

하나로 원자로에 설치될 대향 이상 열사이펀 루프에 관한 실험

황권상* · 조만순** · 성형진***
(1999년 7월 14일 접수)

A Closed Counter-Current Two-Phase Thermosyphon Loop of a Cold Neutron Source in HANARO Research Reactor

Kwon Sang Hwang, Man Soon Cho and Hyung Jin Sung

Key Words : Closed Thermosyphon(닫힌 열사이펀), Counter-Current Two-Phase Flow(대향 이상 유동), Cold Neutron Source(CNS; 냉중성자원), Flooding(플러딩), Dryout(드라이아웃), Stable Flow Regime(안정 유동 영역), Oscillatory Flow Regime(맥동 유동 영역), Restabilized Flow Regime(재안정 유동 영역)

Abstract

An experimental study was carried out to delineate the flow characteristics in a closed counter-current two-phase thermosyphon with concentric tubes. This is to be installed in the HANARO research reactor as a part of a Cold Neutron Source(CNS). In the present investigation, experiments at a room temperature with Freon-113 as a moderator were performed. Results show that, based on the magnitude of pressure fluctuation, the flow regimes could be divided into 4 distinct ones in the (V_f , Q_i) plane, where V_f represents the volume of the charged liquid and Q_i the heat load: a stable flow regime, an oscillatory flow regime, a restabilized flow regime and a dryout flow regime. For $V_f > 2.5$ l, the flow is stable at low Q_i . However, as Q_i increases, the flow becomes oscillatory and finally restabilizes. As V_f increases, the oscillation amplitude decreases, reaching to the restabilized flow region at low Q_i , and the liquid level in the moderator cell remains high. In the oscillatory flow regimes, for a fixed V_f , the oscillating period of time varies with Q_i , having a minimum value at a certain value of Q_i . The heat load, where the oscillating period of time is minimum, decreases as V_f increases.

기호설명

- A_{in} : 내관의 유로 단면적 (cm^2)
- A_{an} : annulus의 유로 단면적 (cm^2)
- P_1 : 감속재 용기에서의 게이지 압력 (Pa)
- P_2 : 꼭관부에서의 게이지 압력 (Pa)
- P_3 : 응축기 뚜껑부분에서의 게이지 압력 (Pa)
- ΔP_2 : P_2 의 압력변동 폭 (Pa)
- Q_i : 감속재 용기에 가한 열부하 (W)

- T_o : 응축기의 냉각수 출구 온도 ($^{\circ}C$)
- V_f : Freon 113의 충전유체체적 (l)

1. 서론

냉중성자(cold neutron) 산란 실험에 사용되는 에너지가 낮고 파장이 긴 냉중성자를 만들기 위해서는 냉중성자원(Cold Neutron Source; CNS)⁽¹⁻⁵⁾ 장치를 원자로에 설치해야 한다. 이 장치는 원자로심 중수 탱크내의 온도(약 314 K)에 대응하는 맥스웰 분포를 가진 열중성자를 감속재(moderator)인 액체 수소 층을 통과시켜, 약 20 K의 온도에 대응하는 맥스웰 분포를 가진 에너지가 낮은 냉중성자로 바뀌게 하는 것이다. 여기서, 중수 탱크 내에 설치된

