'97 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

비균일 축방향 출력분포시 임계열속 예측치 해석적 보정모형

권정택, 남기일, 임종선
한국원전연료주식회사

황대현
한국원자력연구소

요 약

기포막 제한 및 기포 군집 이론에 의한 해석적 접근을 통해 축방향 출력분포가 임계열속에 미치는 영향을 파악하고, 이를 근거로 임계열속 발생지점에서의 엔탈피 변화를 고려하여 축방향 출력분포에 따른 임계열속 예측치 보정 모델을 개발하였다. 제안된 모델의 검증을 위해 cosine 형태의 축방향 출력분포를 갖는 임계열속 측정치와 비교하였으며, 그 결과 제안된 모델은 측정치에 대해 평균 1.0072, 표준편차 9.98%의 예측 성능을 나타냈다.

1. 서 론

일반적으로 가열면의 열속 또는 온도가 어떤 특정 값 이상으로 증가하거나 유량, 압력, 유체온도 등 유동조건이 변화할 때 유체 상태가 액상에서 기상으로 바뀌면서 가열면과 유체 사이의 비등열전달계수가 급격히 낮아지는 천이비등현상이 발생하며, 이때의 열속을 임계열속(Critical Heat Flux)이라 한다[1]. 핵연료봉과 같이 가열면 열속이 조절되는 시스템의 경우 임계열속 발생은 즉각적인 표면온도의 급상승을 야기하며, 열속이 높을 때에는 가열면의 온도가 용융점에 도달하기도 한다. 따라서 임계열속 발생에 대한 정확한 역학구조 이해와 예측 방법 개발은 핵연료 건전성 확보를 위해 매우 중요한 과제라 할 수 있다. 가압경수로 원자로심 운전조건과 같은 저건도 미포화 비등양식에서 나타나는 핵비등 이탈[2] 현상에 의한 임계열속은 발생 가능한 역학기구가 매우 다양하여, 이에 대한 이론적 연구는 대부분 현상학적 모델과 실험상수를 결합한 semi-empirical 형태를 취하고 있으며 원형관과 같은 단순한 기하형태에 대해 부분적으로 성공하고 있다.[3,4,5] 핵연료 집합체와 같이 복잡한 기하형태에서의 임계열속 예측은 전적으로 실험에 의한 임계열속 상관식[6]에 의존하고 있다. 가압경수로 원자로심 임계열속 예측시 사용되는 임계열속 상관식은 임계열속 발생위치에서의 국부조건을 알아야 하기 때문에 부수로 해석 코드 사용이 필수적이다. 그러나 부수로 해석 코드의 특성상, 계산된 유동의 국부 조건은 임계열속 발생 위치 상류에서의 유동 특성과 열속 분포 변화 설명에 한계가 있으며, 따라서 상관식에 의한 임계열속 예측시 이를 고려하기 위한 적절한 보정항이나 보정인자를 사용하는 것이 일반적이다.

본 연구에서는 기포막 제한 및 기포 군집 모델(limitation of the vapor removal and bubble crowding model)[7]을 근거로 임계열속 발생 위치에 대한 해석적 접근을 통해 축방향 출력분포와 임계열속의 상관 관계를 규명하고, 이로부터 상관식에 의한 임계열속 예측시 이를 반영할 수 있는 보정인자 모델을 개발하였다.

2. 임계열속 발생 메카니즘에 의한 해석적 분석

기포막 제한 및 기포 군집 모델에 의하면, 국부건도가 낮은 과냉상태($\alpha < 0.6$)에서 임계열속 발생 직전에는 그림 1과 같이 가열면 근처에 기포들이 군집하여 기포군(vapor blanket)을 형성하게 된다. 이때 제어체적에서의 총 질량 및 액체에 대한 질량 보존 방정식은 각각 식 (1)과 (2)와 같다.

$$\Delta \dot{m}_2 = \dot{m}_3 - \dot{m}_4 \tag{1}$$

$$\dot{m}_2(1-\chi_2) + \dot{m}_3(1-\chi_1) = (\dot{m}_2+\Delta\dot{m}_2)[1-(\chi_2+\Delta\chi_2)] + \dot{m}_4(1-\chi_2) + \frac{q_b P_h \Delta z}{h_{fg}} \tag{2}$$

식(2)에서 이차항 ($\Delta\dot{m}_2\Delta\chi_2$)을 무시하고 이를 식(1)에 대입하여 정리하면 식(3)을 얻는다.

$$\dot{m}_3(\chi_2-\chi_1) = \frac{q_b P_h \Delta z}{h_{fg}} - \dot{m}_2 \Delta\chi_2 \tag{3}$$

