

〈論 文〉

## 2상 자연순환 회로내 유동의 정적 불안정

이 동 원\* · 이 상 용\*\*

(1989년 11월 30일 접수)

### Static Instability in a Two-Phase Natural Circulation Loop

Dong Won Lee and Sang Yong Lee

**Key Words:** Two Phase Flow(2상 유동), Natural Circulation(자연 순환), Static Instability  
(정적 불안정)

#### Abstract

A simple, one-dimensional analytical model was introduced to describe the flow phenomena in a closed two-phase natural circulation loop. Homogeneous flow model was used for the two-phase region, and the time-averaged balance equation was derived. Effects of the subcooling and the valve friction resistances on the circulation rate were examined to find out the conditions of the flow instability. Flow becomes unstable with the increases of the subcooling and the friction resistance in the two-phase region or with the decrease of the friction resistance in the liquid region. Those trends were confirmed by a simpler model with the assumption of point-heat-source/sink, and the static(excursive) instability maps were also provided.

기 호 설 명			
$A$	: 회로의 단면적	$x$	: 건도
$a, b, c, d$	: 회로의 각 부분 길이	$z$	: 축방향 좌표
$C_p$	: 액체의 정압비열	$\zeta$	: 관의 원주방향 길이
$D$	: 관의 직경	$\Lambda_2, \Lambda_5$	: 비등 및 응축경계
$f$	: 관 마찰계수	$\mu$	: 점성 계수
$g$	: 중력가속도	$\rho$	: 밀도
$i, \Delta i_{sub}$	: 엔탈피, 가열기 입구에서의 과냉 엔탈피	$\tau_{23}, \tau_{45}$	: 가열 및 냉각 2상 영역에서의 체류시간
$K$	: 밸브의 마찰계수	$\Omega$	: 반응 진동수 (reaction frequency)
$L, l$	: 회로의 각 부분 길이	첨 자	
$P, \Delta P$	: 압력, 압력 강하	$B$	: 부력
$\dot{q}, \dot{Q}$	: 열유속, 열량	$c$	: 냉각
$T, \Delta T_{sub}$	: 온도, 가열기 입구에서의 과냉 온도	$f$	: 포화상태의 액상
$u$	: 속도	$F$	: 마찰력
$v$	: 비체적	$fg$	: 포화상태에서 기상과 액상의 차이
		$g$	: 포화상태의 기상
		$h$	: 가열

\*정회원, 한국동력자원연구소

\*\*정회원, 한국과학기술원 기계공학과

- $l$  : 액상 영역
- $t$  : 2상 영역
- $tc$  : 냉각 2상 영역
- $th$  : 가열 2상 영역

1. 서 론

유체의 액상과 기상간의 밀도차를 구동력으로 에너지 효율적으로 전달하는 2상 자연순환 회로의 개념은, 열-사이클 reboiler, 태양열 집열기, 개스터빈의 냉각 시스템 등에 널리 적용되고 있다. 그러나 이러한 2상 유동 시스템에서는 수력학적인 불안정성이 기본적으로 존재하며, 이것은 국부적인 열전달 특성을 변화시키거나 기계적인 진동을 일으키므로써, 시스템의 원활한 작동 및 운전애 좋지 않은 영향을 미치게 된다.

2상 유동의 불안정은 크게 정적 불안정(static instability)과 동적 불안정(dynamic instability)으로 나눌 수 있다. 정적 불안정은 미소한 변화에 의하여 한 정상(평형)상태에서 전혀 다른 정상(평형)상태로 유동 조건이 바뀌는 현상으로, excursive (Ledinegg)불안정, 유동양식의 변화에 의한 불안정, 그리고 기포핵 생성(nucleation)에 의한 불안정 등이 여기에 속한다. 반면에 동적 불안정은 관성이나 피드백(feedback)효과 등으로 인해 유량이나 압력이 정상 작동상태를 기준으로 주기성을 가지고 변동하는 현상을 말하며<sup>(1)</sup>, 여기에는 밀도파 진동(density wave oscillations), 압력강하 진동(pressure-drop oscillations), 음향학적 불안정, 응축에 기인하는 불안정(condensation-induced instabilities) 등이 포함된다. 이러한 불안정 현상들은 그 중요성 때문에 시스템의 전열성능 평가 못지 않게 여러 연구<sup>(2-5)</sup>가 수행되어 왔다.