* 한국과학기술원 기계공학과

** 회원, 한국원자력연구소

*** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : hjsung@kaist.ac.kr

TEL : (042) 869-3027 FAX : (042) 869-5027

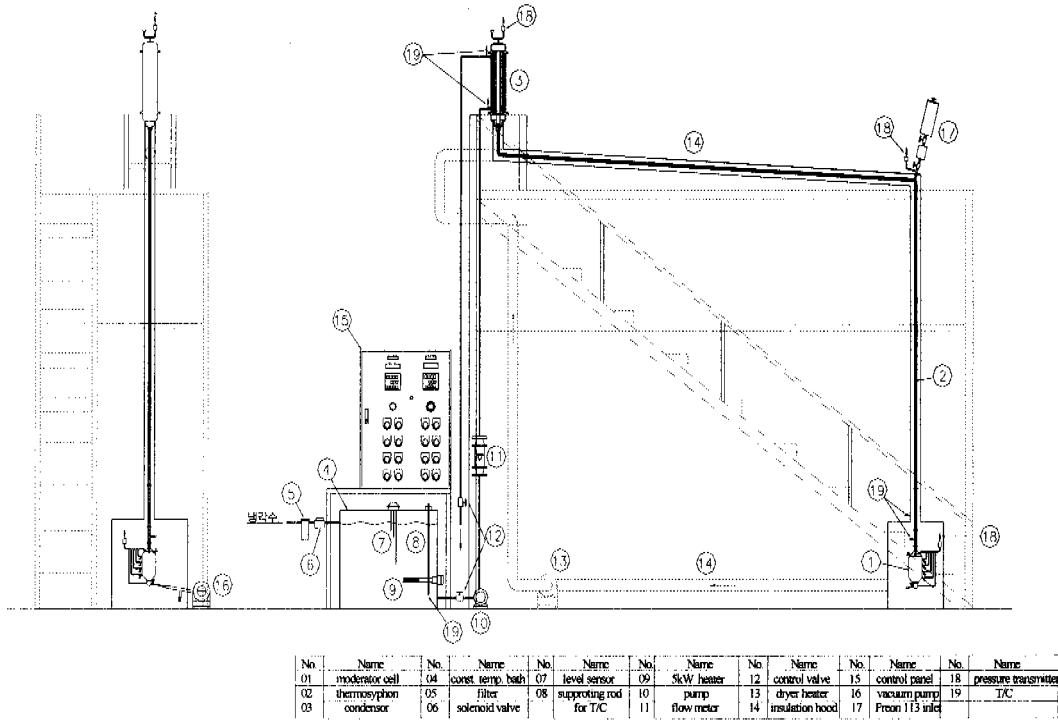


Fig. 1 A schematic diagram of the experimental facilities

감속재 용기(moderator cell)나 그 속에 포함되어 있는 액체 수소는 항상 핵 발열과 진공 단열조로부터의 투입 열에 의해서 가열되기 때문에(하나로의 경우는 약 900 W 정도로 추산⁽¹⁾됨), 액체 수소는 항상 비등하여 증발하게 된다. 이때 핵 발열을 제거하면서 항상 일정량의 수소를 감속재 용기 내에 유지하여야만 높은 유속(flux)을 가진 냉중성자를 안정하게 발생시킬 수 있게 된다.

감속재 용기에서 발생한 증발량에 상응하는 액체 수소를 지속적으로 안정되게 공급하기 위해서 사용되는 방법 중에 하나가 이중관식 열사이펀이다.⁽²⁻³⁾ 열사이펀은 액체에 열을 가하여 증발시켜 주는 증발기(감속재 용기)와 증발된 기체를 응축하는 응축기, 그리고 이 둘 사이에서 기체와 액체의 유동을 분리해 기체의 상승과 액체의 하강을 순조롭게 해주는 이중관식 단열관으로 구성되어 있다(Fig. 1). 따라서 열사이펀 내에서는 서로 반대 방향으로 흐르는 이상 유동(counter-current two-phase flow)이 존재하게 된다.⁽⁹⁾

하나로(HANARO) 원자로에 설치되는 냉중성자원의 열사이펀 내에서는 이렇게 복잡한 이상 유동이 공존하여 순환하고 있고, 이것의 형상이 직관

이 아닌 크랭크형으로 2 개의 굴곡부를 가지도록 되어있기 때문에, 열사이펀 내에서의 유동 상태를 파악하고, 열전달 한계를 알기 위해서는 이론적인 해석이나 수치 해석이 아닌 실제 실험에 의존할 수밖에 없다.

본 연구에서는 연구용 원자로인 하나로에 설치될 열사이펀 회로와 거의 같은 치수와 형상을 가진 모의 실험 장치를 이용한다. 열사이펀은 내부 유동의 관찰이 가능한 유리제로 제작하고, 콘덴서의 냉각수로는 물을 사용하고, 프레온 113을 열사이펀 판의 순환 유체로 하여 실온에서의 모의 실험을 수행한다. 모의 실험을 통해 열사이펀 회로에 충전하는 충전유체체적(V_f)과 감속재 용기에 가한 열부하(Q_f)를 주요 변수로 해서 열사이펀 내에서 유체의 열·유체역학적 거동 특성을 연구하고자 한다. 결과적으로 충전유체체적과 열부하에 따른 안정 유동 영역, 맥동 유동 영역, 재안정 유동 영역, 드라이 아웃 영역으로 구분되는 유동 특성 다이어그램을 얻는 것이 목적이다. 여기서, 각 유동 영역의 특성은 압력과 온도 데이터를 기준으로 하여 설명하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

전체적인 실험 장치 및 장비의 개략도는 Fig. 1 과 같다. Fig. 1 에서 볼 수 있듯이, 전체 계는 액체 Freon 113 로 충전되는 감속재 용기(1), 감속재 용기에서 증발한 Freon 113 기체의 상승과 응축기에서 액화된 액체 Freon 113 을 감속 용기까지 전송해 주는 이중관식 열사이펀(2), Freon 113 을 응축시키는 응축기(3), 냉각수 공급 및 순환 장치(물 공급 탱크 & 항온조(4), 유량계(11), 순환 펌프(10)), 계 내의 온도 및 압력을 측정하기 위한 측정 장비(열전대(19), 압력기(19), 12 타점식 & 3 pen-type 기록계 등), Freon 113 을 주입하기 전에 계의 진공을 유지하기 위한 진공펌프(16), 그리고 전체적인 계를 지탱하기 위한 지지대로 이루어져 있다. 여기서 제반 기기의 동작은 제어판(15)을 통해 이루어지도록 하였다.

감속재 용기에서 증발한 Freon 113 기체(1 기압에서 비등점 48 °C)가 상승 중에 열사이펀 관벽이 실온이면 주위에 열을 빼앗겨 액화해 버리기 때문에, 열사이펀 관 주위를 항상 48 °C 로 유지할 필요가 있다. 이를 위해 아크릴제의 보온후드를 이중 전열관 주위에 덮었다. 보온 후드(13) 내의 항온성을 유지하기 위해서는 3 kW 용 열선이 포함된 열풍기를 사용하였다. 이 열풍기의 출구는 보온 후드가 시작되는 응축기의 바로 밑에 연결하고, 입구는 감속재 용기를 싸고 있는 아크릴 통에 연결하여 닫힌 순환계가 되도록 하였다. 보온후드 내에 온도를 측정하기 위한 열전대는 감속재 용기를 둘러싸고 있는 통 바로 위에 부착하여 on/off 식 제어기를 사용하여 보온 후드 내의 온도를 47 ~ 49 °C 사이가 되도록 하였다.

