

관류형증기발생기 불안정성 해석모델 개발

강한옥, 강형석, 조봉현, 이두정, 배운영
한국원자력연구소

요 약

SMART 관류형증기발생기의 유동 불안정성을 분석할 수 있는 시간영역-비선형 해석모델을 개발하였다. 해석모델은 일차계통 모델을 포함하고 있으며 이차측 튜브 양단에 일정압력 경계조건을 이용하고 내부에서는 평형 균질 이상유동 모델을 도입하였다. 기존의 정상 상태 및 임계조건에 대한 실험 결과와 개발된 해석모델 모델을 이용한 계산 결과를 비교한 뒤 임계점 이후 나타나는 진동의 특성을 분석하였다. 개발된 해석모델은 SMART 관류형증기발생기에서 발생할 수 있는 유동 진동의 특성과 영향을 파악하고 유동 불안정성을 막기 위한 입구 오리피스 설계의 목적에 활용할 수 있을 것이다.

1. 서 론

한국원자력연구소에서는 안전성과 경제성이 향상된 새로운 개념의 원자로인 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)를 개발하고 있다[1]. SMART에서는 증기발생기가 압력용기 안쪽에 위치하고 있으며 단위체적당 열전달 효율이 좋은 나선형의 관류형증기발생기가 도입되었다. 관류형증기발생기에서는 튜브 내에서 과냉각 영역, 이상 영역, 과열 영역이 연속적으로 분포하여 운전 중에 유동이 불안정해질 가능성이 존재한다. 따라서 SMART 설계시 이러한 유동 불안정성이 생성된 증기의 건도, 튜브의 구조적 강도 등에 미치는 영향이 평가되어야 하며 아울러 정상운전시 유동 불안정성을 막기 위한 설계가 필요하다. 관류형증기발생기의 유동 불안정성을 막기 위해 일반적으로 사용되는 방법은 입구에 오리피스를 첨가해 과냉각 영역의 압력강하를 증가시키는 것이다.

기존에 LMFBR 개발 또는 일체형원자로 개발과 관련하여 관류형증기발생기의 불안정성이 주요 연구 주제였으며 증기발생기에서 발생하는 불안정성의 현상적 이해, 다양한 운전조건에서 각 설계변수가 불안정성 시작점에 미치는 영향 평가, 그리고 불안정성 방지를 위해 필요한 입구 throttling을 결정하기 위한 실험 등이 수행된 바 있다. Unal은 Sodium 가열 관류형증기발생기의 이차측 불안정성 조건을 예측하고 진동의 특성을 연구하기 위한 실험을 수행하였으며 Belyakov, Nariai는 물에 의해 가열되는 관류형증기발생기의 유동 불안정성에 대한 실험을 수행하였다[2,3,4].

한국원자력연구소는 SMART의 정적 설계 특성을 해석하기 위한 프로그램을 개발한 바 있으며 증기발생기 불안정성의 현상 이해 및 입구 오리피스 설계를 위해 실제 운전 조건과 비슷한 조건에서의 실험이 계획되어 있다[5,6]. 본 연구에서는 임계점 이후에 나타나는 유동 진동의 특성과 영향을 파악하고 다양한 운전조건에서 유동 불안정성을 막기 위한 입구 오리피스 설계에 활용할 수 있는 증기발생기 불안정성 해석 모델을 개발하고자 한다.

2. 해석방법론

2.1 해석방법의 특징

본 연구에서는 일정 압력강하 조건이 주어진 단일 튜브 내 불안정성에 대한 모델이 설정되었다. 증기발생기에서 헤더를 공유하는 튜브의 개수가 많은 경우 다른 여러 튜브의 한 튜브에 대한 영향은 일정한 조건(일정 압력강하 조건)으로 반영될 있다고 알려져 있으며 기존의 많은 이론적 및 실험적 연구가, 채널간 불안정성을 연구하기 위해, 일정압력조건하의 단일 채널 유동을 대상으로 하였다[7].

