

# 傳熱管에서의 流體振動 防止對策에 關한 研究

鄭 柱 漑

A Study on the Measurements to Prevent  
Flow Oscillations in a Heated Channel



Abstract

Nomenclature

1. 結 論
  2. 連動方程式의 誘導
    - 2.1 無次元 靜特性方程式
    - 2.2 無次元 動特性方程式
  3. 流量制限裝置의 影響
    - 3.1 靜特性曲線에서  $K_I$ ,  $K_F$ 의 影響
    - 3.2 動特性에서  $K_I$ ,  $K_F$ 의 效果
  4. 水平傳熱管과 垂直傳熱管의 安定性 比較
  5. 結 論
- 參 考 文 獻

## Nomenclature

|                |  |                          |
|----------------|--|--------------------------|
| $A_c$          | : cross-sectional flow area of a heated channel              | ( $m^2$ )                |
| $D_H$          | : hydraulic diameter   | ( $m$ )                  |
| $f$            | : Darcy-Weisbach friction factor                             |                          |
| $g$            | : gravity acceleration                                       | ( $9.8 m/sec^2$ )        |
| $h$            | : enthalpy, $h_{fg} = h_g - h_f$                             | (Kcal/kg)                |
| $j^*$          | : volumetric flow rate                                       | ( $m^3/m^2 \cdot sec$ )  |
| $L_H$          | : heated length  | ( $m$ )                  |
| $P^*$          | : pressure   | ( $kg/cm^2$ )            |
| $P_H$          | : heated perimeter   | ( $m$ )                  |
| $q''$          | : heat flux  | (Kcal/ $m^2 \cdot sec$ ) |
| $S$            | : Laplacian operator   |                          |
| $t, \tau$      | : time   |                          |
| $\nu$          | : specific volume, $\nu_{fg} = \nu_g - \nu_f$                | ( $m^3/kg$ )             |
| $V_0$          | : velocity scale   | ( $m/sec$ )              |
| $X$            | : quality  |                          |
| $Z^*$          | : arbitrary position of a fluid particle in a heated channel | ( $m$ )                  |
| $J_1 \sim J_3$ | : integrals defined by Eq.(30)                               |                          |
| $K_1 \sim K_5$ | : coefficients defined by Eq.(50)                            |                          |
| $N_{Fd}$       | : Froud number   |                          |

- $N_{Fr}$  : Friction number  
 $N_{Pc}$  : Phase-change number  
 $\lambda^*$  : position of boiling boundary (m)  
 $\theta$  : time scale (sec)  
 $\Omega$  : characteristic frequency of phase change (sec<sup>-1</sup>)  
 $K_I$  : local friction factor of the inlet restriction  
 $K_E$  : local friction factor of the outlet restriction  
 $\rho$  : density ,  $\rho_{fg} = \rho_f - \rho_g$  (kg/m<sup>3</sup>)



産業用 大形 보일러, 原子爐 등의 傳熱管에서 발생하는 2相流의 振動은 관자체의 振動을 유발할뿐 아니라 過熱과 燒損의 原因이 되므로 安定性에 대한 對策이 요구된다. 보통 傳熱管의 入口 및 出口에 流量制限裝置를 설치하여 이를 防止하고 있으나 그 效果에 대해서는 아직 論離의 대상이 되고 있다.

Zuber<sup>10)</sup>, Achard<sup>13)</sup>, Ishii<sup>14)</sup> 등에 의하여 모멘텀 (Momentum), 에너지 (Energh), 연속 및 상태방정식에서 流體力學과 관계있는 파라메터 (Parameter) 를 無次元化하여 여러가지 數式들이 만들어졌고, 이 分野의 研究에 상당한 진전이 있었다.

本 研究에서는 傳熱管內에서의 壓力損失에 대한 理論式을 유도하고 이를 無次元化한 후, 10), 13), 14) 無次元된 壓力과 流速에 대한 靜特性曲線을 그려서 入口 및 出口 流量制限裝置가 靜特性曲線에 미치는 영향을 살펴보았다. 流體力學 및 熱力學에 關係되는 몇가지 파라메타를 無次元化하여 流體의 運動을 解析하면 機器를 設計할때나 운용할때 相似法을 適用하여 그 解析結果를 응용하는데 편리한 利點이 있다.

傳熱管의 安定性을 검토할 경우, 靜特性만의 結果를 考慮할 경우에는 종종 傳熱管의 과열사고가 發生하는데 이는 靜特性的 安定범위 내에도 動的인 不安定性이 存在하기 때문이다.

傳熱管內에서는 壓力波의 傳播速度가 密度波의 傳播速度에 비하여 수백배 빠르므로 이를 무시하고 密度波만의 전달을 고려하여 動特性 方程式을 유도하고 線形制御에 사용되는 Nyquist 선도를 그려서 入

口 및 出口 流量制限裝置가 動特性에 미치는 영향을 조사하였으며, 他 實驗結果와 比較하였다. 密度波의 移送時間을 고려할 경우 動特性方程式은 비선형이 되므로 定性分析이 곤란하나 Ngquist 선도를 이용하면<sup>17)</sup> 安定性和 安定도를 동시에 구할수 있고 파라미터의 調整效果를 分析하는데 매우 편리하다.

水平傳熱管과 水直傳熱管 중 어느것이 더 안정한가는 아직 연구필라 없고 별 중요한 사항도 아니나 여기서는 參考로 어느것이 安定도가 큰것인지 靜的인 면과 動的인 면에서 살펴보았다.



$$\Omega = \frac{\partial(j^*)}{\partial Z^*} = \frac{q'' \cdot P_H \cdot \nu_{fg}}{A_c \cdot h_{fg}} \quad (3)$$

沸騰境界點  $\lambda^*(t^*)$  은 아래 式과 같이 求해진다.

$$\lambda^*(t^*) = \int_{t^* - \theta}^{t^*} j_i^*(t') dt' \quad (4)$$

여기에서  $\theta$  는 傳熱量  $q''$ , 冷却流體의 入口엔탈피가  $h_i$  일 때, 流體가 관의 入口에서 沸騰境界까지 移送될 때 所要되는 時間으로  $h_i$  의 熱量을 가진 冷却流體가 過冷却을 잃고 포화상태에 到達하는데 所要되는 時間으로 無次元方程式의 基準時間 (time scale) 으로 쓰인다.

$$\theta = \frac{\rho_f \cdot A_c}{q'' \cdot P_H} (h_f - h_i) \quad (5)$$

無次元化하기 위한 基準速度 (Velocity scale) 는 다음과 같이 定하면 편리하다.

$$V_0 = \frac{q'' \cdot P_H \cdot \nu_f \cdot L_H}{A_c (h_f - h_i)} \quad (6)$$

$V_0$  는 傳熱量  $q''$ , 入口엔탈피  $h_i$  의 冷却流體가 傳熱管의 出口 끝에서 飽和狀態가 되는 유속이다.

