

(論 文)

개방된 2상 자연순환 회로내의 유동특성에 관한 실험적 연구

경익수* · 이상용**

(1992년 11월 9일 접수)

An Experimental Study on the Flow Characteristics inside an Open Two-Phase Natural Circulation Loop

Ick Soo Kyung and Sang Yong Lee

Key Words : Natural Circulation(자연 순환), Two-Phase Flow(2상 유동), Flow Pattern(유동 양식), Two-Phase Flow Instability(2상 유동 불안정)

Abstract

Flow patterns inside the riser section and the effects of the heater inlet- and exit-restrictions, liquid charging level and the heater inlet subcooling on the flow characteristics inside an open two-phase natural circulation loop were studied experimentally. Three basic circulation modes were observed ; periodic circulation (A)(flow oscillations with incubation(no boiling) period), continuous circulation(stable operation mode with no flow oscillations), and periodic circulation (B) (flow oscillations with continuous boiling). The circulation rate increases and then decreases with the increase of the heating rate and the maximum circulation rate appears with the continuous circulation mode. The decrease of the inlet-restriction or the increase of the exit-restriction destabilizes the system. When the liquid charging level or the inlet subcooling decreases, the continuous circulation mode starts at the lower heating rate and the system is stabilized.

기 호 설 명

- H : 상승부 상단 수평부에서 작동유체 수위까지의 거리 (cm)
- K_i : 가열기 입구밸브 마찰저항(단함 각도)
- K_o : 가열기 출구밸브 마찰저항(단함 각도)
- Q : 가열량 (Watts)
- $\Delta T_{hi,sub}$: 가열기 입구유체의 과냉정도 (°C)

1. 서 론

2상 자연순환 회로(two-phase natural circula-

tion loop)는 가열기가 설치된 상승부(riser section)와 응축기가 설치된 하강부(downcomer section)의 유체 밀도차를 구동력으로 작동 유체가 회로를 순환하여 열에너지를 전달하는 시스템으로서 펌프와 같은 기계적인 동력원을 필요로 하지 않는 것이 특징이다. 이같은 시스템은 열사이폰 리보일러(thermosyphon reboiler), 태양열 집열기, 가스 터빈의 냉각시스템등에 널리 적용되고 있다. 또한 원자로의 냉각수 상실 사고와 관련하여서도 이러한 2상 자연순환 현상이 나타나는 것으로 알려져 있다. 그런데, 이 시스템에서는 가열기에서 비등(boiling) 현상이 반드시 수반되어 상승부는 2상류(two-phase flow)로 흐르게 되며 이 때 이 시스템

*한국과학기술원 기계공학과 대학원

**정회원, 한국과학기술원 기계공학과

의 기하학적 조건, 작동 유체의 물성치, 그리고 운전 조건등에 좌우되어 여러 형태의 2상 유동 불안정(two-phase flow instability) 현상들이 발생하게 된다. 2상 유동 불안정^(1,2)은 크게 정적 불안정(static instability)과 동적 불안정(dynamic instability)으로 구분되는데 이 현상들은 액체나 기체의 연속적인 순환을 방해함으로써 시스템의 원활한 작동 및 운전에 좋지 않은 영향을 미치게 된다.

이와 같은 2상 유동 불안정에 대해서는 그 중요성 때문에 많은 이론적, 실험적 연구가 수행되어 왔는데, 이러한 연구들은 강제 순환의 경우에 대한 것이 대부분이었다. 그러나 가열기에 의해 가해지는 가열량에 따라 회로내의 순환 유속이 결정되는 자연순환 유동에 대해서는 연구가 부족한 상태이다. 2상 유동 불안정에 관한 이론적 연구들^(3,4,5)에서는 선형 섭동법에 의한 특성 방정식의 유도과 이에 근거한 불안정 경계의 판별 방법이 주를 이루고 있다. 한편 2상 자연순환 회로에 대한 이등원과 이상용⁽⁶⁾의 이론적 연구에서는 작동 유체의 상(phase)에 따라 순환회로를 여러 구간으로 나누고 2상류에서는 균질 유동 모델(homogeneous flow model)을 이용하여 각 구간에서의 압력 손실에 관한 시간 평균 방정식을 유도하였다. 이 방정식을 이용하여 액상의 과냉 정도와 가열기 입·출구 벨브들의 마찰 저항 계수가 순환 유속에 미치는 영향을 살펴보았다. 그러나, 이 연구에서는 가정된 2상류 모델의 적용과 시간 평균적인 계산때문에 자연순환 회로내 유동 특성에 대한 정성적인 경향만을 제공하고 있다. 따라서, 2상 유동 양식의 변화와 같은 현상의 예측에는 어떠한 정보를 제공할 수 없다.