열사이펀 관 및 감속재 용기는 내부의 유동 양태를 관측하기 쉽도록 유리제를 사용하였다. 감속재 용기는 직경이 80 mm 이고, 부피가 1.0 l 가 되는 원통형 용기를 사용하였다. 이것을 감고 있는 밴드 히터의 열용량은 최대 1.8 kW 이다. 열사이펀을 채울 수 있는 최대 충전유체체적(V_f)은 4.9 l 이다. 이중관식 열사이펀의 경우는 $A_{in}/A_{an} = 0.2 \sim 0.3$ 일 때, 단관에 비해 열전송량이 최대로 증가한다는 결과를 이용하여 설계하였다.⁽²⁻³⁾ 여기에 NIST⁽⁴⁾ ($A_{in}/A_{an} = 0.246$)에서 설계한 값을 참조하여 하나의 상황에 맞게 내관($d_i = 12.6$ mm, 두께 1.2 mm)과 외관($d_o = 28.6$ mm, 두께 1.7 mm)의 직경을 정하였다($A_{in}/A_{an} = 0.245$). 본 연구에서는 열부하(Q_f)와 충전유체체적(V_f)를 바꿔가면서 계 내의 압력

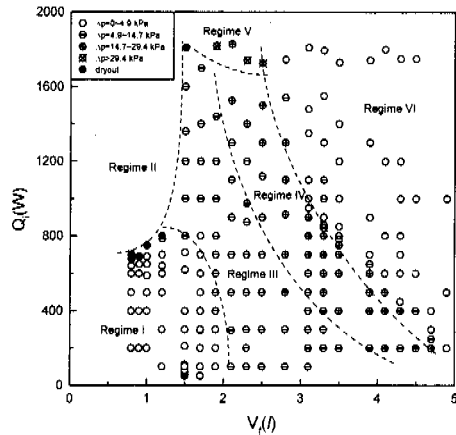


Fig. 2 A regime diagram of the flow characteristics in the thermosyphon with heat load(Q_f) and the amount of charged liquid(V_f)

과 온도를 측정하여 열사이펀 내의 유동특성을 알아보았다.

2.2 실험 방법

- 1) 내관의 출구 위치를 조절한다(스프링으로 고정).
- 2) 열풍기를 가동해 보온 후드 내의 온도를 약 48 °C 로 맞춘다.
- 3) 열사이펀 내를 진공펌프로 진공상태로 만든다.
- 4) 프레온 113 을 메스실린더로 제어 콘덴서의 액충전 입구로부터 열사이펀에 충전한다. 이때 공기가 들어가지 않도록 주의한다.
- 5) 콘덴서의 유량을 조정한다.
- 6) 감속재 용기를 감은 밴드 히터에 전기를 흘려 용기를 가열한다.
- 7) 콘덴서 냉각수의 유량 및 온도를 조정해서 열사이펀 내의 동작 압력이 대략적으로 0 Pa 이 되도록 한다.
- 8) 열사이펀 유체의 온도, 압력 등이 일정한 값에 도달한 후에 용기 내의 액체 레벨, 가액 혼합물 레벨, 온도, 압력 등을 잰다.
- 9) 열부하 및 충전유체체적을 변화 시켜가면서 순서 "8"을 반복한다. 충전유체체적을 변경할 때는 열사이펀 내의 압력이 0 Pa 이하가 되도록 열부하 혹은 냉각수를 조정하면서 액을 보충한다.

그리고, 액을 충전하는 도중에 공기가 유입되어 열사이펀 내의 압력이 비정상적으로 높아졌다고 판단될 때는 감속재 용기의 열부하를 높게 하여 계 내의 압력을 대기압보다 높게 한 후, 응축기의 뚜껑 부분에 부착된 밸브를 열어 계 내의 공기를 빼낸다. 그리고 나서 위의 과정들을 반복한다.

10) 충전유체체적 0.8 ~ 4.9 l에 대해서 열부하를 1800 W 까지 변화시켜 가면서 실험한다.

3. 실험 결과 및 분석

Fig. 2는 감속재 용기에 가한 열부하(Q_i)와 열사이펀 내에 충전한 프레온 113의 충전유체체적(V_f)에 따른 열사이펀 내의 프레온 113의 유동 다이어그램을 보여주고 있다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 유동 영역이 6개의 영역으로 나누어져 있는데, 이는 열사이펀 관 중에 경사관이 시작되는 곡관부에 부착된 압력계(P_2)로 읽혀진 압력 변동 값을 기준으로 하여 임의로 정하였다. 여기서, 영역 I(regime I)는 ΔP_2 가 4.9 kPa 이하인 경우로 안정 유동 영역(stable flow regime)이라고 부른다. 영역 II(regime II)는 ΔP_2 가 4.9 kPa 이하인 경우 중에 특히 flooding과 dryout 현상이 일어나는 드라이 아웃 영역(dryout flow regime)이다. 영역 III(regime III)은 $4.9 \text{ kPa} < \Delta P_2 < 14.7 \text{ kPa}$ 인 경우로 약한 맥동 유동 영역(weak oscillating flow regime), 영역 IV(regime IV)는 $14.7 \text{ kPa} < \Delta P_2 < 29.4 \text{ kPa}$ 인 경우로 중간 맥동 유동 영역(moderate oscillating flow regime), 영역 V(regime V)는 $29.4 \text{ kPa} < \Delta P_2$ 인 강한 맥동 유동 영역(strong oscillating flow regime)이다. 마지막으로, 영역 VI(regime VI)은 존재하던 맥동이 사라져 ΔP_2 가 영역 I과 같이 4.9 kPa 이하가 되는 재안정 유동 영역(restablized flow regime)이라고 부른다.

