

수직 비등관에서의 밀도파 진동 특성 해석

A Parametric Investigation of Density Wave Oscillation in a Vertical Boiling Channel

황대현, 유연종, 김궁구

한국원자력연구소
대전광역시 유성우체국 사서함 105호

요 약

선형 모델을 사용하여 수직 비등관에서의 밀도파 진동에 대한 평가를 수행하였다. 저 건도 조건에서의 type-I 불안정성 특성 해석을 위하여, 입구 오리피스 압력 손실과 중력에 의한 압력 손실만을 고려한 운동량 보존식으로부터 간단한 해석적 모형을 유도하였다. 특성 방정식의 해는 일차원 D-partition 방법으로 구했으며, 그 결과 유동 불안정성 영역을 정성적으로 결정할 수 있었다. 입구 오리피스 압력 손실 계수, 출구 비가열 영역의 길이, 질량 유속 및 압력 등 여러가지 중요한 설계 변수들의 영향을 ALFS 코드를 사용하여 평가하였다. 그리고 SMART 노심 조건을 나타내주는 기준 조건에서 이상 유동장 모델의 영향을 평가하였으며, 그 결과 이들은 단순 모델의 정성적 예측과 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Abstract

A parametric study on the density wave oscillation in a vertical boiling channel was performed by a linear model. In order to investigate the type-I instability at low quality conditions, a simple analytical model was derived by taking into account only two components of pressure losses, i.e., the frictional and the gravitational losses, in the momentum conservation equation. A one-dimensional D-partition method was applied to solve the characteristic equation, and as the result the region of stability was possible to be determined qualitatively. The influence of design parameters such as the inlet orifice loss coefficient, the length of unheated riser section, the mass velocity, and the pressure was evaluated by using the ALFS code. The effect of two-phase flow modeling was also examined for a reference condition representative of SMART core. It revealed that the parametric behavior predicted from the simple model was well reproduced by the ALFS code analysis.

1. 서론

압력 손실이 일정하게 주어지는 수직 비등관에서의 이상 유동 불안정성에 대한 연구는 신형 원자로 SMART 노심의 열수력 설계 요건의 하나로서 중요한 분야이다. 이상 유동 불안정성을 일으키는 여러가지 메카니즘 중에서 SMART 노심 조건과 관련하여 특히 중요한 것은 밀도파 진동(density wave oscillation)에 의해 발생하는 동적 유동 불안정성 현상이다. 이는 계의 압력 손실 궤환 현상에 의해 특정 채널의 유속이 스

스로 진동하는 것이며, 이로 인하여 국부적인 임계 열속 조건에 도달하게 되면 핵연료 파손에까지 이를 수 있다. 본 연구에서는 선형 모델을 사용하여 노심 기하 형태 및 운전 조건 등 주요 설계 변수들이 밀도와 진동에 미치는 영향을 평가하였다. Fukuda & Kobori[1]의 연구에 따르면 밀도와 진동은 그 특성에 따라 두 가지 형태로 구분된다. 일반적으로 건도가 높은 조건에서 발생하는 type-II 불안정성의 특성은 마찰 압력 손실에 의해 지배되며, 낮은 건도 영역에서 발생하는 type-I 불안정성은 중력장에 의한 압력 손실이 중요한 변수인 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 운동량 보존식에 마찰 압력 손실과 중력에 의한 압력 손실만을 고려한 선형 모델에 근거하여 type-I 불안정성의 특성 파악을 위한 단순 모델을 유도하였으며, 특성 방정식의 해를 통하여 밀도와 진동 특성을 해석하였다. 그리고 선형 모델로부터 개발한 ALFS 코드를 사용하여 노심 기하 형태 및 운전 조건 등 여러가지 설계 변수들이 밀도와 진동에 미치는 영향을 SMART 노심 조건에서 정량적으로 평가하였다.