반면에 2상 자연순환 회로에 관한 실험 결과는 Chexal과 Bergles,⁽⁷⁾ Fukuda와 Kobori,⁽⁸⁾ Lee와 Ishii⁽⁹⁾ 및 Imura등⁽¹⁰⁾을 제외하고는 별반 알려져 있지 않다. Chexal과 Bergles⁽⁷⁾는 물과 R-113을 작동 유체로 사용하여 개방된 자연순환 회로내의 2상 유동 불안정에 대하여 연구하였다. 그들은 상승부 유동의 가시화 및 가열기 입구쪽에 설치된 오리피스 양단 압력차 변화를 측정함으로써 회로내 유체의 거동을 연구하였다. 그들은 작동 유체, 가열기 입구의 과냉 정도, 그리고 가열량에 따라 발생하는 상승부의 2상 유동양식(two-phase flow pattern)의 변화 형태를 총 7가지로 분류하였는데 작동 유체가 R-113인 경우에는 물과 다르게 4가지의 유동

형태만이 나타남을 보여주고 있다. 그리고 가열기 입·출구쪽에 설치된 벨브들의 열림 각도를 변수로 하여 가열량과 과냉 정도를 좌표축으로 한 불안정 선도를 작성하였다. 그러나, 그들은 가열량에 따른 순환 유량 및 상승부 기공률의 변화에 대한 연구는 수행하지 않았다.

Fukuda와 Kobori⁽⁸⁾는 물을 사용하여 가열부가 평행 2채널로 구성된 2상 자연순환 회로에 대한 실험을 수행하였다. 그들은 비교적 큰 가열량에서 발생하는 동적 불안정의 한가지 현상인 밀도파 불안정(density wave instability)⁽¹¹⁾을 2가지 형태, 즉 중력 지배적 형태(gravitational-force dominant, type (I))와 마찰력 지배적 형태(frictional-force dominant, Type (II))로 구분하였다. 또한, 시스템 압력, 가열기 입구 마찰 저항, 가열기 입구 과냉 정도와 가열량을 변수로 하여 불안정 선도를 작성하였다. 그러나, 가열량에 따른 유동 양식의 변화나 순환 유량에 대한 실험적 연구는 이루어지지 않았다.

Lee와 Ishii⁽⁹⁾는 R-113을 사용한 2상 자연순환 회로에 대한 실험을 통하여 유체의 거동은 상변화 및 유동과 열전달 현상간의 커플링에 크게 좌우된다는 것을 보였다. 그리고 플래싱(flashing)과 같은 비평형 상변화 현상이 유동의 진동을 일으킨다고 밝혔다. 그들의 연구에서 유동의 특성은 잘 설명되었으나 정성적인 결과에 미쳤으며 유동의 불안정 현상에 대하여는 연구가 진행되지 않았다.

Imura 등⁽¹⁰⁾은 개방된 2상 자연순환 회로에서 가열량에 따른 과냉 액체의 순환 유량, 유동 방향에 따른 압력과 온도의 변화, 가열부의 열전달 계수등을 실험을 통하여 측정, 조사하였고 물, 에탄올, R-113을 작동 유체로 사용하였다. 그들은 실험 및 수치 결과를 통하여 순환 유량이 가열량의 증가에 따라 증가하다가 감소함을 밝혔으나 가열량과 물성치의 영향만을 연구하여 기타 주요 변수의 영향 및 2상 유동 양식의 변화에 대한 연구는 수행되지 않았다.

이와 같이 이전의 실험적 연구들에서는 가열량에 따른 순환 유량 및 기공률의 변화와 2상 유동의 순환 형태(또는 유동 양식)와의 상관 관계에 대한 연구가 전반적으로 결여되어 있었다. 따라서 2상 자연순환 회로내의 2상류 모델 개선을 위해서는 이에 대한 실험적 연구가 필요한 실정이다. 이에 본 연구에서는 가시화가 가능한 상승부를 가진 개방된 2

상 자연순환 회로를 설치하여 각 운전 조건에 따른 순환 유동 특성을 살펴보았다. 즉, 가열량 증가에 따른 상승부에서의 2상 유동 양식의 변화를 관찰하였고 동시에 가열기 입구 과냉 액체의 순환 유속 및 상승부의 기공률(void fraction)을 측정하였다. 또한 가열기 입구 및 출구에 설치된 밸브의 마찰 저항, 가열기 입구 액체의 과냉 정도, 그리고 충전 수위등이 전반적인 유동 특성에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 연구에 사용될 실험 장치는 Fig. 1과 같이 기본적으로 1차 회로(primary loop)인 2상 개방 자연순환 회로와 2차(보조) 회로(secondary loop)인 응축기 냉각 시스템 그리고 주변 장치로서 작동 유체 주입 장치와 데이터 수집 시스템으로 구성되어 있다. 1차 회로인 2상 개방 자연순환 회로는 Fig. 2에서 보여지는 것과 같이 기본적으로 가열기(heater)와 응축기(condenser) 그리고 그 사이를 연결하는 관으로 구성되어 있으며 응축기 상단부는 항상 대기압을 유지하게 되어 있다. 또한 2차 회로는 응축기에 냉각수 공급을 위한 얼음 제조기(ice maker), 냉각수 저장탱크 그리고 펌프 및 동판 코일로 이루어져 있다.

