을 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 표면온도 분포는 비등 현상이 발생하고 있을 경우의 특징이며, 레이놀즈 수가 높은 경우(Re=140,000~200,000)에 공기속에서 원관주위의 표면온도 분포⁽⁸⁾와 비슷하다.

(iii) q'' 값이 236.15kW/m²과 260.14kW/m²의 경우는, 공급열량이 증가할수록 국소 온도분포의 변화의 폭이 상대적으로 작아짐을 보여주고 있다. 수평원관에서 비등 열전달이 격렬하게 일어날 경우에 격렬한 기포의 생성과 성장, 유체유동 등으로 인하여 최고 온도점이 60° 부근으로 이동하였고 120° 부근에서 온도분포의 극소값이 발견하였다.

(iv) q'' 값이 350.93kW/m²~956.59kW/m²의 경우는, 강제대류의 영향보다는 비등의 영향을 주로 받는 경우의 표면 온도분포이다. 이 영역에서는 특이하게 전방정체점($\theta=0^\circ$)에서부터 30° 부근까지의 영역에서 표면온도가 최대임을 발견할 수 있고, 저 열유속 비등 영역의 경우와는 달리 90°~120° 부근 영역에서 표면온도가 최소임을 발견할 수 있다. 또한 Wege와 Jensen⁽⁵⁾의 원관 주위의 강제대류 비등 열전달 연구에서도 높은 열유속에서는 90° 부근의 국소 열전달 계수가 전방정체점 부근보다 높음을 발견하였다. 이는 공급되는 열유속이 높아질수록 비등현상이 원관의 전방에서도 활발하게 이루어

어져 기포발생 주기가 매우 빨라지고, 전방정체점 근방에서 발생한 기포들이 원관표면을 따라서 후방으로 이동하면서 고체 표면을 감싸게 되어(Fig.3 (d), (e) 참조), 찬 액체와 가열 표면의 접촉을 방해하고 있기 때문이라고 추정된다. 반면에 90°~120° 부근에서는 강제대류가 기포의 발생과 붕괴를 촉진시켜 열전달율을 높여서 전방정체점보다 표면온도가 낮게 나타나고 있다고 생각된다. 또한 유체의 속도와 과냉도가 커질수록 국소 온도분포의 형태가 바뀌는 열유속 q'' 의 값도 증가한다. 그러나 본 연구의 범위에서는 열유속이 증가함에 따라서 모두 이 4가지 종류(i, ii, iii, iv)의 국소 표면온도 분포의 형태를 거치게 됨을 알 수 있었다.

Fig.6은 네 번째 실험의 조건에서 열유속에 대한 국소 과열도의 분포를 보여준다. 여기서 공급열량이 증가할수록 핵비등에 의한 기포의 생성과 성장, 수평원관 주위에 유체의 유동 등으로 인해서, 원관 주위에서 최저 온도와 최고 온도가 변화하고 있음을 알 수 있다. 대략 열유속 $q''=260\text{kW/m}^2$ 부근과 $T_w - T_{sat} \approx 12^\circ\text{C}$ 근방을 경계로 하여 $q'' \sim \Delta T$ 비등곡선의 기울기가 크게 달라진다. 이 지점

에서 비등 열전달에 비하여 강제대류의 영향이 큰 경우와, 강제대류에 비하여 비등 열전달의 영향이 큰 경우의 두 가지 영역으로 나누어짐을 알 수 있다. 그림의 (a)~(e)는 Fig.3 (a)~(e)에서 사진 촬영한 지점이다.

3.3 비등곡선에 대한 유체의 속도, 압력 그리고 과냉도의 영향

수평원관의 비등 열전달 실험에서 작동유체의 속도, 과냉도 및 압력들을 변화시키면서 측정된 $q'' \sim \Delta T_s$ 비등곡선을 Fig.7~Fig.9에서 보여주고 있다. Fig.7과 Fig.8에서 실선으로 표시된 q_b'' 는 핵비등 영역에서의 열유속이다. 이 영역에서 평균 열전달 계수는 일반적으로 아래와 같이 표시한다.⁽⁹⁾

