

비등유로의 압력강하 요동특성 Characteristics of Pressure-Drop Oscillations in a Boiling Channel

김 병 주*, 신 광 섭**
B. J. Kim, K. S. Shin

Key words : Pressure-Drop Oscillations(압력강하요동), Oscillation Period and Amplitude(요동주기 및 진폭), Compressible Volume(압축성체적), Boiling Channel(비등유로)

Abstract

Characteristics of pressure-drop oscillations(PDO) in a boiling channel were studied numerically and compared with experimental data. Effects of initial and boundary conditions on PDO were investigated in terms of oscillation period and amplitude. The period and amplitude of PDO increased with increasing of the compressible volume in the surge tank and the heat input. PDO occurred within the specific range of the fluid temperature, at which oscillation period and amplitude diminished rapidly with the increase of the fluid temperature. The increase of the loss coefficient in fluid supply line resulted in slightly longer oscillation period and larger amplitude. Numerical results showed good agreement with the experimental data.

기 호 설 명

<p>A : 면 적</p> <p>c : 비 열</p> <p>C_o : 유동분포함수</p> <p>d : 직 경</p> <p>f : 마찰계수</p> <p>g : 중력가속도</p> <p>G : 질량속도</p> <p>h : 열전달계수</p> <p>i : 엔 탈 피</p> <p>j : 드리프트 플릭스</p>	<p>K : 부가손실계수</p> <p>L : 길 이</p> <p>m : 질 량</p> <p>\dot{m} : 질량유량</p> <p>p : 압 력</p> <p>Δp : 압력강하</p> <p>Δp^* : 압력강하 요동 진폭</p> <p>q : 열 입 력</p> <p>Q : 체적유량</p> <p>t : 시 간</p> <p>T : 온 도</p> <p>u : 속 도</p> <p>V : 체 적</p> <p>x : 건 도</p> <p>z : 축방향좌표</p>
---	--

* 홍익대학교 공과대학 기계공학과
** 홍익대학교 대학원

그리스 문자

- α : 기공율
- ρ : 밀도
- σ : 표면장력
- μ : 점성계수
- ϕ : 2상 마찰배수
- τ : 요동주기
- ξ : 원주길이

하첨자

- c : 대류
- e : 유출
- f : 액상
- fo : 단상액체 유동
- g : 기상
- gj : 드리프트
- H : 수력
- i : 유입
- m : 주탱크
- nb : 핵비등
- o : 정상상태
- s : 완충탱크
- TP : 2상
- w : 가열부
- ∞ : 주위

1. 서론

보일러나 냉동설비등의 상변화 열교환기에서 비등/응축 과정이 형성되면 계의 조건에 따라 기상과 액상의 2상유동에 의한 2상유동 요동이 발생한다.¹⁻³ 2상유동 요동은 유동조건이 초기의 정상상태로부터 미소 변화할 경우 초기상태 부근에서 새로운 정상상태의 형성이 불가능하여 완전히 새로운 조건하에서 정상상태가 형성되거나 초기상태 부근을 주기적으로 요동하는 경우를 말한다. 후자의 동적 2상유동 요동은 계의 압력 및 유체유동의 요동현상으로 나타나며 이는 계의 안전성을 저해하는 매우 중요한 요인이 된다. 또한 2상유동 요동은 구조물의 진동, 열피로 현상, 혹은 전열면의 비등위기까지도

유발할 수 있다.³⁾

2상유동 요동중에서 2차현상으로 발생하는 복합 동적 요동에는 정적 요동의 부수적 현상으로 가열부의 상류나 유로내부에 압축성체적을 가진 계에서 유동탈선동에 의해 유도되는 압력강하요동 (pressure-drop oscillation)⁴⁾이 있다.

압력강하요동은 압력강하-유량 곡선의 기울기가 음인 영역에서 발생하는 저주파수의 요동으로 그 발생에 필요한 상류 압축성체적은 아주 작다. 그러나 압력강하요동의 진폭은 대부분의 경우 매우 커서 이에 대한 방지책이 요구된다. 긴 유로의 경우 ($L/d > 50$), 그 내부에 압축성 체적이 충분히 존재하므로 입구에서의 교축과정에 의한 안정화수단이 계의 압력강하요동을 방지하는데 아무런 도움이 되지 못하는 경우도 있다.⁵⁾

압력강하 요동을 비롯하여 2상유동 요동에 대한 대부분의 연구는 주로 그 안정성경계(stability criteria)를 규명하기 위하여 수행되었다. 많은 실험 및 이론적 연구를 통하여 선형 혹은 비선형 요동의 안정성 경계에 대한 이해도는 크게 향상되었다.⁶⁾ 그러나 시스템의 초기 및 경계조건에 따른 유동의 요동특성에 대한 연구는 실험 및 이론적연구를 통틀어 아직 미약하며⁷⁻⁹⁾ 요동주기 및 요동 진폭에 대한 경계 및 운전조건에 영향을 체계적으로 연구하는 것이 요구된다.