영역 I은 충전유체체적($V_f < 2.0 \text{ l}$)과 열부하($Q_i < 800 \text{ W}$)가 비교적 작은 경우에 해당함을 알 수 있다. 영역 II는 이러한 드라이 아웃이 일어나는 영역이나, 드라이 아웃은 대체적으로 충전유체체적이 작은 경우에 일어나는 현상인데, 본 실험에서도 충전유체체적이 1.5 l 이하일 때 일어남을 알 수 있다. 여기서, 드라이 아웃이 일어나는 경계를 보면(Fig. 2), 충전유체체적이 증가할수록, 드라이 아웃이 일어나기 시작하는 입력 열부하도 점점 더 커짐을 알 수 있다.

Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 맥동이 존재하는 영역은 대략적으로 볼 때, $1.5 \text{ l} < V_f < 4.7 \text{ l}$ 이다. 여기서, 충전유체체적이 대략 2.9 l 이하의 경우는 각각의 충전유체체적에 대해서 감속재 용기에 가하는 열부하를 증가 시킴에 따라 맥동의 진폭이 증가하는

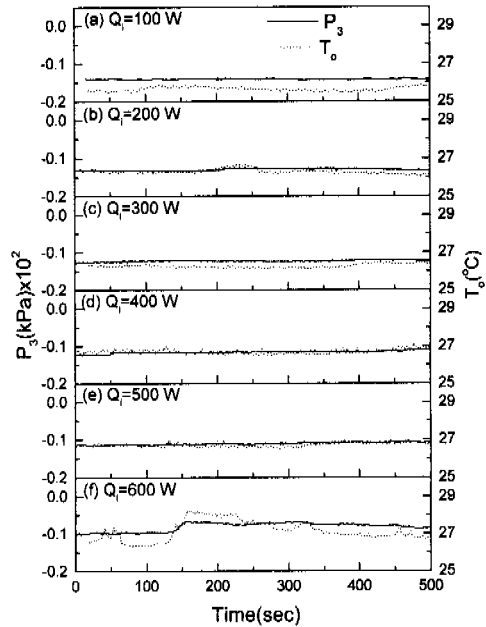


Fig. 3 Variations of the pressure(P_3) and the exit temperature(T_0) of the condenser. $V_f=1.0 \text{ l}$. Q_i varied

것을 알 수 있다(Fig. 5 참조). 반면에 충전유체체적이 3.1 l 이상일 때 열부하가 작은 경우는 맥동의 진폭이 작다가 열부하가 증가함에 따라 맥동의 진폭이 더 증가하지만, 어느 값 이상을 넘어서면 다시 유동이 안정화되는 것을 발견할 수 있다(Fig. 6 참조). 이 영역은 앞에서 보았듯이, 재안정 유동 영역(restablized flow region)이라고 부른다. 이 영역에서는 영역 I에서와 마찬가지로 유동이 전체적으로 안정되어 있어 압력의 변동이나 감속재 용기의 모세관의 수두에 거의 변화가 없다. 특히, 충전유체체적이 많을 경우, 감속재 용기는 거의 Freon 113으로 가득 채워져 있게 된다. 맥동 유동 영역과 이 영역을 나누는 경계선을 보면 알 수 있듯이 충전유체체적이 많을수록 작은 열부하에서부터 이 영역이 시작되는 것을 알 수 있다. 따라서, 실제의 운전을 이 영역에서 할 수 있도록 하면, 가장 많은 냉중성자 속(cold neutron flux)을 가장 안정되게 지속적으로 얻을 수 있게 될 것이다.

Fig. 3은 영역 I에 해당하는 $V_f = 1.0 \text{ l}$ 인 경우에 대해서, Q_i 의 증가에 따른 응축기의 출구 온도와 응축기 뚜껑 부분에서의 압력 변동을 잘 보여주고 있다. 열사이펀 관내의 유동에는 주기적인 맥동 성분이 포함되어 있지 않고, 고정된 Q_i 에 대해서 압력 변동이 거의 없음을 발견할 수 있다.