이와 같은 2상 자연순환 회로에서는 가열부가 응축부보다 작동 유체의 밀도가 작게 되므로 유체의 순환이 이루어지고 순환 방향은 가열부 하단에서

상단 방향으로, 즉 Fig. 2에서 시계 반대 방향으로 이루어진다. 따라서 본 연구에서는 작동 유체의 순환 방향을 기준으로하여 가열기 하단을 가열기 입구, 상단을 가열기 출구 그리고 응축기 상단과 하단을 각각 응축기 입구 및 출구로 지칭한다. 또한 가열기 출구 윗 부분을 상승부(riser section), 응축기 출구 아랫 부분을 하강부(downcomer section)라 지칭한다.

가열기 상단부에서 출구 밸브 사이, 즉 상승부는 유동의 가시화를 위하여 내경 16.0 mm, 외경 18.0 mm인 두 개의 파이렉스 관(pyrex tube)을 이용하여 배관하였고 그 외에는 내경 16.6 mm, 외경 19.1 mm인 3/4" 동파이프로 배관하였다.

가열기는 균일 열유속을 만들어 주기 위하여 길이 1.0 m인 3/4" 동 파이프 표면을 석면 테이프로 절연 처리 한 후 총 길이 16m의 KANTAL선(0.799 Ω/m)을 균일한 간격으로 감았으며 최대 가열량은 전압 220 V에서 약 4 kW이다. 또한 가열량은 220 V의 전원을 입력으로 하는 슬라이드—인

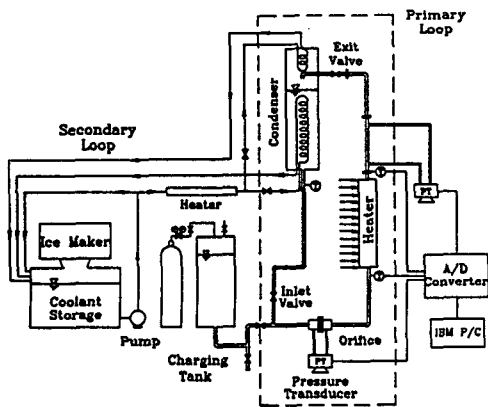


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

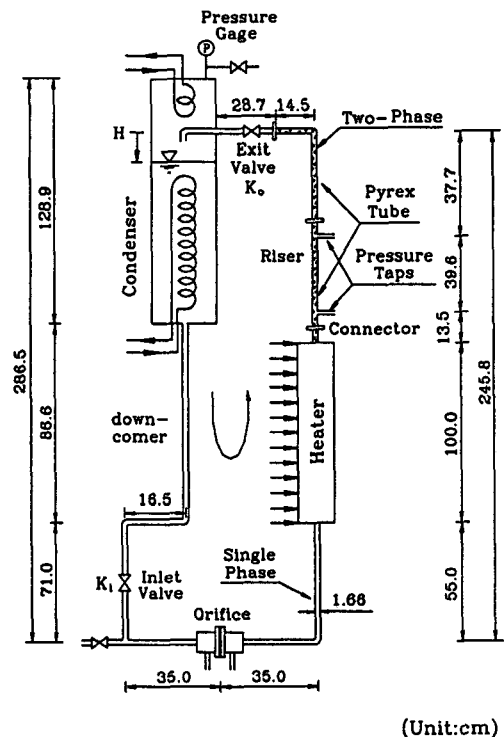


Fig. 2 Schematic diagram of open two-phase natural circulation loop

덕턴스(variac)의 출력 전압을 조정하여 변화시키도록 하였다. 그리고 가열기 외부는 12 cm×12 cm×102 cm의 스테인레스 케이스와 용접하여 고정시켰고 그 사이는 세라믹 섬유인 KAOWOOL로 채워 단열하였다.

응축기는 shell and coil 형태로서 응축기 안의 수위가 작동 유체의 유입과 유출에 관계없이 항상 일정하게 유지되도록 상승부 관 직경(3/4")에 대한 면적비가 약 145배인 내경 200 mm의 파이렉스 관과 1/4" 동파이프 코일로 구성되어 있다.