본 연구에서는 비등유로의 상류에 압축성체적이 있을 때 2상유동계에서 발생하는 압력강하요동의 특성을 수치적으로 연구하였으며 김병주와 신광섭이 수행한 실험의 결과¹⁰⁾와 비교, 분석하였다. 가열유로에 대한 열입력, 유로상류의 압축성체적, 유체온도, 유체공급부의 부가손실특성등의 조건들이 압력강하요동에 미치는 영향을 요동진폭 및 주기의 측면에서 규명하였다.

2. 압력강하 요동의 수치적 해석

2.1 2상유동의 수학적 서술

일반적으로 2상유동의 모델링은 보존식의 서술로부터 시작한다. 이와 더불어 초기조건이나 경계조건이 주어진 문제의 특성에 따라 정의되며 수학적 공식화의 매단계마다 물리적 가정이나 근사화가 따르게 된다.

단일 유로내에서 2상유동은 1유체모델(single fluid model)을 사용하여 해석할 수 있다. 이 중간질모델은 2상류 혼합물을 유한한 압축성의 단상 유체로 가정하는 것으로 기포류 혹은 안개류 등의 두 가지 상이 충분히 혼합하는 경우에 적용 가능하다. 그러나 2상유동 요동이 발생할 경우 기상/액상의 유동양식은 기포류-슬러그류-환상류로 발전, 반복되며 상사이의 속도차를 무시할 수 없으므로 드리프트 플럭스 모델이 사용되었다.

비등유로의 2상유동에 대한 해석은 다음의 가치하에 수행되었다.

- 1) 유체의 물성치와 열유속은 유동방향으로만 변화한다.(일차원 유동)
 - 2) 2상사이에는 미끄럼이 존재한다.
 - 3) 2상은 서로 열역학적 평형을 이루고 있다.
- 그러므로 가열유로 내의 2상유동 특성은 질량, 운동량, 에너지보존식으로 부터 해석된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g - \frac{f}{2d} \rho |u|u - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\alpha \rho_g \rho_l}{(1-\alpha)\rho} u_w^2 \right] \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_i) = \frac{q''_i \xi_i}{A} - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\alpha \rho_g \rho_l}{\rho} i_{rg} u_w \right] \tag{3}$$

드리프트 플럭스모델을 사용하면 보존식의 각 항들은 다음과 같이 표현된다.

$$\rho = (1-\alpha)\rho_l + \alpha\rho_g \tag{4.1}$$

$$G = \rho u = (1-\alpha)\rho_l u_l + \alpha\rho_g u_g \tag{4.2}$$

$$\rho u^2 = G^2 \left\{ \frac{(1-x)^2}{\rho_l(1-\alpha)} + \frac{x^2}{\rho_g \alpha} \right\} \tag{4.3}$$

$$\rho_i = (1-\alpha)\rho_l i_l + \alpha\rho_g i_g \tag{4.4}$$

$$\rho u_i = (1-\alpha)\rho_l u_{li} + \alpha\rho_g u_{gi} \tag{4.5}$$

여기서 u 는 속도, G 는 질량속도, d 는 유로직경, f 는 2상 마찰계수, u_w 는 드리프트 속도, i 는 엔탈피이며, q''_i 는 열유속이다. α 는 기공률, ρ 는 밀도, 그리고 ξ_i 는 원주길이를 나타낸다. 그리고 하첨자 l 와 g 는 액상과 기상을 의미한다. 드리프트 플럭스 모델에서 건도와 기상의 속도는 다음과 주어지며

$$x = \frac{\alpha \rho_g u_g}{\alpha \rho_g u_g + (1-\alpha)\rho_l u_l} \tag{5}$$

$$u_g = C_j + u_w \tag{6}$$

유동분포함수와 드리프트속도는 유동양식의 종류에 따라 결정되나 일반적으로 모든 2상유동양식에 적용할 수 있는 값은 다음과 같다.¹¹⁾

$$C_o = 1.13 \tag{7}$$

$$u_w = 1.41 \left[\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_g)}{\rho_f^2} \right]^{1/4} \tag{8}$$

질량, 운동량, 그리고 에너지방정식의 해석을 위하여 구속 조건이 필요하며 이들은 열역학적 상태량간의 관계, 마찰특성 및 열전달특성을 규명하는 실험적인 관계식이다.

2상유동의 유로에서 발생하는 압력강하는 액상-단상유동의 경우를 기준으로 하여 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{fric,TP} = \frac{f_{fo}}{d_{11}} \phi_{fo}^2 \frac{G^2}{2\rho_f} = \left(\frac{dp}{dz} \right)_{fric,fo} \phi_{fo}^2 \tag{9}$$

여기서 총유량이 액상유동으로 주어질 때 마찰계수는 총류유동의 경우에

$$f_{fo} = 64/Re_{fo} \tag{10.1}$$

를, 난류유동의 경우에

$$f_{fo} = 0.316 Re_{fo}^{-0.25} \tag{10.2}$$

를 사용할 수 있다.