이상유동 불안정성 해석시 Two-Fluid 모델은 너무 복잡하며 수치적인 불안정성을 구분하는데 있어서의 어려움, 교란 변수의 다양함 등 때문에 거의 도입되지 않고 있다. 기존의 연구자들은 대부분 균질 이상유동 모델 또는 Drift-Flux 모델을 이용해 불안정성 해석을 수행해 왔으며 본 연구에서는 평형 균질 이상유동 모델이 사용되었다[7]. 일반적으로 증기발생기와 같이 낮은 열속 및 유속 조건에서는 핵비등 시작점이 유체의 평균온도가 포화상태에 이르는 지점과 거의 일치한다고 알려져 있다[8]. 따라서 모델 설정시 과냉각 핵비등을 고려하지 않았으며 두 상간의 열적 평형을 가정하였다. 각 영역에서 계통압력은 출구 압력이 주어질 경우 채널에서의 압력 강하를 고려해 얻어지며 물성치들은 온도 및 압력에 의존하는 값으로 계산된다.

2.2 지배방정식

비선형 모델에서 사용된 계산 영역 및 각 변수의 정의를 그림 1에 나타내었다. 계산 영역은 일차측 영역과 이차측 영역을 포함하고 있으며 각 영역에서 온도차에 의해 열속이 계산된다.

(ㄱ) 일차측 지배방정식

열속 계산을 위해 1차계통의 정상상태 정보가 필요하므로 단순한 형태의 일차계통 모델이 이용되었다. 일차측의 주요 입력변수는 입구 속도 및 온도이며 이차계통과의 열전달 과정을 거친 뒤, 이차계통의 비등 시작점과 끝나는 지점에 해당하는 위치에서 온도가 계산된다. 일차계통과 이차계통간의 열전달은 LMTD를 이용해 계산된다. 이차계통의 불안정성 계산시 일차계통의 수력학적 정보는 필요하지 않으므로 운동량 방정식을 풀 필요는 없다.

에너지 방정식

$$A_p m_p'' (c_{pi} T_{pi} - c_{pd} T_{pd}) = q_{vo}'' \xi_p l_v' \quad (1)$$

$$A_p m_p'' (c_{pd} T_{pd} - c_{pb} T_{pb}) = q_{to}'' \xi_p l_t' \quad (2)$$

$$A_p m_p'' (c_{pb} T_{pb} - c_{pe} T_{pe}) = q_{fo}'' \xi_p l_f' \quad (3)$$

(L) 이차측 지배방정식

이차측의 연속방정식, 에너지방정식은 각 영역에서 다음과 같다.

액체 단상 영역

$$\rho_f \frac{dl_f}{dt} = \rho_{ij_i} - \rho_{bj_b} \quad (4)$$

$$\rho_f \frac{dl_f h_f}{dt} = \rho_{ij_i} h_i - \rho_{bj_b} h_b + \frac{q_f \xi_s l_f}{A_s} \quad (5)$$

이상 영역

$$\rho_t \frac{dl_t}{dt} = \rho_{bj_b} - \rho_{dj_d} \quad (6)$$

$$\rho_t \frac{dl_t h_t}{dt} = \rho_{bj_b} h_b - \rho_{dj_d} h_d + \frac{q_t \xi_s l_t}{A_s} \quad (7)$$

기체 단상 영역

$$\rho_v \frac{dl_v}{dt} = \rho_{dj_d} - \rho_{ej_e} \quad (8)$$

$$\rho_v \frac{dl_v h_v}{dt} = \rho_{dj_d} h_d - \rho_{ej_e} h_e + \frac{q_v \xi_s l_v}{A_s} \quad (9)$$

운동량 방정식은 이차측 튜브 전체에 대해 적용되며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta p_{ext} = & \frac{d(\rho_{ij_f})}{dt} l_f + \frac{d(\rho_{jt_t})}{dt} l_t + \frac{d(\rho_{vj_v})}{dt} l_v + \rho_{ej_e}^2 - \rho_{ij_i}^2 + \\ & g(\rho_f l_f + \rho_t l_t + \rho_v l_v) + \frac{\xi}{A_s} (\tau_{wf} l_w + \tau_{wt} l_t + \tau_{wv} l_v) + \frac{1}{2} k_i \rho_{ij_i}^2 \quad (10) \end{aligned}$$