이와 같은 2상 유동의 정적 불안정중에서 자연순환 회로에서 가장 문제가 되는 것은 작은 교란에 의해 유량이 급격히 줄어드는 excursive 불안정이다. 유량의 급격한 감소는 회로내의 국부적인 온도 상승을 유발하므로써, 적은 열량이 가해져도 임계 열유속(CHF)에 도달하거나 번아웃(burnout)을 발생시키기도 한다<sup>(6)</sup>. 이러한 정적 불안정의 해석을 위한 2상 자연순환 회로내의 정상상태 유동에 대한 최근의 연구로는, 회로를 액상과 기상의 두 영역으로 구분한 Ramos등<sup>(7)</sup>의 연구와, 여기서 발전하여 회로에 2상 유동 영역을 포함시킨 Chen과

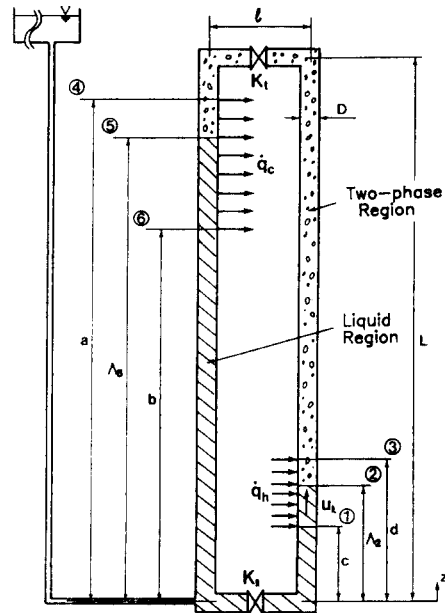


Fig. 1 Analytical model of the two-phase natural circulation

Chang<sup>(8)</sup>의 연구 등이 있다. 그러나 이들이 이용한 회로의 모델은 과냉 현상을 고려하지 않고 액상과 기상을 모두 포화 상태로 가정한 경우로써, 회로 단면적이 일정한 경우 가열정도에 따른 유량에 관한 정상해가 1개 만이 존재하게 되어 정적 불안정의 가능성을 배제하고 있다.

본 연구의 목적은 Fig. 1과 같은 2상 자연순환 회로의 1차원 해석을 수행하고, 액상의 과냉정도와 각 상 영역에서의 밸브 마찰저항이 순환유속에 미치는 영향을 살펴해보므로써 정적 불안정의 조건을 알아보는데 있다. 본 모델에서는 유한 길이를 갖는 증발기와 응축기를 고려하였으며, 정적 불안정의 가능성을 해석적으로 보여주기 위해 간단한 모델(point-heat-source/sink)도 함께 다루었다.

2. 이론 해석

해석을 위한 회로는 동일 단면을 갖고 있으며, Fig. 1과 같이 가열 액상(①-②), 가열 2상(②-③), 단열 2상(③-④), 냉각 2상(④-⑤), 냉각 액상(⑤-⑥), 그리고 단열 액상(⑥-①) 등 6개의 유동 영역으로 나누었다. 유동은 1차원 정상상태이며 2상 유동 영역에서는 가장 단순한 균질유동 모델

(homogeneous flow model)을 가정하였고, 회로 내의 압력을 일정하게 유지시키기 위해 회로의 아랫 부분과 수조를 연결시켰다. 단순화를 위하여 회로 내의 높이에 따른 압력변화는 없다고 가정하였으며 비평형(non-equilibrium)은 고려하지 않았다. 따라서 유체의 물성치는 일정하고 2상 유동 영역의 밀도는 엔탈피에만 의존하게 된다. 또한 순환회로 내의 마찰저항을 조절하기 위한 밸브를 각 상 영역에 설치하여, 마찰저항이 유동에 미치는 영향을 살펴 볼 수 있도록 하였다.