2. Type-I 밀도와 진동 해석을 위한 단순 모델 유도

2.1 수력적 임피던스

그림 1에 제시한 바와 같은 수직 비등관에 대한 선형 유동 불안정성 해석 모형은 참고 문헌 [2]에서 상세하게 유도하였다. 본 연구에서는 두 가지 압력 손실 요소, 즉 마찰 압력 손실과 중력장에 의한 압력 손실만을 운동량 보존식에서 고려하고 HEM(Homogeneous Equilibrium Model)을 사용하여 단순 모델을 유도하였다. 그리고 비등관 입구 오리피스에서의 압력 손실이 가장 주된 마찰 압력 손실 요소로서 비등관 전체의 마찰 압력 손실을 대표할 수 있는 것으로 가정하였다. 입구 유동 섭동에 대한 계의 동적 특성은 압력 손실 섭동과 입구 유속 섭동의 비, 즉 수력적 임피던스로 표현될 수 있다[2]. 그림 1의 각 영역별 수력적 임피던스는 각각 아래와 같이 유도된다.

비가열 단상 유동 영역 (A): 운동량 보존식에 질량 보존식을 대입하고 입구의 비가열 영역에 대하여 적분하면 이 영역에서의 압력 손실을 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta P_A = \int_{z_i}^{z_o} \frac{\partial P}{\partial z} dz = r_f \int_{z_i}^{z_o} \frac{dv_m}{dt} + g + \frac{f_{in}}{2D_i} \cdot v_{in}^2 + k_i r_f \cdot v_{in}^2 \quad (1)$$

여기서 입구 유속의 섭동을

$$v_m = \bar{v}_m + dv \quad (2)$$

로 표현하면, 입구 유속의 섭동에 대한 압력 손실의 시간적 평균 및 섭동은 각각 아래 식과 같이 구할 수 있다.

$$\overline{\Delta P_A} = r_f \int_{z_i}^{z_o} \frac{d\bar{v}_m}{dt} + g + \frac{f_{in}}{2D_i} \bar{v}_m^2 + k_i r_f \bar{v}_m^2 \quad (3)$$

$$d\Delta P_A = r_f \int_{z_i}^{z_o} \frac{dv}{dt} + \frac{f_{in}}{D_i} \bar{v}_m v + 2k_i r_f \bar{v}_m v \quad (4)$$

빈도 반응법을 적용하기 위하여 입구 유속의 섭동항을

$$dv = e e^{st} \quad (5)$$

로 표현하고, 운동량 보존식에서 마찰 압력 손실과 중력장에 의한 압력 손실을 제외한 모든 항들을 무시하면 이 영역에서의 수력적 임피던스는 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{d\Delta P_A}{dv} = \frac{r_f}{s} \int_{z_i}^{z_o} \frac{ds}{ds} + 2r_f k_i \bar{v}_m \quad (6)$$

여기서, k_{in} 은 입구 오리피스의 압력 손실 계수이며 s 는 복소수이다. 그리고 모든 영역의 유로 면적은 서로 동일한 것으로 가정하였다. 입구 오리피스에서의 압력 손실은

$$\Delta P_m = k_m r_f v_m^2 \quad (7)$$

로 표현될 수 있으므로 이를 (6)식에 적용하면 아래와 같은 식을 구할 수 있다.

$$\Lambda_A \frac{db}{dv} = \frac{\partial b_{P_m}}{\partial v} \quad (8)$$

가열 단상 유동 영역 (B): 위와 같은 방법으로 이 영역에서의 운동량 보존식을 적분하면 아래 식과 같이 수력적 임피던스를 구할 수 있다 [2].

$$\frac{db_B}{dv} = \Lambda_B \frac{db}{dv} = r_f g \Lambda_1 \quad (9)$$

위 식의 우변은 비등 경계면, 즉 단상-이상 유동 경계면의 섭동에 의한 압력 손실의 섭동을 나타낸다. 여기서,

$$\Lambda_1(s) = \frac{m e^{-s\bar{t}_{12}}}{s} \quad (10)$$

이며, $\bar{t}_{12} = \bar{l}/\bar{v}_m$ 로서 유체가 단상 유동 영역을 통과하는데 걸리는 시간을 의미한다.