위 數式들에서 各 變數는 다음과 같이 無次元化한다.<sup>13)</sup>

$$Z = Z^* / L_H \quad (7a)$$

$$\langle j \rangle = \langle j^* \rangle / V_0 \quad (7b)$$

$$t = t^* / \theta \quad (7c)$$

$$\lambda(t) = \lambda^*(t^*) / L_H \quad (7d)$$

$$\langle \rho \rangle = \langle \rho^* \rangle / \rho_f \quad (7e)$$

$$P = P^* / \rho_f \cdot V_0^2 \quad (7f)$$

必要한 몇가지 無次元數는 다음과 같이 定한다.<sup>10),13),14)</sup>

프루우드 數 (Froude Number) :

$$N_{Fd} = \frac{V_0^2}{g \cdot L_H} = \left[ \frac{q'' \cdot P_H \cdot \nu_f}{A_c \cdot (h_f - h_i)} \right]^2 \cdot \frac{L_H}{g} \quad (8a)$$

摩擦數 (Friction Number) :

$$N_{Fr} = \frac{f \cdot L_H}{2 \cdot D_H} \quad (8b)$$

相變化數 (Phase Change Number) :

$$N_{PC} = \frac{\Omega \cdot L_H}{V_0} = \frac{\nu_{fg} \cdot (h_f - h_i)}{\nu_f \cdot h_{fg}} = \frac{\partial \langle j \rangle}{\partial Z} \quad (8c)$$

(7)式과 (8)式을 利用하여 (1)式 및 (2)式을 無次元化하면 (9)式 및 (10)式을 얻는다.

$$-\frac{\partial P}{\partial Z} = \frac{dj_i}{dt} + N_{Fr} \cdot j_i^2 + N_{Fd}^{-1} \quad (9)$$

$$dZ = \frac{dZ}{dt'} \cdot dt' = e^{N_{PC} \cdot t'} \cdot j_i (t-t'-1) \cdot dt' \quad (21)$$

(21) 式에 (20) 式을 代入하면

$$dZ = \frac{1}{\langle \rho_H \rangle} \cdot j_i (t-t'-1) dt' \quad (22)$$

(22) 式을 (12) 式에 代入하면 2 相流 領域에서의 無次元 壓力損失을 無次元 時間函數로 表現할 수 있다.

$$\Delta P_{2\phi} = \int_0^{\tau(t)} j_i (t-t'-1) \left[ \frac{\partial \langle j \rangle}{\partial t} + \langle j \rangle \frac{\partial \langle j \rangle}{\partial Z} + N_{FR} \langle j \rangle^2 + N_{Fd}^{-1} \right] dt' \quad (23)$$

傳熱管의 入口로 부터 沸騰境界까지의 無次元 距離  $\lambda(t)$  는 다음 式으로 주어진다.

$$\lambda(t) = \int_0^1 j_i (t-1) dt \quad (24)$$

위 式을 미분하면

$$\frac{d\lambda(t)}{dt} = j_i(t) - j_i(t-1) \quad (25)$$

2 相流의 無次元 慣性과 加速度를 求하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle j \rangle}{\partial t} + \langle j \rangle \frac{\partial \langle j \rangle}{\partial Z} &\triangleq \frac{d \langle j \rangle}{dt'} = \frac{d}{dt'} [j_i(t) + N_{PC} (Z - \lambda(t))] \\ &= \frac{dj_i(t)}{dt} + N_{PC} [j_i(t) + N_{PC} (Z - \lambda(t))] - N_{PC} \frac{d\lambda}{dt} \quad (26) \end{aligned}$$



(26) 式에 (25) 式을 代入하여 整理하면

$$\frac{\partial \langle j \rangle}{\partial t} + \langle j \rangle \frac{\partial \langle j \rangle}{\partial Z} = \frac{dj_i}{dt} + N_{Pc} \cdot j_i (t-1) + N_{Pc}^2 \cdot (Z - \lambda(t)) \quad (27)$$

(13) 式을 제공하면

$$\langle j \rangle^2 = j_i^2 + 2N_{Pc} \cdot (Z - \lambda(t)) \cdot j_i + N_{Pc}^2 \cdot (Z - \lambda(t))^2 \quad (28)$$

(27) 式 및 (28) 式을 (23) 式에 代入하면 2 相流의 無次元壓力 降下損失을 비교적 간단한 方程式으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta P_{2\phi} = & \left[ \frac{dj_i}{dt} + N_{Pc} \cdot j_i (t-1) + N_{Fr} \cdot j_i^2 + N_{Fd}^{-1} \right] \cdot J_1 \\ & + [2 \cdot N_{Fr} \cdot N_{Pc} \cdot j_i + N_{Pc}^2] \cdot J_2 + N_{Pc}^2 \cdot N_{Fr} \cdot J_3 \end{aligned} \quad (29)$$

여기에서

$$J_1 = \int_0^{\tau(t)} j_i (t-t'-1) dt' \quad (30a)$$

$$\begin{aligned} J_2 &= \int_0^{\tau(t)} [Z - \lambda(t')] \cdot j_i (t-t'-1) dt' \\ &= \int_0^{\tau(t)} \int_0^{t'} e^{N_{Pc} \cdot t'} \cdot j_i (t-t'-1)^2 dt' dt \end{aligned} \quad (30b)$$

$$J_3 = \int_0^{\tau(t)} [Z - \lambda(t')]^2 \cdot j_i (t-t'-1) dt'$$

## 2.2 無次元 動特性方程式

2相流의 動特性方程式은 (31)式을 미분하여 2次項以上の 것을 無視하면 安定性 解析에 必要한 線形의 動特性方程式을 얻을 수 있다.

(31)式을 미분한 후 Laplace 變換하면

$$\begin{aligned}
 \delta \Delta P_{\phi}(S) &= \delta \Delta P_{1\phi}(S) + \delta P_{2\phi}(S) = (\lambda_0 + j_{i0} \cdot \tau_0) \cdot S \delta j_i(S) + \\
 &2 \cdot N_{Fr} \cdot j_{i0} \delta j_i(S) + (N_{Fd}^{-1} + N_{Fr} \cdot j_{i0}^2) \cdot \delta \lambda(S) + \\
 &N_{Pc} \cdot j_{i0} \cdot \tau_0 \cdot e^{-s} \cdot \delta j_i(S) + (N_{Pc} \cdot j_{i0} + N_{Fd}^{-1} + N_{Fr} \cdot j_{i0}^2) \cdot \\
 &\delta J_1(S) + (N_{Pc}^2 + 2 \cdot N_{Pc} \cdot N_{Fr} \cdot j_{i0}) \cdot \delta J_2(S) + N_{Pc}^2 \cdot N_{Fr} \cdot \\
 &\delta J_3(S)
 \end{aligned} \tag{40}$$

(24)式을 미분한후 Laplace 變換하면

$$\begin{aligned}
 \delta \lambda(S) &= \int_0^{\infty} e^{-st} \int_0^1 \delta j_i(t-t') dt' dt = \int_0^1 e^{-st} \left[ \int_0^{t'} e^{-s(t-t')} \right. \\
 &\quad \left. \cdot \delta j_i(t-t') dt \cdot dt' + \int_{t'}^{\infty} e^{-s(t-t')} \delta j_i(t-t') dt \cdot dt' \right] \\
 &= \frac{1 - e^{-s}}{s} \delta j_i(S)
 \end{aligned} \tag{41}$$

(15) 式에서  $\tau(t)$ 을 求하면

$$\tau(t) = N_{Pc}^{-1} \log \{ 1 + N_{Pc}(1-\lambda) / j_i \} \quad (42)$$

(42) 式을 미분한 후 Laplace 變換하면

$$\begin{aligned} \delta \tau(S) &= \frac{-e^{-N_{Pc} \cdot \tau_0}}{j_{i0}} \delta \lambda(S) - \frac{e^{-N_{Pc} \cdot \tau_0}}{j_{i0}} \int_0^{\tau_0} e^{N_{Pc} \cdot t'} \int_0^{\infty} e^{-s \cdot t} \\ &\quad \cdot \delta j_i(t-t'-1) dt' \cdot dt = \frac{-e^{-N_{Pc} \cdot \tau_0}}{j_{i0}} \delta \lambda(S) \\ &\quad - \frac{e^{-s}(e^{\tau_0 \cdot (N_{Pc} - s)} - 1)}{(N_{Pc} - s) \cdot j_{i0}} \delta j_i(S) \end{aligned} \quad (43)$$

