

## 관류형 증기발생기의 균일열속 선형 안정성 모형

### Linear Stability Model for the Once-Through Steam Generator under an Uniform Heat Flux

김연식, 심운섭, 김의광

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

증기발생기 안정성 분석을 위한 코드개발을 위한 균일열속 선형모형을 설정하였다. 튜브와 튜브측의 지배방정식을 정리하고 섭동화를 통한 선형화와 Laplace 변형을 통하여 압력강하 섭동항을 계산하기 위한 주요 변수의 지배방정식을 유도하였다. 이를 바탕으로 필요한 해석 알고리즘을 설정하고 전산프로그램 SGSTA를 작성하였다. 작성된 SGSTA로 밀도와 불안정성에 관련한 주요 인자에 대한 정성적 평가를 통하여 개발된 코드는 물리적으로 타당한 결과를 내고 있음을 확인하였다.

#### Abstract

A linear stability model under an uniform heat flux was developed to evaluate the stability of the once-through steam generator. Using the perturbation and Laplace transformation the governing equations were transformed to perturbed linear equations whose solutions are used to calculate perturbed pressure drop relations. An applicable algorithm for numerical analysis was adopted and a computer code named SGSTA was developed. Using the SGSTA parametric study on the density wave instability according to some parameters which have dominant effect on the instability. The calculational results showed reasonable trends which are suitable to physical phenomena.

#### 1. 서론

액체금속로의 증기발생기는 셸측에 냉각재인 소듐이 흐르고 튜브측에는 물/증기가 경계를 이루는 부품으로서 튜브 입구에 과냉의 물(급수)이 들어와 셸측으로부터 열을 전달받아 포화상태의 이상유동이 되고 출구에서는 단상의 과열증기가 되어 빠져 나가게 된다. 포화상태의 이상유동 영역은 증기발생기 작동에 있어서 안정성에 영향을 미치는 중요한 인자가 된다. 계통의 주어진 운전 조건하에서 급수측 등에 작은 교란이 발생할 수 있으며 이는 열전달이 일어나는 튜브길이 전체에 대하여 그 영향이 전파되고 이에따라 열전달 영역의 구간에 변동이 생기고 이를 보상하기 위한 평형점의 이동으로 유량 변화등의 주기적 현상이 발생하게 된다. 튜브내에 유량변화는 온도변화를

유발하고 이는 다시 열전달에도 영향을 미치게 되는 주기적 경향을 띤 거동을 보이게 된다. 이와 같이 증기발생기내 또는 증기발생기를 포함한 증기계통 내에서의 주기성을 띤 열유체적 비정상적 거동을 불안정성으로 정의하며 이에 속하는 경우와 물리적 현상의 종류가 매우 다양하다고 인식하고 있다.

본 논문에서는 액체금속로의 증기발생기내에서의 불안정성을 평가하기 위하여 먼저 비교적 단순한 모형인 균일열속 하에서의 튜브측 안정성을 해석하는 선형 모형을 설정하고 불안정성 현상에 대한 물리적 현상이해와 이에 관련한 주된 인자를 비교.평가 하였다. 이를 위해서 전산코드를 개발하였으며 향후 검증작업을 통하여 설계적용을 위한 도구로 활용할 수 있도록 하였다.

## 2. 본 론

관류형 증기발생기의 튜브측에 대한 안정성 분석을 위하여 튜브외벽에 균일열속이 가해지는 비교적 단순한 모형을 가정하였으며 튜브측의 유동형태에 따라서 튜브영역, 과냉영역, 이상영역, 그리고 과열증기 영역으로 나누어 검토하였다. 튜브외벽에 가해지는 열속은 그림1과 같이 채널의 부분 구간마다 선형적으로 변할 수 있는 것을 가정하였다.

### 2.1 지배방정식

튜브측 안정성 분석을 위하여 네 가지 영역에 대한 선형 모형의 지배방정식을 본 절에서 정리하였다. 액체금속로의 관류형 증기발생기의 안정성 분석을 위한 해석적 모델은 Chan[1]의 논문에서 비교적 자세히 정리되어 있어서 이를 참고하여 활용하였다.

#### 2.1.1 튜브영역

튜브 밖에서 열속이 가해지는 분석 대상 모형은 그림2에 나타내었다. 어떤 요인으로 인한 튜브측 유동진동은 튜브측으로 전달되는 열( $q_1$ )을 변하게 만든다. 튜브 외벽에서 주어지는 열속은(시간에 대하여) 일정하며 튜브내벽으로부터 튜브측으로의 열전달은 열전달 계수와 튜브 벽 온도의 변화로 인하여 유동이 변하는 동안 변하게 된다. 튜브벽과 튜브측 열전달 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_1 = H(T_1 - T_w) \quad (1)$$

열속 섭동은 식(1)에서와 같이 국부 유동조건과 국부 벽 온도에 의존하므로 이를 섭동화 하면

$$\delta q_1 = \delta H_1(T_1 - T_w) + H_1(\delta T_1 - \delta T_w) \quad (2)$$

이며 외벽에서는 반경 방향의 열속이 일정하므로

$$\delta q_2 = 0 \quad (3)$$

이다.