각 유동 영역에서 1차원 정상상태의 연속, 운동량, 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\rho u = \text{constant} \quad (1)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial z} = \rho u \frac{\partial u}{\partial z} + \rho g + \frac{f}{2D} \rho u^2 \quad (2)$$

$$u \frac{di}{dz} = \frac{\dot{q}\zeta}{\rho A} \quad (3)$$

여기서  $\rho$ ,  $u$ ,  $P$ ,  $i$ ,  $\dot{q}$  및  $f$ 는 각각 밀도, 속도, 압력, 엔탈피, 열유속 그리고 관 마찰저항 계수를 의미한다. 또한 에너지 방정식[식 (3)]의  $\dot{q}$ 는 단열 영역에서는 0, 냉각 영역에서는  $-\dot{q}_c$ , 그리고 가열 영역에서는  $\dot{q}_h$ 이다. 이와함께 2상 영역에서 밀도와 엔탈피 사이의 관계를 나타내기 위해서는 다음과 같은 상태 방정식이 필요하다.

$$v_t = v_f + \frac{v_{fg}}{i_{fg}}(i_t - i_f) \quad (4)$$

식 (1)과 (3)으로부터 가열 또는 냉각 2상 영역에서의 유속은 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$u_{th} = u_t + Q_h(z - L_2) \quad (5)$$

$$u_{tc} = u_t - Q_c(z - 2L - l + a) \quad (6)$$

여기서  $Q_h$ 와  $Q_c$ 는

$$Q_h = -\frac{1}{\rho_{th}^2} \frac{d\rho_{th}}{di_{th}} \frac{\dot{q}_h \zeta}{A} \quad (7)$$

$$Q_c = -\frac{1}{\rho_{tc}^2} \frac{d\rho_{tc}}{di_{tc}} \frac{\dot{q}_c \zeta}{A} \quad (8)$$

와 같으며 동적 불안정 현상 해석에서는 이들을 반응 진동수(reaction frequency)<sup>(9)</sup>라고도 부른다.

단열 액상 및 2상 영역에서 회로 마찰저항 밸브를 통한 압력 강하는

$$\Delta P_{k,t} = \frac{1}{2} K_t \rho_t u_t^2 \quad (9)$$

$$\Delta P_{k,t} = \frac{1}{2} K_t \rho_t u_t^2 \quad (10)$$

이고, 액상 영역에서의 관 마찰저항 계수  $f$ 는 다음의 관계식들을 사용하였으며,

$$f = \begin{cases} 64 \left\{ \frac{\rho_t u_t D}{\mu_t} \right\}^{-1} & (\text{층류}) \\ 0.316 \left\{ \frac{\rho_t u_t D}{\mu_t} \right\}^{-0.25} & (\text{난류}) \end{cases} \quad (11)$$

$$f = \begin{cases} 64 \left\{ \frac{\rho_t u_t D}{\mu_t} \right\}^{-1} & (\text{층류}) \\ 0.316 \left\{ \frac{\rho_t u_t D}{\mu_t} \right\}^{-0.25} & (\text{난류}) \end{cases} \quad (12)$$

여기서 식 (12)는 잘 알려진 Blasius의 관계식<sup>(10)</sup>이다. 2상 유동 영역에서도 같은 식들을 적용하되 액체의 점성계수  $\mu_t$  대신 다음과 같은 McAdams 관계식<sup>(10)</sup>

$$\frac{1}{\mu_t} = \frac{x}{\mu_g} + \frac{1-x}{\mu_l} \quad (13)$$

으로부터 구한 2상 점성계수  $\mu_t$ 를 사용하고 전도  $x$ 는 다음 식을 이용하였다.

$$\dot{Q} = \rho_l A u_l \cdot (\Delta i_{sub} + x \cdot i_{fg}) \quad (14)$$

이상의 가정과 관계식들을 이용하여 각 유동 영역에서 순환회로를 따라서 운동량 방정식[식 (2)]을 적분하면

$$\Delta P_B - \Delta P_F = 0 \quad (15)$$

이 된다. 여기서  $\Delta P_B$ 는 부력에 의한 구동력이고  $\Delta P_F$ 는 마찰 압력손실에 의한 압력강하로서 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\Delta P_B = \rho_l g \left\{ (\Lambda_5 - \Lambda_2) - u_l (\tau_{23} - \tau_{45} + \frac{a-d}{u_t}) \right\} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_F = & \left\{ \frac{f_l}{2D} (\Lambda_2 + \Lambda_5 + l) + \frac{1}{2} K_t \right\} \rho_l u_t^2 \\ & + \frac{1}{2D} \left\{ \frac{1}{2} \left( \frac{\langle f_{th} \rangle}{Q_h} + \frac{\langle f_{tc} \rangle}{Q_c} (u_t^2 - u_l^2) \right) \right\} \rho_l u_l \\ & + \left\{ \frac{f_l}{2D} (2L + l - a - d) + \frac{1}{2} K_t \right\} \rho_l u_t^2 \end{aligned} \quad (17)$$

