

수직 관다발형 비등관에서의 이상 유동 불안정성 특성 해석

황대현, 유연중, 김궁구, 장문희

한국원자력연구소

대전광역시 유성우체국 사서함 105 호

요 약

수직 관다발형 비등관에서의 밀도파 진동 및 유동 폭주형 이상유동 불안정성을 해석하기 위하여 선형화 기법 및 D-partition 방법론에 근거한 해석 코드(ALFS)를 개발하고 기존 실험자료 분석을 통해 코드의 예측 성능을 평가하였다. 그 결과 이상유동이 평형상태에 있는 것으로 가정하는 가장 단순한 모델인 HEM은 전반적으로 유동 불안정성 발생 시점의 열출력을 실험치보다 약 20% 정도 낮게 예측하였으며, 이상 유동의 속도 및 온도의 비평형 상태를 고려하는 DEM과 DNEM에 의한 예측 결과는 7~15%의 평균 오차 범위에서 실험 자료를 예측하는 것으로 나타났다.

1. 서론

비등관에서의 이상 유동 불안정성에 대한 연구는 BWR 개발과 함께 오래 전부터 수행되어 왔다. 유동 불안정성으로 인한 운전 조건의 급격한 변화 혹은 유량의 진동 상태는 국부적인 burnout을 일으킬 수 있으므로, 최근에는 자연대류 운전이 허용되는 신형원자로 등에서 원자로의 안전성 관점에서 중요하게 검토되고 있다. 원자로와 관련된 이상 유동 불안정성은 대략 수직 관다발형 비등관에서의 불안정성, 자연대류 계통에서의 불안정성, 그리고 노심에서의 반응도 궤환과 관련된 불안정성 등으로 구분할 수 있다. 수직 관다발형 비등관에서의 이상 유동 불안정성을 일으키는 두 가지 중요한 형태는 유동 상태가 급격히 다른 조건으로 변하는 유동 폭주(flow excursion)형 불안정성과, 이상 유동 조건에서의 밀도파 전달 속도 특성에 의해 발생하는 밀도파 진동(density wave oscillation)형 불안정성인 것으로 알려져 있다. 유동 폭주형 불안정성은 계통 압력 강하의 유량 변화에 대한 변화율이 외부로부터 가해지는 수두의 유량 변화에 대한 변화율보다 작을 때 발생하며, 이 경우 정상 상태 유속 조건이 또 다른 정상상태 유속 조건으로 갑자기 변하게 된다. 밀도파 진동은 입구 유속과 기포 발생률, 그리고 관에서의 압력 강하 간의 상관 관계에 의해 발생한다. 즉, 입구 유속의 섭동은 단상 유동 영역에서의 엔탈피 섭동을 일으키며, 이상 유동 영역에 도달하면 이는 기포율 섭동으로 바뀌어 이 영역에서의 압력 손실 섭동을 일으킨다. 수직 관다발에서와 같이 관에서의 압력 손실이 일정한 경우 이러한 압력 손실 섭동은 다시 입구 유속의 섭동으로 궤환되

며, 여기까지의 시간적 지연에 의해 유동 진동이 유발될 수 있다. 밀도와 진동은 비등관에서 가장 일반적으로 발생하는 불안정성 메커니즘으로서 이를 해석하기 위해 여러 가지 방법론이 개발되어 왔으며, 그 중 가장 널리 사용되고 있는 것은 선형화 기법을 사용한 해석 방법이다. 이는 비선형 지배방정식을 섭동 이론으로 선형화 하고 이를 Laplace 변환하여 특성 방정식을 결정한 후 일반적인 제어 이론을 적용하는 것으로서, 본 연구에서도 이러한 선형화 기법을 사용하여 수직 관다발형 비등관에서의 이상 유동 불안정성 특성을 분석하였다.