2상마찰배수는 다음과 같이 주어지며

$$\phi_{fo}^2 = \phi_j^2(1-x) \frac{f_l}{f_g} \quad (11)$$

액상만의 유동에 대한 2상마찰계수는 Lockhart-Martinelli가 제시한 다음 식으로 계산하였다.¹²⁾

$$\phi_j^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (12)$$

여기서 Martinelli 매개변수는

$$X = \left[\frac{(dp/dz)_l}{(dp/dz)_g} \right]^{1/2} \quad (13)$$

이고 상수 C는 액상/기상의 유동영역에 따라 결정되는 실험상수로써 액상과 기상의 유동이 난류 유동일 때 20이다.

비등유로의 가열부 벽면에서 유체로의 열전달율은

$$q\# = hA(T_w - T_f) \quad (14)$$

이며 h는 열전달계수, A는 가열부 표면적, T_w는 가열부 벽면의 온도, T_f는 유체의 체적온도이다.

2상유동의 경우 열전달특성은 2상유동 양식의 함수이며 2상유동 양식은 유량, 전열량, 압력등에 따라 크게 변하므로 열전달계수를 하나의 식으로 표현하기는 어렵다. Kakac등⁸⁾은 과도비등시의 열전달계수를 정상상태에서의 질량유속과 열전달계수, 과도비등시의 순간 질량유속과 실험상수를 사용한 가중평균치로 산정하였다. 그러나 이는 질량유속의 요동에 의해 야기되는 비등유로의 드라이아웃 및 재적심의 열유속을 충분히 제시할 수 없는 단점이 있다. 정확한 열전달계수와 작업유체로의 열유속의 계산은 압력강하요동 특성의 해석에 필수적이다. 각 유동양식에 따라 열전달계수를 표현하는 실험식들이 많이 있으나 본 연구에서는 국소 2상유동 열전달계수로 Chen이 제시한 다음 식을 사용하였다.¹³⁾

$$h_{TP} = h_{nb} + h_c \quad (15)$$

여기서

$$h_{nb} = 0.00122 \left[\frac{k_f^{0.79} C_{sf}^{0.45} \rho_f^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_f^{0.29} \nu_{fg}^{0.24} \rho_g^{0.24}} \right] \Delta T_{sat}^{0.24} A p_{sat}^{0.75} (S) \quad (16)$$

$$h_c = 0.023 Re_p^{0.8} Pr_f^{0.4} \frac{k_f}{d} (F) \quad (17)$$

이고 억제계수 S와 레이놀즈계수 F는 Martinelli 변수와 2상레이놀즈수 Re_{TP}의 함수로 다음과 같이 상관될 수 있다.¹⁴⁾

$$F = 1.0, \frac{1}{X_u} \leq 0.1 \quad (18.1)$$

$$F = 2.35 \left(\frac{1}{X_u} + 0.213 \right)^{0.736}, \frac{1}{X_u} > 0.1 \quad (18.2)$$

$$S = (1.0 + 2.53 \times 10^{-6} Re_{TP}^{1.17})^{-1} \quad (19)$$

$$Re_{TP} = \frac{G(1-x)d}{\mu} F^{1.25} \quad (20)$$

2.2 2상유로의 압력강하 요동에 대한 해석

작업유체의 비등과정중 발생하는 압력강하요동의 수치적해석을 위한 비등계의 개념도가 Fig.1에 주어져 있으며 이는 주탱크, 완충탱크, 그리고 비등유로로 구성되어 있다. 주탱크와 완충탱크사이에는 유체공급부의 압력강하 특성을 대변하는 유동저항이 설치되어 있으며 비등유로의 출구에는 출구제한이 설치되어 있다. 출구제한의 하류는 대기압으로 개방되어 있으며 출구제한 입구에서의 유량 및 건도에 의해 출구제한에서의 압력강하가 결정된다. 정상상태에서 유체공급부와 비등유로의 유량은 동일하며 이는 유체공급부와 비등유로의 압력강하 특성곡선의 교점으로 지정되고 이에 따라 완충탱크의 압력도 결정된다.

압력강하요동은 주탱크의 압력이 일정할 때 유체공급부의 완충탱크 압력-유량 곡선의 음의 기울기영역에서, 유체공급부의 압력구배와 비등유로의 압력구배가 다음의 조건을 만족할 때 발생한다.

$$\left| \frac{dp_s}{dm} \right|_{supply} > \left| \frac{dp_s}{dm} \right|_{boil} \quad (21)$$

기본적으로 완충탱크에 대한 유입 및 유출유량의

차이에 의해 완충탱크의 압력변동이 발생하며 이는 다시 비등유로의 유량변동을 유도하여 압력강하요동은 반복적으로 지속된다. 이때 비등유로의 유량변동은 2상유동양식의 변화와 이에 의한 열전달계수 및 마찰계수의 변화로 이어지므로 요동은 극히 비선형적인 특성을 나타낸다. 결국 압력강하요동은 유체공급부 유동특성, 비등유로부의 유동특성, 완충탱크의 동특성, 그리고 비등유로의 가열부 벽의 에너지평형식에 의해 그 요동의 주기 및 진폭이 결정된다.