그리고 순환 회로내의 마찰 저항을 조절하기 위하여 SWAGelok 3/4" 볼 밸브를 가열기 입구와 출구 부분에 설치하였고 밸브의 닫힘각을 정확하게 조절하기 위하여 각도기를 밸브 손잡이에 설치하였다. 또한 가열기 출구부분인 상승부의 기공률을 측정하기 위하여 상승부 파이렉스 튜브에 39.6 cm 간격으로 호스니뿔(nipple)을 설치하여 보정 실험을 거친 차압 변환기(FOXBORO, 5000 mm F.S.)에 PVC 튜브로 연결하였다. 이것은 상승부에서의 관 마찰 압력 손실이 매우 작을 때 기공률은 기포 발생에 따른 정수압 차이에 주로 관계된다는 사실을 이용한 것이다. 순환유속을 측정하기 위하여 작동 유체가 항상 액상으로 존재하는 순환 회로 하단 수평부에 보정 실험을 거친 오리피스 유량계(orifice flowmeter)를 제작, 설치하였고 압력탭을 PVC 튜브로 차압 변환기에 연결하였다. 이 오리피스 유량계의 보정 실험을 위하여 일정 수두를 유지하며 유체가 공급될 수 있는 보정용 실험 장치를 구성하여 일정 시간 동안 오리피스를 통과한 유체(물)의 질량 유속(mass flow rate)값과 차압 변환기의 출력신호와의 상관 관계를 얻었으며 향류(inflow) 및 역류(backflow)의 양 방향에 대한 보정 실험을 수행하였다. 그리고 회로 내 여러곳의 온도를 측정, 관찰하기 위하여 OMEGA K-type 열전대를 이용하였다. 즉, 시스템의 정상 상태 도달 확인 및 주요 변수 중의 하나인 가열기 입구 온도를 측정하기 위하여 응축기 출구 및 가열기 입구, 그리고 상승부 유체온도의 시간에 따른 변화를 측정하기 위하여 가열기 출구에 열전대를 설치하였다. 또한 각각의 열전대는 비교적 정밀한 KONTES사 제품 수은 온도계(#871000-0315)로 보정하였다.

한편 상대적인 넓은 단면적으로 인하여 유체의 응축기 내 체제 시간이 길어서 유체의 가열기 입구

온도는 응축기 코일내를 흐르는 냉각수 온도에 의하여 거의 조절된다. 따라서 원활한 가열기 입구 온도의 조절을 위하여 냉각수의 응축기 입구쪽에 가열기 및 PID 자동 온도 조절기를 설치하였다.

2.2 실험 방법

R-113이 채워진 충전 탱크를 질소로 가압하여 회로내 일정 수두까지 작동 유체를 충전한 후 작동 유체에 포함되어 있는 비 응축성 가스를 제거하기 위하여 가열기에 적당량의 전원을 공급하여 충분히 가열한다. 각 조건의 실험을 수행하기 위하여 가열기 입구 및 출구 밸브를 각각 조절하고 가열기 입구 유체 온도를 원하는 값으로 조절하기 위하여 자동 온도 조절기(온도 설정)와 히터를 이용하여 응축기 냉각수 입구 온도를 조절한다. 슬라이드-인덕턴스를 이용하여 전기 가열기에 적당량의 전류를 공급하고, 응축기 출구 및 가열기 입구의 액체 온도가 정상 상태에 도달하면 각 데이터를 수집한다.

데이터 수집은 A/D 변환기(Keithley, DAS-16 G1과 EXP-16)의 기본 명령어와 BASIC 언어로 작성한 프로그램을 이용하여 가열기 입구 유속, 상승부 기공률, 가열기 출구 온도의 시간에 대한 변화를 동시에 측정하도록 하였다. 각 가열량에서 정상 상태에 도달하면 위의 세 데이터를 2분 동안 수집하였다. 한 정상 상태에서 가열량을 약 100 Watts 정도 증가시켜 다른 정상 상태에 도달하는 데는 약 20~40분의 시간이 소요되었다. 또한 속도 및 기공률의 시간에 대한 평균값은 주기적인 변화일 경우에는 한 주기의 평균값을 얻었고 일정한 값일 경우에는 샘플링 시간 동안의 산술 평균을 취하였다.

3. 실험결과 및 토론

본 연구에서는 대기압에서의 포화 온도가 47.56 °C인 R-113을 작동유체로 하여 가열량의 증가에 따라 발생하는 상승부 유동 양식의 변화를 관찰하였고 가열기 입구 유속 및 상승부 기공률의 시간에 따른 변화를 측정하였는데 그것은 대략적으로 Fig. 3과 같이 주기적 순환 (A), 연속 순환, 주기적 순환 (B)의 약 3가지로 구분될 수 있었다.

첫번째 주기적 순환 (A)는 비교적 적은 가열량에서 발생하는 것으로 가열기에서의 주기적인 비등 현상에 의하여 응축기로의 유체 순환이 주기적으로

발생한다. Fig. 3(a)의 경우는 작은 가열량에서 나타나는 현상으로서 상승부에서 흐름이 없이 단상(single phase)으로 존재하는 잠복기(incubation period)에 이어 비등 현상이 나타나게 되며 이때의 유동 양식은 기포류(bubbly flow), 슬러그류(slug flow), 처언류(churn flow)로 순차적으로 변화한다. 이 중 슬러그류가 형성되면서 응축기로의 순환이 이루어지기 시작하여 처언류 종료와 함께 순환은 중단된다. 이는 순환과 동시에 가열기 내로 유입된 과냉 상태의 액체로 인하여 가열기내 비등