벽면온도 섭동은 튜브벽면에 대한 섭동 열전달 식의 해로부터 얻을 수 있다 열전도식과 경계조건

$$\frac{\partial T_t}{\partial t} = k \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_t}{\partial r} \right) \quad (4)$$

$$\text{B.C. } k \frac{\partial T_t}{\partial r} = q_1 \quad \text{at } r = r_1 \quad (5a)$$

$$k \frac{\partial T_t}{\partial r} = q_2 \quad \text{at } r = r_2 \quad (5b)$$

을 섭동화 및 Laplace 변형을 취하면

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{d\delta T_t}{dr} \right) = \frac{s}{k} \delta T_t \quad (6)$$

$$\text{B.C. } k \frac{d\delta T_t}{dr} = \delta q_1 \text{ at } r=r_1 \quad (7a)$$

$$k \frac{d\delta T_t}{dr} = \delta q_2 \text{ at } r=r_2 \quad (7b)$$

이다. 식(6)은 다음과 같은 해를 갖는 Bessel-type 상미분 방정식이다.

$$\delta T_t = A_1 I_0(xr) + A_2 K_0(xr) \quad (8)$$

$$\text{단, } x = \sqrt{\frac{s}{k}} \quad (9)$$

여기서  $I_0(xr)$ 과  $K_0(xr)$ 는 제1종류의 수정된 Bessel 함수이다. 상수  $A_1$ 과  $A_2$ 는 경계조건과 열속 접동식을 이용하여 구할 수 있다.

$\delta T_1$ 은 식(8)에서 구할 수 있으며 이것을 식(2)에 대입하면

$$\delta q_1 = a_1 [\delta T_w + \frac{\delta H}{H} (T_w - T_1)] \quad (11)$$

여기서,

$$a_1 = \frac{-1}{\frac{1}{H} + \left[ \frac{I_0(xr_1)K_1(xr_2) + I_1(xr_2)K_0(xr_1)}{I_1(xr_2)K_1(xr_1) - I_1(xr_1)K_1(xr_2)} \right] \frac{1}{kx}} \quad (12)$$

이다. 식(11)은 튜브내벽에서의 열속 접동을 물 온도와 열전달 계수의 접동항으로 표시한 것임을 알 수 있다.

### 2.1.2 과냉영역

과냉영역에서 물의 밀도가 일정하다고 가정하면 water channel의 연속방정식과 에너지 방정식은

$$v_w^+ = v_i(t) \quad (13)$$

$$\frac{\partial T_w^+}{\partial t} + v_w^+ \frac{\partial T_w^+}{\partial z} = \frac{q_1^+ p_w}{\rho_w c_w A_w} \quad (14)$$

이다. 열속을 그림1과 같이 선형 분포를 허용하 water channel의 정상상태 해를 구하면

$$T_w = T_{wi} + \frac{p_w}{\rho_w c_w v_w A_w} (qZ + f \frac{Z^2}{2}) \quad (15)$$

$$\text{단, } Z = z - z_i \quad (16)$$

이 된다. 튜브측 온도 계산에 있어서 입구 온도로부터 비등점에 도달할 때까지 식(15)가 사용된다.

식(13)과 (14)에 대한 접동화 및 Laplace 변형을 수행하면

$$\delta v_w = \delta v_i \quad (17)$$

과

$$\frac{d\delta T_w}{dz} + \frac{s}{v_w} \delta T_w = \frac{q_1 p_w}{\rho_w c_w v_w A_w} \left( \frac{\delta q_1}{q_1} - \frac{\delta v_w}{v_w} \right) \quad (18)$$

로 된다.

접동항  $\delta H$  등 관련항을 식(18)에 대입하면

$$\frac{\partial \delta T_w}{\partial z} + \alpha_2 \delta T_w = -\alpha_3 q_1 \quad (19)$$

여기서,

$$\alpha_2 \equiv \frac{s}{v_w} - \frac{p_w \alpha_1}{\rho_w c_w v_w A_w} \quad (20a)$$

$$\alpha_3 \equiv \frac{p_w}{\rho_w c_w v_w A_w} \frac{\delta v_w}{v_w} \left(1 + \frac{\alpha_1 \alpha_1}{H}\right) \quad (20b)$$

이다.

각 부분에 대한 열속 관계고려하여 식(19)를 적분하면

$$\delta T_w = \left[ \delta T_{wi} + \frac{\alpha_3}{\alpha_2} \left(q - \frac{f}{\alpha_2}\right) \right] e^{-\alpha_2 Z} - \alpha_3 \left( \frac{f Z + q}{\alpha_2} - \frac{f}{\alpha_2^2} \right) \quad (21)$$

이다. 식(21)은 입구에서의 조건  $\delta T_{wi} = 0$ 인 것을 이용하여 튜브측 입구로부터 정상상태 비등경계까지 각 노드에 대한  $\delta T_w$ 를 계산하는데 사용된다. 비등경계에서는 온도 섭동이 비등경계 요동,  $\delta \lambda$ 로 바뀐다.

단상물 영역에 대한 운동방정식은

$$-\frac{\partial p^+}{\partial z} = \rho_w \frac{D_v v_w^+}{Dt} + \frac{f \rho_w v_w^{+2}}{2D_H} + C_g g \rho_w \quad (22)$$

이며 정상상태 조건에서  $Z=0$ 에서  $Z=\lambda$ 까지 적분하면

$$\Delta P_{1\phi} = \frac{f \rho_w v_i^2}{2D_H} \lambda + C_g g \rho_w \lambda + K_i \frac{\rho_w v_i^2}{2} \quad (23)$$

이며  $K_i$ 는 튜브 입구의 오리피스에 의한 압력강하도 포함한 튜브입구 형상손실 계수이다.