또한, Q_i 가 증가할수록, 계 내의 압력은 상대적으로 점점 높아져 감을 알 수 있다(Fig. 3(a) ~ (e) 참조). 이 때($Q_i < 500$ W) 가액혼합물은 감속재 용기 내에만 머물러 있고, 발생된 기체는 열사이편의 외관을 따라 상승하여 응축기에서 응축되어 내관으로 하강하여 다시 감속재 용기에 채워지게 되는 전형적인 열사이편 순환 패턴을 확인할 수 있었다. 응축기의 출구 온도도 거의 변화하지 않는다. 즉, 응축기의 전달 열량이 거의 변화되지 않고 일정함을 알 수 있다. 그리고 Q_i 가 500W(Fig. 3(e))에서부터 내관과 외관에 동시에 가액혼합물이 형성되기 시작하였다. 여기서, Q_i 가 증가할수록, 내관과 외관의 가액혼합물의 레벨은 점점 더 높아지게 되고, $Q_i = 600$ W(Fig. 3(f)) 근처에서 외관의 가액혼합물의 레벨은 낮아지고 내관의 레벨은 더 상승하였다. 이것은 감속재 용기의 압력이 높아져 외관으로 상승하던 기포가 갑작스럽게 내관을 통해서 상승하기 때문에 생기는 현상이다. 이때 내관으로 흘러 내리던 액체가 위쪽으로 팔려 올라가게 되는 플러딩(flooding) 현상⁽²⁻⁸⁾이 일어나게 된다. 결국 감속재 용기에 채워져 있는 액량이 갑작스럽게 상당히 줄어들게 되는 드라이아웃(dryout)으로 이어지게 되었다. 이러한 현상은 대체적으로 Kumai 등⁽³⁾의 결과와 거의 같은 경향을 보여주고 있다. 드라이아웃이 일어나는 발생 기구는 다음과 같이 설명할 수 있다.

플러딩에 의해 상승한 액체는 응축기의 저장조에 모이게 되고 외관 내관으로 상승한 기체가 응축되어 이곳에 동일하게 모이게 된다. 아래의 감속재 용기의 압력을 이길 만큼 충분히 많이 쌓이기 전까지는 이 저장조에 쌓이게 되는 액체의 양이 계속 증가하게 된다. 따라서 감속재 용기는 응축된 액체가 채워지지 않기 때문에 계속되는 증발에 의해 액체의 양이 갑작스럽게 상당히 줄어들게 된다. 다시 말해, 드라이 아웃이 일어나게 되며 이때 계 내의 압력은 급격히 상승하게 된다(Fig. 3(f)). 이에 맞춰 응축기의 출구 온도도, 많은 양의 기체가 응축되기 때문에, 올라가게 되어 응축기의 전달 열량이 순간적으로 상승하게 되었다. 응축기의 저장조에 쌓인 액체의 양이 증가하여 감속재 용기의 압력을 이길 수 있게 되었을 때는 저장된 액체가 급강하여 감속재 용기를 순간적으로 채우게 된다. 이렇게 채워진 액은 감속재 용기에 가해지는 열부하에 의해 다시 증발되고, 위에서 서술한 과정을 다시 밟게 된다. 이러한 과정은 현상적인 측면에서 볼 때는 맥동 유동이라고 할 수 있지만, 압력의 진폭이 작기 때문에 맥동 유동 영역에서 제외되었다.

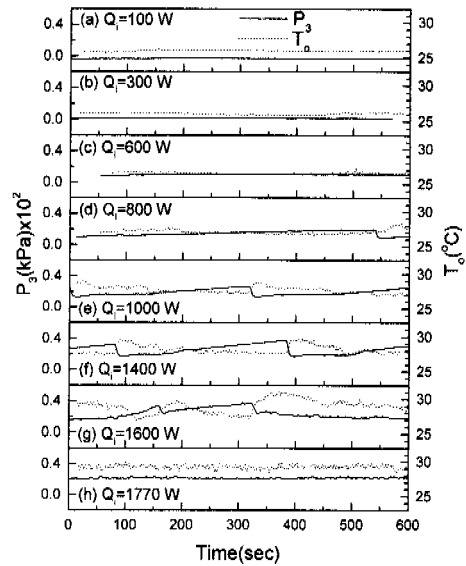


Fig. 4 Variations of the pressure(P_3) and the exit temperature(T_0) of the condenser. $V_f=1.5$ l. Q_i varied

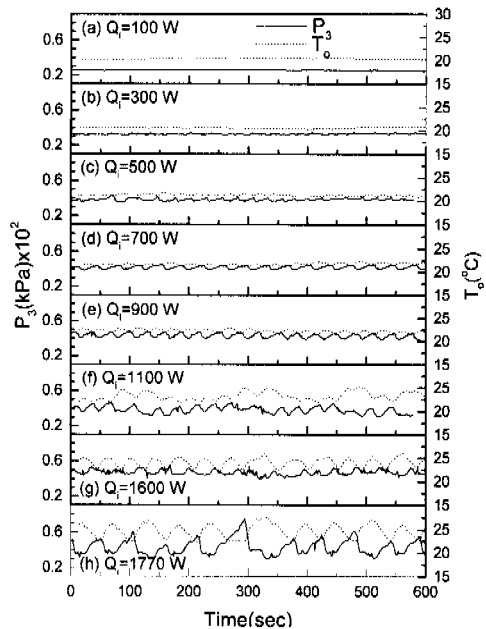


Fig. 5 Variations of the pressure(P_3) and the exit temperature(T_0) of the condenser. $V_f=2.1$ l. Q_i varied

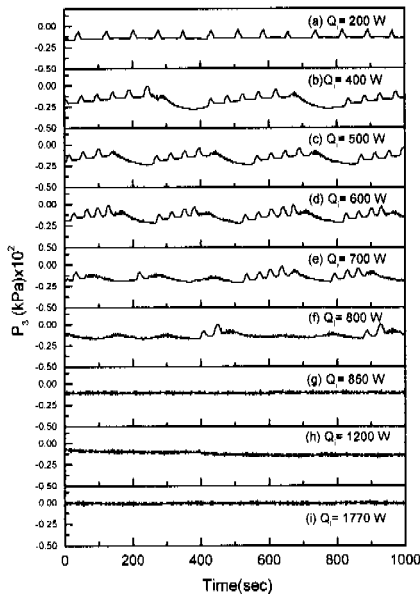


Fig. 6 Variations of the pressure(P_3) and the exit temperature(T_0) of the condenser. $V_f=3.1$ l. Q_i varied