2. 분석 모델 개발

수직 관다발형 비등관에서의 유동 불안정성 해석은 압력 강하가 일정한 단일 비등관에서의 해석으로 대체할 수 있다. 본 연구에서는 세가지 이상유동 기본 모형(HEM: Homogeneous Equilibrium Model, DEM: Drift flux Equilibrium Model, DNEM: Drift flux Non-Equilibrium Model)을 사용하여 그림 1 과 같이 입구와 출구에 비가열 영역이 있는 비등관에서의 유동 폭주 및 밀도파 진동 해석 모형을 개발하였다. 비등관의 가열 영역은 단상 유동 영역과 이상유동 영역으로 구분된다. 모든 영역에서 비압축성을 가정하여 운동량 보존식을 질량 및 에너지 보존식과 분리하였다. 가열 영역에서 열출력의 섭동은 없으며 축방향 균일 출력 분포를 가정하면, 이상 유동 영역에서의 질량 및 에너지 보존식으로부터 아래와 같은 체적 유량 방정식 및 밀도파 전달 방정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial z} j = \Omega \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + C_k \frac{\partial \rho_m}{\partial z} = -\Omega \rho_m \quad (2)$$

그리고 드리프트 속도를 고려한 이상 유동 영역에서의 운동량 보존식은 아래와 같다.

$$-\frac{\partial P}{\partial z} = \rho_m \left\{ \frac{\partial v_m}{\partial t} + v_m \frac{\partial v_m}{\partial z} + g + \frac{f_m}{2D} \cdot v_m^2 \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{\rho_f \rho_g}{\rho_m} \frac{\rho_f - \rho_m}{\rho_m - \rho_g} V_{gj}^2 \right\} \quad (3)$$

정상 상태에서 입구 유속 섭동에 대한 계통의 반응은 빈도반응법 (frequency response method)을 사용하여 평가하였다. 이 방법론의 적용을 위해 지배 방정식을 섭동 이론을 사용하여 선형화 하였으며, Laplace 변환을 통해 시간 좌표계에서의 선형화된 미분 방정식으로부터 빈도 좌표계에서의 대수 방정식을 유도하였다. 입구 유속의 섭동은 $v_m = \bar{v}_m + \delta v(t)$ 로 표현되는데, 빈도반응법에 따르면 섭동항은 $\delta v(t) = \epsilon e^{st}$ 로 나타낼 수 있으며 여기서 $\epsilon / \bar{v}_m \ll 1$ 이다. 입구 유속의 섭동에 대한 아래와 같은 여러가지 운동학적(kinematic) 변수들의 섭동은 질량 및 에너지 보존식으로부터 유도된다.

$$\frac{\delta \lambda}{\delta v}, \frac{\delta \Omega}{\delta v}, \frac{\delta C_k}{\delta v}, \frac{\delta \rho_m}{\delta v}, \frac{\delta v_m}{\delta v}$$

이러한 운동학적 변수들의 섭동은 운동량 보존식을 통하여 결국 계통의 압력 손실 섭동으로 나타난다. 그런데 전체 압력 손실, 즉 단상 및 이상 유동 영역에서의 압력 손실 합이 일정하다는 경계 조건으로부터 압력 손실의 섭동은 아래식을 만족해야 한다.

$$\delta(\Delta P_{system}) \equiv \delta(\Delta P_{1\phi}) + \delta(\Delta P_{2\phi}) = 0 \quad (4)$$

압력 손실의 섭동은 즉시 입구 유속의 섭동으로 변환된다. 그러나 비등관 내의 비등 경계점 섭동에 의한 공간적 지연과, 이상 유동 영역에서의 한정된 밀도파 속도로 인한 시간적 지연 때문에 변환되는 입구 유속의 섭동은 어느 정도 지연되며, 이로인하여 유동 불안정성이 발생하게 된다. 그림 2는 이를 설명하는 닫힌 제어계를 나타낸 것이며, 이로부터 계의 특성 방정식은 아래와 같이 결정된다.

$$\frac{\delta(\Delta P_{system})}{\delta v} \equiv Q(s) = \Gamma(s) + \Pi(s) = 0 \quad (5)$$