과도 계산을 수행하기 위해, 보조 관계식들을 이용하여 위의 식들을 정리하면 입구속도, 과냉각 영역의 길이, 이상 영역의 길이를 주요 변수로하는 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dl_f(t)}{dt} = a_1 j_i(t) + a_2 l_f(t) \quad (11)$$

$$\frac{dl_t(t)}{dt} = a_3 j_i(t) + a_4 l_f(t) + a_5 l_t(t) \quad (12)$$

$$a_6 \frac{dj_i(t)}{dt} = \Delta P_{ext} - \Delta P_f - \Delta P_t - \Delta P_v - \Delta P_{tran} \quad (13)$$

2.3 계산 절차

일차 계통과 이차 계통은 열전달과정을 통해 연계되어 있으므로 정상상태 해를 구하기 위해 반복적인 계산이 필요하다. 또한 이차계통 정상상태 계산시에도 주어진 압력차에 대해 입구속도를 구하는 과정이 반복적인 계산을 필요로 하고 여러 물성치 및 마찰계수, 열전달 계수 등을 정확하게 계산하기 위해 추가적인 계산이 필요하다. 불안정성 해석시

Runge-Kutta-Verner의 6차 해법을 이용하는 IMSL의 DIVPRK 서브루틴을 사용해 해를 구하였다. 과도상태 계산은 정상상태 값들을 초기조건으로 삼고 수행되며 입구 속도에 대해서만 입의 값을 추가하거나 감소시켜 초기 교란을 주었다. 이러한 초기 교란량이 이후에 계속 증가하는지 또는 감소하는지 살펴봄으로써 계통의 안정성을 평가할 수 있다. 과도상태 계산 시 일차계통에 대한 계산을 다시 수행하지는 않았으며 단지 각 영역에서 온도가 선형적으로 변한다고 가정하고 필요한 정보를 얻었다. 이차계통의 물성치 및 다른 변수들은 모두 내재적(implicit)으로 처리되며 정상상태에 대한 계산에서와 같은 방식의 과정이 수행되었다.

3. 결 과

개발된 프로그램의 정적 계산 특성을 알아보기 위해 Nariai 실험 조건에서 입구 과냉각 온도 및 입구유속을 변화시켜가며 비등시작점과 dryout 지점을 계산하였다. Nariai, Kozeki 등은 1970년대부터 일체형원자로의 관류형증기발생기 운전 특성을 연구하기 위해 0.8 MW 실험시설에서 다양한 실험을 수행해왔다[4]. 이들의 실험은 정상상태 실험, 과도운전 제어특성, 다양한 조건에서 유동불안정성 특성 연구 등 다양한 방식으로 수행되어 SMART 증기발생기 설계 및 실험장치 설계에 유용한 정보를 제공한다. 그림 2는 계산된 결과와 실험 데이터를 함께 보여준다. 그림에서 기호들은 실험 데이터이며 선들은 계산에서 얻어진 것이다. 실험 데이터와 계산 결과는 거의 같은 경향을 보여주고 있다. 이 계산에서 Ito 단상 마찰계수, Kozeki 이상유동 multiplier 및 열전달계수, Mori-Nakayama 단상 열전달계수가 사용되었다[4]. 한편 일차측 열전달계수는 Nariai가 자신의 실험에서 얻은 값인 $6,400 \text{ W/m}^2\text{K}$ 를 그대로 사용하였다. 그림에서 이상유동 영역의 길이는 입구 유속이 증가함에 따라 함께 증가함을 알 수 있다. 반면 입구 과냉각 온도의 비교적 큰 폭의 변화에도 불구하고 이상유동 영역의 길이는 별로 변하지 않았다. 그림 3은 입구유속의 변화에 따른 튜브 전체의 압력강하(오리피스에 의한 압력강하 제외)와 과열영역에서의 압력강하를 보여준다. 그림에서 튜브 전체의 압력강하는 양의 기울기를 가짐을 알 수 있으며 이는 튜브 내에서 발생하는 불안정성이 Ledinegg 유형이 아님을 나타낸다. 또한 입구 유속이 증가함에 따라 과열 영역에서의 압력강하 자체는 증가하나 튜브 전체의 압력 강하중 과열 영역에서의 압력강하가 차지하는 비율은 감소하였다.