여기서 $\dot{m}_3 = G_3 2\pi(r_o-s)\Delta z \simeq G_3 P_h \Delta z$, $\dot{m}_2 = G_2 \pi s(2r_o-s)$ 이므로, 식(3)은

$$G_3(\chi_2-\chi_1) = \frac{q_b''}{h_{fg}} - \frac{G_2 s(2r_o s)}{2(r_o-s)} \frac{d\chi_2}{dz}. \tag{4}$$

한편 R. T. Moody와 F. Moody[9]는 가열면으로부터 전달되는 총 열속 중 기포생성에 기여하는 양, q_b에 대해 다음과 같이 제안하였다.

$$q_b = q\frac{(i_l-i_{id})}{(i_f-i_{id})} = q\xi \tag{5}$$

따라서 임계건도에 해당하는 χ_2에 대해,

$$q_{CHF} = \frac{q_b}{\xi} = \frac{G_3 i_{fg}(\chi_2-\chi_1)}{\xi} + \frac{G_2 i_{fg} s}{\xi}\frac{d\chi_2}{dz}. \tag{6}$$

식(6)을 엔탈피를 이용하여 표현하면,

$$q_{CHF} = \frac{G_3 i_{fg}(\chi_2-\chi_1)}{\xi} + \frac{G_2 s}{\xi}\frac{di_2}{dz}. \tag{7}$$

식(7)에서 기포층내 유동의 진행에 따른 엔탈피 변화율 (di_2/dz) 항은 균일한 축방향 출력분포의 경우 양의 상수 값을 갖는 반면, 비균일 축방향 출력분포의 경우는 출력분포의 함수로 나타난다. 대부분의 임계열속 상관식이 균일한 축방향 출력분포시 임계열속 실험자료를 근거로 개발되었고 또한 부수로 해석 코드에 의해 계산된 유동의 국부조건은 기포층내 엔탈피 변화율을 적절히 모사하지 못하기 때문에 비균일 축방향 출력분포시 임계열속 상관식의 예측성능은 저하되며 적절한 보정을 필요로 한다.

3. 축방향 출력분포 보정인자 모델 제안

3.1 비균일 축방향 출력분포 보정인자 정의

식(7)은 균일 및 비균일 축방향 출력분포에 대해 각각 식(8)과 (9)와 같이 쓸 수 있다.

$$q_{CHF,U} = \frac{1}{\xi} G_3 i_{fg}(\chi_2-\chi_1) + \left[\frac{G_2 s}{\xi} + \frac{di_2}{dz}\right]_U \tag{8}$$

$$\begin{aligned} q_{CHF,NU} &= \frac{1}{\xi} G_3 i_{fg}(\chi_2-\chi_1) + \left[\frac{G_2 s}{\xi} + \frac{di_2}{dz}\right]_{NU} \\ &= q_{CHF,U} + \left\{\left[\frac{G_2 s}{\xi}\frac{di_2}{dz}\right]_{NU} - \left[\frac{G_2 s}{\xi}\frac{di_2}{dz}\right]_U\right\} \end{aligned} \tag{9}$$

비균일 축방향 출력분포에 대한 보정인자를 식 (11)과 같이 정의하면,

$$K = \frac{q_{CHF,U}}{q_{CHF,NU}}. \tag{10}$$

식(8)과 (9)로부터 K-factor는 식(11)과 같이 쓸 수 있다.

$$K = \frac{q_{CHF,U}}{q_{CHF,U} - \frac{G_2 s}{\xi}\left(\frac{di_2}{dz}\right)_U\left[1 - \frac{(di_2/dz)_{NU}}{(di_{2/dz})_U}\right]} \tag{11}$$

3.2 보정인자의 수학적 모델링

식(11)에서 $q_{CHF,U}$는 같은 국부 유동조건에서 균일 축방향 출력분포시 상관식에 의해 계산된 임계열속

예측치이다. 그 외에도 K-factor의 정량적 계산을 위해서는 기포층내 질량유속과 엔탈피 변화율, 임계열속 발생지점에서의 기포층 두께, 총 열속 중 기포생성에 기여하는 열속 비율 등을 알아야 한다.