식(22)를 섭동화와 Laplace 변환을 수행하면

$$\delta(\Delta p_{1\phi}) = \int_0^\lambda \left( \rho_w \frac{D_v \delta v_w}{Dt} + \frac{f \rho_w v_w \delta v_w}{D_H} \right) dz + K_i \rho_w v_i \delta v_i + \left( \frac{f \rho_w v_i^2}{2D_H} + C_g g \rho_w \right) \delta \lambda \quad (24)$$

이며 적분항내 첫항은 다음과 같이 단순화할 수 있다. 즉,

$$\frac{D_v \delta v_w}{Dt} = \frac{\partial \delta v_w}{\partial t} + v_w \frac{\partial \delta v_w}{\partial z} = s \delta v_i \quad (25)$$

이며 식(25)의 우측 두 번째 항은 식(19)에 의하여 영이 된다. 따라서 식(24)는 최종적으로

$$\delta(\Delta p_{1\phi}) = (s \rho_w \lambda + \frac{f \rho_w v_i \lambda}{D_H} + K_i \rho_w v_i) \delta v_i + \left( \frac{f \rho_w v_i^2}{2D_H} + C_g g \rho_w \right) \delta \lambda \quad (26)$$

이 된다.

### 2.1.3 이상영역

2상 유동에 대한 지배 방정식을 적용함에 있어서는 단상유동에 비하여 다르게 처리할 수 있다. 본 안정성 해석을 위해서는 증기-물 drift 속도를 고려한 관계식을 사용하는 것이 가장 적절하고 여기서는 Zuber 등의 Drift-Flux model을 사용하여 물-증기의 drift 속도를 계산하였다. 따라서 증기와 물의 기본적인 연속 방정식들은 다음과 같이 volumetric flux density,  $j$ 에 관한 연속방정식

$$\frac{\partial j^+}{\partial z} = \Omega^+ \quad (27)$$

$$\text{단, } \Omega^+ = \frac{\Gamma_g^+ (\rho_f - \rho_g)}{\rho_f \rho_g} : \text{reaction frequency} \quad (28a)$$

$$\Gamma_g^+ = \frac{q_1^+ p_w}{A_w h_{fg}} : \text{vapor generation rate} \quad (28b)$$

과 그리고 density propagation 방정식

$$\frac{\partial \rho^+}{\partial t} + C_k^+ \frac{\partial \rho^+}{\partial z} = -\rho'^+ \Omega^+ \quad (29)$$

$$\text{단, } C_k^+ = j^+ + V_{gj}'^+ + \alpha^+ \frac{\partial V_{gj}^+}{\partial \alpha^+} \approx j^+ + V_{gj}'^+ + \alpha^+ \frac{\partial V_{gj}}{\partial \alpha} \quad (30a)$$

$$\rho'^+ = \rho_f - C_0(\rho_f - \rho^+) \quad (30b)$$

$$V_{gj}'^+ = (C_0 - 1)j^+ + V_{gj}^+ \quad (30c)$$

으로 변형된다. 여기서  $\rho^+$ 를 무차원 밀도  $\phi^+$ 를 도입하여

$$\phi^+ \equiv \ln \frac{\rho'^+}{\rho_f} \quad (31)$$

라고 정의하면 density propagation 방정식은

$$\frac{\partial \phi^+}{\partial t} + C_k^+ \frac{\partial \phi^+}{\partial z} = -\Omega^+ C_0 \quad (32)$$

이 되어 이상영역에 대한 정상상태 방정식을 구하면

$$\frac{dj}{dz} = \Omega \quad (33)$$

$$\frac{d\phi}{dz} = -\frac{\Omega}{C_k} C_0 \quad (34)$$

$$\text{B.C. } j = v_w \text{ at } z = \lambda \quad (35a)$$

$$\phi = 0 \text{ at } z = \lambda \quad (35b)$$

와 같이 된다.  $j$ 와  $\phi$ 를 알면 식(30)과 (31)에서  $\rho$ 를 구할 수 있고  $v^+$ 를

$$v^+ \equiv \frac{G^+}{\rho^+} \quad (36)$$

로 정의하면 다음과 같은  $v^+$ 와  $j^+$ 의 관계식을 얻을 수 있다. 즉,

$$v^+ = j^+ - \left(\frac{\rho_f}{\rho^+} - 1\right) V_{gj}^+ \quad (37)$$

이다. 또한 Drift flux 모델에 있어서 void fraction과 증기질과의 관계식은 Lahey&Moody[2]에 나타나 있다.

지배식을 섭동화하여 Laplace 변환을 수행하면

$$\frac{d\delta j}{dz} = \delta \Omega \quad (38)$$

$$\frac{d\delta \phi}{dz} = -s \frac{\delta \phi}{C_k} - \frac{\delta \Omega}{C_k} + \frac{\Omega \delta C_k}{C_k^2} \quad (39)$$

이며 각각 비등영역 구간 내에서 적분을 할 수 있는데 적분구간은 정상상태 비등경계,  $\lambda$ 와 정상상태 과열경계,  $\eta$  사이이다.