Fig. 4는 충전유체체적이 1.5 l인 경우에 열부하에 따른 P_3 와 T_0 의 시간에 따른 변동을 보여주고 있다. Q_i 가 800 W 미만일 때(Fig. 4(a)-(c))는 안정 유동 영역 I 에 해당하고, 일어나는 현상은 앞에서 기술한 영역 I 에서와 거의 같았다. 한 가지 다른 점은 $Q_i = 300$ W(Fig. 4 (b))까지는 내관에는 거의 액체로 채워져 있는데, 간헐적으로 큰 기포 혹은 기포 기동이 내관을 따라서 상승한다는 것이다. 이 기포의 상승에 의해서는 열사이펀 내의 압력 변동은 그다지 크지 않았다 (10^{-1} kPa 정도의 크기). $Q_i = 800$ W(Fig. 4 (d))에서는 계 내 유동이 거의 일정한 주기로 맥동(oscillation)하는 것을 알 수 있다. 이렇게 맥동의 발생 기구는 앞에서 드라이아웃이 일어나는 과정과 동일하다. 한 가지 다른 것은 맥동이 일어나는 경우는 압력의 진폭이 크다는 것이다.

Fig. 5는 충전유체체적이 2.1 l인 경우의 결과를 보여 주고 있다. $Q_i = 100$ W 에서부터 맥동 성분이 존재하는 것을 알 수 있다. 그러나, 이 경우는 앞에서 설명한 맥동의 메커니즘에 의한 맥동이 아니라 간헐적인 큰 기포의 상승에 의한 것이기 때문에, Fig. 5(a)에서 볼 수 있듯이, 맥동의 주기가 일정하지 않음을 알 수 있다. Q_i 가 증가함에 따라, $V_f=1.5$ l 의 경우와 마찬가지로, 맥동 주기가 감소

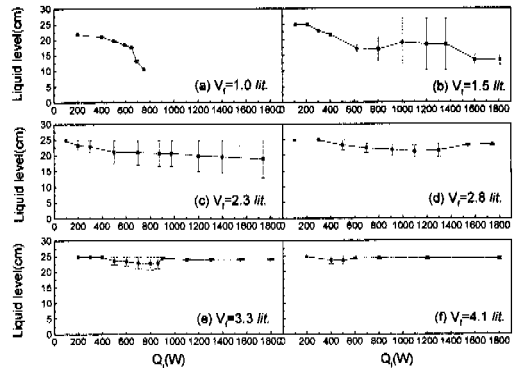


Fig. 7 Variations of the liquid level in the moderator cell for the volume of the charged liquid (V_f) and heat load(Q_i)

하다가 최소값(Fig. 5(e), $Q_i = 900$ W)을 지나 다시 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나, $V_f = 1.5$ l 인 경우와는 달리, 열사이펀 내에서의 압력의 변동 폭이 Q_i 가 증가함에 따라 점점 더 커지는 경향을 보여주고 있다. 응축기의 출구 온도도 이것에 동조(synchronization) 되어 Q_i 가 증가함에 따라, 상당히 높은 진폭을 가지는 맥동 거동을 보여주고 있다.

Fig. 6은 충전된 액량이 3.1 l일 때, 감속재 용기에 가한 열부하의 변동에 따른 응축기에서의 압력 변동을 보여주고 있다. Q_i 가 증가함에 따라 어떤 천이 과정을 거쳐 제안정화 상태에 도달하는 것을 잘 나타내고 있다. 먼저 $Q_i = 200$ W 인 경우에 해당하는 Fig. 6(a)에 관심을 집중해 보자. 이것은 본 열사이펀 계에서 일어나는 있는 맥동 유동 상태에서의 전형적인 압력 변동 상태를 잘 나타내 주고 있다. 이 경우에 맥동이 일어나는 기구(mechanism)를 열사이펀 내의 현상적인 측면에서 설명하면 다음과 같다.

먼저, 감속재 용기에서 생성된 기포의 양이 급작스럽게 증가함에 따라 내관으로도 기포가 상승하게 된다. 이것은 비교적 짧은 시간 동안 진행되는(Fig. 6(a)에서 압력이 급상승하는 시간대; t_1). 이어서 내관으로 상승했던 기포가 열사이펀의 곡관부 밑에서 멈추고 하강하여 감속재 용기를 채우게 된다. 이때 열사이펀 내에서는 안정 상태(stable state)를 유지하게 된다(Fig. 6(a)에서 압력이 낮으면서 거의 변하지 않고 있는 넓은 시간대; t_2). 여기서, 응축된 차가운 프레온 액체가 상당히 많은 양으로 급하강하여 감속재 용기를 채우기 때문에 열

사이편 내의 압력과 온도가 많이 떨어지게 되는 것이다. 그리고 나서 감속재 용기 내에서 발생된 크기가 작은 수많은 기포가 외관으로 흐르고 응축되어 내관으로 흘러내리게 되고 압력은 거의 변하지 않게 된다. 이때 외관은 2 상 유동 상태(mixture)로, 내관은 액체 상태로 머물게 된다.

