

〈논 문〉

밀폐형 2상 열사이폰의 Pool 내부 Pulse Boiling에 관한 연구

김철주* · 문석환** · 강환국**

(1995년 5월 18일 접수)

A Study on the Pulse Boiling Occuring Inside the Liquid Pool of a Closed Two-Phase Thermosyphon

C. J. Kim, S. H. Moon and H. K. Kang

Key Words : Thermosyphon(열사이폰), Pulse Boiling(펄스비등), Liquid Pool(액체 풀), Superheat(과열도), Boiling Period(비등주기), Saturation(포화), Hysteresis(이력)

Abstract

Pulse boiling, the unsteady periodic boiling phenomenon appearing in the evaporator of thermosyphons was investigated by many researchers. In the present study investigations were conducted to examine the evolution of flow patterns at the evaporator, and changes in thermodynamic state that each of liquid pool and vapor experiences through 1 cycle of pulse boiling process. For wall and liquid pool the degree of superheat for the onset of nucleation was examined. It revealed that the degree of superheat increased with the increase of pulse period, reaching to 16.5°C and 23°C for liquid pool and evaporator wall respectively at $\tau=80$ sec. The data on flow patterns obtained through series of operation tests were plotted in the coordinates of heat flux and vapor pressure to get a regime map. Further this map could be used to figure out the conditions of pulse boiling for a thermosyphon.

기호설명

P	: 압력, bar	T_v	: 증기 온도, °C
P_{atm}	: 대기 압력, bar	T_w	: 벽면 온도, °C
P_s	: 포화 압력, bar	$\Delta T_{w, sup}$: 벽면 과열도, $T_w - T_v$, °C
P_v	: 증기 압력, bar	$\Delta T_{l, sup}$: 액체과열도, $T_l - T_v$, °C
P_s'	: 환산 압력, P_s/P_{atm}		그리스문자
q_e''	: 증발부열유속, W/m ²	τ	: 펄스비등주기, sec
t	: 시간, sec.		
T_p	: 액체풀온도, °C		
T_s, T_{sat}	: 포화 온도, °C		
T_v	: 증기 온도, °C		

1. 서 론

밀폐형 2상 열사이폰은 보통 긴 원통 형상의 용기로써 내부 작동유체의 기-액 상변화를 이용하는 열이송 장치이다. 열사이폰은 열전도도가 크고, 열

*회원, 성균관대학교 기계공학과
**회원, 성균관대학교 대학원 기계공학과

다이오드 등의 특성을 가지며, 작동하는 온도 범위가 매우 넓다. 따라서 오늘날 열사이폰은 가스터빈의 날개 냉각, 배기열 회수 시스템의 열교환장치, 태양열 집열기, 전기요소의 냉각 등 산업 전반에 걸쳐 응용분야가 다양하다.⁽⁴⁾

열사이폰은 일반적으로 작동유체의 삼중점으로부터 임계점까지 넓은 작동범위에서 정상상태의 안정된 작동을 하는 것으로 알려져 있다. 그러나 작동 온도 및 열부하 크기에 따라서 여러 형태의 불안정한 작동요인들이 존재하며,^(2,3) 이것들이 작동한계를 결정하는 주요 요인이다. 이들 중 일부는 벽면을 따라 흐르는 응축액막 유동의 유체 동력학적 불안정성에 기인하며, 액적 비산 또는 건조(dryout) 등의 원인이 되며 작동 상한 경계를 결정하는 요인이 된다.^(1,3) 또다른 불안정한 작동현상으로 펄스비등(pulse boiling)이 있으며, 이것은 증기핵의 생성에 관련된 불안정성에 기인하고 있다. 펄스비등은 알콜, 물을 이용한 열사이폰에서 작동 온도 30~40°C 이하, 열유속범위 10³~10⁴ W/m²의 작동범위에서 자주 목격되는 현상으로 하한 한계를 결정하는 인자로 볼 수 있다. 이 비등과정 중 증발부에서 간헐천(geysering)이 나타난다. 그리고 간헐천의 주기가 열부하 조건에 따라 10~200 sec의 분포를 나타내며, 그러나 열부하가 일정할 때 주기 변동폭이 크지 않다. 이 펄스비등 과정에서는 응축부와 증발부의 온도가 시간에 대해 진동을 나타내며, 주기가 큰 경우 벽의 온도진폭은 에탄올(ethanol) 또는 물을 사용하는 열사이폰에서 20~30 °C 정도의 큰 값을 보인다. 또한 응축부로 전달되는 열 이송률도 시간의 함수로 진동을 나타낸다. 이러한 관점에서 열사이폰을 설계할 때에는 한계 열전달률(limitation)에 대한 해석과 함께 펄스비등 영역에 대한 해석도 필수적으로 수행되어야 할 과제로 생각한다.