현상이 점차 줄어들기 때문이다. 이 때 상승부의 유동 양식은 다시 슬러그류, 기포류등을 거쳐서 단상이 되어 잠복기로 되돌아오며 이같은 현상은 규칙적으로 반복된다. 이같은 가열 상태에서의 가열기 입구 유속 및 상승부에서의 기공률의 시간에 따른 변화는 Fig. 3(a)와 같이 주기적이며 가열량이 증가하면 정체기 및 주기는 점점 짧아진다. 그러나 가열량을 더욱 증가시키면 잠복기에 이어 기포류나 슬러그류의 과정이 없이 가열기 출구에서 급격히 상승하는 처언류에 의하여 순환으로 이어지는 약간 다른 유동 양식 변화 과정이 나타나며, 순환이 중단된 이후에는 슬러그류, 기포류, 잠복기가 이어지게 된다. 이때의 가열기 입구 유속 및 기공률의 변화는 Fig. 3(b)와 같으며 특히 이 유동 양식에서는 가열기 내에서 급격히 성장한 기포가 가열기 내 유체를 상하 양 방향으로 밀어내어 순환 전에 순간적으로 역류(back flow)가 발생하는데 이같은 역류 현상은 가열량의 증가에 따라 점점 증대하게 된다. 이같이 정체기에 이어 급격한 기포의 성장에 의한 강력한 순환의 특성은 정적 불안정한 현상 중 하나인 가이저링(geysering)⁽¹⁾으로 여겨진다. 한편, 이같은 주기적 순환 (A)의 현상들은 가열량의 증가에 따라 순환 주기는 점점 짧아지고 유속 및 기공률의 진폭이 커지게 되며 시간에 대한 평균 유속 및 기공률의 값은 증가한다.

가열량을 더욱 증가시키면 유동 형태는 주기적 순환에서 연속적인 순환으로 바뀌게 되며 이 때의 상승부에서의 유동 양식은 처언류 또는 스위피-환상류(wispy-annular flow)의 형태이다. 가열기 입구 유속 및 상승부 기공률은 Fig. 3(c)와 같이 시간에 따라 거의 일정한 값으로 유지된다. 이같은 양식이 바로 2상 자연순환 회로의 안정 운전 조건이 되며 이 연속 순환 구간이 넓은 가열량 범위에서 발생할 때 그 시스템은 상대적으로 안정하다고 볼 수 있다. 그런데 연속 순환 영역에서는 가열량이 증가함에 따라 기공률은 계속 증가하는 반면 순환 유량은 증가하다가 감소하는 현상이 발생하여 이 연속 순환 영역에서 최대 순환 유량이 존재하게 된다. 이같은 순환 유량의 감소 현상은 2상류 마찰 손실의 상대적 증가에 기인하는 것으로 최대 순환 유량 이전 영역에서는 가열량이 증가하면 기공률의 증가에 따라 순환 구동력이 증가하게 되고 동시에 순환 유량도 증가하게 되나 최대 순환 유량 이후의 가열량의 증가는 2상류 속도의 증가에 따른 2상류

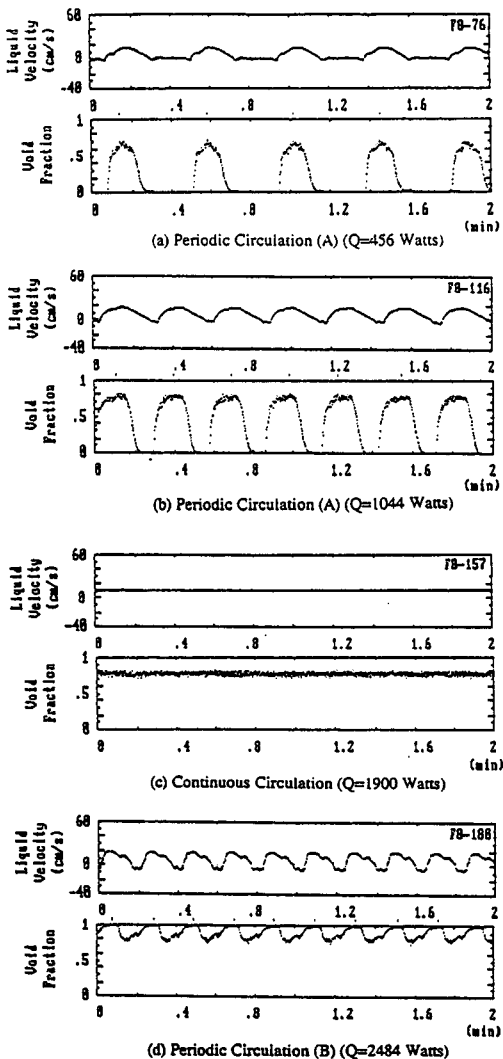


Fig. 3 Time variations of liquid velocity and void fraction($H=15$ cm, $K_i=40^\circ$, $K_o=20^\circ$, $\Delta T_{hi,sub}=20^\circ\text{C}$)

마찰 손실의 증가가 순환 구동력의 증가보다 상대적으로 더 커지게 되어 순환 유량은 감소하게 된다.