압력강하요동을 직접적으로 야기하는 완충탱크는 열역학적 평형을 이룬 액상과 기상이 탱크의 하부와 상부에 각각 존재하고 있으며 기상의 압축성에 의해 압력변화를 일으킨다. 완충탱크 압력의 변화율은 유체공급부로부터 유입하는 유량(Q_i), 비등유로로 유출하는 유량(Q_o)에 의해 결정된다. 압축성기상을 이상기체로 가정하면 완충탱크 압력의 과도적 응답특성은

$$\frac{dp_s}{dt} = \frac{p_s^2}{(p_{so} V_{so})} (Q_i - Q_o) \quad (22)$$

이고 여기서 p_s 는 완충탱크의 압력, p_{so} 는 완충탱크내 기상의 정상상태 압력, V_{so} 는 완충탱크내 기상의 정상상태 체적이다.

외부 에너지원으로부터 가열부에 공급되는 열전달율은 항상 일정하지만 가열부를 통해 실질적으로 유체에 공급되는 열전달율은 가열부의 열관성의 영향으로 유체의 유동속도나 온도, 가열부 벽면의 온도등에 따라 변화할 수 있다. 가열부 벽면의 평균온도변화는 다음과 같다.

$$m_w c_w \frac{dT_w}{dt} = q - hA(T_w - T_f) \quad (23)$$

여기서 q 는 외부 열입력, m_w 는 가열부의 질량, 그리고 c_w 는 가열부의 비열이다.

압력강하 요동의 주기는 가열부에 대한 유체의 통과시간에 비해 상대적으로 훨씬 크다. 그러므로 요동상태에서의 유동특성이 정상상태의 압력강하 특성 곡선상의 작동점에 대응한다고 생각하는 준정상상태 모델이 적용될 수 있다. 그러므로 완충탱크에 유입되는 유체의 유량은

$$p_m - p_s = K Q_i^2 + \frac{\rho L_i}{A_i} \frac{dQ_i}{dt} \quad (24)$$

로 주어지고, 여기서 p_m 은 주탱크의 압력, L_i 는 주탱크와 완충탱크 사이의 유로길이이며 K 은 유체공급부의 부가손실계수이다. 그리고 완충탱크로부터 비등유로로 배출되는 유체의 유량은

$$p_s - p_x = (p_s - p_x)_o + \frac{\rho L_o}{A_o} \frac{dQ_o}{dt} \quad (25)$$

로 유도되며, 여기서 L_o 는 완충탱크와 출구제한사이의 관의 길이이며 $(p_s - p_x)_o$ 는 주어진 유량에서 정상상태의 비등유로에서 발생하는 압력강하이다. 압력강하 요동의 경우 그 주기가 상대적으로 길기 때문에 정상상태의 압력강하가 적용될 수 있다.

비등유로에서 발생하는 압력강하의 대부분은 출구제한에서 발생하며 이는 기상/액상의 유동시 유량과 건도에 의해 그 크기가 결정된다. 본 연구에서는 출구제한에서의 2상마찰배수에 대하여 실험으로부터 도출된 다음의 근사식을 사용하였다.¹⁰⁾

$$\phi_o^2 = 1.0 + 74.8x + 89.5x^2 - 67.5x^3 \quad (26)$$

정상상태의 유동에서 초기 외부 교란을 주는 방법은 여러가지가 있지만 본 수치적 해석에서는 완충탱크의 압력에 미소 교란을 줌으로써 압력강

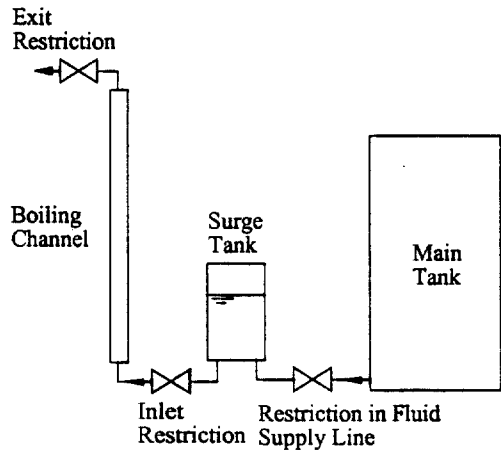


Fig.1 Schematic diagram of boiling apparatus for PDO analysis

하요동을 유도하였다.

2.3 압력강하 요동의 수치 해법

Fig.1로 주어진 비등계의 2상유동요동은 비등유로 전체를 하나의 검사체적으로 취하는 집중용량법에 의하여 해석하였다. 가열부에 대한 집중용량법은 수치해석의 단순화를 위하여 사용하였으며 이에 따른 해석결과는 유로를 유한차분화하는 경우의 해석과정의 수치적 요동과 복잡성을 고려할 때 상대적으로 우수한 방법이다. 압력강하 요동에 대한 수치해법으로 식 (22)-(25)의 과도항을 전진차분법에 의하여 근사화 하였다. 압력강하 요동의 실험¹⁰⁾과 같이 주탱크의 압력이 일정하고 비등유로 출구의 압력은 대기압으로 일정하므로 주어진 경계 조건에 대하여 정상상태에서 비등유로의 질량유량을 계산하기 위하여 시행착오에 의한 반복법이

사용되었다. 과도해석의 시간증분은 작업유체의 비등유로내 통과시간중 최소치를 임계치로 하였으나 2상유동의 경우 해의 수치적요동이 심하므로 충분히 작게 취하였다.

