空氣調和·冷凍工學 論文集 第5卷 第3號(1993)/ pp.179~186.

비등유로의 압력강하 불안정성에 대한 실험적 고찰

Experimental Investigation on the Pressure-Drop Instabilities in Boiling Channel

김 병 주*·신 광 섭**
B. J. Kim, K. S. Shin

Key words: Pressure-Drop Instability(압력강하 불안정성), Oscillation Characteristics(요동특성), Boiling Channel(비등유로)

Abstract

The characteristics of pressure-drop oscillations(PDO) in boiling channel are studied experimentally. The effects of initial and boundary conditions on PDO are investigated in terms of oscillation period and amplitude. The period and amplitude of PDO are increased with the increase in the compressible volume in surge tank and heat input. However the amplitude of PDO is decreased with fluid temperature under low subcooling condition. Higher initial insurge flowrate resulted in almost invariant oscillation period but lower amplitude. At higher heat input the oscillation of heater wall temperature is significant, whose period is the same as that of pressure-drop instability.

기호설명

A : 면적
c : 비열
D : 직경
h : 열전달계수
K : 부가손실계수
l : 길이
m : 질량
$\dot{m}$: 질량유량
p : 압력
Δp : 압력강하
Δp^* : 무차원 압력진폭
q : 열입력
Q : 체적유량
t : 시간
T : 온도
V : 체적
x : 건도
z : 축방향좌표

Greek문자

ρ : 밀도
ϕ^2 : 2상 마찰배수
τ : 주기

하첨자

e : 유출
f : 액체
fo : 단상액체 유동
i : 유입
m : 주탱크
o : 정상상태
s : 완충탱크
TP : 2상
w : 가열부
∞ : 주위

*홍익대학교 공과대학 기계공학과
**홍익대학교 대학원

1. 서 론

2상유동 불안정성이란 상변화 등에 의하여 액상과 기상이 함께 유동할 경우 유량과 시스템의 압력 그리고 가열면의 온도가 새로운 정상상태로 천이하거나 시간에 따라 주기적으로 요동하는 현상이다. 상변화와 더불어 형성되는 유동변동은 국부적인 열전달 특성에 영향을 미쳐 버언아웃과 같은 비등위기[1]를 초래하고 이의 지속적인 발생은 시스템의 제어기능을 저하시키며 부속설비의 기계적 강제진동을 야기한다. 또한 가열벽면상의 버언아웃지점의 이동에 의한 가열면 온도의 주기적인 변화는 열응력과 열피로를 발생시켜 열기기의 수명을 단축시키는 요인이 되기도 한다.

2상유동 불안정성 현상은 비등경수로, 증기발생기, 냉동설비 그리고 화학공정이나 정제과정의 열교환기와 같은 상업설비에서 주로 발생하며 시스템의 안정된 운전을 위하여 방지되어야 될 현상중의 하나이다.[2]

2상유동 불안정성은 정적불안정성(static instability)[3]과 동적불안정성(dynamic instability)[4]으로 구별된다.

2차현상으로 발생하는 복합동적 불안정성에는 정적 불안정성의 부수적 현상으로 가열부의 상류나 내부에 압축성 체적을 가진 계에서 유동탈선 등에 의해 유도되는 압력강하요동(pressure-drop oscillation)[5]이 있다.

압력강하 불안정성은 압력강하-유량 곡선의 기울기가 음인 영역에서 발생하는 저주파수의 요동으로 그 발생에 필요한 상류의 압축성 체적은 아주 작다. 그러나 압력강하요동의 진폭은 대부분의 경우 매우 커서 이에 대한 방지책이 요구된다.

유로 상류에 설치된 압축성 체적에 의한 압력강하 불안정성은 압축성 체적과 가열관 사이에 교축밸브를 설치하여 제거할 수 있다. 그러나 긴 유로의 경우(ℓ/D>50), 유로 내부에 압축성 체적이 충분히 존재하므로 입구에서의 교축과정이 계의 압력강하 불안정성을 방지하는데 아무런 도움이 되지 못하는 경우도 있다.[6]

2상유동 불안정성에 대한 대부분의 연구는 주로 그 안정성 경계(stability criteria)를 규명하기 위하여 수행되었다. 많은 실험 및 이론적 연구를 통하여 선형 혹은 비선형 불안정성의 안정성 경계에 대한 이해도는 크게 향상되었다.[7] 그러나 시스템의 초기 및 경계조건에 따른 불안정성의 요동특성에 대한 연구는 아직 미약하다고 할 수 있다.[8,9]

본 연구에서는 유로상류에 압축성 체적이 있을 때 2상유동계에서 발생하는 압력강하 불안정성의 특성을 실험적으로 연구하였다. 가열유로에 대한 열입력(heat input), 압축성 체적, 유체온도, 유체 공급부의 초기유량 등의 조건들이 압력강하 불안정성에 미치는 영향을 요동크기 및 주기의 측면에서 규명하였다.