튜브측의 비등영역에 대한 운동 방정식은

$$-\frac{\partial p^+}{\partial z} = \rho^+ \frac{D_v v^+}{Dt} + \frac{C_{f0}}{D_H} \frac{G^{+2}}{2\rho_f} \phi_{f0}^2 + C_{sg} g \rho^+ + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\rho_f - \rho^+}{\rho^+ - \rho_g} \frac{\rho_f \rho_g}{\rho^+} V_{gj}^{+2} \right] \quad (40)$$

여기서  $\phi_{f0}^2$ 는 이상유동 마찰 압력강하 multiplier이고  $f_{f0}$ 는 유동이 모두 물로 가정된 이상유동 마찰계수이다. 정상상태에 대하여 식(40)은 비등경계 ( $z = \lambda$ )와 과열경계 ( $z = \eta$ ) 사이에서 수치적으로 적분할 수 있다. 식(40)의 우변의 첫째 항의 적분은 해석적으로 구할 수 있어서

$$\int_{\lambda}^{\eta} \rho \frac{D_v v}{Dt} dz = \int_{\lambda}^{\eta} \frac{\partial v}{\partial z} dz = G \int_{\lambda}^{\eta} dv = G(v_{\eta} - v_{\lambda}) \quad (41)$$

이 되고 마지막 항은 적분 경계에서는  $V_{gj}$ 가 영이 되므로 마지막 항 전체가 영이 된다. 그리고 중력항과 마찰항은 수치적으로 적분할 수 있다. 이제 식(40)을 섭동화와 Laplace 변형을 수행하고 순간 비등경계와 순간 과열경계사이에서 적분을 수행하면

$$\delta(\Delta p_{2\phi}) = \delta(\Delta p_{2\phi})_{\eta} - \delta(\Delta p_{2\phi})_{\lambda} + \delta(\Delta p_{2\phi})_{acc} + \delta(\Delta p_{2\phi})_g + \delta(\Delta p_{2\phi})_f + \delta(\Delta p_{2\phi})_{dr} \quad (42)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 식(42) 우변의 각 항을 살펴보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta(\Delta p_{2\phi})_{\eta} &= \left( \frac{C_{fj0} \rho_g v_{\eta}^2}{2D_H} + C_{gg} \rho_g + \rho v_{\eta} \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{\eta} \right) \delta \eta \\ &= \left( \frac{C_{fj0} \rho_g v_{\eta}^2}{2D_H} + C_{gg} \rho_g + \rho v_{\eta} \Omega_{\eta} \right) \delta \eta \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \delta(\Delta p_{2\phi})_{\lambda} &= \left( \frac{C_{fj0} \rho_f v_{\lambda}^2}{2D_H} + C_{gf} \rho_f + \rho v_{\lambda} \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{\lambda} \right) \delta \lambda \\ &= \left( \frac{C_{fj0} \rho_f v_{\lambda}^2}{2D_H} + C_{gf} \rho_f + \rho v_{\lambda} \Omega_{\lambda} \right) \delta \lambda \end{aligned} \quad (44)$$

$$\delta(\Delta p_{2\phi})_{acc} = \int_{\lambda}^{\eta} s \rho \delta v dz + v_{\eta}^2 \delta \rho_{\eta} - v_{\lambda}^2 \delta \rho_{\lambda} + 2(\rho_{\eta} v_{\eta} \delta v_{\eta} - \rho_{\lambda} v_{\lambda} \delta v_{\lambda}) + s \int_{\lambda}^{\eta} v \delta \rho dz \quad (45)$$

$$\delta(\Delta p_{2\phi})_f = \frac{C_{fj0} G_w}{2D_H \rho_f} \int_{\lambda}^{\eta} \Phi_{j0}^2 (v \delta \rho + 2\rho \delta v) dz \quad (46)$$

$$\delta(\Delta p_{2\phi})_g = C_{gg} \int_{\lambda}^{\eta} \delta \rho dz \quad (47)$$

$$\delta(\Delta p_{2\phi})_{dr} = \left[ \left( -\frac{2\rho_f}{\rho^3} + \frac{1}{\rho^2} \right) \rho_f \rho_g V_{gj}^{\prime 2} \delta \rho + \left( \frac{\rho_f}{\rho^2} - \frac{1}{\rho} \right) \rho_f \rho_g 2V_{gj}^{\prime} \delta V_{gj}^{\prime} \right]_{\lambda}^{\eta} \quad (48)$$

$$\text{단, } \delta \eta = \frac{C_{kj}}{\rho \Omega_{\eta} C_0} \delta \rho \quad (49a)$$

$$\delta v = \delta j - \left( \frac{\rho_f}{\rho} - 1 \right) \delta V_{gj} + \frac{\rho_f V_{gj}}{\rho^2} \delta \rho \quad (49b)$$

$$\delta \rho = \rho' \delta \phi \quad (49c)$$

#### 2.1.4 과열증기 영역

과열증기 영역에 대한 water channel의 mass와 energy 방정식은

$$\frac{D_v \rho_s^+}{Dt} + \rho_s^+ \frac{\partial v_s^+}{\partial z} = 0 \quad (50)$$

$$\rho_s^+ \frac{D_v h_s^+}{Dt} = \frac{q_1^+ p_w}{A_w} \quad (51)$$

으로 나타낼 수 있다. 일정 압력조건에서 비체적과 엔탈피의 관계는 그림3과 같이 기울기  $k_o$ 인 직선으로 가정할 수 있다. 이 개념을 사용하여 fictitious superheat quality,  $x_s$ 를 정의하면

$$x_s \equiv \frac{h_s - h_g}{h_{fg}} \quad (52)$$

이고 일정 압력하에서의 과열증기의 비체적은

$$V_s = V_g + k_0(h_s - h_g) = V_g + V_{gs} x_s \quad (53)$$

이므로 밀도는

$$\rho_s = \frac{1}{V_g + V_{gs}x_s} \quad (54)$$

이된다. 여기서

$$V_{gs} \equiv k_0 h_{fg} \quad (55)$$

이다.