펄스비등 현상은 열사이폰의 개념을 처음 도입한 Larkin 등이 수행한 초기 연구에서도 목격되었다.⁽⁶⁾ 그러나 이 문제에 대한 체계적 연구는 80년대 중반 이후 Negishi,⁽⁸⁾ Liu⁽⁷⁾ 등에 의해 시작된 것으로 알려져 있다. 이들의 연구는 주로 실험적 방법을 통하여 펄스비등 과정에서 나타나는 벽온과 유체온도의 진동주기, 진폭을 측정하고, 이들에 미치는 열사이폰의 형상, 충전율, 작동유체 등의 영향을 파악하는데 집중되었다. Kim⁽⁵⁾ 등은 펄스비등 메커니즘을 이해하기 위하여 유리관으로 제작한 열사

이폰을 이용하여 내부 액체 풀의 비등을 가시화하는 연구를 수행하였다. 이들 연구에 의하면 펄스비등 영역에서는 간헐천이 일어날 때에만 증발부 풀의 상부 액체층에서 비등이 진행되며 나머지 하부 구간에서는 가열 표면에서 증기핵이 생성되지 않는다. 또한 간헐천은 2~3초의 짧은 시간동안 진행되고 다음 간헐천이 시작될 때까지 증발부 액체 풀에서는 어떠한 형태의 증기 기포도 나타나지 않는다. 간헐천이 시작될 때 증기와 함께 풀 상단으로부터 많은 양의 액체가 응축부로 비산하며, 이 결과 풀의 계면이 급격히 감소한다. 이러한 현상을 연구자들에 따라 blow-up 또는 bumping이라고 부르기도 한다.

이상에서 언급한 바와 같이 그동안 Negishi, Liu, Kim 등에 의해 펄스비등 영역에서 유동의 가시화, 온도진동, 과열도, 진동주기 등에 관한 많은 연구가 진행되었다. 그러나 주어진 열사이폰에서 펄스비등이 발생하는 조건에 관해서는 분명하게 설명하지 못하고 있다.

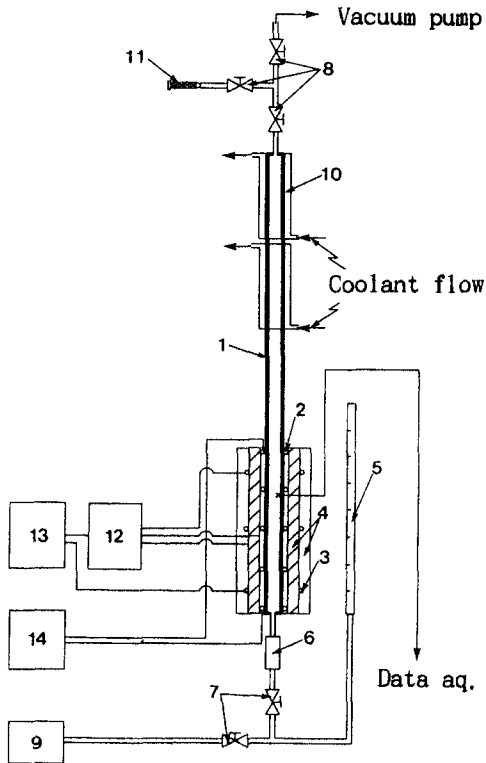
본 연구에서는 작동유체 충전율을 연속적으로 변화시킬 수 있도록 실험용 열사이폰을 제작하고, 이것을 이용하여 포화 증기압과 증발부 열유속을 각각 0.025~0.7 bar, 0.5~30 kW/m²까지 단계적으로 변화시키면서 벽면과 내부증기 및 풀의 액체온도를 계속하고 펄스비등 영역과 정상상태 핵비등영역을 구분하였다. 펄스비등 영역에서는 측정값의 시간적 변화를 분석하여 풀 내부 액체의 열역학적 상태변화를 고찰하였다. 이러한 방법을 통하여 각 열부하 조건에 따라 열사이폰 내부의 증발부 풀에서 열전달 영역을 자연대류, 펄스비등, 연속 핵비등영역으로 구분하고, 이 결과를 열유속 q_e'' 와 증기온도 T_v 의 좌표평면에 표시하였다. 이 그림으로부터 펄스비등영역 구간의 경계선을 나타내는 상관식을 q_e'' 와 T_v 의 함수로 구하였으며, 도표 또는 이 함수식을 사용하여 열사이폰의 펄스비등 영역 구간을 예측할 수 있는 방법을 제시하였다.