Fig. 6(b)는 $Q_i = 400$ W 인 경우인데, Fig. 6(a)와는 다른 압력 변동 특성을 보여주고 있다. 여기서는 더 잔잔한 기포가 외관을 통해서 안정되게 상승하고 응축되어 액체가 내관을 통해서 안정되게 하강하는 시간(Fig. 6(b)에서 Time=250-400 (sec) 범위에서와 같은 압력 변동 특성을 보이는 시간대: t_3)이 존재함을 보여주고 있다. t_1 과 t_2 의 시간 동안에는 압력이 점진적으로 증가하고, t_3 의 시간 동안에는 감소하고 있는 것을 발견할 수 있다. 충전유체체적이 증가할수록 더 잔잔한 기포가 형성되는데, 이는 충전유체체적이 증가할수록 감속재 용기 내의 정압(static pressure)이 높아져, 생성된 기포가 큰 기포로 성장할 수 없게 되기 때문이다.

점점 더 열부하를 증가시키면, t_2 의 시간 간격은 점점 더 줄어들고, 압력이 갑작스럽게 변동하는 횟수도 줄어들고 있음을 알 수 있다. 반면에, t_3 의 시간 간격을 점점 더 늘어나 재안정 유동 영역에 도달하기 바로 전인 $Q_i = 800$ W(Fig. 6(f))에서는 압력의 갑작스러운 변동은 거의 사라지고 압력의 변동이 거의 없는 t_3 의 시간 간격이 더 넓어짐을 알 수 있다. 이어서 $Q_i = 850$ W(Fig. 6(g))일 때는 압력 변동이 작은 재안정 유동 영역에 도달하게 된다. 이 상태에서는 감속재 용기에서 지속적으로 작은 기포가 형성되고, 이 기포는 외관을 따라서 안정되게 상승하고 응축되어 내관을 통해 감속재 용기를 재충전하게 된다. 재안정 유동에 도달하고 나서는 열부하를 증가시키기에 따라 계 내의 압력이 더 상승함을 알 수 있다. 충전유체체적이 3.1 l 이상인 경우 유동 거동 특성도 $V_f = 3.1$ l 의 경우와 거의 비슷하였다.

Fig. 7 은 고정된 충전유체체적에 대해서, 감속재 용기에 가하는 열부하의 증가에 따른 감속재 용기 내의 액체 레벨(liquid level)의 변화를 보여주고 있다. 액체 레벨은 용기의 옆면에 부착된 모세관의 수두 변화를 통해 기록할 수 있었다(Fig. 1 참조). 각각의 데이터는 변동의 평균값으로 했고, 데이터에 그려진 수직바는 액 레벨의 수직 변동 폭을 나타낸다. Fig. 7(a)는 충전유체체적이 1.0 l 인 경우에 해당한다(Fig. 3 참조). 열부하가 증가함에 따라 점점 용기 내의 액 레벨이 줄어드는 것을 알 수 있다. 그리고 드라이 아웃이 일어나기 전에는 액 레벨이 급격하게 감소하는 것을 보여주고 있다. 이

것은 열부하를 증가시키기에 따라 열사이편 관 내의 압력이 상승하는 앞의 결과와 물리적으로 일치하는 현상이다. Fig. 7(b)는 충전유체체적이 1.5 l 인 경우에 해당한다(Fig. 4 참조). 열부하가 600 W 보다 작은 경우에는 안정 유동 영역에 해당하기 때문에 용기 내의 액 레벨의 변동은 거의 없고 열부하가 증가함에 따라 액 레벨이 점점 줄어드는 것을 알 수 있다. 열부하가 600 W 이상에서는 특정한 주기를 가진 맥동 유동으로 발달하기 때문에 감속재 용기의 액 레벨도 변동하는 것을 알 수 있다. 맥동이 일어나는 범위에서는 열부하를 증가시킬수록 변동의 폭이 더 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 $Q_i = 1600$ W 에서는 드라이 아웃이 일어나기 때문에, Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이, 액 레벨이 줄어드는 대신에 액 레벨의 변동폭은 현저하게 줄어들게 된다. Fig. 7(c)는 충전유체체적이 2.1 l 인 경우인데, 열부하가 최대인 1800 W 근처에서도 여전히 맥동 상태로 남아 있는 것을 알 수 있다(Fig. 5 참조). 이것은 Fig. 5 의 결과와 일치하는 결과이다. 그리고 열부하를 증가시키기에 따라, 전체적으로 보았을 때, 액 레벨의 변동 폭이 넓어지는 것을 관찰할 수 있다. 반면에, 맥동이 일어나는 영역에서는 액 레벨의 평균적인 위치는 열부하가 증가하더라도, 안정 유동 영역의 경우와는 달리(Fig. 7(a)와 (b)를 참조할 것), 그렇게 많이 감소하지 않는다. Fig. 7(d), (e), (f)는 재안정 유동 영역이 존재하는 경우들이다. 이들 경우에서도 맥동이 존재하는 영역에서는 액 레벨의 평균적인 감소가 그렇게 심