가열 이상 유동 영역 (C): 비등 경계면과 혼합물 밀도의 섭동을 고려하고, 평균치 정리를 적용하면 중력장에 의한 압력 손실은 아래와 같이 표현된다.

$$\Delta P_c = \int_{z_{eq}} r_m g \cdot dz \cong g \int_{z_{eq}} dz + g \int_{z_{eq}} dr_m dz - g r_f dl \quad (11)$$

이로부터 이 영역에서의 수력적 임피던스는 아래와 같이 유도된다[2].

$$\frac{db_C}{dv} = \Lambda_C \frac{db}{dv} = g r_f \int_{z_{eq}} dz - g r_f \Lambda_1 \quad (12)$$

HEM을 적용할 경우

$$\Lambda_4 \frac{db}{dv} = \frac{F_1}{G_1 k} \frac{1}{s - \Omega_{eq}} \frac{F_2}{G_2 k} \frac{1}{s - \Omega_{eq}} \Lambda_1 \frac{db}{dv} + \frac{\Lambda_3}{C_1} \frac{1}{s - \Omega_{eq}} \frac{F_3}{G_3 k} \frac{1}{s - \Omega_{eq}} \frac{F_4}{G_4 k} \frac{1}{s - \Omega_{eq}} \frac{db}{dv} \quad (13)$$

로 표현되며[2], 이는 입구 유속 섭동에 대한 혼합물 밀도의 섭동을 나타내는 항이다. 만일 가열관의 출구 부근에서 비등이 발생하여 비등 길이가 매우 짧은 경우를 가정하면

$$C_1 \cong C_2 \cong \bar{v}_m \quad (14)$$

이므로,

$$\Lambda_4 \frac{db}{dv} = \frac{\Omega_{eq}}{\bar{v}_m} \Lambda_1 \frac{db}{dv} \quad (15)$$

이 된다. 따라서,

$$\Lambda_C \frac{db}{dv} = g r_f d - \bar{l} \frac{\Omega_{eq}}{\bar{v}_m} \Lambda_1 \frac{db}{dv} - g r_f \Lambda_1 \frac{db}{dv} = -g r_f \Lambda_1 \frac{db}{dv} \quad (16)$$

이다.

비가열 이상 유동 영역 (D): 마찬가지로 중력에 의한 압력 손실을 고려하면

$$\frac{db_D}{dv} = \Lambda_D \frac{db}{dv} = g r_f \bar{v}_{me} \cdot \frac{1 - e^{-s\bar{t}_{34}}}{s} \cdot \frac{\Omega_{eq}}{\bar{v}_m} \Lambda_1 \frac{db}{dv} \quad (17)$$

을 유도할 수 있다. 여기서 $\bar{\tau}_{34} = l_e / \bar{v}_{me}$ 로서 유체가 비가열 이상 유동 영역을 통과하는데 걸리는 시간을 의미한다.

위의 4 영역에 대한 수력적 임피던스를 종합하면 수직 비등관 전체의 동적 특성은 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dv} &= \Omega_A \Lambda_A + \Omega_B \Lambda_B + \Omega_C \Lambda_C + \Omega_D \Lambda_D \\ &= \frac{\partial P_{in}}{\partial v} + g r_f \bar{v}_{me} \cdot \frac{e^{-s\bar{\tau}_{34}}}{s} \cdot \frac{\Omega_{eq}}{v_{in}} \cdot \frac{e^{-s\bar{\tau}_{12}}}{s} \end{aligned} \quad (18)$$

2.2 특성 방정식의 해

압력 손실이 일정하게 주어지는 비등관에서 계의 동적인 특성을 나타내는 block diagram으로부터 특성 방정식은 아래와 같이 주어진다[2].

$$\Omega_{eq} = 0 \quad (19)$$

따라서 (18)식을 정리하면 특성 방정식은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$K \cdot s^2 \bar{\tau}_{12} \bar{\tau}_{34} + C - e^{-s\bar{\tau}_{12}} \cdot H - e^{-s\bar{\tau}_{34}} \cdot F = 0 \quad (20)$$

여기서, $\bar{v}_{me} = l_e / \bar{\tau}_{34}$, 그리고 $\bar{v}_{in} \cong l / \bar{\tau}_{12}$ 이므로

$$K = \frac{2\Delta P_{in}}{g \cdot r_f \cdot l_e \cdot \frac{\Omega_{eq} \cdot l}{\bar{v}_{in}}} \quad (21)$$

로 표현될 수 있으며, Ω_{eq} 는 기포 생성 빈도수를 의미한다. 위의 특성 방정식에서 K 를 독립 변수로 두면, 일차원 D-partition 방법론을 적용하여 이 계의 불안정성을 해석할 수 있다. 특성 방정식을

$$K = - \frac{C - e^{-s\bar{\tau}_{12}} \cdot H - e^{-s\bar{\tau}_{34}} \cdot F}{s^2 \bar{\tau}_{12} \bar{\tau}_{34}} \quad (22)$$