(30) 式들은 미분한 후 Laplace 變換하면

$$\begin{aligned} \delta J_1 &= j_{i0} \cdot \delta \tau(S) + L \left[ \int_0^{\tau_0} \delta j_i(t-t'-1) dt' \right] = \frac{e^{-s}(1-e^{-\tau_0 \cdot s})}{s} \delta j_i(S) \\ &\quad - \frac{e^{-N_{Pc} \cdot \tau_0}(1-e^{-s})}{s} \delta j_i(S) - \frac{e^{-s}(e^{-\tau_0 \cdot s} - e^{-N_{Pc} \cdot \tau_0})}{(N_{Pc} - s)e^{-N_{Pc} \cdot \tau_0}} \delta j_i(S) \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \delta J_2(S) &= j_{i0} \cdot (1-\lambda_0) \delta \tau(S) + \frac{2 \cdot j_{i0}}{N_{Pc}} \cdot L \left[ \int_0^{\tau_0} (e^{N_{Pc} \cdot t'} - 1) \cdot \delta j_i \right. \\ &\quad \left. (t-t'-1) dt' \right] - j_{i0} \cdot L \left[ \int_0^{\tau_0} \int_0^{t'} e^{N_{Pc} \cdot t''} \cdot \delta j_i(t-t''-1) \right. \\ &\quad \left. dt' dt'' \right] - j_{i0} \cdot L \left[ \int_0^{\tau_0} \int_0^1 \delta j_i(t-t'-t'') dt' \cdot dt'' \right] \end{aligned}$$

(47a)

$$L \left[ \int_0^{\tau_0} e^{N_{pc} \cdot t} \delta_{ji}(t-t'-1) dt' \right] = \int_0^{\tau_0} e^{-st} \int_0^{\infty} e^{N_{pc} \cdot t'} \cdot \delta_{ji} \\ (t-t'-1) dt \cdot dt' = \int_0^{\tau_0} e^{-s(t'+1)} \cdot e^{N_{pc} \cdot t'} \left\{ \int_0^{1+t'} e^{-s(t-t'-1)} + \right. \\ \left. \int_{1+t}^{\infty} e^{-s(t-t'-1)} \right\} \delta_{ji}(t-t'-1) dt' \cdot dt = \frac{e^{-s} (e^{(N_{pc}-S) \cdot \tau_0} - 1)}{(N_{pc}-S)}$$

 $\cdot \delta_{ji}(S)$ 

(47b)

$$L \left[ \int_0^{\tau_0} \int_0^{t'} e^{N_{pc} \cdot t''} \delta_{ji}(t-t''-1) dt' \cdot dt'' \right] = \int_0^{\infty} e^{-st} \int_0^{\tau_0} \int_0^{t'} \\ e^{N_{pc} \cdot t''} \cdot \delta_{ji}(t-t''-1) dt' \cdot dt'' \cdot dt = \int_0^{\tau_0} \int_0^{t'} e^{-s(1+t'')} \cdot e^{N_{pc} \cdot t''} \\ \left\{ \int_0^{1+t''} e^{-s(t-t''-1)} + \int_{1+t''}^{\infty} e^{-s(t-t''-1)} \right\} \delta_{ji}(t-t''-1) dt \cdot dt' \cdot dt'' \\ = \frac{e^{-s}}{(N_{pc}-S)} \left\{ \frac{(e^{(N_{pc}-S) \cdot \tau_0} - 1)}{(N_{pc}-S)} - \tau_0 \right\} \cdot \delta_{ji}(S) \quad (47c)$$

$$L \left[ \int_0^{\tau_0} \int_0^1 \delta_{ji}(t-t'-t'') dt' \cdot dt'' \right] = \int_0^{\tau_0} \int_0^1 e^{-s(t+t'')} \\ \left\{ \int_0^{t'+t''} e^{-s(t-t'-t'')} + \int_{t'+t''}^{\infty} e^{-s(t-t'-t'')} \right\} \cdot \delta_{ji}(t-t'-t'')$$

$$\cdot dt' \cdot dt'' \cdot dt = \frac{(e^{-s}-1)(e^{-\tau_0} \cdot S - 1)}{S^2} \delta_{ji}(S) \quad (47d)$$

$$L \left[ \int_0^{\tau_0} e^{2N_{Pc} \cdot t'} \cdot \delta_{ji}(t-t'-1) dt' \right] = \frac{e^{-s}(e^{(2N_{Pc}-S)\tau_0} - 1)}{(2N_{Pc} - S)} \delta_{ji}(S) \quad (47e)$$

$$L \left[ \int_0^{\tau_0} e^{N_{Pc} \cdot t'} \int_0^{t'} e^{N_{Pc} \cdot t''} \delta_{ji}(t-t''-1) dt' \cdot dt'' \right] = \int_0^{\tau_0} \int_0^{t'} e^{-s(1+t'')} \cdot e^{N_{Pc}(t'+t'')} \cdot \left\{ \int_0^{1+t''} e^{-s(t-t''-1)} + \int_{1+t''}^{\infty} e^{-s(t-t''-1)} \right\} \cdot \delta_{ji}(t-t''-1) dt' \cdot dt'' = \frac{e^{-s}}{(N_{Pc}-S)} \left\{ \frac{(e^{(2N_{Pc}-S) \cdot \tau_0} - 1)}{(2N_{Pc}-S)} - \frac{(e^{N_{Pc} \cdot \tau_0} - 1)}{N_{Pc}} \right\} \delta_{ji}(S) \quad (47f)$$

$$L \left[ \int_0^{\tau_0} e^{N_{Pc} \cdot t'} \int_0^t \delta_{ji}(t-t'-t'') dt' \cdot dt'' \right] = \frac{(e^{(N_{Pc}-S) \cdot \tau_0} - 1) \cdot (1 - e^{-s})}{(N_{Pc}-S) \cdot S} \delta_{ji}(S) \quad (47g)$$

(47) 式에서 初期條件은 모두 0인 것으로 가정하여 計算하였고, (44), (45), (46) 式들은 이 式들을 利用하여 求하였다. (37) 式을 미분한 후 Laplace 변환하고 (41), (43), (44) 式들을 利用하여 정리하면 다음과 같이 表現된다.

단,

$$K_1 = N_{Pc} + N_{Fd}^{-1} + N_{Fr} \cdot j_{io}^2$$

$$K_2 = N_{Pc}^2 + 2N_{Pc} \cdot N_{Fr} \cdot j_{io}$$

$$K_3 = N_{Pc}^2 + N_{Fr}$$

$$K_4 = e^{-N_{Pc} \cdot \tau_o} + N_{Pc} \cdot \tau_o + N_{Pc} \cdot \tau_o \cdot (1 + N_{Pc} \cdot \tau_o \cdot e^{N_{Pc} \cdot \tau_o})$$

$$K_5 = N_{Pc} \cdot \left\{ 1 + N_{Pc} \cdot \tau_o \cdot e^{N_{Pc} \cdot \tau_o} \cdot (1 + 0.5 N_{Pc} \cdot \tau_o) - \frac{e^{-N_{Pc} \cdot \tau_o}}{2} \right\}$$



### 3. 流量制限裝置의 影響

#### 3.1 靜特性曲線에서의 $K_I, K_E$ 의 影響

##### 3.1.1 靜特性曲線에서 $K_I$ 의 影響

定常狀態에서는  $j_{i0} = \lambda_0$ . 이므로 (39) 식에서 無次元 數 및 變數는  $N_{Pc}, N_{Fd}, N_{Fr}, j_i, K_I, K_E$  의 6 가지이다.

靜特性曲線에 가장 영향이 큰 것은 無次元 相變化數  $N_{Pc}$ 이다. 이 無次元數는 (8c) 식에서 알 수 있는 바와 같이 壓力과 過冷 却度에 따라 변하며 系統壓力이 낮을수록, 冷却流體의 入口엔탈피 ( $h_i$ )가 적을수록 커진다.