질량보존식 (50)의 좌변 첫 번째식은

$$\frac{D_v \rho_s^+}{Dt} = -\frac{\Omega_s^+}{V_s^+} \quad (56)$$

$$\text{단, } \Omega_s^+ = \frac{k_0 q_1^+ p_w}{A} \quad (57)$$

이고 이들을 지배방정식 (50)과 (51)에 대입하면

$$\frac{\partial v_s^+}{\partial z} = \Omega_s^+ \quad (58)$$

$$\frac{D_v x_s^+}{dt} - \Omega_s^+ x_s^+ = \Omega_s^+ \frac{V_g^+}{V_{gs}} \quad (59)$$

이 된다. 식(58)은 과열 증기 속도 전파 방정식이고 식(59)는 과열 증기질 (밀도) 전파 방정식이다. 식(59)에 대한 정상상태식은

$$\frac{dx_s^+}{dz} = \frac{\Omega_s(x_s + V_g/V_{gs})}{v_s} = \frac{q_1 p_w}{GA h_{fg}} \quad (60)$$

이다. 식(58)과 (59)를 과열경계로부터 가열부분 출구까지 적분하면 정상상태의 해가 된다.

식(58)과 (59)를 섭동화 및 Laplace 변환을 수행하면

$$\frac{d\delta v_s}{dz} = \delta \Omega_s \quad (61)$$

$$\frac{d\delta x_s}{dz} = \frac{\Omega_s - s}{v_s} \delta x_s + \frac{(x_s + V_g/V_{gs})}{v_s} \delta \Omega_s - \frac{q_1 p_w}{GA v_s h_{fg}} \delta v_s \quad (62)$$

식(62)에서  $\delta \Omega_s$ 는 식(58)을 이용하면

$$\delta \Omega_s = \frac{k_0 p_w}{A} \delta q_1 \quad (63)$$

을 사용하고  $\delta q_1$ 은 식(11)을 사용하면 된다.  $\delta \rho_s$ 와  $\delta x_s$ 에 대한 관계식은 식(54)를 이용하면

$$\delta \rho_s = -\rho_s^2 V_{gs} \delta x_s \quad (64)$$

이고 식(52)를 이용하면

$$\delta x_s = \frac{\delta h_s}{h_{fg}} = \frac{c_{ps}}{h_{fg}} \delta T_s \quad (65)$$

이 된다. 과열증기 영역에 대한 튜브측의 momentum 방정식은

$$-\frac{\partial p^+}{\partial z} = \rho_s \frac{D_v v_s^+}{Dt} + \frac{C_{fs} f \rho_s^+ v_s^{+2}}{2D_H} + C_{gs} g \rho_s^+ \quad (66)$$

이며 이것에 대한 steady-state pressure drop은

$$\Delta p_s = G(v_{sL_H} - v_{sn}) + \int_{\eta}^{L_H} \left( \frac{C_{fs} f \rho_s v_s^2}{2D_H} + C_{gs} g \rho_s \right) dz \quad (67)$$

으로 된다. 튜브측 momentum 방정식 (66)을 섭동화와 Laplace 변형을 수행하고 정리하면

$$\delta(\Delta p_s) = \delta(\Delta p_s)_{acc} + \delta(\Delta p_s)_g + \delta(\Delta p_s)_f - \delta(\Delta p_s)_\eta \quad (68)$$

고 나타낼 수 있다. 여기서 식(68) 우변의 각 항을 살펴보면 다음과 같다.

$$\delta(\Delta p_s)_{acc} = s \int_{\eta}^{L_H} (v_s \delta \rho_s + \rho_s \delta v_s) dz + v_{sL_H}^2 \delta \rho_{sL_H} - v_{s\eta}^2 \delta \rho_{s\eta} + 2G[\delta v_{sL_H} - \delta v_{s\eta}] \quad (69)$$

$$\delta(\Delta p_s)_f = \frac{C_{fs} f}{2D_H} \int_{\eta}^{L_H} (v_s^2 \delta \rho_s + 2\rho_s v_s \delta v_s) dz \quad (70)$$

$$\delta(\Delta p_s)_g = C_{gs} g \int_{\eta}^{L_H} \delta \rho_s dz \quad (71)$$

$$\delta(\Delta p_s)_{\eta} = \left( \frac{C_{fs} f \rho_g v_{g\eta}^2}{2D_H} + C_{gs} g \rho_g + \rho_g v_{g\eta} \Omega_{s\eta} \right) \delta \eta \quad (72)$$

이 된다.

## 2.2 계산 알고리즘

앞절에서 유도된 지배방정식들에서 단상물영역은 해석적 형태로 제시되어 있고 비등영역과 과열증기영역은 초기치 상미분 방정식의 형태로 되어 있다. 수치적분을 수행하는 영역에 대하여는 정방향 차분법을 사용하였다. 그리고 사용된 주요 상관식들은 표 1에 요약하였다.

각 영역은 질량 및 에너지 보존 방정식으로 모델링 되었으며 반경 방향에서 벽면 온도 섭동과 국부적으로 연결되도록 하였다. 방정식들은 선형화와 Laplace 변형 방법을 사용하여 풀었다. 입구 물의 유속을 사인곡선 형태로 변화시켰을 때 계통의 반응을 바로 얻을 수 있다. 각 영역에 대한 압력강하의 크기 및 위상은 선형화된 운동방정식으로부터 구할 수 있다.