로 표현하고, $s = jw$ 를 대입하면 K 의 실수 및 허수 부분은 각각 아래와 같이 유도된다.

$$\text{Re}[K] = \frac{C \cos w\bar{\tau}_{12} \cdot g r_f \cdot \cos w\bar{\tau}_{34} \cdot g r_f - \sin w\bar{\tau}_{12} \cdot g \sin w\bar{\tau}_{34} \cdot C}{w^2 \bar{\tau}_{12} \bar{\tau}_{34}} \quad (23)$$

$$\text{Im}[K] = - \frac{C \sin w\bar{\tau}_{12} \cdot g r_f \cdot \sin w\bar{\tau}_{34} \cdot g r_f + \cos w\bar{\tau}_{12} \cdot g \cos w\bar{\tau}_{34} \cdot C}{w^2 \bar{\tau}_{12} \bar{\tau}_{34}} \quad (24)$$

그림 2는 이러한 특성 방정식에 의해 구분되는 D-partition 영역을 나타낸 것이다. 각빈도수 w 가 증가함에 따라서 구해지는 $\text{Re}[K] - \text{Im}[K]$ 궤적의 왼쪽 영역은 s -좌표계에서 허수 축의 왼쪽, 즉 안정된 영역에 해당한다[3]. 따라서 이 계가 안정될 조건은, 물리적인 의미로 볼 때 항상 $K > 0$ 이어야 하므로,

$$K_0 < K < \infty \quad (25)$$

로 주어진다. 여기서 K_0 은 $\text{Re}[K]$ 좌표축 상에서 근의 최대치를 의미한다.

(24) 식으로부터 $\text{Im}[K]=0$ 을 만족시키는 w 는 아래와 같이 결정된다.

$$w = 0 \quad (26)$$

$$w = \frac{2n\pi}{\bar{\tau}_{12}}, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (27)$$

$$w = \frac{2n\pi}{\bar{\tau}_{34}}, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (28)$$

$$w = \frac{2np}{\bar{\tau}_{12}\bar{\tau}_{34}}, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (29)$$

위의 처음 세 근, 즉 (26)-(28)식은 $\text{Re}[K]$ 를 음수나 0으로 만들기 때문에 물리적인 의미가 없으며, 의미 있는 근은 (29)식으로 표현된다. $\text{Re}[K]$ 의 w 에 대한 변화를 보면 $n = \pm 1$ 일 때 $\text{Re}[K]$ 가 최대값을 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 K_0 에 대응하는 w 의 값은, $\text{Re}[K]$ 가 w 에 대하여 대칭이므로 아래와 같이 결정된다.

$$w = \frac{P}{\bar{\tau} + \bar{\tau}^-} \quad (30)$$

이러한 각빈도수(angular frequency)로부터 진동 주기는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$T = \bar{\tau}_{12} + \bar{\tau}_{34} \quad (31)$$

2.3 Type-I 밀도와 진동의 특성

단순 모형에서 밀도와 진동의 특성은 K 에 의해 결정된다. 즉, K 가 감소할수록 계는 점점 불안정해지는 경향을 보이며, K 가 K_0 이하로 작아지면 주기 T 를 갖는 밀도와 진동이 발생한다. 수식 (21)에 나타난 바와 같이 K 가 감소하는 경우는, 입구 오리피스에서의 압력 손실이 감소하거나, 비가열 이상 유동 영역의 길이가 증가하거나, $N_{pch}(=\mathcal{Q}_{eq}/v_{in})$ 가 증가하는 경우이다. 그리고 K 는 v_{in}^3 에 비례하므로 저유속 조건에서 불안정성 발생 확률이 높아진다. 가열관의 출구에서 비등이 발생하지 않는 경우에는 $\mathcal{Q}_{eq}=0$ 이므로 $K=\infty$ 이며 따라서 이 경우에 계는 안정된 상태에 있다. 비등이 발생하는 경우에는,

$$N_{pch} = \frac{\Delta r}{r_f r_g} \frac{x l}{Ah_{fg} \bar{v}_{in}} \quad (32)$$