아래의 그림은  $K_I$  가 변화할때의  $\Delta P - j_i$  靜特性 曲線이다.

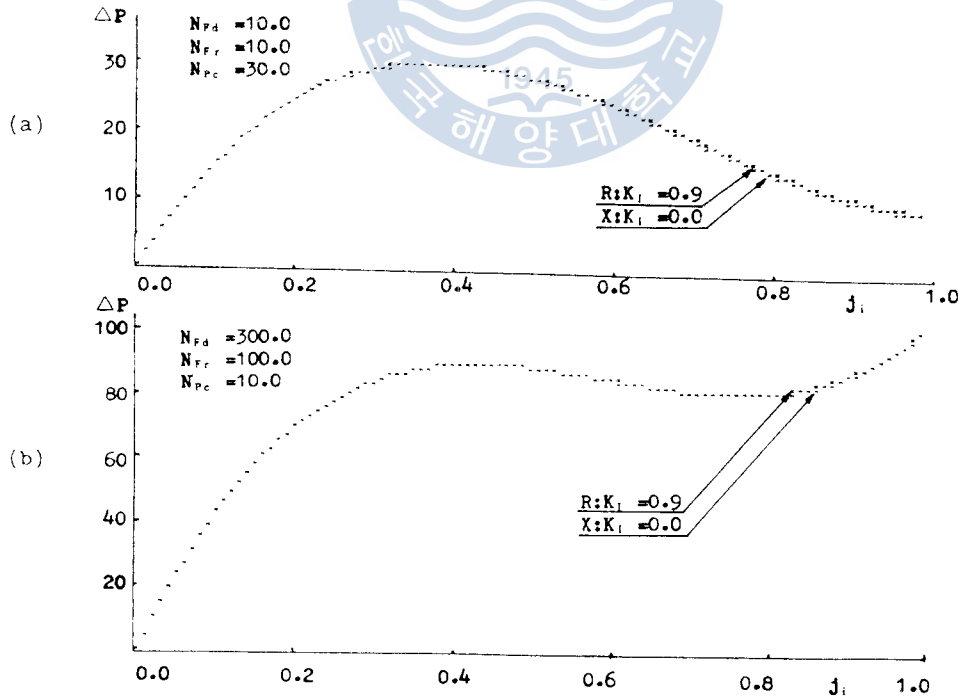


Fig. 3.1  $\Delta P - j_i$  curves to  $K_I$  variation at steady state

그림 3.1 (a)는  $N_{Fd} = 10.0$ ,  $N_{Fr} = 10.0$ ,  $N_{Pc} = 30.0$  일때  $K_I = 0.0$  과  $K_I = 0.9$  에 대해서 나타낸  $\Delta P - j_i$  靜特性曲線이다. 이 그림에서  $j_i$  가 0.3 부근과 0.45 보다 클때  $K_I = 0.0$  曲線보다  $K_I = 0.9$  曲線이 약간 상승하였음을 알 수 있다. 이것은 入口流量制限裝置를 設置하였을 경우에 安定性이 조금 좋아진다는 것을 의미한다.

그림 3.1 (b)는  $N_{Fd} = 300.0$ ,  $N_{Fr} = 100.0$ ,  $N_{Pc} = 10.0$  일때  $K_I = 0.0$  과  $K_I = 0.9$  에 대한  $\Delta P - j_i$  靜特性曲線이다. 이 그림에서는  $j_i$  가 0.6 일때와 0.8 보다 클때  $K_I = 0.0$  曲線보다  $K_I = 0.9$  曲線이 미세하나마 상승하였음을 이 그림에서 알 수 있다. 이 그림에서도 入口流量制限裝置를 設置하였을 경우에 安定性이 좋아진다는 것을 의미한다.

그림 3.1 에서 분석한 것을 종합하면 傳熱管에 入口流量制限裝置를 設置하였을 경우 조금 安定性이 좋아진다는 것을 알 수 있다. 이는 液相 領域에 設置된 流量制限裝置가 流速의 자승에 比例하는 壓力損失을 유기하므로 대체로 摩擦力은 振動을 감쇄시키는 것으로 解析할 수 있다.

이 結果는 參考文獻 (2), (6), (8) 의 實驗結果와 一致한다.

### 3.1.2 靜特性曲線에서 $K_E$ 의 影響

그림 3.2 는 몇가지 無次元數에 대하여  $K_E$  의 影響이 어떠한가를 나타낸  $\Delta P - j_i$  靜特性曲線이다.



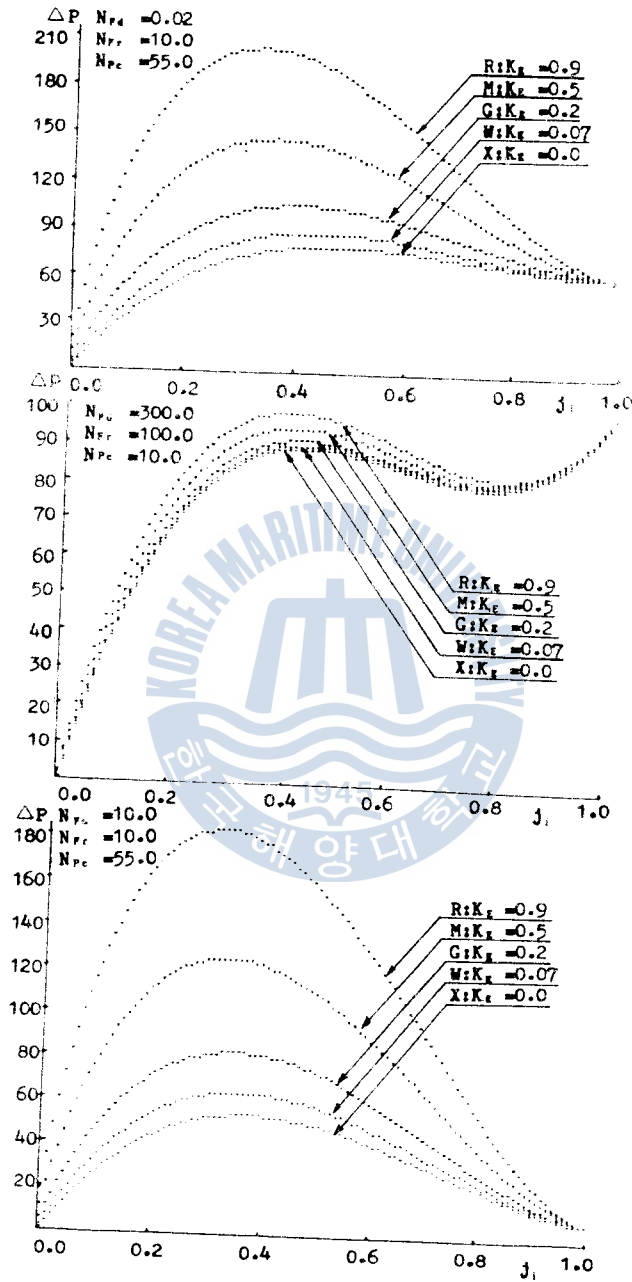


Fig. 3.2  $\Delta P - j_1$  curves to  $K_x$  variation at steady state

그림 3.2(a)는  $N_{Fd} = 0.02$ ,  $N_{Fr} = 10.0$ ,  $N_{Pc} = 55.0$  일때  $K_E$ 가 0.0에서 0.9까지 변할때 나타낸 그림이다.  $K_E$ 가 증가함에 따라 불안정領域과 폭이 상당히 커졌으며, 極大點은  $j_i$ 가 0.4 부근이다. 이것은 出口流量制限裝置를 設置하였을 경우에 安定性이 나빠진다는 것을 의미한다.