본 연구의 결과는 2상 밀폐 열사이폰에서 이와 같이 펄스비등이 발생하는 영역을 T_v 와 q_e'' 의 함수로 구분할 수 있는 방법을 제시하는 데 가장 큰 의의가 있다고 생각하며, 실제 열사이폰의 설계와 응용에 이러한 방법이 이용될 수 있을 것으로 생각한다. 다만 본 연구내용은 주어진 열사이폰을 대상으로 얻은 결과이며, 여기서 제시한 상관식을 열사이폰의 크기, 작동유체의 물성, 충전율 등 다양한

설계인자들에 대한 영향을 포함할 수 있도록 일반화시키는 것이 앞으로 연구수행해야 할 과제로 생각한다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 실험에서 사용한 장치의 구성에 대한 개략도로써 열사이폰, 가열 및 냉각장치, 열부하 제어장치, 그리고 온도 및 압력 측정장치 등으로 구성되어 있다. 일반적으로 열사이폰은 양 끝단이 밀폐된 고립계이다. 그러나 본 연구에서는 열사이폰의 응축부 상부끝단에 작동유체의 증기압을 측정할 수 있도록 압력 전달장치(PDCR 961, 5 bar abs)를 설치하였다. 그리고 하부끝단에 열사이폰 용기



1. Test tube 2. Main heater 3. Heater
4. Insulator 5. Measuring device for liquid level
6. Flexible tube 7, 8. Vacuum valves
9. Working fluid bath 10. Water jacket
11. Pressure transducer 12. Thermostat
- 13, 14. Slidacs

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

와 평행하게 액주계를 설치하여 충전유량을 변화시키거나 또는 유량을 계측 및 제어할 수 있도록 하였다.

열사이폰의 양 끝단에는 고진공용 밸브(NUPRO, SS-DLV51)를 설치하였으며 밸브의 연결부위를 통하여 외부공기의 유입이 우려되었으나, 그러나 다행하게도 약 2000여 시간의 실험기간 동안 이러한 문제가 발생되지 않았으며, 이러한 사실은 열사이폰이 상온에서 휴식 상태에 있을 때 증기압력의 측정을 통하여 확인하였다. 작동유체를 충전할 때에는 먼저 열사이폰 용기와 주변 관로를 확산진공장치(한국진공, K. VAC)를 이용하여 10^{-4} torr 이하의 진공도에서 5~6시간 이상 유지하여 열사이폰 용기내부에 유입된 기체를 제거하였고, 액주계에도 동일한 방법을 적용하였다. 이와 같이 열사이폰과 액주계 용기 내부도 동일한 정도의 진공인 상태에서 증발부 하단에 설치한 작동유체 공급용기로부터 유체를 열사이폰과 액주계에 유입시켰다. 액주계와 열사이폰 내부의 유체가 열역학적 평형상태에 도달되면 액주의 높이가 균일하게 되며, 따라서 주입된 작동유체의 충전량을 계측할 수 있게 된다. 본 실험에 사용된 작동유체는 에탄올(ethanol)이며, 충전율은 약 30%로써 범용 수직 열사이폰의 설계에서 많이 적용되는 값을 선택하였다. 증발부에 균일한 열유속을 공급하기 위하여 전기 저항선($\phi=0.8$ mm, $2 \Omega/m$)을 용기 벽면에 나선형태로 피치가 약 8 mm가 되도록 설치하였고, 최대 약 500 W ($q_e''=25,000 \text{ W/m}^2$) 정도의 열을 안정하게 공급할 수 있다. 전기 저항선에서 발생된 열이 외부로 흐르는 것을 차단하기 위하여 발열체 주위를 단열재(Kaowool, ceramic fibre)로 균일한 두께로 감고, 그리고 그 주위에 약 10 mm의 동심환형의 공기층을 갖도록 차열벽을 설치하였다. 아울러 바깥쪽 차열벽 외벽에는 보조 가열장치를 설치하고, 공기층을 사이에 둔 두 차열벽의 표면온도 차이가 약 $2\sim 5^\circ\text{C}$ 를 초과하지 않도록 하였다. 그리고 응축부에는 길이 방향으로 균일한 벽면온도 분포를 얻도록 하기 위하여 냉각부를 길이 방향으로 동일한 길이의 2실로 나누고, 각 실에 냉각수 유량을 독립적으로 조절하였다. 열부하 크기에 따라 냉각 항온조(제일과학, Model C-BC)를 사용하여 냉각수의 온도를 $-10\sim 50^\circ\text{C}$ 까지 가변시켜 사용하였으며, 이러한 방법으로 응축부 증기압을 $0.03\sim 0.7$ bar까지 제어할 수 있었다.

열사이폰 벽면온도 분포를 측정하기 위하여 20개의 열전대(C-C Type, $\phi=0.12$ mm)를 벽면에 길이 방향으로 일정간격으로 설치하였다. 각 측정점의 위치에 관한 자세한 자료는 참고문헌 (10)에서 찾아볼 수 있다. 또한 열사이폰 내부증기 및 액체 풀의 온도를 측정하기 위하여 용기 내부 중심축을 따라 증발부 하단에 2개, 응축부 상단에 1개의 sheath 형 열전대를 설치하였으며, 각각의 측정점은 끝단으로부터 5 cm, 10 cm에 위치하고 있다. 온도의 계측은 Hybrid Recorder(Yokogawa, Model 3088)와 함께 Data Logger(Yokogawa, DA2500E)를 사용하였고, PC를 이용하여 입력신호의 저장 및 처리를 수행하였다.