그림 4는 입구의 throttling 계수를 증가시킴에 따라 입구 속도의 시간에 따른 경향이 어떻게 변하는가를 보여준다. throttling 계수가 작을 경우, 즉 단상유동에서의 압력강하가 작으면 매우 큰 진폭의 진동이 발생하여 limit cycle로 발전한다. 이 때 진동의 진폭은 거의 평균 유속과 같은 크기이다. throttling 계수를 증가시킴에 따라 limit cycle의 주기는 거의 변하지 않는 반면 진폭은 점차 감소한다. throttling 계수를 더욱 증가시키면 초기 교란은 더 이상 limit cycle로 발전하지 못하고 소멸한다.

그림 5는 다양한 압력 조건에서 이상 영역 길이의 함수로서 표현된 임계 입구 throttling 계수를 보여준다. 그림에서 안 채워진 기호들은 실험에서 얻어진 값들이고 채워진 기호들은 계산에서 얻어진 값들이다. 그림에서 계산된 값들은 실험치에 비해 좀 더 넓게 분포하였다. 또한 이상영역이 많은 튜브의 많은 부분을 차지할 때는 계산된 값이 실험치에 비해 약간 큰 반면 이상영역이 아주 짧은 경우에 나타나는 임계 throttling 계수의 급격한 증가가 계산 결과에서는 나타나지 않았다. 이상영역이 많은 부분을 차지할 때 모델이 실험치에 비해 약간 높은 값을 예측하는 것은 모델에서 사용된 국부적인 가정 또는 상관식에 의해 설명될 수 있다. 하지만 이상 영역이 짧은 경우의 계산 결과와 실험치의 차이는 개발된 모델이 이 영역에서의 적용될 수 없으며 추가적인 모델 개선이 필요하다는 것을 보여준다.

임계 throttling 계수를 계산하면서 임계조건에서의 진동 주기를 함께 계산하였다. 그림 6은 채널 거주시간의 함수로서 진동 주기의 실험치와 계산 결과를 함께 보여준다. BWR과 관련된 기존 연구에서 진동주기는 일반적으로 채널 거주시간의 두배라고 알려져 있으며 일부 연구자들은 진동주기와 채널거주시간이 같다고 주장하고 있다[7]. Nariai의 실험에서는 채널 거주 시간의 2/3 배 및 4/3 배되는 진동주기가 측정되었다[4]. 본 계산 결과에서는 진동주기가 Nariai의 실험과 같이 두 유형으로 나누어 나타나지 않고 두 경계 안에서 연속적인 분포를 가지고 있었다. 계산에서 임계조건 이하로 입구 throttling 계수를 감소시키면 진폭이 커졌으나 주기의 증가는 매우 작았다.

4. 결 론

본 연구에서는 임계점 이후에 나타나는 유동 진동의 특성을 파악하고 다양한 운전조건에서 유동 불안정성을 막기 위한 입구 오리피스 설계에 활용하기 위해 증기발생기 불안정성 해석 모델을 개발하였다. 개발한 해석모델을 이용해 Nariai 실험 조건에서 입구 과냉각 온도 및 입구유속을 변화시켜가며 얻은 정상상태 각 영역의 길이 및 압력강하에 대한 결과는 실험결과와 거의 일치하는 경향을 보여주었다. 한편 임계 throttling 계수를 실험 데이터와 비교해 본 결과 이상영역의 길이가 길 경우는 실험결과와 계산 결과가 큰 차이를 보이지 않았으나 이상영역의 길이가 짧은 경우 차이가 커졌다. 그 이유는 계산에서 고려하지 않은 비가열 전단부의 존재 또는 모델에서 도입된 가정에 기인한다고 판단되며 추가적으로 계산을 수행하고 모델을 개선할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] J.K. Seo, etc, "Advanced Integral Reactor(SMART) for Nuclear Desalination," IAEA-SM-347/40, Proceedings of a symposium on nuclear desalination of seawater, Taejon, Korea, May 26-30, 1997
- [2] H.C. Unal, "Density-Wave Oscillations in Sodium Heated Once-Through Steam Generator Tubes," Journal of Heat Transfer Vol. 103, 1981
- [3] I. I. Belyakov, V. I. Breus, D.A. Loginov, "Hydraulic Stability of Steam-Forming Elements in Convective Heating," Translated from Atomnaya Energiya, Vol. 65, No. 1, pp. 12-17, July, 1988
- [4] H. Nariai, M. Kobayashi, T. Matsuoka, Y. Ito, I. Aya, "Flow Instabilities in a Once-through Steam Generator," Boiler dynamics and control in nuclear power stations. BNES, London, 1979
- [5] 이두정, 관류형증기발생기의 열수력학적 설계 및 성능분석 프로그램 개발, 한국원자력연구소, 1995
- [6] 서재광, 일체형원자로에 장착되는 증기발생기 및 가압기의 정상상태 성능분석 프로그램 개발, 한국원자력연구소, 1997
- [7] Rizwan-Uddin, "On Density-wave oscillations in two-phase flows," Int. J. Multiphase Flow, Vol. 20, No. 4, pp.721-737, 1994
- [8] V. P. Carey, *Liquid-Vapor Phase-change Phenomena*, Hemisphere Publishing Cor., 1992