그림 3.2(b)는  $N_{Fd} = 300.0$ ,  $N_{Fr} = 100.0$ ,  $N_{Pc} = 10.0$  일때  $K_E$ 가 0.0에서 0.9까지 변할때 나타낸 그림이다. 그림 3.2(a)와 마찬가지로  $K_E$ 가 증가함에 따라 불안정領域과 폭이 증가하였으며, 極大點은  $j_i$ 가 0.4 부근이다. 이 경우에도 出口流量制限裝置를 設置하였을 경우 역시 安定性이 나빠졌다. 불안정領域은  $j_i$ 가 0.4에서 0.8 사이의領域이다.

그림 3.2(c)는  $N_{Fr} = 10.0$ ,  $N_{Fd} = 10.0$ ,  $N_{Pc} = 55.0$  일때  $K_E$ 가 0.0에서 0.9까지 변할때 나타낸  $\Delta P - j_i$  靜特性曲線이다. 이 경우에도  $K_E$ 가 증가함에 따라서 불안정領域과 폭이 상당히 증가하였다. 역시 出口流量制限裝置를 設置하였을 경우 安定性이 나빠졌다. 極大點은  $j_i$ 가 0.38 부근이다.

그림 3.2에서 分析한 結果를 종합하면 傳熱管에서 出口流量制限裝置를 設置하였을 경우 安定性이 나빠진다는 것을 알 수 있다. 이는 傳熱管의 出口에 設置되는 流量制限裝置가 유속에 따른 2相流領域의 變化로 인하여 2相流의 密度와 流速의 變化가 심하게 일어나 安定性이 악화되는 것으로 생각된다.

이 結果는 參考文獻 (2), (6), (8)의 實驗結果와 一致한다.

### 3.2 動特性에서 $K_i, K_E$ 의 效果

(49)式은 傳熱管入出口에서 조그마한 차압변동이나 내부압력 강하에 의하여 管入口流速의 變動이 어떻게 變動하는가를 나타내는 方程式으로 有限한 壓力 變動에 대하여 流速이 무한하게 증대하면 2相流는 不安定해지고 無限히 작아지면 安定해진다. 流速이 相當한 크기로 계속하여 振動하는 安定과 不安定の 境界상태는 廣意로는 安定하다고 하나 自然界에서는 어떠한 현상이 不安定하여 무한히 증대하기만 하는 일은 없고 대개 有限한 振動現象으로 나타난다. 따라서 有限한 振動現象이 不安定狀態의 것인가 臨界狀態의 것인가 구별하기 곤란하므로 이를 모두 不安定한 狀態로 取扱한다. 실제의 竝列傳熱管에서, 差壓變動은 驅動펌프나 중간 벨브 操作등으로 발생하고, 내부압력강하의 변동은 흐름 양상의 변동이나 傳熱量등이 변화할때 誘起됨으로 機器가 운전중일때는 언제나 이러한 압력변동은 存在한다고 볼 수 있다.

만약 (49)式의 해를 얻을 수 있다면 動特性和 安定성을 쉽게 얻게되나 이 方程式은  $S$ 의 指數函數를 포함하고 있으므로 해석적인 方法으로는 해를 求하기 힘들다. 그러나 制御工學에서 흔히 利用하는 Nyquist 安定條件을 적용하면 安定度(relative stability)는 電子計算機로 용이하게 구할 수 있다.

여기서는 入口 및 出口 流量制限裝置가 無次元 2相流의 安定度에 미치는 영향을 알아보려고 한다.

(49) 식으로 부터 開回路傳達函數를 求하면 다음 式과 같다.

$$G_{op}(S) = G_p(S) - 1 \quad (51)$$

$G_{op}(S)$  는 複素數平面의 右半面에 不安定根을 가지고 있지 않으므로 Nyquist 軌跡이  $(-1.0j)$  점을 감싸지 않으면 이 계통은 安定하고 만약 이점을  $N$ 회 감싸면  $G_{op}(S)$  는  $N$ 개의 不安定한 極(pole)을 갖게 되어 이 계통은 不安定해진다. 따라서 無次元의 數 및 變數의 크기에 따라 Nyquist 의 軌跡이  $(-1, 0j)$  점에 얼마나 접근하느냐에 따라 2相流의 安定度를 判別할 수 있다.

### 3.2.1 動特性에서 $K_I$ 의 影響

그림 3.3 은  $N_{Fd} = 0.02$ ,  $N_{Pc} = 0.03$ ,  $N_{Fr} = 0.5$ ,  $j_i = 0.38$  인 경우의 垂直傳熱管에서  $K_I$  가 變할때의 Nyquist 선도이다.

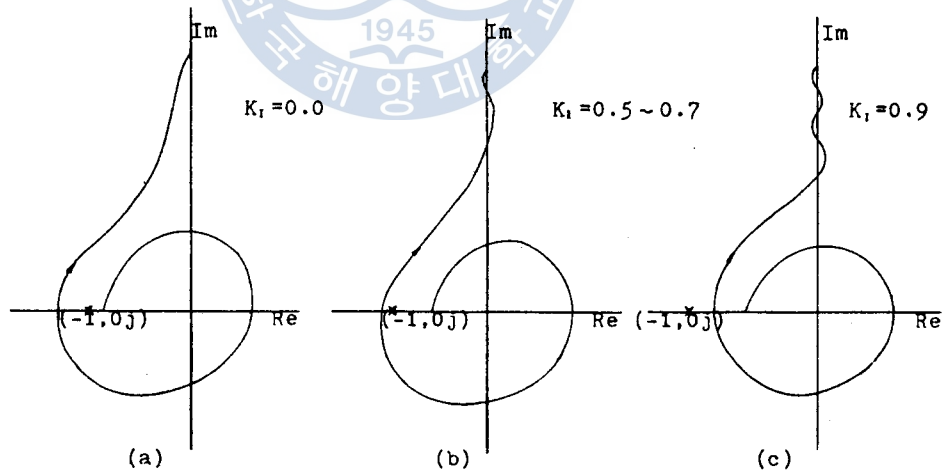


Fig. 3.3 Nyquist diagram to  $K_I$  variation in a vertical heated channel. ( $N_{Fd} = 0.02, N_{Pc} = 0.03, N_{Fr} = 0.5, j_i = 0.38$ )

그림 3.3 (a)는  $(-1, 0j)$ 를 감싸고 있으므로 不安定하나  $K_E$ 가 증가함에 따라 전체적인 선도가 오른쪽으로 이동하여  $K_E = 0.9$ 일 때는 安定하게 된다. 이것은 入口流量制限裝置를 설치하였을 경우에 安定性이 좋아짐을 나타내고 있다.

그림 3.3의 分析結果를 종합하면 入口流量制限裝置의 설치는 安定性을 좋게하는 것으로 나타났다. 이는 入口流量制限裝置가 液棉領域에 存在하고 流速變動을 억제하는 역할을 하므로 流體振動을 억제하는 것으로 보아진다.

이 結果는 參考文獻 (2), (6), (8)의 實驗結果와 一致한다.

### 3.2.2 動特性에서 $K_E$ 의 影響

그림 3.4는  $N_{Fd} = 10.0$ ,  $N_{Pc} = 1.7$ ,  $N_{Fr} = 0.5$ ,  $j_i = 0.6$ 인 경우 垂直傳熱管에서의 Nyquist 선도이다.

$K_E = 0.0$ 인 그림 3.4(a)는 安定이나  $K_E$ 가  $0.5 \sim 0.9$ 인 領域에서의 그림 3.4(b)는 不安定으로 나타났다. 이는 出口流量制限裝置를 설치하면 安定性이 나빠짐을 의미한다.