본 연구의 목적은 2상유동 불안정성에 대한 기초적 이해를 높이고 주어진 초기 및 경계조건에 대한 시스템의 불안정성의 특성을 예측하는 데 있으며 그 결과는 2상유동계의 안전하고 효율적인 운전과 열시스템의 최적 설계의 기준으로 활용될 수 있을 것이다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

강제순환 비등유로의 압력강하 불안정성의 실험적 해석을 위한 작동유체(working fluid)로 비등점이 낮고, 증발잠열이 작으며 인화성이 없는 Freon-113을 사용하였다. Fig. 1과 같이 설치된 2상유동 루프는 작동유체 공급부, 완충탱크부(surge tank section), 시험부, 회복부(recovery section)의 4부분으로 구성되었다.

작동유체 공급부의 주탱크는 높이 1000 mm, 직경 500 mm의 원통형 내압용기로써 용량은 195리터이다. 가압된 질소가스에 의해 주탱크내의 작동유체는 일정한 압력으로 유로하류로 압출된다. 주탱크에는 작동유체를 가열하기 위한 잠입히터(immersion heater)와 수위변화를 감시하기 위한 싸이트 글래스(sight glass)가 설치되어 있다. 시험부로 이송되는 유량을 조절하기 위하여 니이들밸브 및 미터링 밸브가 주탱크 하류에 설치되었으며 터빈유량계(유량범위 0.05~0.5 GPM)에 의해 그 유량이 측정되었다.

완충탱크는 기상의 압축성 유체와 액상의 작동유체를 포함하고 있어 시스템의 압력변동을 완충시키는 기본 기능을 갖고 있으나 압력강하 요동을 유도하는 요인이 되기도 한다. 터빈유량계의 하류에 설치된 완충탱크는 높이 300 mm, 직경 105 mm의 압

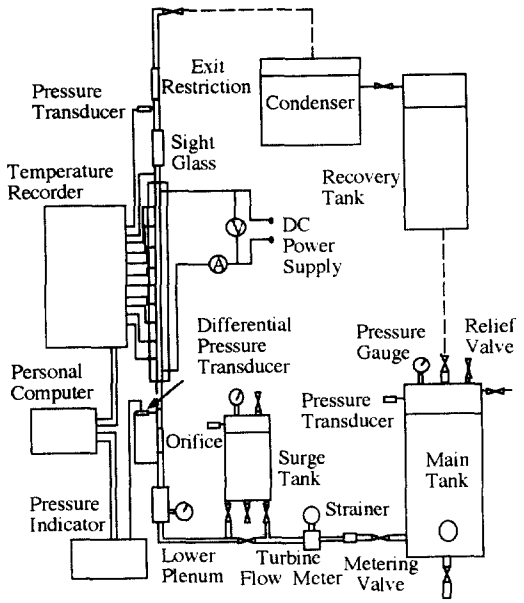


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for pressure-drop instability

력용기로써 압력게이지와 압력변환기 그리고 유동불안정성의 과정동안 압축성 체적의 변화를 관찰하기 위한 싸이트글래스가 설치되어 있다.

시험부는 비가열 유로부와 비등유로부(비등부와 출구제한(exit restriction))로 구성된다. 완충탱크에서 유출되는 작동유체는 열교환기의 관측 챔버에 해당하는 하부 플레넘을 거쳐서 비가열 유로부로 공급된다. 비가열 유로부는 작동유체가 비등유로부에 유입되기 전에 그 유동이 완전히 발달할 수 있도록 충분히 긴 길이로 비등유로부의 상류에 설치되었다. 압력강하 불안정성이 유도되면 완충탱크를 중심으로 주탱크로부터 유입되는 유량과 비등부로 유출되는 유량이 다를 수 있으므로 시험부를 통과하는 유량은 비가열 유로부에 설치된 오리피스(bore 직경 3 mm)에서의 차압측정에 의해 산정된다.