여기서  $\langle f_{th} \rangle$ 와  $\langle f_{tc} \rangle$ 는 각각 가열 및 냉각 2상 영역에서의 2상 관 마찰저항 계수를 평균한 것이며,  $\tau_{23}$ 과  $\tau_{45}$ 는 각 영역내에서의 체류 시간,  $u_t$ 는 단열 2상 영역에서의 유속, 그리고  $\Lambda_2$ 와  $\Lambda_5$ 는 비등 및 응축 경계로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{23} = \frac{1}{Q_h} \ln \left[ \frac{u_t}{u_l} \right] \quad (18)$$

$$\tau_{45} = -\frac{1}{Q_c} \ln \left[ \frac{u_t}{u_l} \right] \quad (19)$$

$$u_t = u_l + Q_h (d - \Lambda_2) \quad (20)$$

$$\Lambda_2 = c + \frac{\rho_l A u_l}{\dot{q}_h \zeta} \cdot \Delta i_{sub} \quad (21)$$

$$\Lambda_5 = a - \frac{Q_h}{Q_c} (d - \Lambda_2) \quad (22)$$

따라서 식 (15)~(22)로부터 액상 영역의 순환속도  $u_l$ 를 계산할 수 있다. 이 때 주어진  $\dot{Q}$ 와  $\Delta T_{sub}$ 에서 가능한  $u_l$ 의 범위는 2상 유동의 조건을 만족시키려면  $0 \leq x \leq 1$ 의 범위내에 있어야 하므로

$$\frac{\dot{Q}}{\rho_l A (\Delta T_{sub} + i_{fg})} \leq u_l \leq \frac{\dot{Q}}{\rho_l A \cdot \Delta T_{sub}} \quad (23)$$

이다. 식 (15)로 부터  $u_l$ 을 구할 때는 bi-section 방법을 이용하였다.

한편 열량이 적은 범위에서는 액상의 밀도차에 의한 단상(single-phase)자연순환이 가능한데, 작은 온도 범위내에서 온도에 따른 액상의 밀도가 선형적으로 변화한다고 가정하면 운동량 방정식을 적분하므로써 식 (15)를 세울 수 있으며 이때 구동력  $\Delta P_B$ 와 마찰 압력손실  $\Delta P_F$ 는 다음과 같다.

$$\Delta P_B = \Delta \rho_l g \left\{ (b-d) + \frac{1}{2}(a-b) + \frac{1}{2}(d-c) \right\} \quad (24)$$

$$\Delta P_F = \left\{ \frac{f_l}{2D} \cdot 2(L+l) + \frac{1}{2}K_l + \frac{1}{2}K_t \right\} \rho_l u_l^2 \quad (25)$$

여기서  $\Delta \rho_l$ 은 가열기 입, 출구 온도차

$$\Delta T = \dot{Q} / (\rho_l u_l C_p A) \quad (26)$$

에 대응하는 액체의 밀도차이다. 단상 자연순환이 가능한 가열 범위는 증발기 출구에서의 액체 온도가 포화온도  $T_f$ 에 이를 때까지이다.

### 3. 결과 및 검토

2상 자연순환 회로의 정상상태 유동 특성을 알아보기 위해, 열 매체로써 물을 선택하고 Table 1과 같은 조건에서 계산을 수행하였다.

Fig. 2는 가열기에 가해진 열량  $\dot{Q}$ 에 대한 액상의 순환속도  $u_l$ 의 변화를 보여주는 전형적인 예로서, 작은 가열 열량 영역( $a-j$ )에서는  $\dot{Q}^{1/3}$ 에 대체로 비례하는 경향을 보인다<sup>(11)</sup>. 또한 이 그림에서 보면, 같은  $u_l$ 이 나타나는 2개의  $\dot{Q}$ 가 가능하며 어떤 열량( $\dot{Q}_m$ )에서 최대 속도,  $(u_l)_{max}$ 가 존재함