로 표현된다. 비 압축성 유체를 가정하면 혼합물의 엔탈피에 대한 정의로부터 아래와 같은 관계식을 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial r}{\partial h_m} = - \frac{\Delta r \cdot r_m^2}{r r_g h_{fg}} \quad (33)$$

(32)와 (33) 식을 (21)식에 대입하고 정리하면 아래와 같은 식을 구할 수 있다.

$$K = \frac{2d_m^2/r_f^2 \cdot \Delta_{in}}{b_l g \left| \frac{\partial r_m}{\partial h_m} \right| \frac{G}{AG} k} \quad (34)$$

위 식의 분모에 나타나는 첫번째 괄호항은 출구 비가열 영역에서의 중력장에 의한 압력 손실을 나타내는 항이며, 두번째 항은 엔탈피 변화에 대한 밀도 변화를 나타내는 것으로서 그 기울기는 비등이 시작되는 조건에서 최대값을 갖는다. 따라서 Type-I 불안정성은 출구에서 비등이 시작되는 조건에서 발생할 확률이 가장 크다. 세번째 항은 비등관에서의 엔탈피 상승을 의미한다. 즉 출구에서의 엔탈피 조건이 동일하면 입구 과냉도가 클수록 Type-I 불안정성이 발생할 확률이 커지는 것을 알 수 있다.

3. 밀도와 진동에 대한 주요 설계 변수들의 영향 평가

신형원자로 SMART 노심 조건으로부터 노심 기하 형태 및 운전 조건 등 주요 설계 변수들이 밀도와 진동에 미치는 영향을 ALFS 코드[2,4]를 사용하여 분석하였다. 기준 노심 조건은 압력=122.5bar, 질량 유속=262kg/m²/s, 채널 출력=104kW, 입구 온도=230°C, 가열 길이=1.5m, 입구 오리피스 압력 손실 계수(k_{in})=10, 출구 비가열 영역 길이(l_o)=0.2m, 그리고 채널 유로 면적=1.06E-3m²으로 선정하였다.

노심 기하 형태와 관련된 주요 설계 인자로서 단순 모형 해석을 통해 나타난 입구 오리피스 압력 손실 계수 및 출구 비가열 영역 길이의 영향을 분석하였다. 그림 3은 $k_{in}=0$ 으로 감소시키면 밀도와 진동에 의한 유동

불안정성 영역이 현저하게 증가하는 것을 이차원 D-partition 해석을 통하여 채널 출력-입구온도 좌표계에서 보여주고 있다. 각 영역의 불안정성 여부는 Nyquist criteria를 사용하여 평가하였다. 출구 비가열 영역의 길이 $l_e=1m$ 로 증가시키면 그림 4에서 보듯이 type-II 불안정성 영역이 증가함과 동시에 type-I 불안정성 영역이 새로이 나타나는 것을 알 수 있다.

노심 운전 조건 중 질량 유속이 밀도와 진동에 미치는 영향은 단순 모형에서 매우 큰 것으로 나타났으며, 이를 ALFS 코드로 분석한 결과는 그림 5와 같다. 이 그림은 기준 조건으로부터 입구 온도와 질량 유속에 대한 유동 불안정성 경계 조건을 분석한 것이다. 그림에서 보듯이 질량 유속이 감소함에 따라 불안정성 영역은 급격하게 증가하며, 약 $120kg/m^2/s$ 이하로 감소하면 type-I 불안정성이 나타나기 시작하는 것을 알 수 있다. 그림 6은 기준 조건에서 압력 변화가 밀도와 진동에 미치는 영향을 평가한 결과로서, 채널 출력이 일정하게 주어지는 경우 압력이 감소하면 유동 불안정성이 발생할 확률이 높아지는 것을 알 수 있다.

그림 7은 이상 유동장 모형이 계의 밀도와 진동 해석 결과에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 기준 조건으로부터 $l_e=1.5m$ 로 증가시킨 조건에서 분석하였으며, DEM(Drift-flux Equilibrium Model)의 경우 기체의 드리프트 속도는 Ishii 모델[5]을 사용하여 계산하였다. 그리고 DNEM(Drift-flux Non-Equilibrium Model)에서 OSV(Onset of Significant Void)는 Saha & Zuber 모델[6]을 사용하여 예측하였다. 분석 결과 입구 과냉도가 매우 큰 경우를 제외하면 HEM의 예측 결과가 가장 보수적인 것으로 나타났다. 드리프트 속도나 미포화 비등을 고려하면 type-I 불안정성이 발생하는 최대 입구 온도가 낮아지는 경향을 보인다. 그리고 type-II 불안정성을 DNEM으로 분석한 결과를 보면, 입구 온도가 약 $200^{\circ}C$ 이하로 낮아지는 경우 유동 불안정성 경계와 출구 건도가 일정하게 유지되는 조건이 거의 일치하는 것으로 나타났다.