3.2.1 최초 기포이탈 발생지점

Levy[10]는 Martinelli[11]가 제안한 해를 이용하여 가열면에 부착된 기포와 가열면 사이의 온도분포를 다음과 같이 제시하였다.

$$\Delta T_d = T_s - T_f = \frac{q/A}{h_{FC}} - Q N_{\Pr} Y_B^+ \qquad \text{for } 0 \le Y_B^+ \le 5 \tag{12a}$$

$$\Delta T_d = \frac{q/A}{h_{FC}} - 5Q\left\{N_{\Pr} + \ln\left[1 + N_{\Pr}\left(\frac{Y_B^+}{5} - 1\right)\right]\right\} \qquad \text{for } 5 \le Y_B^+ \le 30 \tag{12b}$$

$$\Delta T_d = \frac{q/A}{h_{FC}} - 5Q\left\{N_{\Pr} + \ln[1 + 5N_{\Pr}] + 0.5\ln\left[\frac{Y_B^+}{30}\right]\right\} \qquad \text{for } Y_B^+ \ge 30 \tag{12c}$$

여기서, Y_B^+는 기포까지의 거리를 나타내는 무차원 수이고 Q는 국부열속과 액체비열로 표현되는 무차원 수로서 각각 다음과 같이 표현된다.

$$Y_B^+ = 0.015(\sigma g_c D_H \rho_l)^{0.5}\frac{1}{\mu_l} \tag{13}$$

$$Q = \frac{q/A}{\rho_l C_{pl}\sqrt{\frac{\tau_w g_c}{\rho_l}}} \tag{14}$$

이로부터 기포층내 유동의 엔탈피 계산이 가능하며, 이를 주유동의 엔탈피와 비교하여 최초 기포이탈 발생지점(Onset of Significant Void)을 결정하였다.

3.2.2 균질유동의 유동건도

Saha와 Zuber[12]는 가열관 내 과냉이상유동의 유동건도에 대해 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$\chi_T = \frac{\chi_e - \chi_{e,N}\exp\left(\frac{\chi_e}{\chi_{e,N}} - 1\right)}{1 - \chi_{e,N}\exp\left(\frac{\chi_e}{\chi_{e,N}} - 1\right)} \tag{15}$$

식(15)에서 χ_e는 열역학적 평형건도, i_l은 임계열속 발생 지점에서 액체의 엔탈피 그리고 i_f는 포화액체의 엔탈피이며 $\chi_{e,N}$은 핵비등 발생 이후 기포이탈 발생지점(net vapor generation)에서의 열역학적 평형건도인데, Peclet수에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$\chi_{e,N} = -0.0022\frac{q}{\rho_l i_{fg}}\frac{d}{(\lambda_l/c_{pl}\rho_l)} \qquad \text{for } Pe_l = Gc_{pl}d/\lambda_l < 70{,}000 \tag{16a}$$

$$\chi_{e,N} = -154\frac{q}{\rho_l i_{fg}}\frac{1}{(G/\rho_l)} \qquad \text{for } Pe_l = Gc_{pl}d/\lambda_l > 70{,}000 \tag{16b}$$

유동건도가 결정되면 균질유동의 밀도, 기포율 등을 계산할 수 있다.

3.2.3 기포층내 기포율

기포층내 기포율은 식(17)과 같이 유동의 기포율에 비례한다고 가정하였다.

$$\alpha_2(z) = K_\alpha \alpha(z) \tag{17}$$

K_α를 구하기 위한 경계조건으로는 최초 기포이탈 지점에서의 기포율은 0, 임계열속 발생지점에서는 Pei[13]가 제안한 바와 같이 0.82를 사용하였다.

3.2.4 기포층 두께

기포층내 질량유속을 계산하기 위해서는 그림 1의 제어체적 상단에서의 기포층 두께를 알아야 한다. 임계

열속 발생지점에서의 기포층두께 및 기포 직경은 각각 Pei가 제안한 모델을 사용하였다.[13]

$$\text{기포층 두께 :} \quad s_c = 5.5\,D_t \tag{18}$$

$$\text{기포 직경 :} \quad D_b = 0.015\,(\sigma D_H/\tau_w)^{0.5} \tag{19}$$

임계열속 발생 전 노드에서의 기포층 두께는 식(20)과 같이 최초 기포이탈 발생지점에서 임계열속 발생지점까지 열속의 적분치에 비례한다고 가정하고, K_s를 구하기 위한 경계조건으로는 최초 기포이탈 지점에서의 기포층 두께는 0, 임계열속 발생지점에서의 기포층 두께는 s_c를 사용하였다.

$$\int_{z_{osv}}^{z_c} q''(z)\,dz = K_s s(z) \tag{20}$$

3.2.5 기포층내 유동 속도

Karman[14]은 표면이 매끄러운 원형관에서 완전히 확립된 난류 유동에 대한 속도 유형 U_l을 마찰속도 U_τ와 벽면에서의 거리 y의 함수로 각각 층류영역(laminar sublayer), 천이영역(buffer sublayer) 및 난류영역(turbulent sublayer)으로 세분화하여 제시하였다. 이를 본 연구의 관심영역인 이상유동에 적용하기 위해 이상유동 상태량을 사용해서 기포층내 유동 속도를 계산하였다.