실험은 다음의 과정과 같이 진행하였다. 먼저 증기압 크기에 따라 냉각수 온도를 결정하고 일정유량을 응축부에 공급하고 열사이폰이 열적평형상태에 도달되면, 증발부에 열부하를 작용하였다. 열사이폰의 정상작동영역에서는 정상상태에서 각 측정점의 온도와 압력을 측정하고 기록하였으며, 펄스 비등영역에서는 주기가 일정하게 진행될 때 2~3주기 동안의 측정값들을 기록 또는 저장하였다. 열유속 크기는 단계적으로 변화시켰다.

3. 결과 및 고찰

3.1 펄스 비등과정에서 증발부 액체 풀의 과열도와 시간에 따른 열역학적 상태변화

Kim⁽⁶⁾ 등의 연구에서 지적된 것과 같이 펄스 비등과정 동안에 용기 내부의 작동유체는 액체 풀과 증기 모두 비정상 상태에 있으며, 액체 풀은 20~30 °C의 높은 과열 상태에 놓인다. 이때 응축부에서는 증기온도와 증기압력의 측정 결과를 비교함으로써 증기가 열역학적 평형 상태에 있는 것을 확인하고자 하였다. Fig. 2는 열사이폰이 펄스 비등과정을 일으키고 있을 때의 응축부 증기온도 T_v 와 응축부의 증기압력 P_v 및 증발부벽의 온도, T_w 를 측정된 결과를 비교하여 도시한 것으로 약 22초의 펄스 주기를 가지고 변화하고 있다. 이 둘 측정값 사이의 상관관계를 검토하기 위하여 이상기체 상태방정식을 이용하여 계측된 증기온도, T_v 값을 상평형 증기압력, P_v 로 변환하여 측정치와 비교한 것이 Fig. 3이다. 이 결과 절정(peak)값에서 약 30~34 %정도 계측된 압력값이 크게 나타났으며 나머지 구간에서는 약 2 % 범위내에서 거

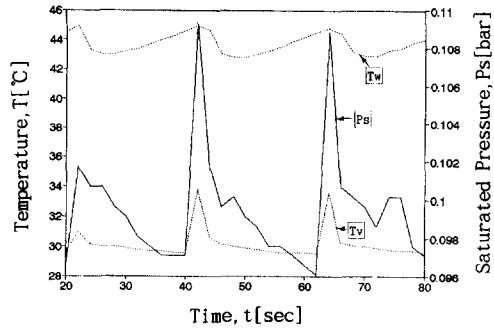


Fig. 2 Periodic variations of temperatures T_w , T_v and vapor pressure, P_v in condenser during pulse boiling process at $q_e''=5500\text{W/m}^2$.

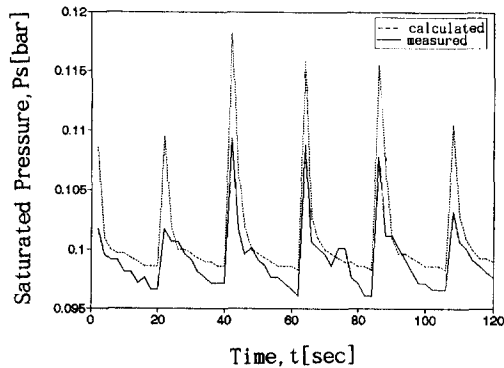


Fig. 3 Comparison of vapor pressure, between measured value and calculated one using measured vapor temperature, T_v .

의 일치하는 것으로 나타났다. 이러한 절정치의 차이는 열전대와 압력센서의 응답성의 차이에 기인하여 압력센서의 감도가 크기 때문에 나타나는 차이로 생각하며 따라서 응축부의 증기는 펄스 비등구간에서 비정상 상태에 있으나 열역학적 평형상태에 있는 것으로 간주할 수 있다. 다시 말하면, 열사이폰의 펄스 비등영역에서 응축부의 증기가 열역학적 평형상태에 있으며, 따라서 증발부 액체 풀의 과열도는 증기온도를 기준으로 구할 수 있다. Fig. 4는 이러한 방법으로 펄스 비등 과정에서 증발부 액체의 과열도와 열역학적 상태 변화를 고찰하기 위하여 증발부 벽온, 증발부 액체 풀 및 응축부 증기온도의 측정 결과를 도시한 것이다. Kim⁽⁶⁾ 등의 연구에 의하면 풀의 액체온도를 기준으로 절정을 이루는 두 점 사이를 1주기의 펄스 비등구간으로 정의하였고, 절정점에서 간헐천이 시작하여 2~3초 진행하며, 나머지 구간에서는 액체 풀에 증기 기포