비등부는 열공급에 의해 비등현상이 발생하는 부분으로 길이 700 mm, 내경 7.5 mm, 두께 1 mm인 스테인리스 강관에 니크롬선(직경 0.5 mm)를 등간격으로 감아 제작하였다. 비등부는 직류전원에 의해 균일하게 가열되며 최대 열공급율은 400W이다.

비등부의 관벽 온도를 측정하기 위하여 열전대(K-type)를 길이방향에 대하여 등간격으로 5곳에 부착하였다. 비등부의 출구에 싸이트 글래스를 설치하여 작동유체의 2상유동양식을 관찰할 수 있도록 하였다. 비등부의 하류에 설치된 출구제한은 두께 1.6 mm, bore직경이 1.5 mm인 오리피스를 사용하여 구성하였다.

시험부의 하류에 설치되는 회복부는 분리부, 응축부, 그리고 회복탱크로 구성된다. 출구제한으로부터 유출되는 포화액체와 포화증기의 혼합물은 분리기에서 기/액이 분리되며 증기는 순환냉각수에 의해 응축된 후 회복탱크에 저장된다. 회복탱크에 모인 작동유체는 실험이 끝난 후 펌프에 의해 다시 주탱크로 압송된다.

2.2 실험방법 및 자료처리

압력강하 불안정성의 실험은 실험의 전 과정동안 주탱크의 압력을 3.0bar로 일정하게 유지하면서 수행하였다. 잠입가열기에 의해 주탱크의 작동유체의 온도를 조절하고 고압질소탱크와 압력조절기에 의해 압력를 고정한 후 미터링밸브를 사용하여 유량을 설정치로 조정하였다. 완충탱크를 질소가스로 가압하여 압축성 체적을 형성하였으며 DC 전원공급기에 의해 비등부에 대한 열입력을 서서히 증가시켰다. 정상상태의 비등과정이 유도되었을 때 완충탱크의 압축성체적을 순간적으로 일부 추출하거나 완충탱크하류의 밸브의 개폐정도를 변화시키는 방법으로 유동에 변동을 주었다. 이 때 유동상태가 정상상태로부터 완전히 이탈하여 주기적인 변동을 겪는 불안정성이 지속되는가를 확인하고 주기 및 진폭을 기록하였다. Table 1에 주어진 것과 같이 기준조건을 중심으로 어느 한 변수만이 증가 혹은 감소된 초기조건에 대하여 매번 실험을 수행하였다. (once-at-a-time approach)

본 실험에서 측정된 자료는 주탱크, 완충탱크, 출구제한에서 입, 출구의 압력과 온도, 시험부 입

Table 1 Base-line values and range of parameters

Parameters	Base-line values	Ranges
Compressible volume (cc)	1298	649-1948
Heat input (W)	300	0-400
Inlet fluid temperature (K)	300.15	283.15-308.15
Initial insurge flowrate (g/s)	7.5	6.5-9.2

구에서 오리피스의 차압, 완충탱크에 유입되는 유량, 시험부에 유입하는 유체온도, 비등부의 관벽온도 5곳 등 모두 15가지이다. 측정치들은 온도기록기 및 A/D변환기 등에 의해 개인용 컴퓨터에 전송, 기억되며 본 계측장치의 자료 수집간격(sampling duration)은 약 14초이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 비등유로의 압력강하 특성

비등유로부의 압력강하는 비등부와 출구제한에서의 압력강하의 합으로 주어진다. 비등부에서 발생하는 압력강하는 마찰, 가속, 그리고 중력에 의한 압력강하의 합으로 표시된다.

비등부의 하류에 설치된 출구제한은 그 유동저항의 크기가 2상유동 불안정성의 안정성경계나 요동특성을 결정하는 중요한 요소이다. 기본적으로 출구제한에서의 유동저항이 클수록 유동요동의 발생가능성은 높아지며 요동주기 및 진폭도 증가한다. 2상유동의 경우 출구제한을 구성하는 출구오리피스에서 발생하는 압력강하는 동일유량의 단상유동에서 발생하는 압력강하에 2상 마찰배수(two-phase friction multiplier)를 곱하여 다음과 같이 표현될 수 있다.[10]

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{TP}=\phi_{fo}^2\left(\frac{dp}{dz}\right)_{fo} \qquad (1)$$