그림 8은 type-I 불안정성이 발생하는 경우 밀도와 진동 주기(T_{osc})와 유체 통과 시간(T_{trans}) 간의 관계를 나타낸 것이다. 건도가 0 근처로서 아주 낮은 조건에서는 (31) 식에서 예측한 바와 같이 T_{osc} 와 T_{trans} 가 거의 일치하는 것으로 나타났다. 건도가 증가하면 T_{osc} 는 감소하는데, T_{trans} 가 더욱 빠르게 감소하여 T_{osc}/T_{trans} 는 증가하였다. Type-I 불안정성의 경우 건도가 증가함에 따라 'first-order mode($T_{osc}=4/3T_{trans}$)'에 접근하는 경향을 보였으며, type-II 불안정성의 경우에는 'first-order mode'에서 'fundamental mode($T_{osc}=2T_{trans}$)'까지 분포하는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구를 통하여 얻은 주요 결론은 아래와 같다.

- (1) 중력장에 의한 압력 손실과 마찰 압력 손실 만을 고려한 단순 모형을 유도하여, 압력 손실이 일정하게 주어지는 수직 비등관에서의 type-I 밀도와 진동 특성을 정성적으로 해석하였다.
- (2) 노심 기하 형태 및 운전 조건이 밀도와 진동에 미치는 영향을 ALFS 코드를 사용하여 분석하였으며, 그 결과가 단순 모형의 정성적 해석 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 중장기 연구개발과제의 일환으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] K. Fukuda & T. Kobori, Classification of two-phase flow instability by density wave oscillation model, J. Nuc. Sci. Technology 16, 95-108 (1979).
- [2] 황대현 외, 수직 비등관에서의 이상 유동 불안정성 특성 해석 I: 입구 유속 섭동에 대한 선형 모델 개발, KAERI/TR-1128/98 (1998).

- [3] B. Porter, Stability Criteria for Linear Dynamic Systems, Chapter7, Academic Press (1968).
- [4] 황대현 외, 수직 관다발형 비등관에서의 이상 유동 불안정성 특성 해석, 98 춘계학술발표회논문집, 463-468, 한국원자력학회 (1998).
- [5] M. Ishii, One-dimensional drift-flux model and constitutive equations for relative motion between phases in various two-phase flow regimes, ANL-77-47 (1977).
- [6] P. Saha & N. Zuber, Point of net vapor generation and vapor void fraction in subcooled boiling, Proc. 5th Int. Heat Transf. Conf. 4, 175-179 (1974).