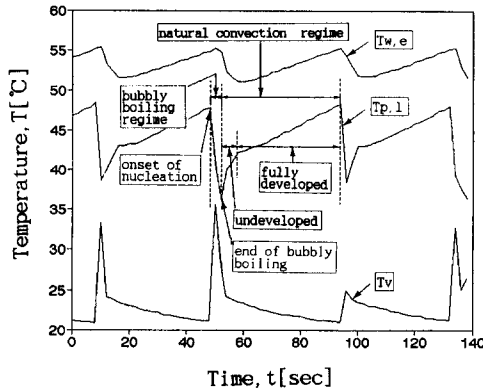


Fig. 4 Variations of temperatures T_v , $T_{w,e}$, $T_{p,i}$ and flow regimes of liquid pool for 1 cycle of pulse boiling process. ($q_e'' = 1500 \text{ W/m}^2$)

가 존재하지 않는다. 절정점에서 액체 풀온도(T_p)는 증기온도(T_v)에 비하여 약 20~25°C 높은 값을 나타내고, 이것은 절정점에서 액체 풀이 높은 과열상태 즉 열역학적으로 준 안정상태(metastable state)에 있다는 것을 의미하고 있다. 이와 같이 액체 풀이 높은 과열 상태에 있을 때 가열 벽면으로부터 증기핵이 생성되면 증기 기포는 급격히 성장하며, 이러한 기포의 급격한 성장을 간헐천의 원인으로 볼 수 있다. Kim⁽⁶⁾ 등의 가시화 연구에 의하면 이 간헐천이 2~3초 지속되는 동안 증기 기포는 오직 풀의 계면 아래 2~3 cm 구간에서만 생성된다. 여기서 우리는 이 구간을 bubbly 비등구간으로 지칭하였다. 그 이유는 이 구간에서 증기 기포가 가열벽면에서가 아니라 풀의 상단 1~2 cm 구간의 액체층 내부에서 간헐천에 의한 물리적 운동의 결과로 생성되기 때문에 이 기포들이 액체층의 과열도가 클 때 급격히 성장하여 간헐천을 지속시키기 때문이다. Bubbly 비등 과정은 액체 내부에 축적된 에너지를 소산시키며, 따라서 액체 풀의 온도를 급격히 강하시킨다. 그러나 반대로 증기온도는 상승하여 증발부 액체 풀과 응축부 증기가 평형 상태에 접근하고 이때 비등은 종료된다. 이후 새로운 간헐천이 시작될 때까지 액체 풀에서는 증기 기포의 생성이 일어나지 않으며 따라서 증발부에 공급된 열의 일부는 벽을 통하여 여전히 냉각부로 공급되며, 나머지는 액체 풀에 전달되어 온도를 상승시킨다. 따라서 이 과정동안의 증발부벽과 액체 풀 사이의 열전달은 자연대류로 볼 수 있다. 이 대류 과정동안 증기온도는 다시 감소하며, 액체 풀은 과

열상태에 놓이게 된다. 이와 같이 펄스 비등구간에서는 액체 풀은 열역학적으로 거시적 관점에서 평형상태로부터 절정 과열온도 상태까지 1 cycle을 이루며 상태변화를 일으키는 것으로 볼 수 있다. 그동안의 연구 결과 과열 상태의 풀에서 증기핵이 생성되는 점, 즉 Fig. 4의 절정점에서 액체 풀의 과열도, $\Delta T_{p,sup} = T_p - T_s$ 와 이때의 벽의 과열도, $\Delta T_{w,sup} = T_w - T_s$ 는 열역학적으로 그리고 열전달 분야에서 중요한 연구 과제로 생각된다.

3.2 액체 풀의 대류열전달 영역별 구분과 천이 구간의 상관식

열사이폰의 증발부에서 열전달률은 액체 풀에서의 열전달 유동 메커니즘에 따라 큰 차이를 나타내며, 따라서 열사이폰의 성능을 결정하는 중요한 요소가 된다. 풀비등영역에 관한 Nukiyama의 실험 결과는 열유속이 매우 작은 구간에서는 가열벽면으로부터 자연대류에 의해 열이 유체 내부로 전달되고, 열유속을 증가시키면 핵비등 영역으로 천이됨을 보여주고 있다. 이후 많은 연구자들에 의해 이 두 대류영역 사이의 천이점은 유체의 물성, 열유속, 증기압과 같은 인자들에 의존하고 있는 것으로 알려져 있다. 이들 인자 외에 가열 고체표면의 미시적 구조, 고체와 유체 사이의 친화력 등 복잡한 요인들이 포함되어 있으며, 또한 이력현상(hysteresis)이 나타나고 있다.⁽²⁾ 2상 열사이폰의 증발부 액체 풀에서도 이와 유사한 현상이 나타난다. 즉 증기압이 일정한 조건에서 열유속이 매우 작은 값에서는 증발부벽에서는 핵비등이 나타나지 않는다. 이때 액체 풀은 일정한 과열도를 유지하며 열유속을 증가시키면 펄스 비등영역으로 천이된다. 열유속을 더욱 증가시키면 다시 핵비등 영역으로 천이된다. 이상과 같이 열유속의 조건에 따라 열사이폰 내부 액체 풀에서는 자연대류, 펄스비등, 핵비등 영역으로 구분할 수 있다.