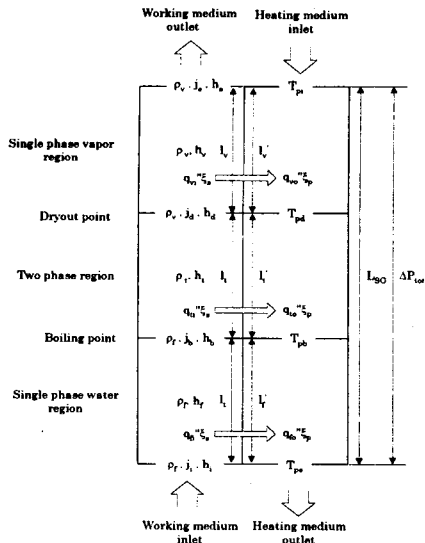


그림 1. 계산영역 및 변수 정의

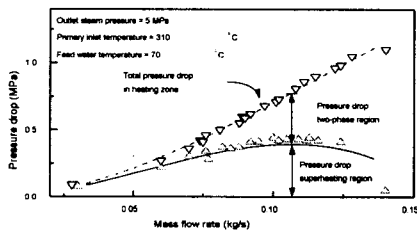


그림 3. 입구 속도의 변화에 따른 이상, 과열 영역의 압력강하 변화

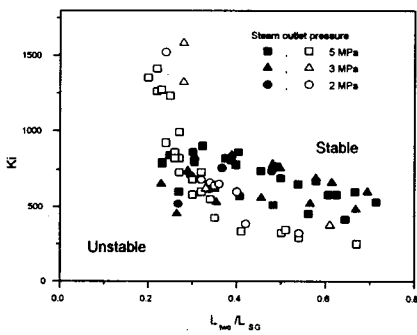


그림 5. 비등영역 길이 변화에 따른 임계 입구 throttling 계수

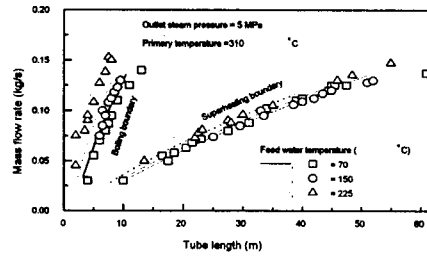


그림 2. 입구 속도의 변화에 따른 비등 시작점과 dryout 지점의 변화

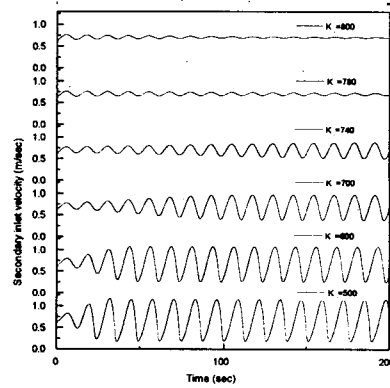


그림 4. 시간에 따른 입구속도의 변화

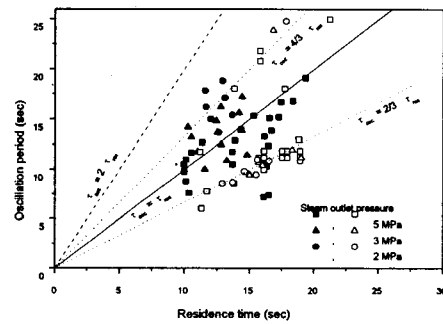


그림 6. 채널거주시간과 진동주기간의 관계