본 실험의 경우 출구제한에서 발생하는 압력강하가 비등유로의 전 압력강하의 대부분을 차지하며 단상유동시 출구제한에서의 부가손실계수는 약 1500이고, 2상유동시 출구제한 입구에서의 건도에 대한 2상마찰배수의 단순관계식은 다음과 같이 실험의 결과로 부터 밝혀졌다.

$$\phi_{fo}^2=1.0+73.45x+93.86x^2-72.3x^3 \qquad (2)$$

비등유로의 압력강하-유량의 특성곡선이 비등부에 대한 열입력과 유입되는 유체온도의 함수로 Fig. 2와 Fig. 3에 주어져 있다.

유량이 클 때, 즉 300W의 경우 9.2 g/s 이상의 유량영역에서, 시험부의 압력강하는 양의 기울기를 가지며 유량의 자승에 비례하여 증가함을 볼 수 있다. 이 영역은 작동유체의 상변화 즉 비등이 발생하지 않는 액상유동영역이다. 이보다 낮은 유량의 범위에서 300W의 경우 5.0~9.2 g/s에서, 압력강하는 음의 기울기를 가지며 이 때 작동유체는 액상과 기상의 2상혼합물로 유동한다. 2상영역에서는 고정된 열유속에 대하여 유량이 감소하면 건도(quality)가 증가하여 출구제한에서의 압력강하가 증가하므로 비등유로의 압력강하는 증가한다. 본 실험에서 사용된 터빈유량계의 측정범위의 제한으로 실험결과가 제시되지는 않았으나 2상영역보다 낮은 유량의 영역은 비등부 하류에서 작동유체의 상태가 과열증기의 상태인 단상증기영역이다.

Fig. 2는 시험부 입구에서 유체의 온도가 303K일 때 비등부에 대한 열입력이 비등유로의 압력강하에 미치는 영향을 보여주고 있다. 열입력과 함께 비등부 출구의 건도가 증가하여 출구제한에서의 압력강하가 증가하므로 열입력의 증가에 따라 시험부의 음압력구배영역이 크게 형성됨을 알 수 있다. 또한 열입력의 증가에 따라 2상유동영역의 음압력구배도 증가하고 있다.

Fig. 3은 열입력이 300W로 일정할 때 비등부에

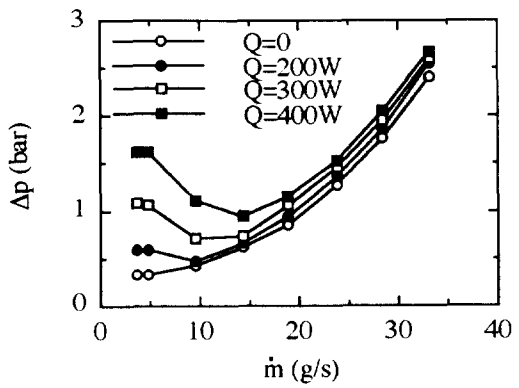


Fig. 2 Pressure-drop of a boiling channel at various heat input(T=303K)

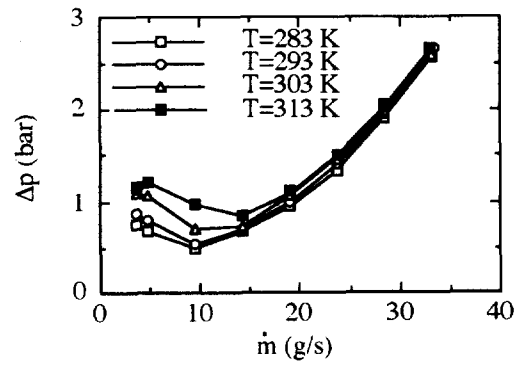


Fig. 3 Pressure-drop of a boiling channel at various fluid inlet temperatures(Q=300W)

유입하는 작동유체의 온도가 비등유로의 압력강하에 미치는 영향을 나타내고 있다. 작동유체의 온도가 증가함에 따라 2상유동영역이 증가하나 그 압력구배는 거의 변함이 없다. 유량이 클 경우 모든 곡선들이 하나의 곡선으로 수렴하며 이는 작동유체의 온도가 밀도에 영향을 미치나 그 영향이 작음을 의미한다.