Figs. 5, 6은 열유속범위 $4 \times 10^2 < q_e'' < 2 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ 에서 수행한 데이터로부터 대류열전달영역별 벽면의 과열도 $\Delta T_{w,sup} = T_w - T_s$ 를 q_e'' 와 P_s 의 함수로 도시한 결과로써, Fig. 5는 증기압력이 $0.025 < P_s < 0.1 \text{ bar}$, Fig. 6은 $0.1 < P_s < 0.76 \text{ bar}$ 의 자료를 구분한 것이다. 자연대류영역과 핵비등영역에서는 과열도의 크기가 시간에 대하여 정상상태로 일정한 값을 유지하기 때문에 측정이 용이하다. 그러나 펄스비등에서는 Fig. 2에서 보는 것과 같이 과

열도가 주기적 변화를 일으키므로 증기핵이 발생되는 점, 즉 최대 과열도값을 사용하였다. 자연대류와 연속핵비등영역에서는 데이터들이 각각 일직선상에 모여있다. 한편 $0.195 < P_s < 0.76$ bar 조건의

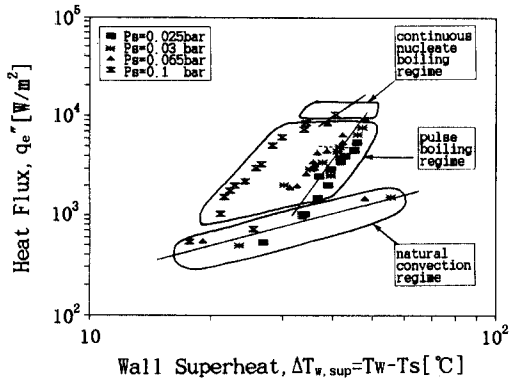


Fig. 5 Wall superheat versus heat flux at $0.025 < P_s < 1$ bar.

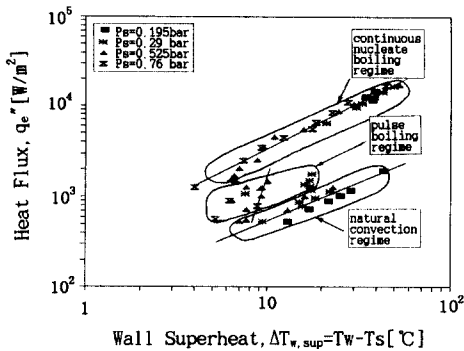


Fig. 6 Wall superheat versus heat flux at $0.175 < P_s < 0.76$ bar.

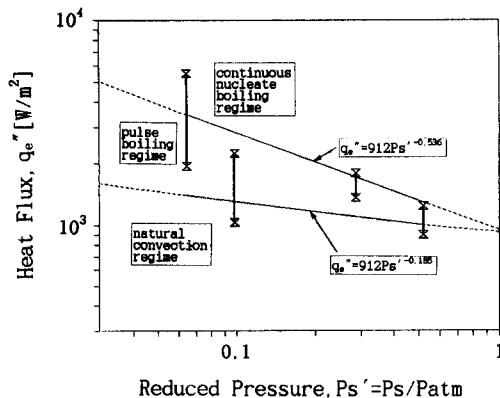


Fig. 7 Chart of heat transfer regimes in the liquid pool at the evaporator for the closed thermosiphon.

연속핵비등영역에서의 열전달계수는 Rohsenow, Kutateladze의 핵비등 상관식에 접근하고 있는 것으로 확인되었다.⁽¹⁰⁾ 그러나 Figs. 5, 6에서 자연대류영역에서는 열유속 범위가 $q_e'' = 1000$ W/m² 이하로 한정되어 있고, 증기압이 작을수록 벽의 과열도가 증가하며, $P_s = 0.025$ bar에서 최대 50~60 °C의 매우 큰 과열도를 나타내고 있다. 자연대류영역에서는 이러한 높은 과열도에서도 가열 벽면에서 증기핵의 생성이 이루어지지 않는 현상에 대해서는 증기핵 생성 메커니즘의 연구 분야에서 검토되어야 할 것으로 생각된다.