특성 방정식은 표 1 과 같은 비등관에서의 여러가지 압력 손실 요소들에 대한 전달 함수로 구성되는데, 계의 불안정성은 특성 방정식의 근의 성질에 따라 결정되며 계가 안정된 상태에 있기 위한 필요 조건은 특성 방정식의 실근이 모두 음수이어야 한다는 것이다. 특성 방정식으로부터 계의 불안정성을 평가하기 위하여 Nyquist plot 방법과 D-partition 방법을 사용하였다. 임의의 조건에서 계의 불안정성 여부를 평가하는 Nyquist plot 방법은 사용하기 쉬운 대신 계의 불안정성 여부에 대한 정보만을 얻을 수 있다. 이에 비하여 특정 변수에 대한 계의 불안정성 경계를 구하는 D-partition 방법을 사용하면 Nyquist plot 방법에 비해 분석은 복잡하지만 훨씬 다양한 정보를 얻을 수 있다. 한편, 유동 폭주 불안정성이 발생하지 않을 조건은 Ledinegg criteria 로 주어지는데, 수직 관다발의 경우 압력 손실이 일정하다는 경계 조건으로부터 이는 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial(\Delta P_{system})}{\partial v} \equiv \lim_{s \rightarrow 0} Q(s) > 0 \quad (6)$$

본 연구에서는 이상 유동장 모형에 따른 유동 불안정성 해석 특성을 파악하기 위하여 세가지 기본 모형에 근거한 유동 불안정성 해석 코드 ALFS(Analysis of Local Flow Stability)를 개발하였다.

3. 모델 평가

유동 불안정성에 대한 서로 다른 세 종류의 실험 자료[1,2,3]를 분석하여 ALFS 코드의 예측 성능을 평가하였다. 실험 장치 및 실험 조건에 대한 특성 자료는 표 2에 정리하였으며, 분석 결과는 그림 3에 제시하였다. 그림의 수직 축은 유동 불안정성이 발생하는 시점에서의 열출력 예측치와 실험치의 비율을 나타낸 것이다. 분석시 미포화 비등 지점은 Saha & Zuber 모델[4]로 예측하였으며 과냉 영역에서의 기포 발생은 Zuber 모델[5]에 따르는 것으로 가정하였다. 기체의 드리프트 속도는 Ishii 모델[6]로 계산하였다. 분석 결과 HEM 모델은 모든 실험 자료에 대하여 대체로 불안정성 발

생 시점의 열출력을 낮게 예측하는 경향을 보였다. 두 상 간의 속도 차이 및 비등 길이는 비등관에서의 유동 불안정성에 영향을 주는 것으로 알려져 있는데, 드리프트 속도가 있는 경우 계는 더욱 안정화되며, 미포화 비등에 의해 비등 길이가 증가하면 계는 불안정해지는 경향을 보인다. 이러한 경향은 분석 결과에서 잘 나타나는데, Saha 실험 자료의 경우 HEM 모델로 예측한 P/M의 평균은 0.92, DEM 모델은 1.06, 그리고 DNEM 모델을 사용한 경우에는 0.95였으며, 표준 편차는 약 15% 정도로 서로 비슷하였다. HEM 모델은 입구 과냉도가 낮아질수록 P/M을 낮게 평가하는 경향을 보였으며, 가열 길이가 매우 큰 CNEN 실험 자료의 경우에는 세 모델 모두 30~40% 정도 P/M을 낮게 예측하였다. FLARE-loop 실험 자료의 경우 DEM과 DNEM은 비슷한 예측 결과를 보였으며 HEM 모델은 상대적으로 낮게 예측하는 것으로 나타났다.

4. 결론

수직 관다발형 비등관에서의 이상 유동 불안정성 해석을 위하여, 입구 유속 섭동에 대한 계통의 밀도파 진동을 선형화 기법을 통하여 해석하는 프로그램, ALFS를 개발하였다. ALFS 코드는 축방향 출력 분포가 균일하고 일정한 조건에서 입구 및 출구에 비가열 영역이 존재하는 비등관에 적용 가능하다. 이상 유동장 모형의 영향을 평가하기 위하여 HEM, DEM 및 DNEM의 세 가지 모델을 사용하여 실험 자료를 분석하였다. 그 결과 HEM 모델은 전반적으로 보수적인 방향으로 이상 유동 불안정성을 예측하며, DEM과 DNEM은 적절하게 예측하는 것으로 나타났다. 그러나 비등관의 길이가 긴 경우에는 세 모델이 모두 보수적인 예측 경향을 보였다.