3.2 압력강하 불안정성

기본적으로 압력강하 불안정성은 주탱크의 압력이 일정할 때 비등유로부에 대한 유량-압력 곡선의 음의 구배영역에서, 유체공급부의 압력구배와 비등유로부의 압력구배가 다음의 조건을 만족할 때 발생한다.

$$\left|\frac{dp}{d\dot{m}}\right|_{supply} > \left|\frac{dp}{d\dot{m}}\right|_{boil} \tag{3}$$

여기서 압력강하 불안정성시의 유체공급부와 비등유로부의 유동특성은 불안정성의 주기가 상대적으로 길기 때문에 준정상상태의 운동량보존식으로부터 구할 수 있다.

$$p_m - p_s = K_i Q_i^2 + \frac{\rho_i l_i}{A_i}\frac{dQ_i}{dt} \tag{4}$$

$$p_s - p_\infty = (p_s - p_\infty)_o + \frac{\rho_e l_e}{A_e}\frac{dQ_e}{dt} \tag{5}$$

여기서 p_m, p_s, p_∞는 주탱크, 완충탱크, 그리고 비등유로 출구의 압력이며 Q_i와 Q_e는 완충탱크에 대한 유입 및 유출유량을 나타낸다. 완충탱크에 대한 유입 및 유출유량의 차이에 의해 완충탱크의 압력변동이 발생하며 완충탱크의 동특성에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dp_s}{dt} = \frac{p_s^2}{(p_s V_s)_o}(Q_i - Q_e) \tag{6}$$

이러한 완충탱크의 압력변동은 다시 비등유로의 유량변동을 유도하여 압력강하 불안정성은 반복적으로 지속된다. 비등부의 관벽온도는 에너지균형으로부터 가열부의 열용량(heat capacity) $m_w c_w$, 비등유로에 대한 열입력 q, 그리고 비등유체의 열전달률에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$m_w C_w \frac{dT_w}{dt} = q - hA_w(T_w - T_f) \tag{7}$$

결국 작동유체의 2상유동양식과 가열면온도의 변화는 비등열전달계수와 마찰계수 등의 변동을 유도하므로 압력강하 불안정성은 극히 비선형적인 특성을 나타낸다.[11]

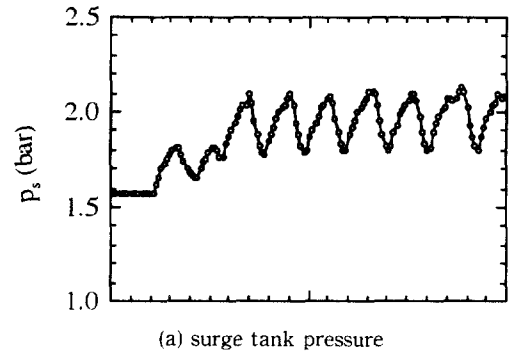
본 실험에서 대부분의 경우 압력강하 불안정성은 유량 및 기타 조건들을 조절한 후 열입력을 설정값까지 증가시키는 도중에 비등과정의 발달과 함께 자생적으로 형성되었다. 비등부 하류의 싸이트글래스를 통하여 관찰된 유동양식은 초기의 과냉비등영역에서 기포류, 가열벽면의 히스테리시스이후부터 처언류, 그리고 열입력의 증가와 함께 환상류로 발달하였다. 일단 압력강하 불안정성이 형성되면 이러한 유동양식은 반복적으로 발생하였다.

압력강하 불안정성의 발생과 함께 완충탱크의 압력, 완충탱크에 대한 유입 및 유출유량, 그리고 비등부의 관벽온도는 주기적으로 요동하며 이들의 주기는 모두 동일하다. 압력강하 불안정성의 크기는 각 변수에 대하여 다양하게 표시될 수 있으나 본 논문에서는 압력강하 불안정성의 발생요소인 완충탱크의 압력변동을 중심으로 정성적인 해석을 수행하였다.