3.3 이력 현상

열사이폰에서 증기압을 일정하게 유지하면서 단계적으로 열유속을 증가 또는 감소시키면 액체 풀에서의 열전달 영역이 변화하는 천이점이 서로 다른 이른바 이력현상(hysteresis)이 나타나고 있다. Figs. 5, 6으로부터 이러한 관계식을 일반화시킨 것이 Fig. 8이다. 즉 선 1-2'과 선 3-5는 각각 모든 증기압에 대하여 자연대류영역과 핵비등영역의 과열도를 나타내고 있다. 다만 펄스비등영역에서는 증기압의 크기에 따라 그림에서 P_{s1} , P_{s2} , P_{s3} 의 서로 다른 관계식을 따라 벽의 과열도가 분포되어 있고, 이들 식의 기울기는 거의 일정하다. 한편 Figs. 5, 6의 데이터를 분석하면 이력현상이 존재함을 알 수 있다. 즉 열사이폰에 적용하는 열유속을 자연대류영역 증기압, P_{s2} 를 일정하게 유지하면서 1-2를 따라 증가시키면 2에서 펄스비등영역으로 천이하지 않고 점 2'까지 자연대류영역을 유지한다. 다시 열유속을 증가시키면 2'에서 2''으로 과열도가 천이하고 이후 열유속의 증가에 따라 2''-4''-4까지

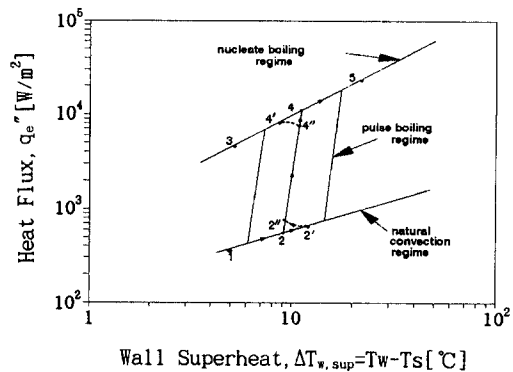


Fig. 8 Hysteresis of changes in heat transfer regimes at liquid pool.

펄스비등을 지속하고 점 4에서 선 4-5의 핵비등으로 천이한다. 또한 점 5상태에서 증기압을 P_{s2} 로 유지하며 열유속을 감소시키면 선 5-4-4'을 따라 과열도가 결정되며 더욱 열유속을 감소시키면 선 4''-2''-2-1을 따라 열전달 영역과 과열도가 결정된다. 이러한 결과는 열유속의 증가 또는 감소 과정에 따라 열전달 영역이 변화하는 천이점이 서로 다른 이력현상을 보여주고 있다.

3.4 비등주기와 작동인자들 사이의 관계

Stralen⁽⁹⁾ 등이 풀(pool)내의 가열벽면에 주어진 크기의 공동(cavity)을 설치하고, 포화 증기압력과 열유속을 변화시키면서 수행한 기포핵의 형성과 성장주기에 대한 연구내용에 의하면, 증기압이 1 atm에서 핵형성 주기는 약 0.1 sec의 order를 갖는다. 그러나 증기압력이 낮아질수록 증기기포의 발생 주기가 길어지며, $P_s \approx 0.04$ bar일 때 약 85 sec의 매우 긴 기포발생 주기가 목격되고 있다. 그러나 열사이폰에서는 앞 절에서 언급한 것과 같이 10~100 sec의 order를 갖는 긴 발생주기의 핵비등이 나타나고 있으며, 이러한 값들은 Stralen⁽⁹⁾ 등의 연구에서 나타나는 풀내의 핵비등의 기포 발생주기에 비하여 10~1000배 이상의 큰 값에 해당된다. 펄스비등영역에서 주기를 예측하기 위한 연구가 Liu⁽⁷⁾ 등에 의해 수행되었으나 아직 더 연구가 수행되어야 할 것으로 평가되고 있다.

Fig. 9는 이와 같은 방법으로 포화 증기압력 P_s 와 열유속 q_e'' 를 주 관련인자로 고려하여 실험결과로부터 $\tau = f(q_e'', P_s)$ 의 함수로 표시한 것이다. 측

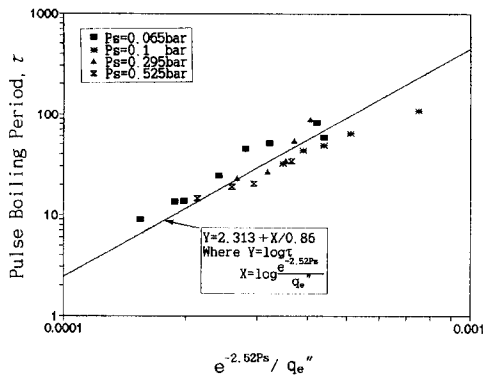


Fig. 9 Correlation of pulse boiling period, τ as a function of heat flux, q_e'' and saturated pressure, P_s at $700 < q_e'' < 6000 \text{ W/m}^2$ and $0.065 < P_s < 0.525 \text{ bar}$.