3. 결과 및 고찰

비등유로의 압력강하요동을 해석하기 위한 비등계의 기하학적 조건이나 운전조건은 Table 1과 같다.¹⁰⁾

3.1 비등유로의 압력강하특성

비등유로의 압력강하는 가열비등부의 압력강하와 출구제한의 압력강하의 합으로 주어진다. 비등부에서 발생하는 압력강하는 마찰, 가속, 그리고 중력에 의한 압력강하의 합으로 표시된다. 비등유

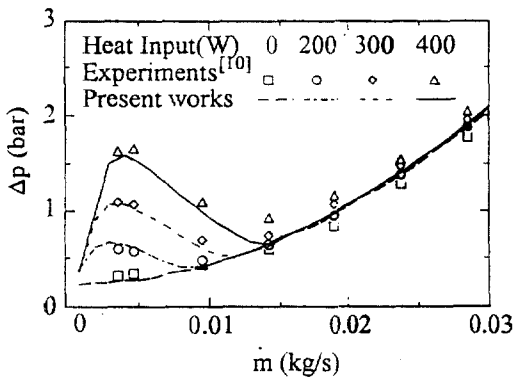


Fig.2 Pressure-drop of a boiling channel at various heat input($T_1=303K$)

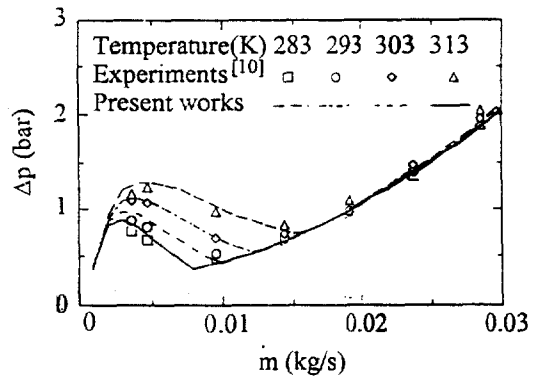


Fig.3 Pressure-drop of a boiling channel at various fluid inlet temperatures($Q=300W$)

Table 1 Data for PDO analysis

Parameters	Base-line Values	Ranges
Working Fluid	R113	
Main Tank Pressure(bar)	4.0	
Surge Tank Volume(m^3)	0.002	
Tube Inner Diameter(m)	0.0075	
Tube Wall Thickness(m)	0.0012	
Boiling Channel Length(m)	0.7	
Compressible Volume(m^3)	0.0013	0.0007-0.002
Heat Input(W)	300	250-450
Fluid Inlet Temperature(K)	300	283-308
Loss Coef. in Fluid Supply Line	28400	12500-35000

로의 압력강하-유량의 특성곡선이 가열부에 대한 열입력과 유입 유체온도의 함수로 Fig.2와 Fig.3에 주어져 있다.

유량이 클 때 시험부의 압력강하는 양의 기울기를 가지며 압력강하는 유량의 자승에 비례하여 증가함을 볼 수 있다. 이 영역은 작업유체의 상변화 즉 비등이 발생하지 않는 액상유동영역이다. 액상유동영역보다 낮은 유량의 범위에서 압력강하는 음의 기울기를 가지며 이 때 작업유체는 액상과 기상의 2상혼합물로 유동한다. 주어진 열유속에 대하여 유량이 감소하면 건분은 증가하므로 압력강하는 증가한다. 2상영역의 왼쪽부분은 가열관하류에서 작업유체의 상태가 과열기체의 상태인 단상기체영역이다.

Fig.2는 시험부 입구유체의 온도가 303K일 때 열입력이 0인 단상유동의 경우로부터 열입력이 400 W에 이르기 까지 가열부에 대한 열입력이 비등유로의 압력강하에 미치는 영향을 보여주고 있다. 열입력과 함께 가열부 출구의 건도가 증가하고 출구제한에서의 압력강하도 증가하므로 열입력의 증가에 따라 시험부의 음압력구배영역이 크게 형성됨을 알 수 있다.

Fig.3은 열입력이 300W로 일정할 때 가열부에 유입하는 작업유체의 온도가 비등유로의 압력강하에 미치는 영향을 나타내고 있다. 2상유동영역의 압력구배가 유입온도의 증가에 따라 완만해지는 것을 볼 수 있다. 유량이 클 경우 모든 곡선들이 하나의 곡선으로 수렴하며 이는 작업유체의 온도가 밀도에 영향을 미치나 그 영향이 작음을 보여주고 있다. 비등유로의 압력강하에 대한 수치해석의 결과가 실험의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

3.2 비등유로의 압력강하요동

기본적으로 완충탱크에 대한 유입 및 유출유량의 차이에 의해 완충탱크의 압력변동이 발생하며 이는 다시 비등유로의 유량변동을 유도하여 압력강하요동은 반복적으로 지속된다. 이 때 비등유로의 유량변동은 2상유동양식의 변화와 이에 의한 열전달계수 및 마찰계수의 변화로 이어지므로 요동은 극히 비선형적인 특성을 나타낸다.