5. 참고문헌

- [1] Saha P., Thermally induced two-phase flow instabilities including the effect of thermal nonequilibrium between the phases, PhD thesis, GIT, 1974.
- [2] Cumo M., et al., An experimental study on two-phase flow instability in parallel channels with different heat flux profiles, CNEN rep. ENEA-RT-TERM/85/8, 1985.
- [3] Carver M.B., An analytic model for the prediction of hydrodynamic instability in parallel heated channels, AECL-2681, 1967.
- [4] Saha P. & Zuber N., Point of net vapor generation and vapor void fraction in subcooled boiling, Proceed. 5th Int. Heat Transfer Conference Vol.4, p.175, 1974.
- [5] Zuber N., et al., Vapor void fraction in subcooled boiling and saturated boiling systems, Proceed. 3rd Int. Heat Transfer Conference Vol.5, p. 24, 1966.
- [6] Ishii M., One-dimensional drift flux model and constitutive equations for relative motion between phases in various two-phase flow regimes, ANL-77-47, 1977.

표 1. 압력 손실 요소별 전달 함수

	Single-phase flow: $\Gamma(s)$		Two-phase flow: $\Pi(s)$	
	Unheated region (A)	Heated region (B)	Heated region (C)	Unheated region (D)
Temporal acceleration	Λ_{A1}	Λ_{B1}	Λ_8	Λ_{13}
Spatial acceleration	None	None	Λ_9	None
Gravitation	None	Λ_{B2}	$\Lambda_{10} - g \cdot \Lambda_1$	Λ_{14}
Friction & form loss	Λ_{A2}	Λ_{B3}	$\Lambda_{11} - \frac{f \cdot v_m^2}{2D} \Lambda_1$	Λ_{15}
Drift stress	None	None	Λ_{12}	$(e^{-s\tau_{34}} - 1) \cdot \Lambda_{12}$

표 2. 분석에 사용된 유동 불안정성 실험 자료 특성

	Saha [1]	CNEN [2]	FLARE [3]
Boiling channel configuration	Round tube	Round tube	Annulus
Heated length, m	2.74	9.0	2.03 to 3.05
Hydraulic diameter, m	0.01	0.021	0.009 to 0.013
Pressure, bar	10.3 to 13.8	35	68.9
Mass velocity, kg/m ² /s	880 to 1800	170 to 250	302 to 810
Working fluid	R-113	water	water