정결과는 다소 흠어짐을 보이고 있으나 $700 < q_e'' < 10000 \text{ W/m}^2$, $0.065 < P_s < 0.525 \text{ bar}$ 의 영역에서 인자들 사이에 상관관계가 존재함을 보여주고 있다. 여기서 제시한 q_e'' , P_s 외에 용기형상, 용기표면의 미세구조, 작동유체의 물성, 충전율, 냉각수 온도 및 열전달계수 등 많은 인자들이 영향을 미치는 것으로 보이며, 따라서 이러한 요인들이 Fig. 9의 측정치가 보여주고 있는 흠어짐의 원인으로 생각한다. Fig. 9에서 얻은 상관식을 일반화하는 데에는 보다 많은 실험 자료들이 필요로 하며, 앞으로의 연구과제로 생각한다.

4. 결 론

(1) 응축부 증기와 증발부 액체 풀은 열역학적으로 서로 다른 경로를 따라 1 cycle 내의 변화를 받게 된다. 그러나 증기는 이 과정동안에 평형 상태에 있으나 액체 풀은 과열 상태에 놓이며, 최대 20~30 °C의 과열도를 형성하게 된다.

(2) 액체 풀도 1 cycle의 상태 변화에 걸리는 시간 즉 펄스비등 주기는 약 10~200 sec로써 열부하 조건에 따라 결정된다. 그리고 1주기 동안에 증발부 액체는 2~3 sec의 짧은 시간의 bubbly 비등에 의해 증기를 발생시키며 나머지 구간 동안에는 가열벽으로부터 열을 축적한다.

(3) 열사이폰의 증발부 액체 풀의 열전달 메커니즘은 열유속 q_e'' 와 증기압 P_s 의 크기에 따라 자연대류, 펄스비등, 핵비등으로 구분된다. 열부하 변화에 따라 열전달 메커니즘이 천이될 때에는 이력현상이 발생된다.

(4) 펄스비등이 발생하는 영역을 환산 증기압력 P_s' 와 열유속 q_e'' 의 좌표상에 표시할 수 있었으며 경계를 나타내는 두 개의 상관식을 얻을 수 있었다. 이 도표(map)를 이용하여 주어진 열 사이폰에서 연속 핵비등이 발생하는 정상상태 작동 한계를 구할 수 있다.

(5) 펄스비등영역에서 펄스비등 주기는 열유속 q_e'' 와 증기압력 P_s 의 함수로 아래 상관식을 얻을 수 있다. $\log \tau = 2.313 + (1/0.86) \log(e^{-2.52 * P_s} / q_e'')$.

참고문헌

- (1) Andros, F. Z. and Florschuetz, L. W., 1980, *Heat Transfer Characteristic of the Two-Phase*

- Closed Thermosyphon*, Department of Mechanical Eng. Arizona State University.
- (2) Carey, V. P., 1992, *Liquid-Vapor Phase Change Phenomena*, Hemisphere Pub.
- (3) Casarosa, C. and Dobran, F., 1988, "Experimental Investigation and Analytical Modeling of a Closed Two-Phase Thermosyphon with Imposed Convection Boundary Conditions," *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 31, No. 9, pp. 1815~1833.
- (4) Dunn, P. B. and Reay, D. A., 1993, *Heat Pipes*, 4th Edition, Pergamon Press, Oxford, pp. 301~310.
- (5) Kim, C. J. and Kang, H. K., 1993, "The Visual Study of Nucleate Boiling Phenomena in Liquid Pool for a Closed Two Phase Thermosyphon," *ISTP 6th in Thermal Engineering*, Seoul, Korea, Vol. I., pp. 389~399.
- (6) Larkin, B. S., 1971, "An Experimental Study of Two-Phase Thermosyphon Tube," *Trans. CSME*, Vol. 14, pp. 17~24.
- (7) Liu, J. F. and Wang, J. C. Y., 1992, "On the Pulse Boiling Frequency in Thermosyphons," *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 114, pp. 290~292.
- (8) Negishi, K., Kaneko, K. and Kusumoto, F., 1987, "Analysis of Pulsation in Two-Phase Thermosyphons," *Proc. 6th Int. Heat Pipe Conf.*, Grenoble, pp. 436~440.
- (9) Stralen, S. J. D., Cole, R., Slugter, W. M. and Sohal, M. S., 1975, "Bubble Growth Rates in Nucleate Boiling of Water at Subatmospheric Pressures," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 655~669.
- (10) 문석환, 1994, "밀폐형 2상 열사이폰의 Pool 내부 Pulse boiling에 관한 연구," 성균관대학교 석사학위 논문.