3.2.6 기포생성에 기여하는 열속

과냉비등시 기포가 가열면 근처에서 생성되어 점차로 이탈하는 단계에서 총 열속은 식 (21)과 같이 강제대류에 의한 부분과 기포생성에 기여하는 부분의 합으로 표현할 수 있다.

$$q = q_b + q_{FC} \tag{21}$$

강제대류에 의한 열속 q_{FC}는 식(22)와 같고, 이때의 단상강제대류 열전달계수 h_{FC}는 잘 알려진 Dittus-Boelter 식에 의해 구할 수 있다.

$$q_{FC} = h_{FC}(T_w - T_l) \tag{22}$$

$$\frac{h_{FC}d}{\lambda_l} = 0.023\left(\frac{GD}{\mu_l}\right)^{0.8} \mathrm{Pr}_l^{0.4}. \tag{23}$$

Shah[15]는 가열면과 액체간의 온도 $T_w - T_l$에 대해 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$T_w - T_l = \frac{(\Psi_o - 1)(T_f - T_l) + (q/h_{FC})}{\Psi_o} \tag{24}$$

여기서

$$\Psi_o = 230(q/Gh_{fg})^{0.5} \quad \text{이다.} \tag{25}$$

따라서 식(21)로 부터 기포생성에 기여하는 열속 비율 ξ를 계산할 수 있다.

3.3 제안된 모델의 검증

제안된 모델의 검증을 위해, cosine 형태의 축방향 출력분포를 갖는 5x5 배열의 시험 집합체에서 측정된 임계열속 시험자료와 비교하였다. 각 임계열속 발생 위치에서의 유동조건은 COBRA-IV I 코드[16]로 계산하였고, 이로부터 각 측정치에 대한 K-factor를 계산하였다. 또한 같은 유동조건에서의 균일 축방향 출력분포시 임계열속, $q_{CHF,U}$ 계산은 Columbia 임계열속 상관식[17]을 사용하였으며, 이 들로부터 식(10)에 의해 보정된 임계열속 예측치가 계산된다. 그림 2는 임계열속 측정치에 대하여 보정하지 않은 예측치의 비율을 도시한 것으로 전체적으로 상관식이 과도 예측하고 있음을 볼 수 있다. 그림 3, 4 그리고 5는 각각 임계열속 발생 위치에서의 압력, 질량유속, 건도에 대한 [예측치/측정치]의 거동을 나타낸 것이다. 특히 국부건도 경우는 그림 5에서 보는 바와 같이 과도예측 정도와 분산이 크며, 이는 국부건도가 축방향 출력분포 형태에 민감한 인자임을 알 수 있다. 그림 6은 본 연구에서 제안된 모델로 보정된 예측치의 거동을 나타낸 것이다. 보정된 임계열

속 예측치는 측정치에 대해 ±20%내에 고르게 분포하며 평균 1.0072, 표준편차 9.98%를 갖는다. 이는 보정 전 1.1606과 15.3%에 비해 현저히 개선되었으며, 여러 변수들 중 특이 그 편차가 컸던 국부건도에 대해서도 ±20%내에 고루 분포함을 볼 수 있다(그림 7).