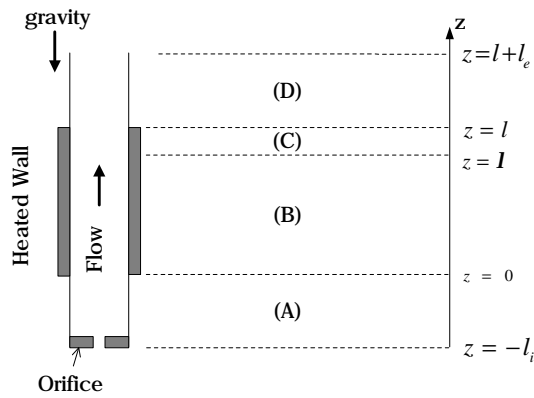


그림 1. 수직비등관의 기하 형태

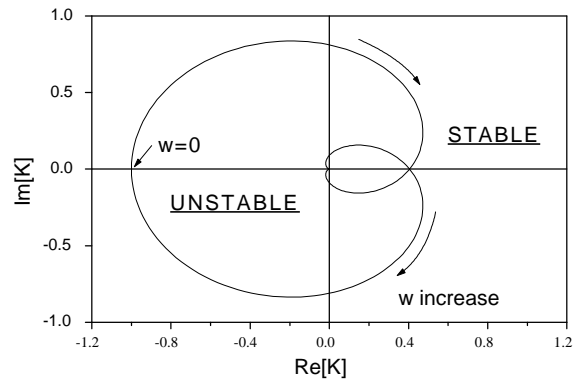


그림 2. D-partition 경계면

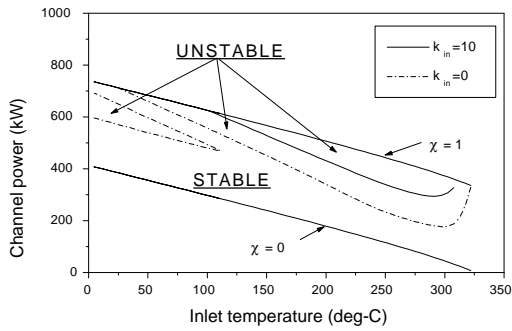


그림 3. 입구 오리피스 압력 손실 영향

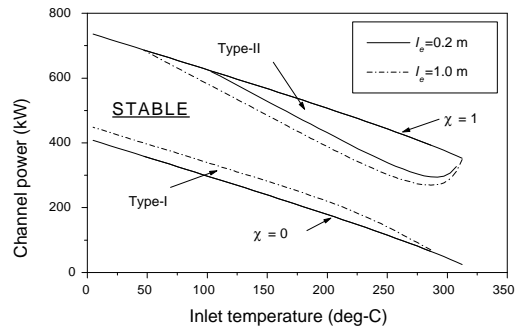


그림 4. 출구 비가열 영역 길이 영향

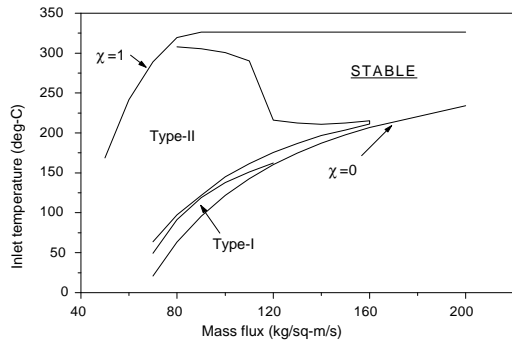


그림 5. 질량 유속의 영향

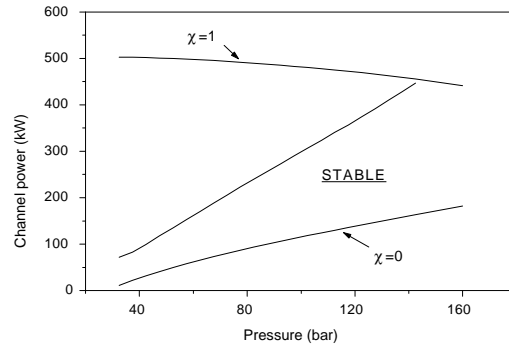


그림 6. 압력의 영향

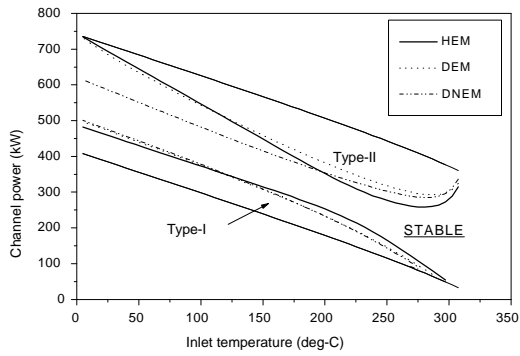


그림 7. 이상 유동장 모형의 영향

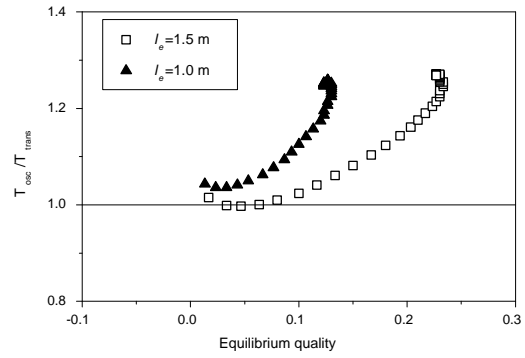


그림 8. 건도에 대한 진동 모드 특성