$$h_b = a(q_b'')^n \tag{2a}$$

따라서

$$q_b'' = (a\Delta T_s)^{\frac{1}{1-n}} \tag{2b}$$

그리고 점선으로 표시된 q_c'' 는 강제대류 영역에서

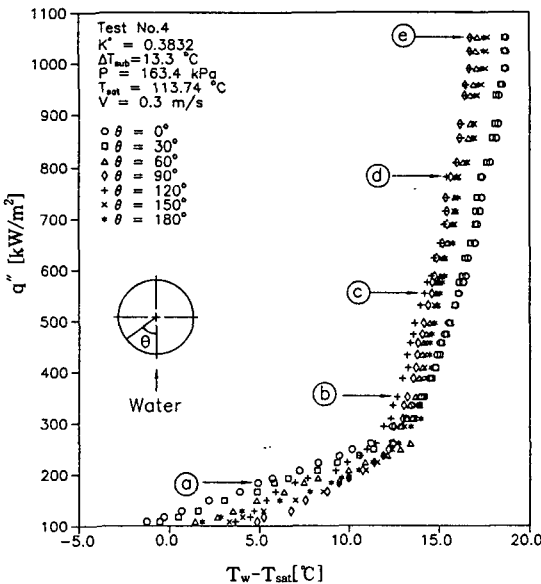


Fig.6 q'' vs. $(T_w - T_{sat})$ measurements around circular tube in flow boiling of water (refer to Fig.3 a,b,c,d,e)

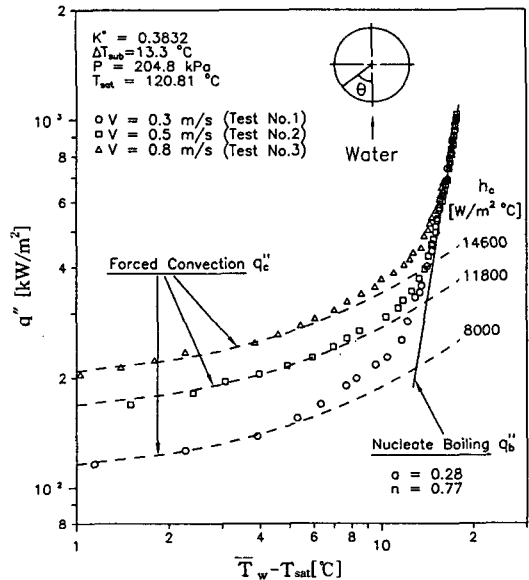


Fig.7 Effect of velocity in flow boiling of water

열유속이고, 아래와 같이 평가하였다.

$$q_c'' = h_c(T_w - T_f) = h_c(\Delta T_s + \Delta T_{sub}) \quad (3)$$

식(2b)의 상수 a와 n의 값들과 식(3)의 강제대류 열전달계수 h_c 값들은 실험 결과로부터 평가하였다.

Fig.7은 열유속 q'' 를 증가시켰을 때, $q'' \sim \Delta T_s$ 비등곡선에서 유체속도의 영향을 보여주고 있다. 강제대류의 영향을 주로 받는 낮은 열유속 영역에서는 속도가 증가할수록 동일한 열유속에 대한 평균 과열도(ΔT_s)가 작아짐을 알 수 있다. 그리고 $q'' = 700 \text{ kW/m}^2$ 이상의 높은 열유속 영역에서는 강제대류의 영향을 거의 무시할 수 있음을 알 수 있다.

Fig.8은 비등곡선에서 유체의 과냉도의 영향을 보여준다. 속도의 영향과 마찬가지로 낮은 열유속 영역에서는 과냉도가 클수록, 동일한 열유속에 대한 평균 과열도가 작아짐을 나타내고 있다. 그리고 $q'' = 400 \text{ kW/m}^2$ 이상의 높은 열유속 영역에서는 과냉도의 영향을 거의 무시할 수 있음을 알 수 있다.

Fig.9는 비등곡선에 대한 유체 압력의 영향과 1 기압에서 풀비등 실험식들⁽⁹⁾을 보여주고 있다. 본 연구의 범위에서 압력의 영향은 속도나 과냉도의 영향에 비하여 크지 않음을 알 수 있다. 강제대류의

영향을 많이 받는 낮은 열유속 영역에서, 압력이 204.8kPa의 경우가 동일한 열유속에 대한 평균 과열도가 약간 작음을 알 수 있다. 높은 열유속 영역에서는 기울기에 조금은 차이가 있으나 Rohsenow⁽⁹⁾가 제안한 풀비등 실험식과 비슷한 경향을 보인다. 그러나 전체적으로 동일 과열도에 대해서 비등 열유속 q'' 값은 강제대류 비등의 경우가 풀비등의 경우보다 높게 나타났다.