간이화한 Nyquist 안정조건은 minimum phase function 인 경우 s 평면의 우측 반평면에 극을 갖지 않으므로 특성방정식을  $1 + K \frac{Z(s)}{P(s)}$  형태로 바꾸었을 때  $K \frac{Z(j\omega)}{P(j\omega)}$  의 벡터 궤적이  $\omega$ 를 0에서  $+\infty$ 까지 변화했을 때 (-1+j0) 점을 함유하지 않으면, 즉  $\omega = 0 \sim +\infty$  일 때 (-1+j0) 점이 좌측에 있을 때 안정하다는 것이다. 이 개념을 여기서 고려하고 있는 계통에 적용하면 압력강하에 대한 경계조건이 계통의 안정성 기준을 제공한다고 볼 수 있다. 모든 영역에서의 압력강하 섭동의 합이 0이 되는 것이 계통의 불안정성을 의미한다. 즉,

$$\delta(\Delta P_{1\phi}) + \delta(\Delta P_{2\phi+s}) = 0 \quad (73)$$

이 만족할 때 계통이 불안정하다.

증기발생기의 안정성 분석에는 크게 두가지의 개념을 생각할 수 있다. 즉, 증기발생기 자체만을 고려하는 parallel-channel 안정성 분석과 증기발생기가 설치된 폐회로 계통 전체를 고려하는 loop 안정성 분석이 있다. 본 보고서에서는 전자만을 위한 작업으로서 식(73)에 나타낸 바와 같이 parallel-channel 안정성을 확인하는데 초점을 맞췄다. 그러나, parallel-channel 모형에 더하여 필요한 부품, 예를들어 배관이나 급수 펌프등에 대한 모델을 추가함으로써 loop 안정성 해석이 가능하 다.

## 2.3 시산 결과

앞절에서 유도된 지배식을 전산화하여 프로그램 SGSTA (Steam Generator STability)를 작성 하였으며 이것을 사용하여 정성적 및 정량적 평가를 수행하였다.

대표적인 이상유동 불안정성 개념인 밀도파 불안정성은 칼리머의 관류형 증기발생기 튜브내에서



와 같이 이상영역이 존재하는 계통내에서 유량, 증발율, 그리고 압력 강하 등 인자간의 다중 재생 피이드백으로 인한 유동 진동이 발생된다. 주요 인자의 영향[11]을 보면 안정화를 위해서는 입구 저항 증가, 출구 저항 감소, 중.고 과냉영역에서 입구 과냉의 증가, 열속 감소, 그리고 압력 증가 등이 방향으로 인자가 설정되어야 한다. 본 논문에서는 입구저항 영향, 열속 영향, 그리고 입구 온도 영향 등 세가지 인자의 영향을 SGSTA로 시산을 수행하여 정성적인 평가를 수행하였다.

먼저 입구 저항의 변화에 대하여 평가한 결과는 그림 4에서 나타내고 있는 바와 같이 입구 저항이 증가할수록 안정된 방향 즉, (-1,0)에서 Nyquist 선도가 멀어지는 것을 볼 수 있다. 열속의 영향에 대하여 그 값이 증가할수록 불안정된 방향으로 Nyquist 선도가 이동하는 것을 볼 수 있다. 그리고 입구 온도의 영향을 보면 입구 온도가 낮을수록 즉, 과냉 정도가 커질수록 (-1,0)에서 멀어지는 방향으로 Nyquist 선도가 움직이는 것을 확인하였다. 개발된 SGSTA는 정성적인 평가 결과 관류형 증기발생기의 튜브측 안정성을 물리적으로 타당하게 예측하고 있음을 확인하였다.

### 3. 결 론

증기발생기 안정성 분석을 위한 코드개발을 위한 균일열속 선형모델을 설정하였다. 튜브와 튜브측의 지배방정식을 정리하고 섭동화를 통한 선형화와 Laplace 변형을 통하여 압력강하 섭동항을 계산하기 위한 주요 변수의 지배방정식을 유도하였다. 이를 바탕으로 필요한 해석 알고리즘을 설정하고 전산프로그램 SGSTA를 작성하였다.

밀도와 불안정성의 주요 인자에는 입구 저항, 출구 저항, 중.고 과냉영역에서 입구 과냉 정도, 열속, 그리고 압력 등이 있는데 개발된 코드를 사용하여 입구저항 영향, 열속 영향, 그리고 입구 온도 영향 등 세가지 인자의 영향을 평가하였다. 입구 저항의 변화에 대하여 평가한 결과 입구 저항이 증가할수록 안정된 방향 즉, (-1,0)에서 Nyquist 선도가 멀어지는 것으로 나타났다. 열속의 영향에 대하여 그 값이 증가할수록 불안정된 방향으로 Nyquist 선도가 이동하였으며 입구 온도의 영향을 보면 입구 온도가 낮을수록 즉, 과냉 정도가 커질수록 (-1,0)에서 멀어지는 방향으로 Nyquist 선도가 움직이는 것으로 나타났다.

작성된 SGSTA는 밀도와 불안정성에 관련한 주요 인자에 대한 정량적 평가를 통하여 물리적으로 타당한 정성적 결과를 나타내고 있음을 확인하였으며 추후 검증 및 시산 작업을 수행하여 칼리머 증기발생계통에 적용할 예정이다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 지원에 의하여 수행되었다.