Table 1 Conditions for sample calculations

$L$	3.0m	$v_l$	$1.000 \times 10^{-3} - 1.044 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$
$a$	2.8m	$v_g$	$1.6729 \text{m}^3/\text{kg}$
$b$	1.7m	$\mu_l$	$279 \times 10^{-6} - 1750 \times 10^{-6} \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$
$c$	0.15m	$\mu_g$	$12.02 \times 10^{-6} \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$
$d$	0.65m	$K_t$	0~1000
$l$	0.6m	$K_l$	10~40
$D$	.0166m	$T_f, T_m$	100°C, 10~100°C

을 보여주고 있다. 이는  $a-b$ 영역에서는 열량이 높아짐에 따라 부력의 증가율이 회로 마찰저항의 증가율보다 우세하여 유속이 증가하나,  $b-c-d$ 영

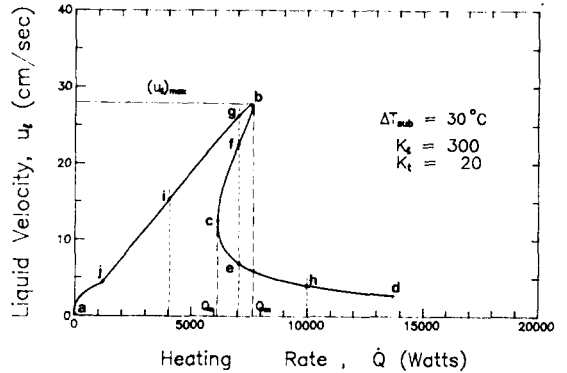


Fig. 2 Liquid velocity as a function of heating rate

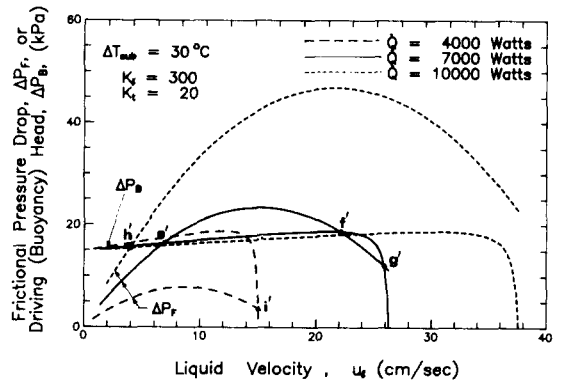


Fig. 3 Loopwise frictional pressure drop and driving head as a function of liquid velocity

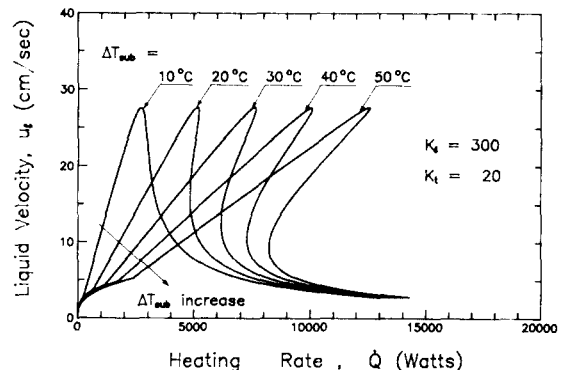


Fig. 4  $u_l - \dot{Q}$  relationship with degree of subcooling taken as a parameter