실험의 경우 압력강하 요동의 불안정성영역에서 비등유로에 대한 열입력을 설정치까지 증가시키는

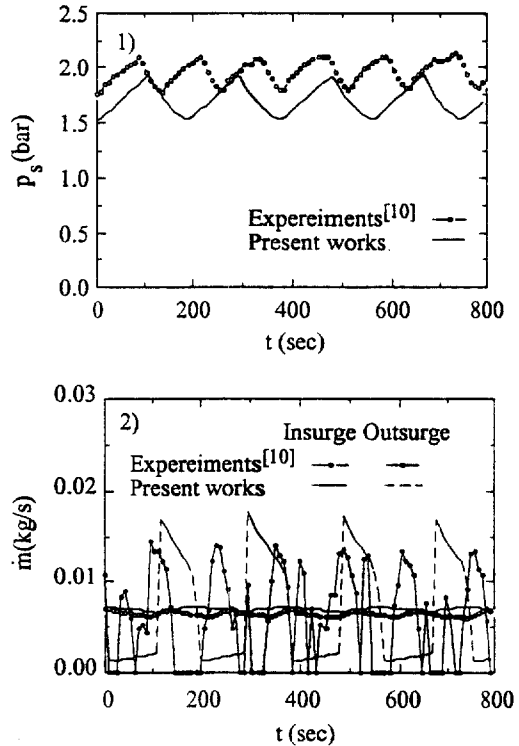


Fig.4 Typical oscillatory characteristics of pressure-drop oscillation :
1) Surge tank pressure ; 2) Insurge and outsurge flowrate

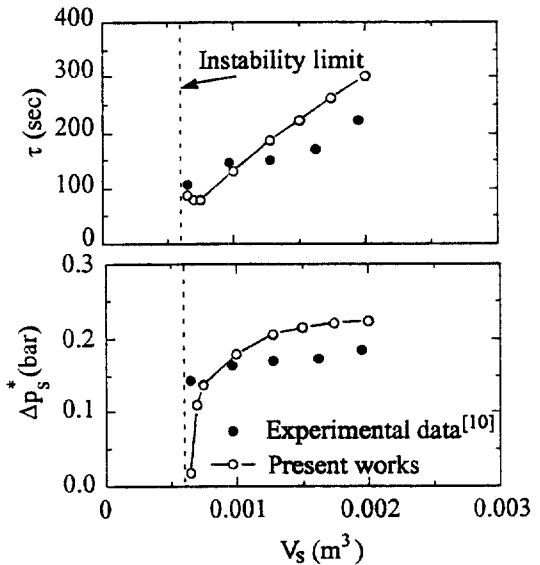


Fig.5 Effects of compressible volume in surge tank on pressure-drop oscillation

과정중에 완충탱크의 압력의 요동과 비등유로에 대한 유량의 요동이 자발적으로 발생하였으나 본 수치적 해석에서는 완충탱크의 절대압력의 0.01%에 해당하는 미소 변동을 정상상태의 완충탱크에 강제적으로 부가하여 압력강하요동을 유도하였다. 이에 따라 완충탱크의 압력이나 비등유로의 유량이 서서히 변동하기 시작하여 일정시간이 경과하면 초기 및 경계조건에 따라 특정 크기의 주기 및 진폭을 가진 요동특성을 나타내게 된다.

Fig.4에 기준조건하에서 발생한 압력강하요동의 전형적인 요동특성이 실험결과와 함께 주어져 있다. Fig.4-1과 같이 완충탱크의 압력변동과 함께 요동이 시작되었으며 그 진폭과 주기는 거의 일정하게 유지되면서 주기적인 변동이 계속되었다. Fig.4-2는 완충탱크에 유입, 유출하는 유량을 제시하고 있다. 유입유량은 유체공급부의 높은 손실계수에 의해 완충탱크의 압력변동에도 불구하고 그 요동이 미약하나 비등유로로의 유출유량은 크게 요동하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 유입유량과 유출유량의 차이가 완충탱크의 압력변동을 지속적으로 반복시키는 요인이다. 시험부에 유입되는 유량의 변동에 따라 유동양식의 변화가 반복적으로 발생하고 이에 따른 열전달계수의 변화는 가열벽온도의 변동을

야기하게 된다.

Fig.5에 완충탱크의 압축성체적이 압력강하요동의 주기 및 완충탱크의 압력요동의 진폭에 미치는 영향이 주어져 있다. 압축성 체적이 증가함에 따라 요동주기 및 진폭이 증가하고 있다. 이는 압축성체적의 압력변화율이 체적에 반비례하기 때문이다.