강제대류와 비등의 영향을 동시에 받는 영역에서 대표적인 두 가지 중첩식은, 단상 강제대류 실험식과 풀비등 실험식을 중첩하여 만든 식이다. 첫째로 Rohsenow⁽¹⁰⁾가 제안한 간단한 중첩식으로 식(4)와 같다.

$$q'' = q_c'' + q_b'' \quad (4)$$

그리고 두 번째 방법은 식(5)와 같이 Kutateladze⁽¹¹⁾가 제안한 식이다.

$$\frac{h}{h_c} = \left[1 + \left(\frac{h_b}{h_c} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (5)$$

그러나 Bergles와 Rohsenow⁽¹²⁾는 거의 동일한 표면조건을 가지는 원관의 풀비등 실험과 강제대류

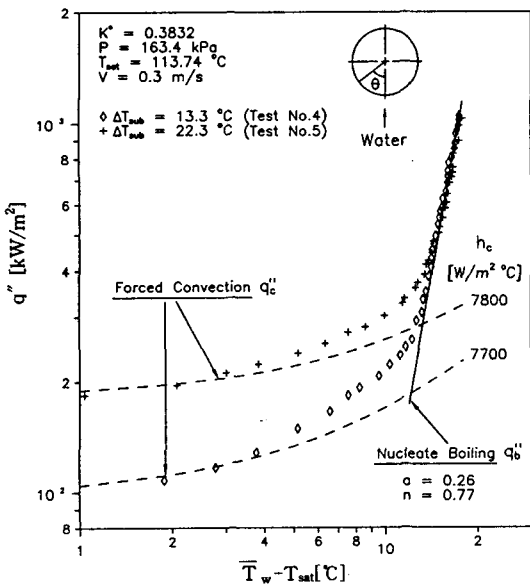


Fig.8 Effect of subcooling in flow boiling of water

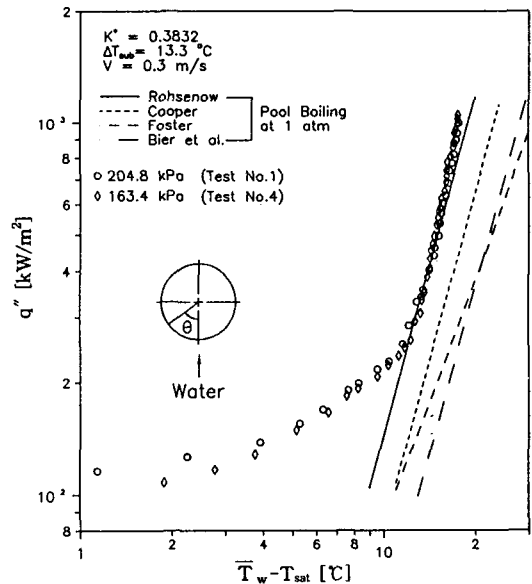


Fig.9 Effect of pressure in flow boiling of water

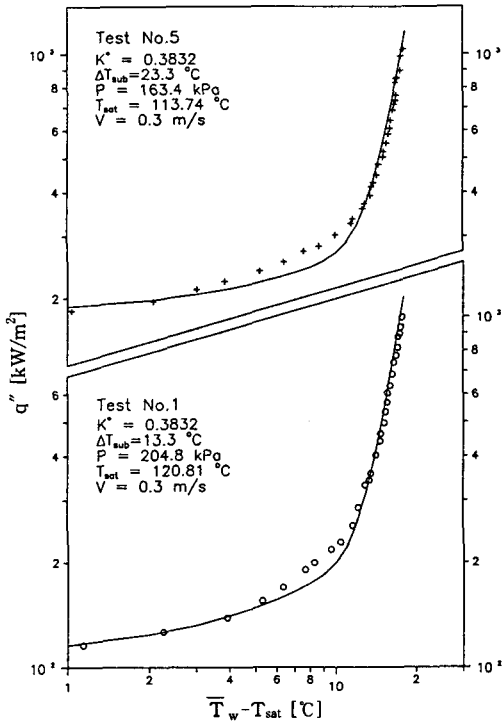


Fig.10 Comparison between experimental and theoretical prediction based on superposition model

비등 열전달 실험을 수행하였고, McKee와 Bell⁽³⁾은 동일한 원관을 사용하여 풀비등 실험과 직교유동에서 강제대류 비등 열전달 실험을 수행하였는데, 이들은 모두 풀비등 실험식이 식(4)나 식(5)와 같은 중첩식에 직접 사용하기가 어려움을 보여 주었다. 따라서 Bergles와 Rohsenow⁽¹²⁾는 풀비등 실험식 대신에 강제대류 비등 실험 데이터가 직접 중첩식에 사용된 아래와 같은 식을 제안하였다.

$$q'' = q_c'' \left[1 + \left\{ \frac{q_b''}{q_c''} \left(1 - \frac{q_{bi}''}{q_b''} \right) \right\}^2 \right]^{0.5} \quad (6)$$

여기서 q_{bi}'' 는 비등 시발점의 열유속 $q'' [=15.60p^{1.156} (T_w - T_{sat})^{2.30/p^{0.026}}]$ 에 해당하는 과열도의 값에 대한 식(2b)의 열유속이다. 실제로 열유속 q_{bi}'' 는 열유속 q_b'' 보다 매우 작기 때문에 큰 영향을 주지 않는다. Fig.10은 첫 번째 실험과 다섯 번째 실험의 경우에 실험 데이터와 이론적인 예측식(6)을 비교하여 보여주고 있다. 약간의 차이가 나타나며 최

대오차는 11% 정도이다.