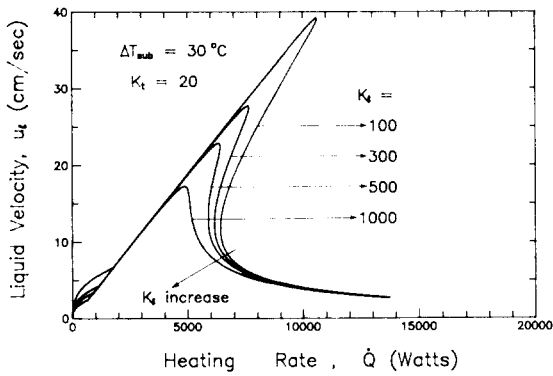


Fig. 5  $u_l - \dot{Q}$  relationship with  $K_t$  taken as a parameter

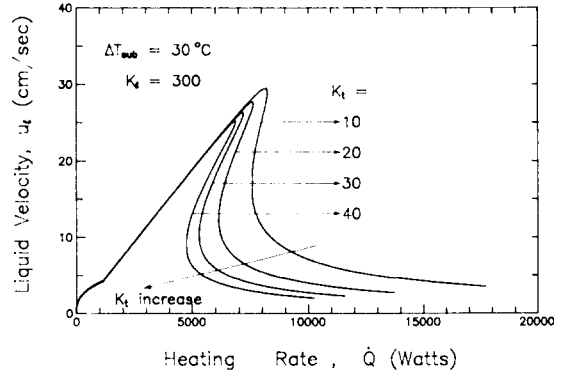


Fig. 6  $u_l - \dot{Q}$  relationship with  $K_t$  taken as a parameter

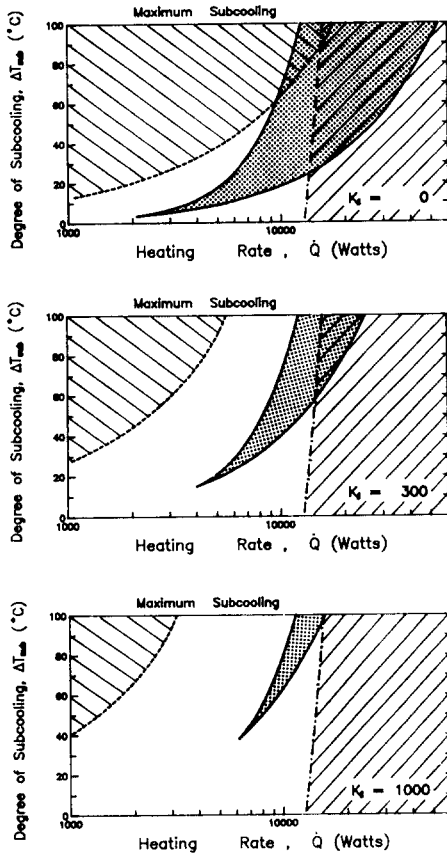


Fig. 7 Static instability map of the two-phase natural circulation with  $K_t$  taken as a parameter,  $K_t = 20$

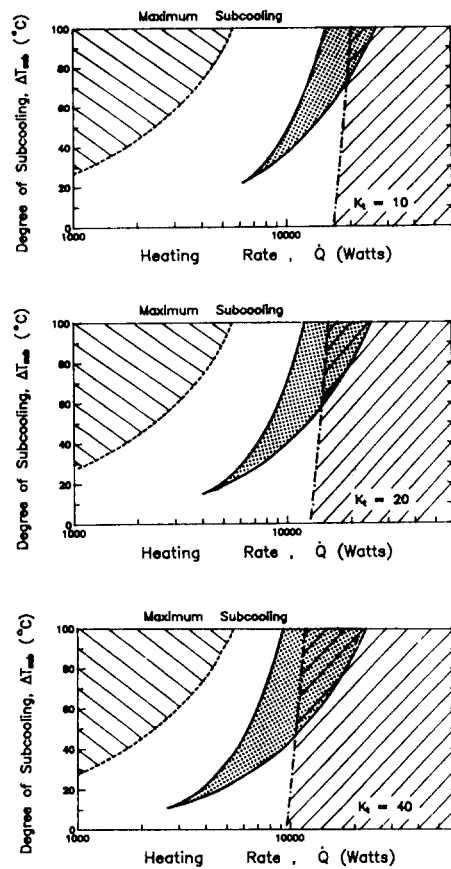
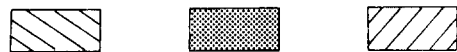


Fig. 8 Static instability map of the two-phase natural circulation with  $K_t$  taken as a parameter,  $K_t = 300$



역에서는 2상 영역의 마찰저항이 크게 증가함에 따라 유속이 감소하기 때문이다.

Fig. 2에서 또 하나 중요한 점은, 어떤 가열열량 범위 ( $\dot{Q}_n \leq \dot{Q} \leq \dot{Q}_m$ )에서는 주어진  $\dot{Q}$ 에 대응하는  $u_i$ 가 2개 이상 ( $e, f, g$ )이라는 사실로 이것은 정적 불안정(static instability)의 가능성을 의미한다. 즉 Fig. 3에서  $\Delta P_B$ 와  $\Delta P_F$ 가 만나는 점 ( $e' - i'$ )이 각 열량에 대응하는 순환유속을 의미하는데,  $f'$ 의 경우 다음과 같은 정적 불안정의 조건<sup>(12,13)</sup>을 만족시키고 있는 것이다.

$$\frac{\partial \Delta P_B}{\partial u_i} > \frac{\partial \Delta P_F}{\partial u_i} \quad (27)$$

따라서 유동이 이 조건에 해당되면, 유속은 안정 조건인  $e'$ 나  $g'$ (Fig. 2에서  $e, g$ )로 급격히 변화하게 된다.