### 참고문헌

1. K.C. Chan, Thermal-Hydraulic Stability Analysis of Steam Generators, Ph.D. Dissertation, UC Berkly, 1979
2. R.T. Lahey, Jr. and F.J. Moody, The Thermal-Hydraulics of A Boiling Water Nuclear Reactor, ANS Publications, 1977
3. F.W. Dittus and L.M.K. Boelter, University of California, Publicaitons in Engineering, Vol.

2, 1930

4. J.R.S. Thom et al., Boiling in Subcooled Water During Flow Up Heated Tubes or Annuli, Symp. on Boiling Heat Transfer in Steam Generator Units and Heat Exchangers, Inst. Mech. Engrs., Manchester, 1965
5. S. Wolf et al., Recent Advances in Evaluating Critical Heat Flux Conditions in LMFBR Steam Generators, ASME Paper No. 77-WA/NE-11, 1977
6. A.A. Bishop et al., Forced Convection Heat Transfer at High Pressure After the Critical Heat Flux, ASME Paper No. 65-HT-31, 1965
7. J.B. Heineman, An Experimental Investigation of Heat Transfer to Superheated Steam in Round and Rectangular Channels, ANL-6213, 1960
8. G.E. Dix, Vapor Void Fraction for Forced Convection with Subcooled Boiling at Low Flow Rates, Ph.D Thesis, University of California, Berkeley, 1971
9. N. Zuber and J.A. Findlay, Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow Systems, J. Heat Transfer, Trans. ASME, Vol. 87, pp, 453-468, 1965
10. R.C. Martinelli and D.B. Nelson, Prediction of Pressure Drop During Forced-Circulation Boiling of Water, Trans. ASME, Vol. 70, pp. 695-702
11. J.A. Boure et al., Review of Two-Phase Flow Instability, Nuclear Engineering and Design, 25, pp. 165-192, 1973

## Nomenclature

### Notations

- A : area  
 $A_1, A_2$  : 섭동 튜브 온도 방정식 상수  
 $a_1$  : Dittus-Boelter 상관식에서 Re 지수값  
 $C_0$  : distribution parameter or drift flux model correlation parameter  
 $c_p$  : specific heat  
 $C_k$  : kinetic wave velocity  
 $C_f$  : correctional factor for frictional pressure drop in different regions  
 $C_g$  : adjustment factor for gravitational pressure drop  
 $D_H$  : hydraulic diameter of water channel  
 $f$  : Moody type friction factor  
 $f'$  : heat flux 기울기  
 $G$  : mass flow rate  
 $g$  : gravitational acceleration  
 $H$  : heat transfer coefficient  
 $h$  : enthalpy  
 $h_{fg}$  : latent heat of vaporization of water  
 $j$  : volumetric flux  
 $K$  : K-factor of flow resistances  
 $k$  : thermal conductivity  
 $k_0$  : gradient of specific volume to enthalpy line for steam  
 $L$  : channel length  
 $P$  : pressure  
 $p$  : perimeter  
 $q$  : heat flux  
 $r$  : channel radius  
 $s$  : Laplace transform variable  
 $T$  : temperature

$t$  : time  
 $V$  : specific volume  
 $V_{gj}$  : vapor-liquid drift velocity  
 $v$  : velocity  
 $x$  : quality, or radial co-ordinate direction  
 $z$  : axial co-ordinate  
 $Z$  :  $z-z_i$

### Greeks

$\alpha$  : void fraction  
 $\alpha_1$  : 접동 튜브벽 열속 계수  
 $\alpha_2, \alpha_3$ : 접동 물 온도 방정식 계수  
 $\Gamma_g$  : vapor generation rate  
 $\delta(.)$  : Laplace transformed perturbation of the quantity (.)  
 $\lambda$  : boiling boundary  
 $\eta$  : superheat boundary  
 $\rho$  : density  
 $\phi$  : non-dimensional density function,  $\ln(\rho/\rho_f)$   
 $\phi_0$  : two-phase multiplier  
 $\omega$  : oscillation frequency  
 $\Omega$  : reaction frequency  
 $\Delta p$  : pressure drop  
 $\chi$  :  $\sqrt{s/k}$

### Subscripts

1 : inner tube surface (water side) of the wall, or single-phase region  
 $1\phi$  : single phase  
2 : outer tube surface (sodium side) of the wall, or two-phase region  
 $2\phi$  : two-phase  
acc : acceleration  
dr : drift flux 항  
H : heated length  
i : inlet to heated section  
f : liquid  
g : vapor, or gravity  
s : superheat region  
t : tube wall  
v : vapor  
w : water  
 $\lambda$  : boiling boundary  
 $\eta$  : superheat boundary

### Superscripts

+ : variables with both space and time dependence

표 1 사용된 주요 상관식

구분	상관식
Single-Phase Heat Transfer	Dittus-Boelter Correlation[3]: $N = 0.023Re^{.8}Pr^{.4}$
Nucleate Boiling Heat Transfer	Thom et al.[4]: $T_{wall} - T_{sat} = 0.072q''^{.5}e^{-\frac{p}{1260}}$
CHF Quality	Wolf, et al.[5]: $x_c = \frac{0.78(1 - \frac{p}{3208})^{1.504}}{(G/10^6)^{.625}} (\frac{D_H}{0.394})^{.15}$
Post-Dryout Heat Transfer	Bishop et al.[6]: $N = 0.0193Re^{.8}Pr^{1.23}[x + (1-x)\frac{\rho_g}{\rho_f}]^{.68}(\frac{\rho_g}{\rho_f})^{.068}$
Superheat Steam Heat Transfer	Heinemann[7]: $N = 0.0133Re^{.84}Pr^{.33}$
Drift Flux Model Correlation Parameter, $C_0$	Dix[8]: $C_0 = \beta[1 + (\frac{1}{\beta} - 1)^b]$ where, $\beta = \frac{j_g}{j}$ ; $b = (\frac{\rho_g}{\rho_f})^{0.1}$
Drift Velocity, $V_{gj}$	Zuber & Findlay[9]: $V_{gj} = 1.53[\frac{\sigma_g(\rho_f - \rho_g)}{\rho_f^2}]^{.25}(1 - a)^{1.5}$
Two-Phase Pressure Drop	Martinelli-Nelson Correlation[10]