4. 결 론

원관에 직교하는 유동조건에서, 물을 작동유체로 사용하여 강제대류 비등 열전달 실험을 수행하였다. 원관 주위의 국소 온도분포를 측정하여 유체의 속도, 압력, 과냉도등이 비등 열전달에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 또한 비등실험 중에 가시화 연구를 함께 하였다.

1) 원관에 직교하는 강제대류 비등 열전달에서 국소 표면온도 분포는 열유속 q'' 가 증가함에 따라서 대략 4가지 종류로 나타났다. (i) 초기 비등 영역에서는 전형적인 원관주위의 단상 강제대류 국소 온도 분포의 경향을 보여주고 있고, (ii) 핵비등 초기영역에서는 공급열량이 증가함에 따라 원관의 후반부에서 부분적으로 비등이 생기기 시작하고 국소 온도분포는 마치 높은 Reynolds 수의 단상 강제대류 영역에서 나타나는 원관의 온도분포와 비슷하다. (iii) 공급열량이 증가할수록 국소 온도분포의 변이의 폭이 상대적으로 작아짐을 보여주고 있으며, 최고·최소 온도지점의 위치(θ)가 변하고 있다. (iv) 공급열량이 더 증가하면, 전방정체점 부근에서의 표면온도가 오히려 90° 부근의 온도보다 상대적으로 큼을 알 수 있다.

2) 열유속 q'' 를 증가시켰을 때 $q'' \sim \Delta T_s$ 비등곡선에서, 강제대류의 영향을 주로 받는 낮은 열유속 영역에서는 유체의 속도와 과냉도의 영향을 크게 받고, 핵비등의 영향을 주로 받는 높은 열유속 영역에서는 유체의 속도와 과냉도의 영향을 거의 무시할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 본 연구의 범위에서 압력의 영향은 유체의 속도와 과냉도의 영향에 비하여 상대적으로 작음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국 원자력 연구소의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Fink, J., Gaddis, E. S. and Vogelpohl, A.,

- 1982, "Forced convection boiling of mixture of Freon-11 and Freon-113 flowing normal to a cylinder", Proc. 7th Int. Heat Transfer Conf. Munich, Vol. 4, pp. 207~212.
2. Fand, R. M., Keswani, K. K., Jotwani, M. M. and Ho, R. C. C., 1976, "Simultaneous boiling and forced convection heat transfer from a horizontal cylinder to water", Trans. ASME J. Heat Transfer Vol. 98, pp. 395~400.
 3. McKee, H. B. and Bell, K. J., 1969, "Forced convection boiling from a cylinder normal to the flow", Chemical Engineering Progress Symposium Series, Vol. 65, pp. 222~230.
 4. Yilmaz, S. and Westwater, J. W., 1980, "Effect of velocity on heat transfer to boiling Freon-113", Trans. ASME J. Heat Transfer Vol. 102, pp. 26~31.
 5. Wege, M. E. and Jensen, M. K., 1984, "Boiling heat transfer from a horizontal tube in an upward flowing two-phase cross-flow", Trans. ASME J. of Heat Transfer, Vol. 106, pp. 849~855.
 6. Lee, Y. and Kakade, S. G., 1976, "Effect of peripheral wall conduction on heat transfer from a cylinder in cross flow", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 19, pp. 1031~1037.
 7. Lee, Y., Zeng, Y. and Shigechi, T., 1990, "Conjugated heat transfer of nucleate pool boiling on a horizontal tube", Int. J. Multiphase Flow, Vol. 16, No. 3, pp. 421~428.
 8. Giedt, W. H., 1949, "Investigation of variation of point unit heat transfer coefficient around a cylinder normal to an air stream", Trans. Am. Soc. Mech. Engrs 72, pp. 375~381.
 9. Hewitt, G. H., Shires, G. L. and Bott, T. R., 1994, Process Heat Transfer, CRC Press, London.
 10. Rohsenow, W. M., 1953, Heat Transfer with Evaporation, University of Michigan Press.
 11. Kutateladze, S. S. 1961, "Boiling Heat Transfer", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 4, pp. 31~45.
 12. Bergles, A. E. and Rohsenow, W. M., 1964, "The determination of forced convection surface boiling heat transfer", Trans. ASME J. of Heat Transfer, Vol. 8, pp. 365~372.