그림 3.5은  $N_{Fd}^{-1} = 0.0$ ,  $N_{Pc} = 1.7$ ,  $N_{Fr} = 0.5$ ,  $j_i = 0.6$ 인 水平傳熱管에서의 Nyquist 선도이다.

$K_E = 0.0$ 인 그림 3.5(a)는 安定이나  $K_E$ 가  $0.5 \sim 0.9$ 인 領域에서의 그림 3.5(b)는 不安定으로 나타났다. 역시 出口流量制限裝置를 설치할 경우 安定性이 나빠짐을 의미한다.

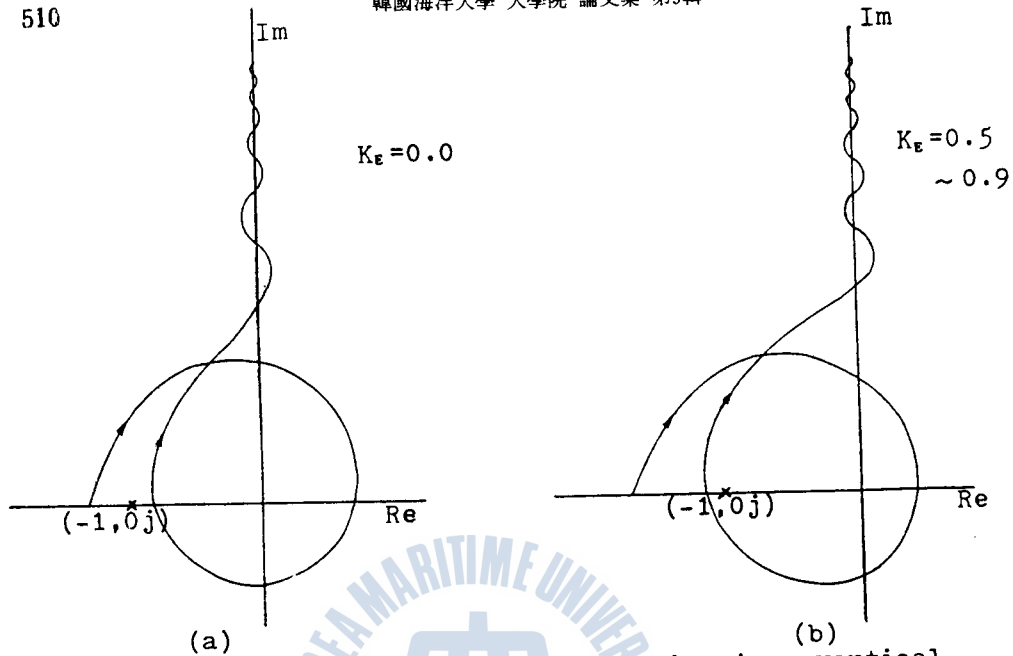


Fig. 3.4 Nyquist diagram to  $K_E$  variation in a vertical heated channel. ( $N_{Fd} = 10.0$ ,  $N_{Pe} = 1.7$ ,  $N_{Fr} = 0.5$ ,  $j_i = 0.6$ )

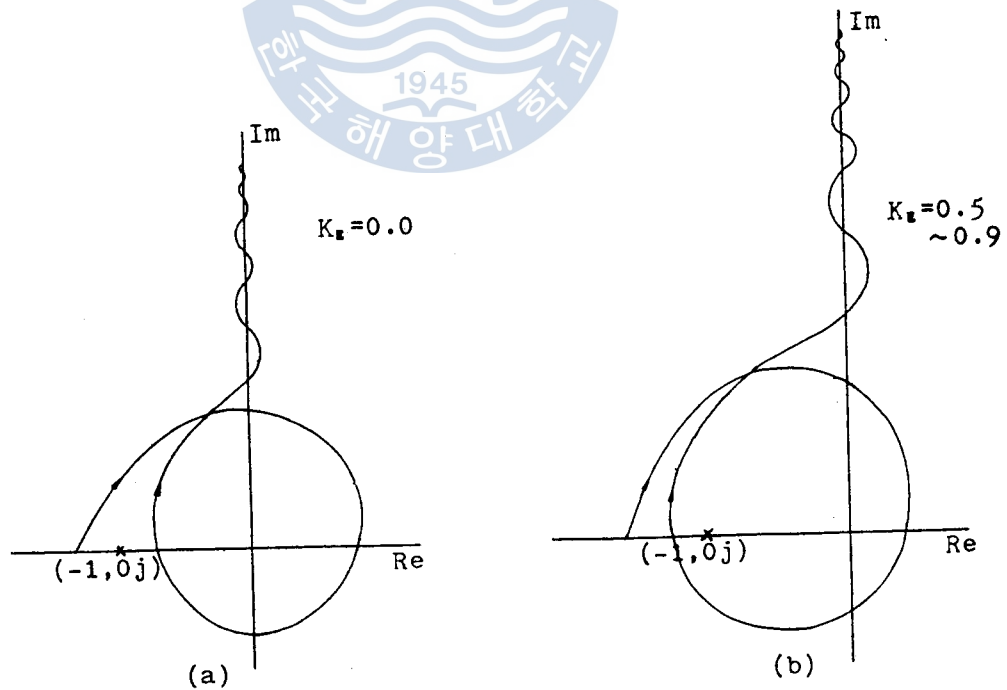


Fig. 3.5 Nyquist diagram to  $K_E$  variation in a horizontal heated channel. ( $N_{Fd}^{-1} = 0.0$ ,  $N_{Pe} = 1.7$ ,  $N_{Fr} = 0.5$ ,  $j_i = 0.6$ )

그림 3.4 와 그림 3.5 의 分析結果를 종합하면 出口流量制限裝置의 설치는 安定性を 나쁘게 하는 것으로 나타났다.

이것은 2相流 領域에 存在하는 出口流量制限裝置가 流量變動時 流速과 質量의 變化를 모두 받게 되고, 出口流速變化는 管의 길이에 해당하는 移送時間 후에 密度波가 出口에 도달하게 되므로 安定性이 阻害되는 것으로 생각된다.

이 結果는 參考文獻 (2), (6), (8) 의 實驗結果와 一致한다.



## 4. 水平傳熱管和 垂直傳熱管的 安定性 比較

水平傳熱管和 垂直傳熱管 중 어느 편이 安定한지에 대해서 2章에서 誘導한 無次元 靜特性方程式과 無次元 動特性方程式을 利用하여 分析해 보고자 한다.

### 4.1 靜特性에서의 安定性 比較

그림 4.1 은 水平傳熱管和 垂直傳熱管에서의  $\Delta P - j_i$  靜特性曲線이다.

그림 4.1(a)는 垂直傳熱管인  $N_{Fd} = 10.0$ ,  $N_{Fr} = 10.0$  인 경우에 그림 4.1(c)는 水平傳熱管인  $N_{Fd}^{-1} = 0.0$ ,  $N_{Fr} = 10.0$  인 경우의  $N_{Pc}$ 에 대하여 나타낸  $\Delta P - j_i$  靜特性曲線이다. 두 그림을 比較分析하면  $j_i = 0.24$  부근일때  $N_{Pc} = 55$  와  $N_{Pc} = 0.1$  에서 미세하나마 水平傳熱管이 垂直傳熱管에 비하여 安定성이 좋아졌다. 또한  $j_i = 0.43$  부근에서  $N_{Pc} = 0.1$  일때도 水平傳熱管이 미세하나마 安定성이 좋아졌다.

그러나 그림 4.1(b)의  $N_{Fd} = 0.02$ ,  $N_{Fr} = 10.0$  인 垂直傳熱管的 靜特性曲線과 水平傳熱管인 그림 4.1(c)를 比較하면 垂直傳熱管인 그림 4.1(b)의 경우가 훨씬 安定성이 좋아졌음을 알 수 있다.