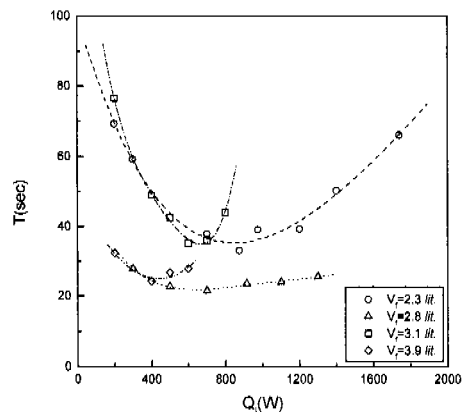


Fig. 8 Variations of the period of time in oscillating flows for the volume of the charged liquid(V_f) and heat load(Q_i)

하지 않은 편이지만, 열부하가 증가함에 따라 진폭이 커지게 된다. 그러나, 충전유체체적이 작은 Fig. 7(b)와 (c)에 비해서 맥동 진폭을 상당히 작음을 알 수 있다. 재안정 유동 영역에서는 충전유체체적이 작고 가한 열부하가 작은 경우에 일어나는 안정 유동 영역과 마찬가지로 액 레벨의 변동폭은 아주 작게 나타났다. 여기서, 재안정 유동 영역은 충전유체체적이 많을 수록 더 작은 Q_i 값에서 시작함을 알 수 있다. 이것은 Fig. 2 의 결과와 일치하는 것이다.

Fig. 8 은 맥동 유동이 존재하는 경우 Q_i 를 증가시켰을 때의 맥동 주기의 변화를 보여주고 있다. 여기서, $V_f = 2.3 l$ 의 경우는 최대의 열부하에서도 재안정 유동 영역으로 옮겨지지 않을 때이고, 나머지 세 경우는 어느 열부하 이상에서는 재안정 유동 영역으로 존재하는 경우에 해당한다. Fig. 8 을 보면 알 수 있듯이, 각각의 충전유체체적에 대해서 가한 열부하를 증가시키기에 따라 맥동 주기가 점점 줄어들다가 어느 값에서 최소값을 가짐을 알 수 있다. 이어서, 이 값 이상으로 증가시키면 맥동 주기가 다시 증가하는 것을 보여준다. 더욱이, 맥동 주기가 최소가 되는 열부하량은 충전유체체적이 될수록 점점 작아지게 된다. 이것은, 앞에서 보았듯이, 충전유체체적이 많을수록 더 작은 열부하에서 재안정 유동 영역으로 옮겨 진다는 사실과 같은 맥락에서 이해하면 될 것이다.

4. 결 론

하나로 원자로에 설치할 예정인 냉중성자원 내의 열사이편 모의 실험을 수행하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 열사이편 내의 유동현상은 충전유체체적과 감속재 용기에 가하는 열량에 따라 안정 유동 영역, 맥동 유동 영역, 재안정 유동 영역, 드라이아웃 영역으로 나누어진다.
- (2) 충전유체체적이 많을수록 맥동 진폭은 줄어들었고, 재안정 유동 영역에 빨리 도달한다.
- (3) 충전유체체적이 많을수록 감속재 용기 내의 액체 레벨이 높아진다.
- (4) 응축기의 전달열량은 열사이편 관내의 압력 변동에 동기 되어 변한다.
- (5) 맥동 유동 영역에서는 입력 열부하에 따라 주기의 최소값이 존재하고, 이 최소값이 되는 입력 열량은 충전유체체적이 많을수록 줄어든다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업 및 한국 원자력 연구소의 냉중성자원 개발 사업의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 최창용, 조만순, 이무용, 손재민, 박선희, 박국남, 양승영, 강병위, 양성홍, 장종화, 이영욱, 장천익 및 조영식, 1996, "냉중성자원 개발," KAERI/RR-1728/9.
- (2) Kumai, T., Sakamoto, M. and Takahashi, H., 1987, "JRR-3 개조로 냉중성자원 장치를 위한 폐회로 열사이편 실험 1," JAERI Report.
- (3) Kumai, T., Kudo, M., Sakamoto, M., Akutsu, C. and Takahashi, H., 1989, "JRR-3 개조로 냉중성자원 장치를 위한 폐회로 열사이편 실험 2," JAERI Report.
- (4) Siegarth, J. D., Olson, D. A., Lewis, M. A., Rowe, J. M., Williams, R. E. and Kopetka, P., 1994, "Thermal Hydraulic Tests of a Liquid Hydrogen Cold Neutron Source," NISTIR 5026.
- (5) Hoffman, H., 1985, "Natural Convection Cooling of a Cold Neutron Source with Vaporizing Deuterium at Temperatures of 25K," Natural Convection: Fundamentals and Applications, S. Kaksc, W. Aung, R. Viskanta, eds., Hemisphere Publishing Corp., New York.
- (6) Tien, C. L., Chung, K. S. and Liu, C. P., 1979, "Flooding in Two-Phase Countercurrent Flows," NP-1283 Research Project 1160-1, Topical Report, Dec.
- (7) Nguyen-Chi, H. and Groll, M., 1981, "Entrainment or Flooding Limit in a Closed Two-Phase Thermosyphon," Heat Recovery Systems, 1.
- (8) El-Genk, M. S. and Saber, H. H., 1997, "Flooding Limit in Closed, Two-Phase Flow Thermosyphons," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, No. 9.
- (9) Kim, C. J., Moon, S. H. and Kang, H. K., 1997, "A Study on the Pulse Boiling Occuring Inside the Liquid Pool of a Closed Two-Phase Thermosyphon," *KSME Journal*, Vol. 21, No. 10, pp. 1254~1261.