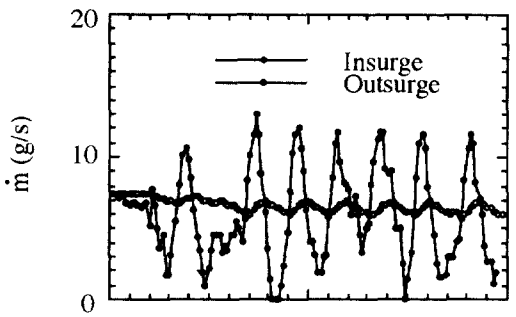
Fig. 4에 균일열유속하에서 발생하는 압력강하 불안정성의 전형적인 요동특성이 주어져 있다. 초기의 단상유동상태에서 열입력을 서서히 증가시켜 약 250W에 도달하였을 때 Fig. 4(a)와 같이 완충탱크의 압력변동과 함께 불안정성이 시작되었으며 열입력이 300W로 증가함에 따라 요동의 진폭이 더욱 증가함을 볼 수 있다. 이후 열입력을 300W로 고정하였을 때 그 진폭과 주기는 거의 일정하게 유지되면서 주기적인 변동이 계속되었다. Fig. 4(b)는 완충탱크에 유입, 유출하는 유량을 제시하고 있다. 유입유량은 유체공급부의 높은 부가손실계수에 의해 완충탱크의 압력변동에도 불구하고 그 요동이 미약하나 시험부로 유출하는 유량은 크게 요동하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 유입유량과 유출유량의 차이가 완충탱크의 압력변동을 지속적으로 반복시키는 요인이다.

Fig. 4(c)는 길이방향으로 비등부의 중앙에서 측정된 가열벽온도의 요동현상을 보여주고 있다. 시험부에 유입되는 유량의 변동에 따라 유동양식의 변화가 반복적으로 발생하고 이에 따른 열전달계수의 변화는 비등부의 관벽온도의 변동을 야기하게 된다.

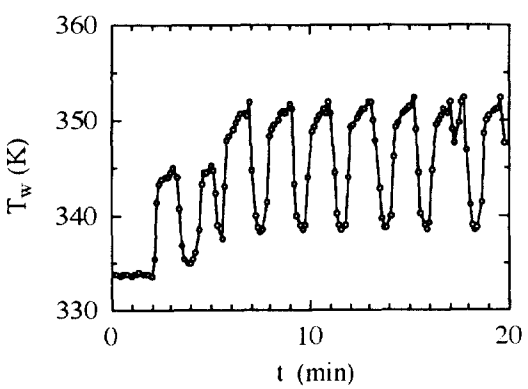
완충탱크 내에 유입하는 유량의 요동정도가 상대적으로 작은 것을 고려할 때 압력강하 불안정성은 결국 완충탱크의 압력과 시험부를 통과하는 유량의



(a) surge tank pressure



(b) in and out surge flowrate



(c) heater wall temperature

Fig. 4 Typical oscillatory characteristics in pressure-drop instability

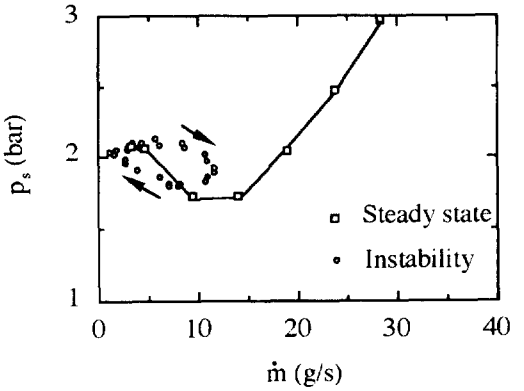


Fig. 5 Locus of typical pressure-drop instability

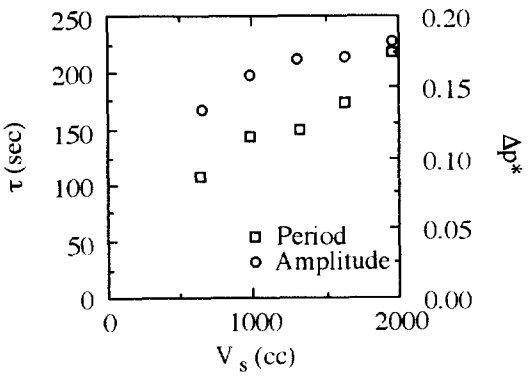


Fig. 6 Effects of surge volume on pressure-drop instability

주기적인 요동으로 특징지워지며 그 궤적이 Fig. 5에 주어져 있다. 압력강하 불안정성의 궤적을 정상상태의 유량-압력강하 곡선과 비교하여 보면 압력강하 곡선이 음의 기울기를 갖는 영역을 중심으로 하여 요동과정이 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 6에 완충탱크의 압축성 체적이 압력강하 불안정성의 주기 및 완충탱크의 압력요동의 진폭에 미치는 영향이 주어져 있다. 완충탱크의 압력요동의 진폭은 평균압력에 대한 요동압력의 진폭의 비로 무차원화하여 표시하였다. 압축성 체적이 증가함에 따라 요동주기 및 진폭이 증가하고 있으며 이는 압축성 체적의 압력변화율이 체적에 반비례하기 때문이다.