가열량을 더욱 더 증가시키면 비등 현상이 계속적으로 발생하는 상태에서 다시 주기적인 순환이 이루어지는데 이 때 상승부의 유동 양식은 처언류, 위스피-환상류, 환상류, 위스피-환상류, 처언류등의 변화과정을 반복한다. 이같은 주기적 순환 (B)에서의 가열기 입구 유속 및 상승부 기공률의 변화모습은 Fig. 3(d)와 같이 유속은 심한 역류가 발생하며 기공률은 대체적으로 0.6~1.0 사이의 값에서 주기적으로 진동한다. 이 가열 영역에서 가열량을 계속 증가시키면 처언류가 없이 위스피-환상류, 환상류, 위스피-환상류만의 유동 양식으로 변화되며 결국에는 환상류, 증기류(vapor flow), 환상류의 반복적인 유동 양식으로 바뀌어 dry-out에 도달하게 된다. 이같이 비등 현상이 지속되면서 발생하는 주기적 순환 (B)의 유동 형태는 밀도파 진동(density wave oscillation)으로 알려져 있다.⁽⁷⁾ 한편, 이 가열 영역에서 가열량의 증가에 의하여 기공률은 계속 증가하나 순환 유량(가열기 입구 액체 유속)은 감소하며 특히 위스피-환상류에서 환상류로 변화하는 순간에는 상승부 내면의 액막에 작은 교란파(ripple)가 나타나고 환상류가 거의 끝나갈 때 증기류의 유속이 감소하여 액막의 유동 방향이 동향류(co-current flow)에서 대향류(counter-current flow)로 바뀌는 역류(flow reversal) 현상이 관찰되기도 한다.

한 유동 양식에서 가열량의 증가에 의하여 다음 단계의 유동 양식으로의 변화 과정은 Fig. 4에서 잘 보여지고 있으며 본 실험 장치의 경우 약 100 Watts 정도 가열량을 증가시킬 때 약 4~10분 후에 다른 유동 양식으로의 천이 과정이 발생하고 앞서 언급한 바와 같이 정상 상태의 도달에는 약 20~40분의 시간이 소요된다.

한편 가열기 입·출구 밸브의 마찰 저항이 가열기 입구 유속(즉, 순환 유량)에 미치는 영향은 Figs. 5, 6에서 알 수 있다. 이 때의 유속은 각 가열조건에서 시간에 대한 평균치이다. Fig. 5는 입구 밸브의 영향으로서 출구 밸브는 완전 개방하고 입구 밸브를 0°, 30°, 40° 닫았을 때의 결과이다. 우선 K_i 가 0°일 때는 주기적 순환 (A)의 유동 양식만이 나타나다가 K_i 가 30°로 증가하게 되면 연속 순환 및 주기적 순환 (B)의 유동 양식이 나타나게

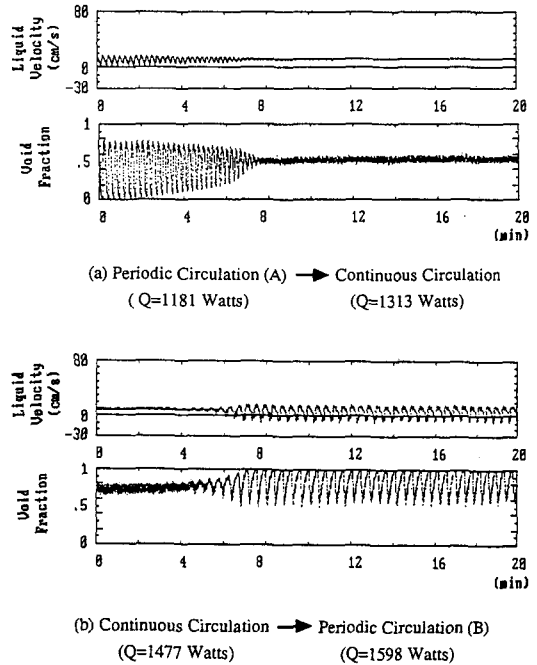


Fig. 4 Flow pattern transition with variation of heat flux ($H=15$ cm, $K_i=40^\circ$, $K_o=30^\circ$, $\Delta T_{hi,sub}=20^\circ\text{C}$)

되며, K_i 가 40°로 증가하게 되면 $K_i=30^\circ$ 에 비하여 연속순환 구간이 증가한다. 이는 K_i 의 증가에 따라서 정상 순환인 연속 순환의 관점에서 유동이 안정화됨을 보여주며, 또한 K_i 의 증가는 회로마찰저항의 증가를 의미하므로 연속 순환의 관점에서 살펴보면 순환 유속이 줄어들음을 알 수 있다. 그러나 K_i 의 변화가 유동 양식의 변화를 수반하는 경우에는 흐름의 현상이 바뀌는 것이므로 이 때에는 K_i 증가에 따라 순환 유량이 오히려 증가하는 현상도 보인다. (Fig. 5의 $K_i=0^\circ$ 일 때와 $K_i=30^\circ$ 일때의 경우를 살펴보면 알 수 있다.)