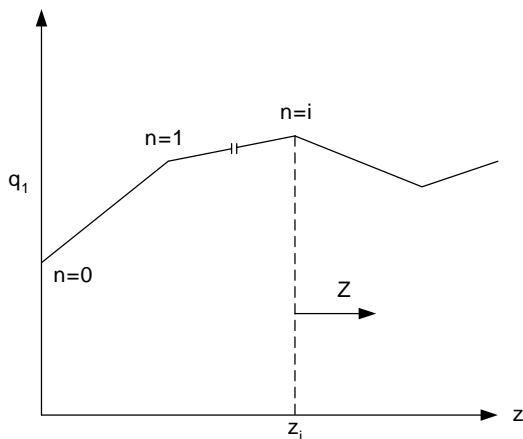


그림 1 채널길이에 따른 열속분포

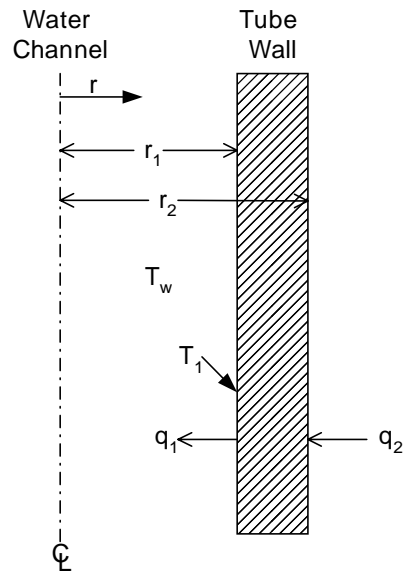


그림 2 반경방향 채널 배치

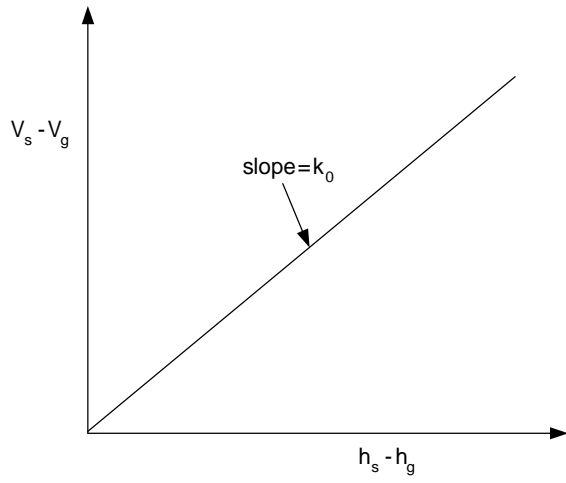


그림 3 과열증기의 비체적-엔탈피 관계

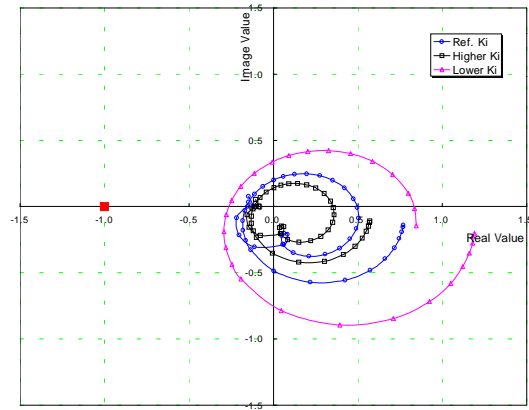


그림 4 입구저항 변화에 대한 SGSTA 결과

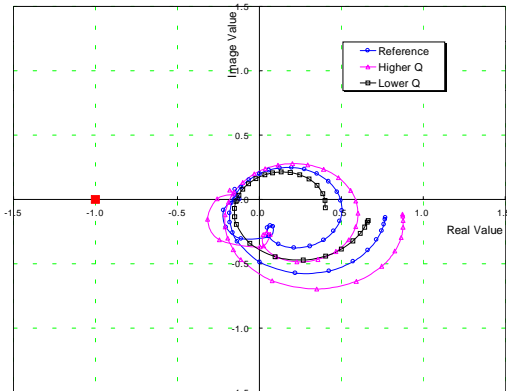


그림 5 열속 변화에 대한 SGSTA 결과

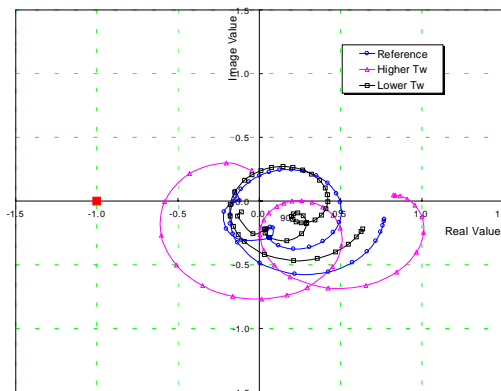


그림 6 입구온도 변화에 대한 SGSTA 결과