열입력이 증가하면 요동의 주기와 진폭은 Fig.6과 같이 급격히 증가한다. 열입력의 증가로 가열부의 증기생성량이 높아지고 이에 따라 출구제한에서의 압력강하는 크게 증가하므로 유량 및 완충탱크 압력의 요동 진폭은 심각할 정도로 크다. 그러나 시험부에서의 비등과정이 충분히 발달하지 못한 열입력이 200W이하에서는 요동은 발생하지 않았다. 열입력이나 압축성체적의 압력강하요동에 대한 수치해석의 결과는 실험자료¹⁰⁾와 잘 일치하며 Vezirglu 등⁹⁾이 제시한 결과와도 일치하고 있다.

Fig.7에 유체공급부의 손실계수의 영향이 주어져 있다. 부가손실계수가 높아지면 정상상태에서의 유량은 감소한다. 압력강하요동의 요동주기는 부가손실계수에 따라 증가하나 그 증가율은 다른 변수에 비해 상대적으로 미약하다. 부가손실계수가 증가할 때 압력강하요동의 요동진폭도 작으나마 증가하였다. 특히 요동주기의 경우 실험자료의 분

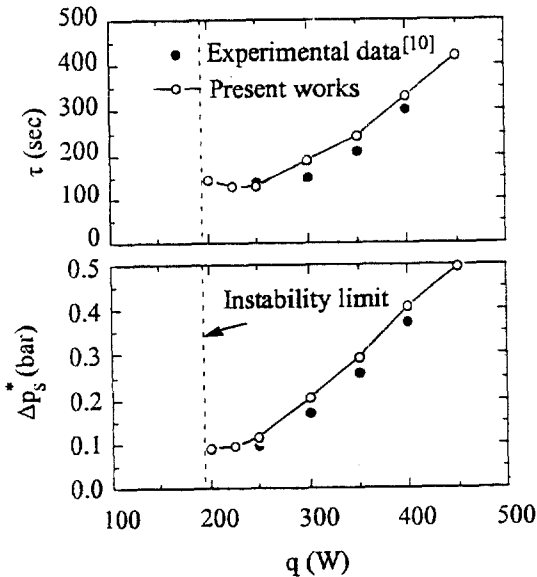


Fig.6 Effects of heat input on pressure-drop oscillation

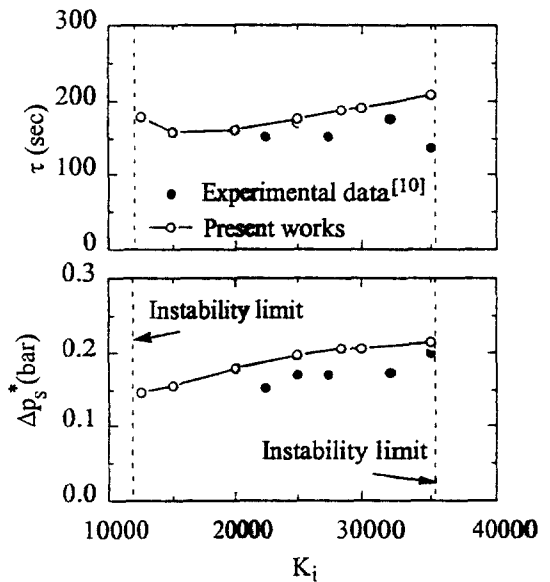


Fig.7 Effects of loss coefficient in fluid supply line on pressure-drop oscillation

산으로 수치해석의 정량적인 신뢰성을 확인하기는 어려우나 정성적인 특성은 동일한 것으로 고려된다.

본 수치해석의 결과는 실험의 경우와 마찬가지로 Kakac 등¹⁰⁾이 제시한 연구결과와 상이성을 보여주고 있다. Kakac등은 압력강하-유량 곡선상의 초기유량이 증가하면 즉 유체공급부의 손실계수가 감소하면 요동주기는 증가하는 것으로 보고하였다. Kakac등은 열유속과 작동유체의 입구아냉도를 중심으로 경계조건들의 상호작용의 영향을 실험과 수치적해석을 통하여 해석하였으나 유체공급부의 부가손실의 영향에 대한 체계적인 결과는 제시하고 있지 않으므로 본 연구의 결과와 비교하여 그 차이를 분석하는 것은 쉽지 않다. 압력강하요동에 대한 부가손실계수의 영향이 상대적으로 미약함을 고려할 때 수치적모델에서 사용한 비등유로에서의 열전달계수에 대한 상관식의 차이가 부분적으로는 그 원인중의 하나가 될 수 있을 것으로 판단된다. 기본적으로 유체공급부의 부가손실계수가 감소하면 완충탱크의 압력변동에 대한 주탱크로부터 완충탱크내로의 유입유량이 신속하게 변화할 것이므로 압력강하 불안정성의 요동주기 및 진폭은 감소할 것으로 이해된다.