또한, Fig. 6는 출구 밸브의 영향으로서 입구 밸브를 40° 닫고 출구 밸브를 0°, 20°, 30° 닫았을 때로서 출구 밸브가 잠김에 따라 연속 순환의 구간이 줄어들어 유동이 불안정해짐을 알 수 있다. 또한 K_o 의 증가는 최대 순환 유량 이후의 순환 속도 기울기를 더욱 가파르게 하여 동일한 가열량에서 2개 이상의 순환 유량이 나타나는 소위 정적 불안정 중 유동 이탈의 가능성이 커지게 된다.⁽⁶⁾

Fig. 7은 회로내 충전 수위의 영향으로서 수위가 낮을수록 (Fig. 2의 H 가 커질수록) 응축부와 가열

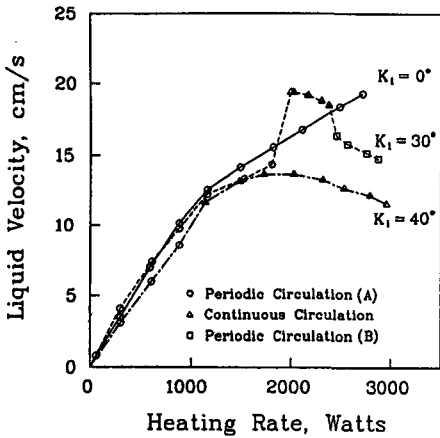


Fig. 5 Effect of inlet-restriction ($H=15\text{ cm}$, $K_o=0^\circ$, $\Delta T_{hi,sub}=20^\circ\text{C}$)

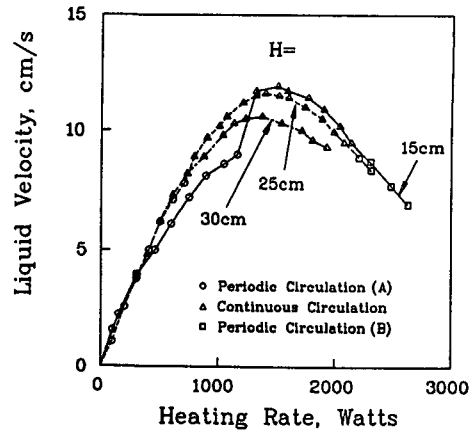


Fig. 7 Effect of liquid charging level ($K_i=40^\circ$, $K_o=20^\circ$, $\Delta T_{hi,sub}=20^\circ\text{C}$)

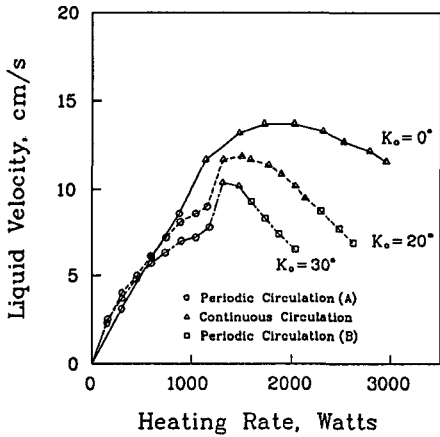


Fig. 6 Effect of exit-restriction ($H=15\text{ cm}$, $K_i=40^\circ$, $\Delta T_{hi,sub}=20^\circ\text{C}$)

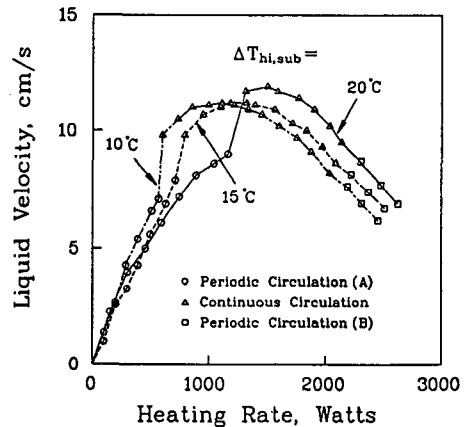


Fig. 8 Effect of inlet subcooling ($H=15\text{ cm}$, $K_i=40^\circ$, $K_o=20^\circ$)

부의 중심간 수직거리 즉, 순환 구동력이 작아져 연속 순환의 관점에서 순환 유량은 감소한다. 한편, 충전 수위에 따라 같은 가열량에서도 순환하기 위한 상승부 기공률은 바뀌게 되는데 수위가 낮아질수록 순환시 상승부 기공률은 상대적으로 커지게 되어 연속 순환은 Fig. 7과 같이 적은 가열량에서 시작한다.