정적 불안정 유동이 발생할 수 있는 각 조건의 영향을 알아보기 위해  $K_i$ 과  $K_i'$ , 그리고  $\Delta T_{sub}$ 를 변수로 하여  $\dot{Q} - u_i$ 의 관계를 Fig. 4~6에 나타내었다. 이 결과  $\Delta T_{sub}$ 와  $K_i$ 의 증가, 또는  $K_i$ 의 감소는 순환속도가 클 때  $u_i$ 의 증가에 따른  $\Delta P_F$ 의 감소를 더욱 급격히 하므로써 시스템을 불안정하게 하는 요소임을 알 수 있는데, 특히  $K_i$ 와  $K_i'$ 의 영향은 동적 불안정성 해석 결과와도 일치하는 것이다<sup>(3,4)</sup>.

Fig. 7과 8은 이상의 결과를 이용하여  $\dot{Q} - \Delta T_{sub}$  평면에서  $K_i$ 과  $K_i'$ 를 변수로 한 정적 불안정선도를 나타낸 것이다. 만약 이론 해석에서 무시한 비평형에 의한 과냉 비등을 고려한다면 순환 속도는 보다 크게 나타나겠지만, 본 연구에서 다루는 정적 불안정은 비교적 큰 건도 영역에서 발생하므로, 열적 평형의 가정은 큰 무리가 없다고 할 수 있다.

이상과 같은 정적 불안정에 대한 각 인자의 영향은 point-heat-source/sink를 가정하므로써 해석적으로 간단히 알아볼 수 있다. 즉 증발기와 응축기의 길이가 무한히 짧다고 가정하여, 회로가 단열 액상과 단열 2상 등 두 영역으로만 구성되어 있다고 가정하면 2상 영역에서의 평균 밀도는

$$\frac{1}{\rho_i} = v_f + \frac{v_{fg}}{i_{fg}} \left( \frac{\dot{Q} v_f}{A u_i} - \Delta i_{sub} \right) \quad (28)$$

가 되며,  $\Delta P_F$ 는  $u_i$ 만의 함수로서 아래와 같이 표시된다.

$$\Delta P_F = \rho_i \left[ \left\{ K_i' - K_i' \left( \frac{v_{fg}}{i_{fg}} \frac{\Delta i_{sub}}{v_f} - 1 \right) \right\} u_i^2 + K_i' \frac{\dot{Q} v_{fg}}{A i_{fg}} u_i \right] \quad (29)$$

여기서

$$K_i' = \frac{f_i}{2D} (\Lambda_2 + \Lambda_5 + l) + \frac{1}{2} K_i \quad (30)$$

$$K_i' = \frac{f_i}{2D} (2L + l - \Lambda_2 - \Lambda_5) + \frac{1}{2} K_i \quad (31)$$

이다. 식 (29)는  $u_i$ 의 2차 함수이므로,  $\Delta P_F$ 가 Fig. 3에서와 같이 위로 볼록한 형태를 가지기 위해서는  $u_i^2$ 의 계수가 적어도 음수(-)이어야 할 것이다. 따라서 정적 불안정의 필요 조건은

$$K_i' - K_i' \left( \frac{v_{fg}}{i_{fg}} \frac{\Delta i_{sub}}{v_f} - 1 \right) < 0 \quad (32)$$

로 나타난다. 여기서 과냉 현상이 없다면 2개 이상의  $u_i$ 를 얻을 수 없음을 알 수 있고, 따라서 Ramos 등<sup>(7)</sup>이나 Chen과 Chang<sup>(8)</sup>의 연구에서는 순환유속에 관한 해가 1개 밖에 나타나지 않는 것이다.