작업유체의 온도는 일정범위의 불안정성 한계내

에서 급격한 변화를 나타내고 있다. 작업유체의 온도가 압력강하요동에 미치는 영향이 Fig.8에 주어져 있다. 작업유체의 아냉도가 아주 클 때 가열부에서의 증기생성량이 상대적으로 작으므로 압력강하요동은 발생하지 않았다. 일단 작업유체의 온도가 하한 불안정성 한계에 도달하여 요동이 형성되면 요동진폭과 주기는 최대치로 발달하였다. 작업유체 온도의 증가로 아냉도가 감소하면 비등과정에 의한 증기생성율이 증가하여 Fig.3에서와 같이 질량유량의 변화에 대한 비등유로의 압력강하변동이 상대적으로 감소하므로 요동특성은 소멸하게 된다. 이 영역에서 압력강하요동의 주기는 작업유체의 온도에 대해 거의 선형적으로 감소하나 요동진폭은 상한 불안정성 한계에서 급격히 감소함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 2상유동계에서 일반적으로 발생하는 압력강하요동의 특성을 수치적으로 해석하고 실험결과와 비교, 분석하였다. 본 수치해석의 범위에서 수치해석의 결과는 실험자료와 잘 일치하였다. 가열유로에 대한 열입력, 압축성체적, 유체온도, 유체공급부의 완충탱크에 대한 초기유량등의 초기 및 경계조건들이 압력강하요동의 요동크기 및 주기에 미치는 영향은 다음과 같다.

- 1) 압력강하요동의 요동주기 및 진폭은 완충탱크의 압축성체적이 증가할수록, 열입력이 높을수록 증가한다.
- 2) 작업유체의 온도가 증가할 때 압력강하요동의 요동주기는 거의 선형적으로 감소하나 진폭은 상한 불안정성 한계에서 급격히 감소한다.
- 3) 유체공급부의 손실계수가 증가하면 요동주기와 진폭은 증가하나 그 변화율은 다른 변수에 비해 상대적으로 작다.

후 기

본 연구는 홍익대학교 교내연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 관계자 여러분에게 감사드립니다.

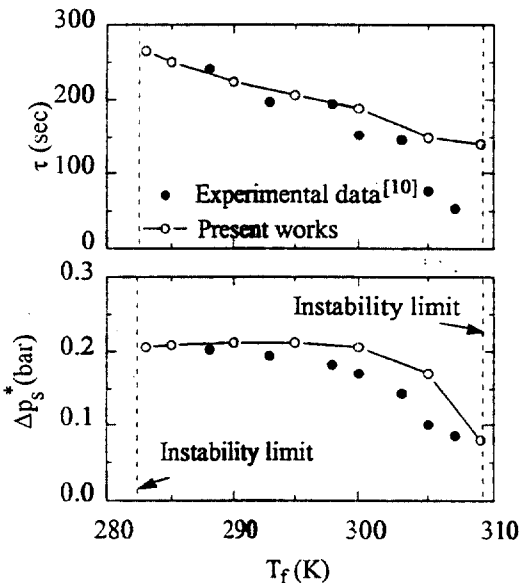


Fig.8 Effects of fluid temperature on pressure-drop oscillation

참 고 문 헌

1. Murphy, R.W., Bergles, A.E., 1971, "Subcooled flow boiling of fluocarbons", MIT Engineering Projects Lab. Report 71903-72.
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. Tong, L.S., 1968, "Boundary-layer analysis of the flow boiling crisis", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.11, pp.1208-1211.
4. Daleas, R.S., Bergles, A.E., 1965, "Effect of upstream compressibility on subcooled critical heat flux", ASME Paper No.65-HT-67.
5. 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.
6. Yadigaroglu, G., 1978, "Two-phase flow distributions and propagation phenomena", von Karman Institute for Fluid Dynamics, Lecture Series, 1978-5
7. Akyuzlu, K.M., Dogan, T., Veziroglu, T.N., 1984, "Effect of inlet subcooling on dynamic instabilities in two-phase upflow systems", HTD-Vol.34, Basic Aspects of Two Phase Flow and Heat Transfer, ASME
8. Kakac, S., Veziroglu, T.N., Fu, L.Q., Chen, X.J., Padki, M.M., 1988, "Two-phase flow thermal instabilities in a vertical boiling channel", FED-Vol. 72, Fundamentals of Gas-Liquid Flows, ASME
9. Veziroglu, T.N., Kakac, S., 1988, "Two phase flow thermal instabilities in a single channel system", NSF Project CBT-86-12282, CERL, University of Florida
10. 김병주, 신광섭, 1993, "비등유로의 압력강하 불안정성에 대한 실험적 고찰", 공기조화 냉동 공학 논문집, 제5권 제3호, pp.179-186.
11. Ishii, M., 1977, "One dimensional drift flux model and constitutive equations for relative motion between phases in various two-phase flow regimes", ANL-77-47.
12. Lockhart, L.W., Martinelli, R.C., 1949, "Proposed correlation of data for isothermal two-phase two-component flow in pipes", Chemical Engineering Progress, Vol.45, No.39
13. Chen, J.C., 1963, "A correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow", ASME reprints 63-HT-34, presented at 6th National Heat Transfer Conference, Boston.
14. Bergles, A.E., Collier, J.G., Delhaye, J.M., Hewitt, G.F., Mayinger, F., 1981, Convective boiling in two-phase flow and heat transfer in the power and process industries, McGraw-Hill, P.250.