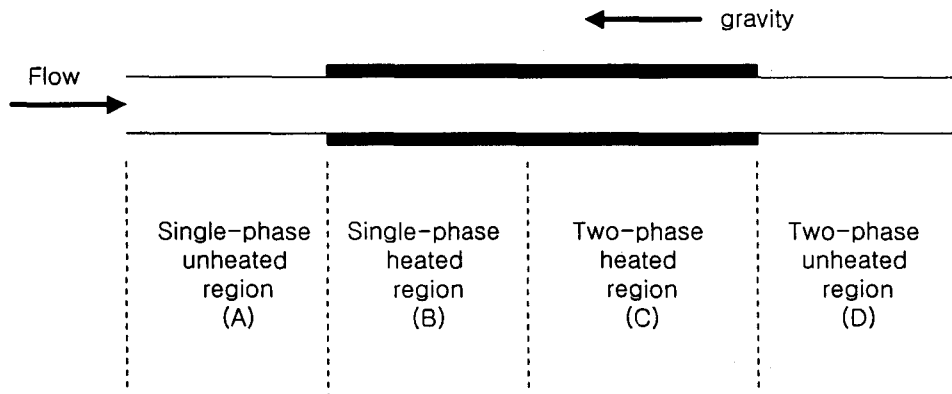


그림 1. 분석 모형에 고려된 수직 비등관의 기하 형태

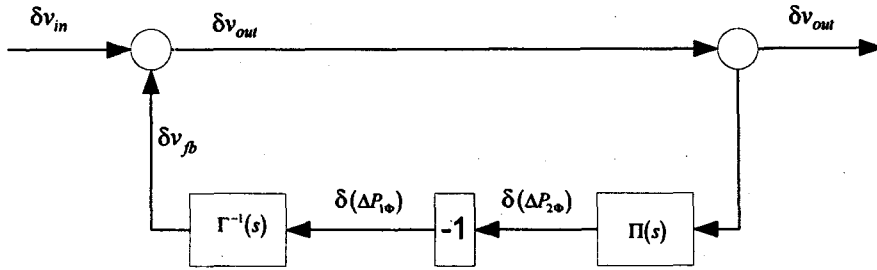


그림 2. 수직 비등관의 입구 유속 섭동에 대한 제어를 나타내는 닫힌 제어계

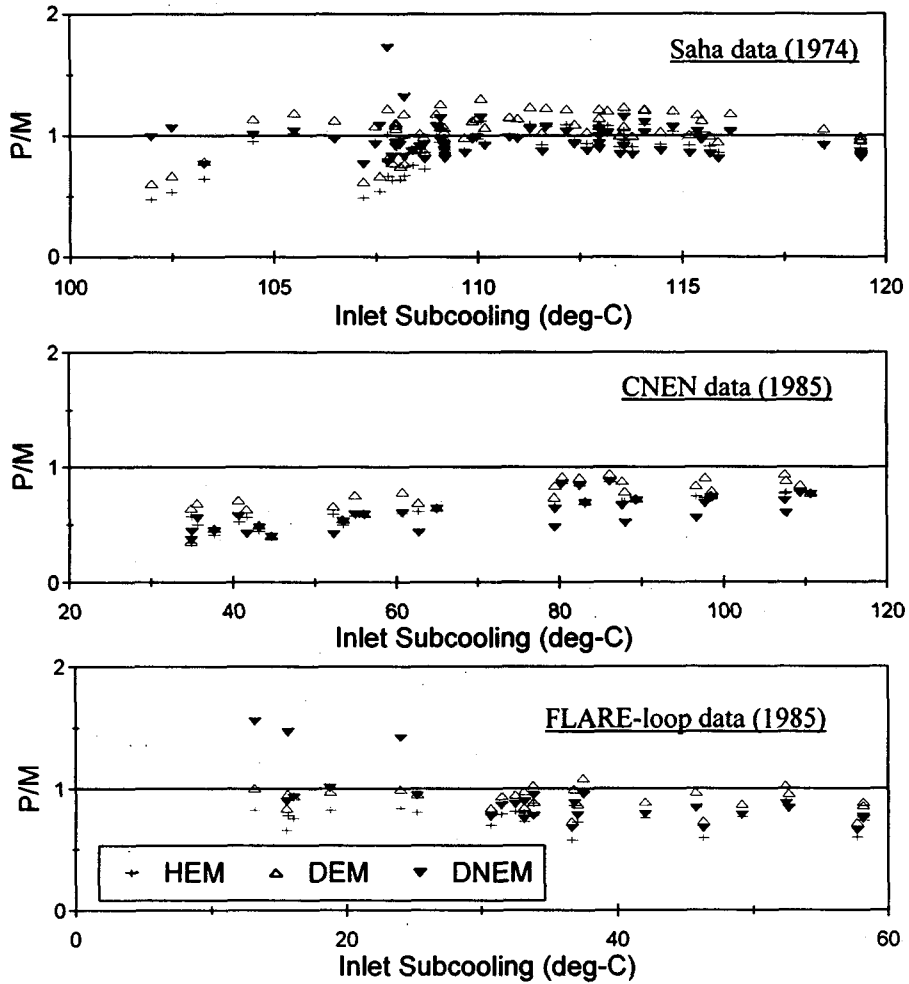


그림 3. 밀도파 진동 유동 불안정성 실험 자료에 대한 분석 결과