그림 4.1의 分析을 종합하면  $N_{Fd}$ 가 큰 경우 즉 管的 길이가 짧은 경우에는 미세하나마 水平傳熱管的 安定성이 더 좋고,  $N_{Fd}$ 가 작은 경우 즉, 管的 길이가 긴 경우에는 垂直傳熱管이 더 安定한 것으로 나타났다.



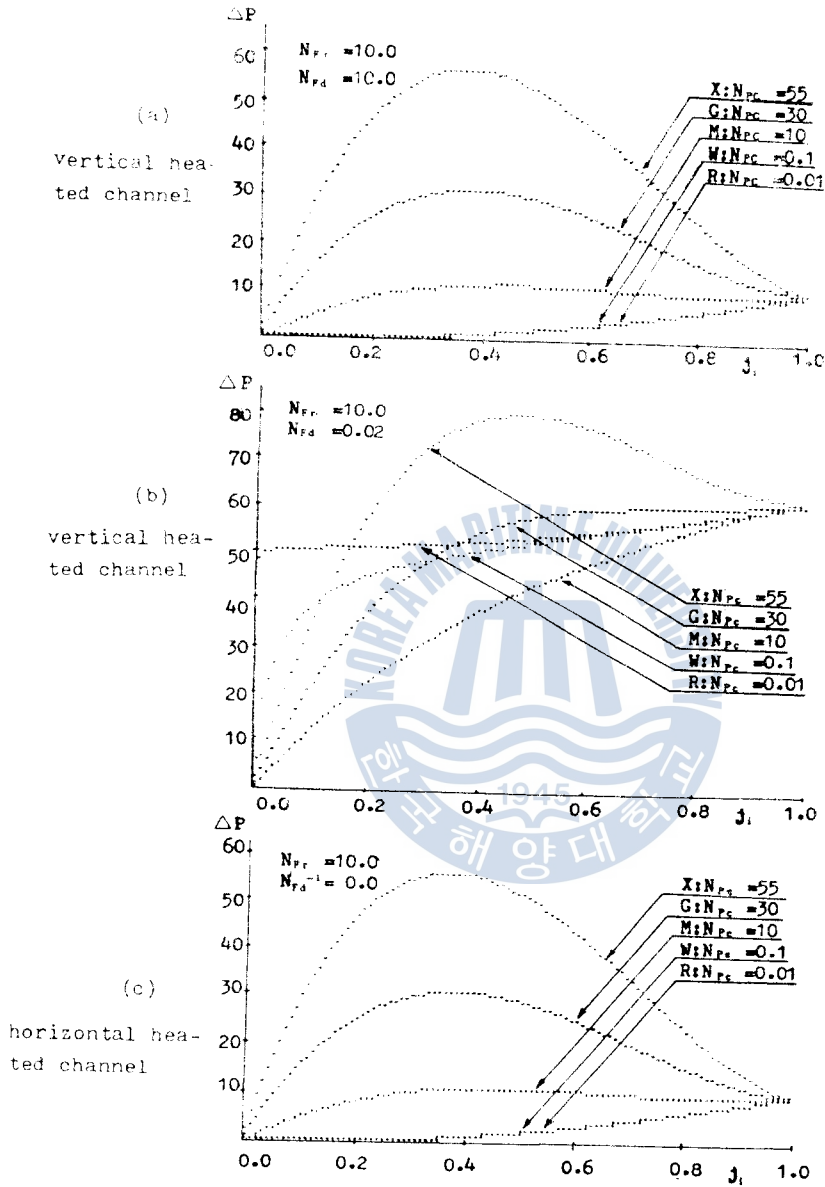
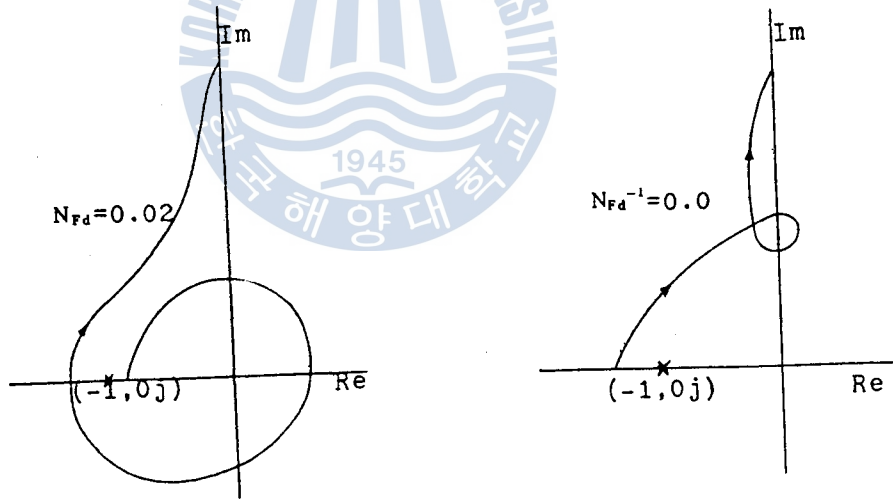


Fig. 4.1  $\Delta P - j_1$  curves to vertical and horizontal heated channel at steady state.

직 관의 경우에 垂直傳熱管에서는  $N_{Pc} = 55$  에서만 負의 기울기가 存在하고 水平傳熱管에서는  $N_{Pc} = 10$  까지 負의 기울기가 나타나므로 不安定領域이 확대 되었는데, 이는 관내의 作動流體가 가진 중력이 定常狀態에서는 安定化에 기여하는 것으로 보여진다.

4.2 動特性에서의 安定性 比較

그림 4.2(a)는  $N_{Fd} = 0.02$ ,  $N_{Pc} = 0.03$ ,  $N_{Fr} = 0.5$ ,  $j_i = 0.38$  인 경우의 垂直傳熱管을, 그림 4.2(b)는 같은 조건에서의 水平傳熱管을 도시하였다.



(a) vertical heated channel

(b) horizontal heated channel

Fig 4.2 Nyquist diagram in a vertical and horizontal heated channel. ( $N_{Pc} = 0.03$ ,  $N_{Fr} = 0.5$ ,  $j_i = 0.38$ )

이 두 그림 (a), (b)를 比較하면 같은 조건에서 垂直傳熱管은 不安定하나 水平傳熱管은 安定한 것으로 나타났다.

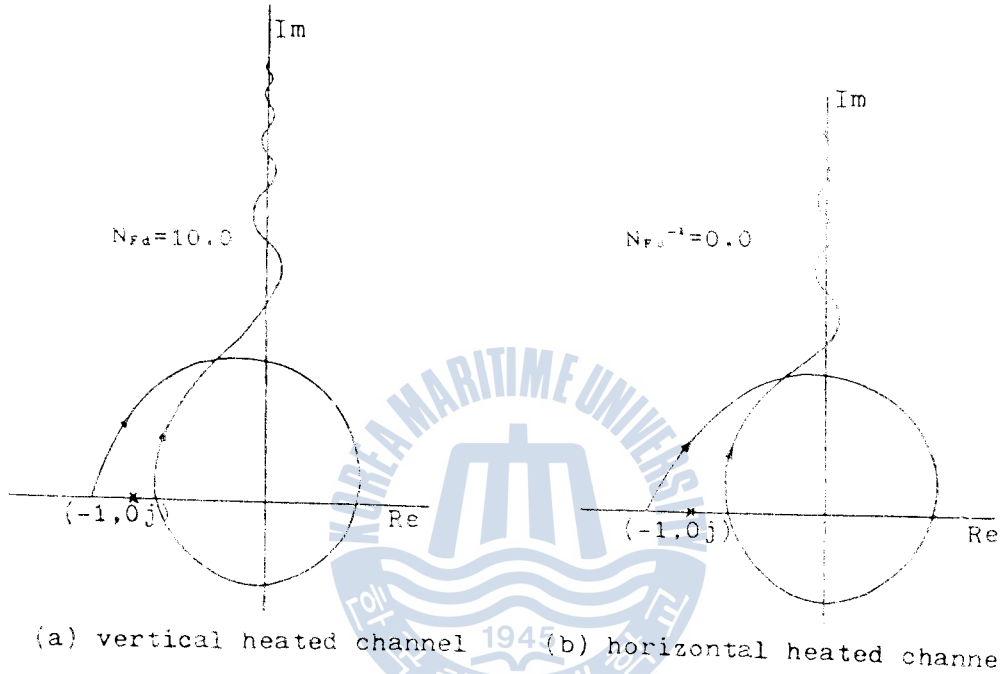


Fig. 4.3 Nyquist diagram in a vertical and horizontal heated channel. ( $N_{Pc} = 1.7$ ,  $N_{Fr} = 0.5$ ,  $j_1 = 0.6$ )