또한 Fig. 8은 가열기 입구 과냉 정도의 영향으로서 과냉 정도가 커질수록 전체적인 유동 특성은 더 큰 가열량 영역으로 이동되어 있다. 가열기 입구 과냉 정도가 커질수록 같은 가열량에서 가열기 내 비등 구간(boiling length)이 짧아지고 상승부

기공률은 감소하며 상대적으로 큰 가열량에서 연속 순환이 시작되나 주기적 순환 (B)는 거의 같은 가열량에서 발생하므로 결국 과냉 정도가 작을수록 유동이 안정해짐을 Fig. 8에서 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 2상 자연순환 회로에서의 가열량의 증가에 따른 상승부의 2상 유동 양식을 관찰하였고 유동 특성에 대한 가열기 입·출구 밸브 마찰 저항, 충전 수위, 가열기 입구 과냉 정도의 영향을 연구하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 가열량의 증가에 따라 유동 형태는 상승부 유동 양식의 변화와 순환 형태의 관점에서 크게 주기적 순환 (A), 연속 순환, 주기적 순환 (B)로 구분될 수 있다.

(2) 주기적 순환 (A)는 상승부 유동 양식이 (1) 잠복기, 기포류, 슬러그류, 처언류, 슬러그류, 기포류, 잠복기와 (2) 잠복기, 처언류, 슬러그류, 기포류, 잠복기로 반복되는 두가지의 현상으로 구분된다. 그리고 응축기로의 순환은 주기적으로 이루어지며 가열량의 증가에 따라 순환 유량은 증가한다.

(3) 연속 순환은 2상 자연순환 회로의 안정 운전 조건으로서 처언류 또는 위스피-환상류의 형태로 순환이 연속적으로 이루어진다. 이 순환 영역에서 최대 순환 유량이 존재하고 이를 기점으로 가열량의 증가에 따라 순환 유량은 감소한다.

(4) 주기적 순환 (B)는 상승부 기공률이 약 0.6~1.0 사이의 값에서 주기적으로 진동하는 모습으로 특징지어지며 유동 양식은 처언류, 위스피-환상류, 환상류, 위스피-환상류, 처언류로 바뀐다. 또한, 순환이 주기적으로 이루어지나 가열량의 증가에 따라 순환 유량은 감소한다.

(5) 가열기 입구 마찰 저항의 증가는 유동을 안정화시키며 가열기 출구 마찰 저항의 증가는 유동을 불안정화시킨다.

(6) 충전 수위가 낮을수록, 가열기 입구 과냉 정도가 작을수록 연속 순환은 작은 가열량에서 시작되며 유동은 안정해진다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 첨단유체공학연구센터 (AFERC) 1991년도 연구과제 및 한국과학기술원의 1992년도 기본 연구 과제의 일환으로서 수행되었으며 이에 대해 관계자들에게 사의를 표한다.

참고문헌

- (1) Boure, J.A., Bergles, A.E. and Tong, L.S., 1973, "Review of two-phase flow instabilities," Nucl. Eng. Des., Vol. 25, pp. 165~192.
- (2) Hsu, Y.Y. and Graham, R.W., 1976, "Transport processes in boiling and two-phase systems," Chap. 9, McGraw-Hill.
- (3) Ishii, M. and Zuber, N., 1970, "Thermally induced flow instabilities in two-phase mixtures," Proc. of the 4th Int. Heat Transfer Conf., Paris, Paper No. B5.11.
- (4) Saha, P. and Zuber, N., 1978, "An analytical study of the thermally induced two-phase flow instabilities, including the effect of thermal non-equilibrium," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 21, pp. 415~426.
- (5) Lahey, R.T. and Podowski, M.Z., 1989, "On the analysis of various instabilities in two-phase flows," Multiphase Science and Technology, Vol. 4, eds. G.F. Hewitt, J.M. Delhay, and N. Zuber, pp. 183~370, Hemisphere.
- (6) 이동원, 이상용, 1990, "2상 자연순환 회로내 유동의 정적 불안정," 대기기계학회논문집, 제 14권, 제4호, pp. 920~926.
- (7) Chexal, V.K. and Bergles, A.E., 1973, "Two-phase instabilities in a low pressure natural circulation loop," AIChE Symp., Ser. 69, No. 131, pp. 37~45.
- (8) Fukuda, K. and Kobori, T., 1979, "Classification of two-phase flow instability by density wave oscillation model," J. Nucl. Sci. and Tech., Vol. 16, No. 2, pp. 95~108.
- (9) Lee, S.Y. and Ishii, M., 1988, "Simulation experiments on two-phase natural circulation in a freon-113 flow visualization loop," ANS Proc., National Heat Transfer Conf., pp. 374~386.
- (10) Imura, H., Saito, Y. and Katsumoto, Y., 1989, "Flow and heat transfer characteristics in a two-phase loop thermosyphon," Advances in Phase Change Heat Transfer, Pergamon, New York, pp. 579~584.

(1) Boure, J.A., Bergles, A.E. and Tong, L.S.,