열입력이 증가하면 불안정성의 주기와 진폭은 Fig. 7과 같이 급격히 증가한다. 열입력의 증가로 비등부의 증기생성량이 높아지고 이에 따라 출구제한에서의 압력강하는 크게 증가하므로 유량 및 완충탱크 압력의 요동 진폭은 심각할 정도로 크다. 그러나 200W 이하의 열입력의 경우 비등부에서의 비등과정이 충분히 발달하지 못하기 때문에 불안정성은 발생하지 않았다.

Fig. 8에 유체공급부의 초기유량의 영향이 주어져 있다. 유체공급부의 초기유량은 주탱크의 압력이 일정한 상태에서 미터링밸브에 의해 조절되며

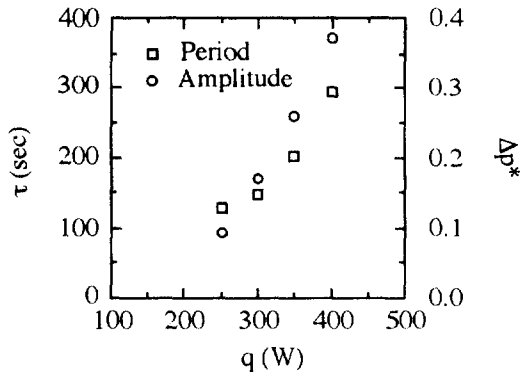


Fig. 7 Effects of heat input on pressure-drop instability

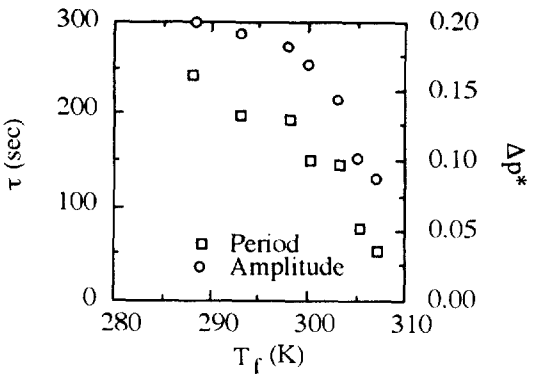


Fig. 9 Effects of fluid temperature on pressure-drop instability

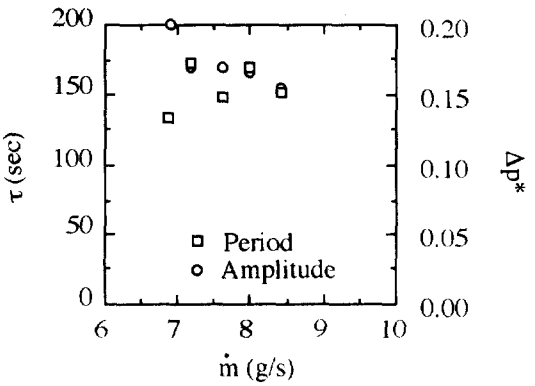


Fig. 8 Effects of initial insurge flowrate in the fluid supply section on pressure-drop instability

이는 유체공급부의 부가손실계수의 변화를 의미한다. 물론 부가손실계수가 높아지면 초기상태에서의 유량은 감소한다. 본 실험의 경우 음의 압력구배 영역에 해당하는 유량의 범위는 300W의 경우 5.0~9.2 g/s로 매우 제한되어 있다. 이 유량범위에서 압력강하 불안정성의 요동주기는 변곡을 보여주고 있으며 이는 Kakac 등[9]이 제시한 초기유량과 함께 불안정성의 요동주기가 증가한다는 결과와 일치하지 않고 있다. 그러나 Kakac 등은 실험결과를 직접 제시하지 않으므로 그 차이를 확인할 수 없다. 본 실험에서 관찰한 요동주기의 변곡정도를 고려할 때 요동주기는 초기유량에 관계없이 거의 일정하다고 할 수 있다. 압력강하 불안정성의 진폭은 초기유량이 증가할 때 혹은 부가손실계수가 감소할 때 감소하였다. 초기유량이 약 9.2 g/s일 때 유로에서 비등과정이 형성되지 않으므로 불안정성은 발생하지 않았다.