그림 4.3 (a)는  $N_{Fd} = 10.0$ ,  $N_{Pc} = 1.7$ ,  $N_{Fr} = 0.5$ ,  $j_1 = 0.6$  인 경우의 垂直傳熱管이고, 그림 4.3 (b)는 같은 조건에서의 水平傳熱管이다. 두 그림은 별 차이가 없는 것으로 나타났다.

그림 4.2와 그림 4.3의 分析을 종합하면  $N_{Fd}$ 가 비교적 큰 경우 즉 管의 길이가 짧은 경우에는 水平傳熱管과 垂直傳熱管의 安定성 차이가 별로 없고,  $N_{Fd}$ 가 比較的 작은 긴 傳熱管의 경우에는 水

平傳熱管이 垂直傳熱管에 比하여 더 安定하다.

이 結果는 靜特性의 경우와 相反된다. 이는 管내에 있는 作動流體가 가진 중력이 振動의 경우에는 가속 및 감속에 작용하기 때문인 것으로 생각되어 진다. 그러나 실제 水平傳熱管에서는 垂直傳熱管에 比하여 많은 흐름의 양상 변화가 일어나므로 꼭 水平傳熱管이 더 安定하다고 보기는 어렵다.



## 5. 結 論

傳熱管內의 2相流는 均質流라는 가정 아래 入口 및 出口 流量制限裝置가 設置된 경우에 密度波의 移送時間을 고려한 無次元動特性方程式을 유도하여 傳熱管 入口 및 出口 流量制限裝置의 효과에 대하여 定性的으로 分析하였다.

流體力學 및 熱力學에 關係되는 몇가지 파라메터를 無次元化하여 流體의 運動을 解析하면 機器를 設計할때나 應用할때 相似法을 적용하면 그 分析結果를 應用하는데 편리한 利點이 있다.

本 分析方法和 結果를 利用하여 여러가지 設計 및 運轉 조건에서 傳熱管內의 流量制限裝置의 設計에 參考가 될 것으로 생각된다.

本 研究의 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 入口流量制限裝置는 靜特性이나 動特性上 모두 振動發生을 억제하거나 振動範圍등이 줄어들게 된다. 이것은 從來의 實驗結果와 一致한다.
2. 出口流量制限裝置는 靜特性이나 動特性으로 振動을 유발하고 振動範圍를 확대한다. 이것은 從來의 實驗結果와 一致한다.
3.  $N_{Fd}$ 가 작은 경우 즉 傳熱管의 길이가 긴 경우에 靜特性上으로는 水平傳熱管 보다 垂直傳熱管이 더 安定한 것으로 나타났고, 動特性으로는 垂直傳熱管 보다 水平傳熱管이 더 安定한 것으로 나타났다.

## 參 考 文 獻

1. M. Ledinegg: Instability of Flow during Natural and Forced Circulation, Die Wärme, 61,48, pp.891 ~ 898, (1938)
2. J.S. Malbetsch and P. Griffith: A Study of System-Induced Instability in Forced-Convection with Subcooled Boiling, MIT Lab. Repot, 5382-35, pp.1 ~ 83, (1965)
3. G. Yadigaroglu and A.E. Bergles: An Experimental and Theoretical Study of Density-Wave Oscillation in Two-Phase Flow, MIT Report, DSR 74629-3, pp.1 ~ 125, (1969)
4. EURATOM Report: Proceedings of Symposium on Two-Phase Flow Dynamics, Eindhoven, Netherland, pp.1131 ~ 1289, (1967)
5. A.H. Stenning and T.N. Veziroglu: Flow Oscillation Modes in Forced Convection Boiling, Proceedings of 1965 Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute, Stanford University Press, pp.301 ~ 306, (1965)
6. K.C. Jain and S.G. Bankoff: Self-Sustained Hydrodynamic Oscillation in a Natural-Circulation Boiling Water Loop, Nuclear Eng. and Design 4 (1966) 233-252, North-Holland Publishing Comp., p.248, (1966)
7. E.R. Quandt: Analysis and Measurement of Flow Oscillation, Chem. Eng. Progress Symposium Series, No.32, Vol.57, pp.111 ~ 126, (1961)

8. G.B. Wallis and J.H. Heasley: Oscillations in Two-Phase Flow Systems, J. of Heat Transfer, ASME, August, p.369, (1961)
9. J.M. Gonnalez-Santalo and R.T. Lahey, JR: An Exact Solution for Flow Transients in Two-Phase Systems by the Method of Characteristics, J. of H. T., ASME, November, pp.470 ~ 476, (1973)
10. M. Ishii and N. Zuber: Thermally Induced Flow Instabilities in TWO-Phase Mixtures, 4th Intern. Heat Transfer Conf. Paris, pp.1 ~ 12, (1970)
11. R.T. Laley, Jr. and F.J. Moody: The Thermal Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor, ANS Monograph, pp.713 ~ 737, (1979)
12. T.N. Veziroglu and S. Kakac: Two-Phase Transport and Reactor Safety, Vol. 1 - Vol. V, Hemisphere, pp.713 ~ 737, (1979)
13. J.L. Achard, et al: The Analysis of Linear and Nonlinear Instability Phenomena in heated channels, RPI, Topical Report, pp.1 ~ 99, (1980)
14. M.Ishii: Thermo-Fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow, Eyrolles, pp.142 ~ 201, (1975)
15. 朴進吉·河注植; 傳達管内에서 發生하는 2相流의 不安定性에 關

- 한 研究, 韓國海洋大學 船舶工學研究所 論文集, pp.77 ~ 120,  
(1982).
16. 朴進吉·陳康奎·吳世駿; 直立傳熱管에서의 流體振動에 關한 研究,  
韓國船用機關學會誌, 第8卷, pp.85 ~ 99, (1984).
17. R.C. Dorf: Modern Control Systems, Addison-Wesley, pp.255  
~ 310, (1974)
18. J.G. Park and J.S. Ha: The Pressure-Drop and Density-Wave  
Oscillations of Two-Phase Flow in a Parallel Heating  
Channel, 第8次 國內外韓國科學技術者學術大會, 論文集(II),  
pp.631~638, (1981).
19. 金京根; 氣液二相流, 太和出版社, pp.7 ~ 70, pp.228 ~ 236,  
(1986).
20. J.A. Boure, et al: Review of Two-Phase Flow Instability,  
ASME Preprint, 71-HT-42, ASME, pp.1 ~ 19, (1971)
21. S. Kakac and M. Ishii: Advances in Two-Phase Flow and Heat  
Transfer, NATO ASI Serise, Vol.2, pp.577 ~ 667, (1983)