식 (32)의 값이 큰 음수일수록  $\Delta P_F$ 의 곡선은 보다 볼록해지며 따라서 정적 불안정의 가능성이 높아지는데, 이것은  $K_i'$ 가 감소하거나  $\Delta i_{sub}$ 와  $K_i'$ 가 증가할 때라는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

2상 자연 순환 회로내에서의 정상상태 유동 특성을 알아보기 위해 간단한 1차원 모델을 도입하였다. 전체 회로를 6구간으로 나누었고, 2상 영역을 균질유동 영역으로 가정하여 지배 방정식을 세웠으며 이로 부터 시간 평균 방정식을 얻어내었다. 이 방정식으로 부터 각 영역의 밸브 마찰 계수  $K_i$ ,  $K_i'$ 와 과냉 정도  $\Delta T_{sub}$ 를 변수로 하여 가열 열량  $\dot{Q}$ 에 따른 순환 속도  $u_i$ 를 구하였다.

계산 결과 같은 유속을 얻기 위한 가열 열량은 두 개도 가능하며, 어떤 열량 범위내에서는 주어진 가열 열량에 대해 2개 이상의 순환 유속이 존재하여 정적 불안정이 일어날 수 있음을 알았다. 이러한 불안정 영역은 과냉 정도와 2상 영역에서의 밸브 마찰저항 계수가 증가할수록, 또 액상영역에서의 밸브 마찰저항 계수가 감소할수록 커진다. Point heat source/sink의 가정하에 간단한 모델을 세우면 해석적인 해를 구할 수 있고, 이를 통해서도 같은 결과를 얻었다. 추후 연구로서, 증발기와 응축기 부분에서의 자세한 2상 유동 열전달 현상 해석이 요구되며, 2상간의 slip을 고려하기 위한 drift flux모델의 사용 등 2상 유동 모델의 개선도 이루어져야 할 것이다.

## 후 기

본 연구는 한국과학기술원 기본 연구사업의 일환으로 추진되었으며, 이에 대해 관계자 제위께 감사 를 드린다.

## 참 고 문 헌

- (1) Boure, J.A., Bergles, A.E. and Tong, L.S., 1971, "Review of Two-Phase Flow Instability", ASME Paper 71-HT-42.
- (2) Wissler, E.H., Isbin, H.S. and Amundson, N.R., 1956, "Oscillatory Behavior of a Two-phase Natural-circulation Loop", AIChE. J. Vol. 2, pp. 157~162.
- (3) Wallis, G.B. and Heasley, J.H., 1961, "Oscillations in Two-phase Flow Systems", J. Heat Transfer, Trans. ASME, Vol. 83, pp. 363~369.
- (4) Chexal, V.K. and Bergles, A.E., 1973, "Two-phase Instabilities in a Low Pressure Natural Circulation Loop", AIChE Symp. Ser., Vol. 69, pp. 37~45.
- (5) Lee, S.Y. and Ishii, M., 1988, "Simulation Experiments on Two-Phase Natural Circulation in a Freon-113 Flow Visualization Loop", ANS Proceedings, 1988 National Heat Transfer Conference, pp. 374~386.
- (6) Ishii, M. and Fauske, H.K., 1983, "Boiling Dryout Behavior in a Liquid-Metal Fast Breeder Reactor Subassembly Bundle Under Low Heat Flux and Low Flow Conditions", Nuclear Science and Engineering, Vol. 84, pp. 131~146.
- (7) Ramos, E., Sen, M. and Trevino, C., 1985, "A Steady-State Analysis for Variable Area One- and Two-phase Thermosyphon Loops", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, pp. 1711~1719.
- (8) Chen, K.S. and Chang, Y.R., 1988, "Steady-State Analysis of Two-phase Natural Circulation Loop", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, pp. 931~940.
- (9) Ishii, M., 1976, "Study on Flow Instabilities in Two-Phase Mixture", ANL-76-23, pp. 31~32.
- (10) Collier, J.G., 1981, "Convective Boiling and Condensation", McGraw-Hill, New York, pp. 32~33.
- (11) Massoud, M. and Hsu, Y.Y., 1988, "Evaluation of Natural Circulation Characteristics in a Model PWR", Proceedings of the Third International Topical Meeting on Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics and Operations, A10-27~A10-35.
- (12) Ledinegg, M., 1938, "Instability of Flow During Natural and Forced Circulation", Die Wärme, Vol. 61, pp. 891~898.
- (13) Lahey, Jr., R.T. and Podowski, M.Z., 1989, "On the Analysis of Various Instabilities in Two-Phase Flows", Multiphase Science and Technology, Vol. 4 (edited by G.F. Hewitt, J.M. Delhay and N. Zuber), Hemisphere, pp. 183~370.