작동유체의 온도가 압력강하 불안정성에 미치는 영향이 Fig. 9에 주어져 있다. 작동유체의 과냉도(subcooling)가 아주 클 때 비등부에서의 증기생성량이 상대적으로 작으므로 압력강하 불안정성은 발생하지 않았다. 작동유체 온도의 증가로 과냉도가 감소하면 비등과정은 충분히 발달하고 증기생성률도 증가한다. 이 영역에서 압력강하 불안정성의 진폭과 주기는 작동유체의 온도가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. 이러한 작동유체 온도의 영향은 과냉도의 크기에 따라 비등유로에서의 비등양식의 발달과정이 크게 바뀌기 때문으로 고려된다.

본 실험에서 해석된 압력강하 불안정성에 대한 제 변수의 효과는 요동주기에 대한 초기유량의 영향을 제외하고 Kakac 등[9]이 제시한 포괄적인 요동특성과 정성적인 일치성을 보여주고 있다. 그러나 Kakac 등은 요동주기나 진폭에 대한 각 조건의 국부적인 영향을 실험결과와 함께 제시하지 않았으므로 직접적인 비교는 불가능하다.

5. 결 론

본 연구에서는 비등유로에서 발생하는 압력강하 불안정성의 특성을 실험적으로 해석하였다. 가열유로에 대한 열입력, 압축성 체적, 유체온도, 유체공급부의 초기유량 등의 초기 및 경계조건들이 압력강하 불안정성의 요동크기 및 주파수에 미치는 영향은 다음과 같다.

1) 압력강하 불안정성의 요동주기 및 진폭은 완충탱크의 압축성 체적이 증가할수록, 열입력이 높

을수록 증가한다.

2) 낮은 과냉도의 범위에서 작동유체의 온도가 증가할 때 압력강하 불안정성의 요동주기 및 진폭은 감소한다.

3) 유체공급부의 초기유량이 2상영역내에서 증가할 때 요동주기는 거의 일정하고 진폭은 감소한다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

(1) Tong, L. S., 1968, "Boundary-layer analysis of the flow boiling crisis," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 11, pp. 1208~1211.

(2) Cho, S. M., Ange, L. J., Fenton, R. E., Gardner, K. A., 1971, "Performance changes of a sodium-heated steam generator," ASME Paper No. 71-HT-15

(3) Ledinegg, M, 1938, "Instability of flow during natural and forced circulation," Die Warme, Vol. 61, No. 8, pp. 891~898.

(4) Kakac, S., Veziroglu, T. N., 1986, "The effect of heat transfer augmentation on two-phase flow instability in a vertical boiling channel," Metu Journal of Pure and Applied Sciences, Vol. 19, No. 3, pp. 243~262.

(5) Daleas, R. S., Bergles, A. E., 1965, "Effect of upsteam compressibility on subcooled critical heat flux," ASME Paper No. 65-HT-67

(6) Maulbetsch, J. S., Griffith, P., 1967, "Prediction of the onset of system induced instabilities in subcooled boiling," Proc. Symp. on Two-Phase Flow Dynamics, Eindhoven, EUR 4288e, pp. 799~825.

(7) Yadigaroglu, G., 1978, "Two-phase flow distributions and propagation phenomena," von Karman Institute for Fluid Dynamics, Lecture Series, 1978~5

(8) Akyuzlu, K. M., Dogan, T., Veziroglu, T. N., 1984, "Effect of inlet subcooling on dynamic instabilities in two-phase upflow systems," ASME HTD-Vol. 34, Basic Aspects of Two Phase Flow and Heat Transfer, ASME 22ND National Conf., New York

(9) Kakac, S., Veziroglu, T. N., Fu, L. Q., Padki, M. M., 1988, "Two-phase flow thermal instabilities in a vertical boiling channels," ASME FED-Vol. 72, Fundamentals of Gas-Liquid Flow, ASME Winter Annual Meeting

(10) Collier, J. G., 1981, Convective Boiling and Condensation, Second Eds., McGraw-Hill

(11) 김병주, 1991, "단일유로계의 2상유동 불안정성에 대한 수치적 해석," KOSEF 보고서 891-0903-036-2