4. 결론 및 요약

기포막 제한 및 기포 군집 모델에 근거하여 임계열속 발생위치에 대한 해석적 분석 결과, 임계열속 발생 위치에서의 엔탈피 변화율이 축방향 출력분포에 종속되는 주요 인자이다. 유동의 국부조건 계산에 사용되는 부수로 해석코드는 그 특성상 임계열속 발생 위치에서의 이와같은 현상을 모사 하는데 한계가 있으며, 비균일 축방향 출력분포시 상관식의 예측 성능 저하의 주요 원인으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 임계열속 발생 위치에서의 엔탈피 변화율을 포함하는 축방향 출력분포에 따른 임계열속 예측치 보정 모델을 제안하였다. 제안된 모델의 성능 평가를 위해 임계열속 측정치와 비교 분석한 결과, 검증에 사용된 측정치들에 대해 그 평균과 표준편차가 각각 1.1606에서 1.0072, 15.3%에서 9.98%로 향상 되었음을 확인할 수 있었다. 향후 과제로는, 본 모델에 대한 검증이 제한된 특성을 갖는 시험 집합체로부터 얻은 측정치에 대해 수행되었으므로 보다 다양한 기하형태와 유동 조건에 대한 측정치들과 비교 분석이 수행되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. John G. Collier, Convective Boiling and Condensation, Mcgraw-Hill Book Company, UK, pp325-429, 1994.
2. G. F. Hewitt, Handbook of Multiphase Systems, Chap. 6.4, Edited by G. Hetsroni, McGraw-Hill Co., 1982.
3. L. S. Tong, "Boundary Layer Analysis of the Flow Boiling Crisis", Int. J. of Heat & Mass Transfer, Vol. 11, pp 1208-1215, 1968.
4. J. Weisman & B. S. Pei, "Prediction of Critical Heat Flux in Flow Boiling at Low Qualities", Int. J. of Heat & Mass Transfer, V26 N10, pp1463-1477, 1983.
5. W. Lin, et al., "A Theoretical Critical Flux Model for Rod Bundles under Pressurized Water Reactor Conditions", Nuc.Tech. Vol. 85 pp213-226, 1989.
6. D. C. Groenveld, Heat Transfer Phenomena Related to the Boiling Crisis, AECL-7239, Chalk River Nuclear Lab., Chalk River, Ontario, AECL, 1981.
7. W. Hebel, W. Detavernier and M. Decreton, "A Contribution to the Hydrodunamics of Boiling Crisis in a Forced Flow of Water", Nucl. Eng. Des., Vol.64, pp433-445, 1981
8. W. Hebel and W. Detavernier, "On the Velocity Profile of Vapor Bubbles at Critical Heat Flux", Nucl. Eng. Des., Vol.74, pp253-257, 1982
9. R. T. Lahey and F. Moody, "The Thermal Hydraulics of a Boiling Water Reactor", pp214-220, American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois, 1977.
10. S. Levy, "Forced convection subcooled boiling prediction of vapor volumetric fraction", Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 10, pp951-965, 1966.
11. R. C. Martinelli, "Heat Transfer to Molten Metals", Trans. Am. Soc. Mech. Engrs 69, 947, 1947.
12. P. Saha and N. Zuber, "Point of Net Vapor Generation and Vapor Void Fraction in Subcooled Boiling", Proc., 5th Int. Heat Mass Conf., Vol. IV, pp175-179, 1974.
13. B. S. Pei, "Prediction of Critical Heat Flux in Flow Boiling at Low Qualities", PhD Thesis, University of Cincinnati, Cincinnati, Ohio, 1981.
14. V. S. Arpaci and P. S. Larsen, Convection Heat Transfer, Prentice-Hall, Edgewood Cliffs, N. J., 1984
15. M. M. Shah, "A General Correlation for Heat Transfer during Subcooled Boiling in Pipes a Annuli", ASHRAE Trans. 83, 202-217, 1977
16. D. S. Rowe, COBRA-IV-I: An Interim Version of COBRA for Thermal-Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements and Cores, BNWL-1962, 1976
17. D. G. Reddy and C. F. Fighetti, "Parametric Study of CHF Data, Vol. 2 ; A Generalized Subchannel CHF Correlation for PWR and BWR Fuel Assemblies", EPRI-NP-2609, 1983

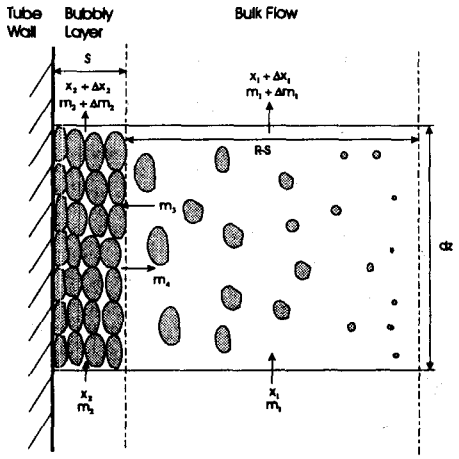

Figure 1 Schematic diagram of bubble crowding model

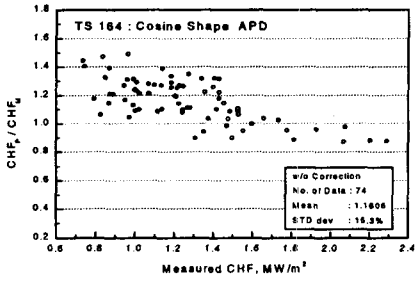

Figure 2 CHF ratio w/o correction versus measured CHF

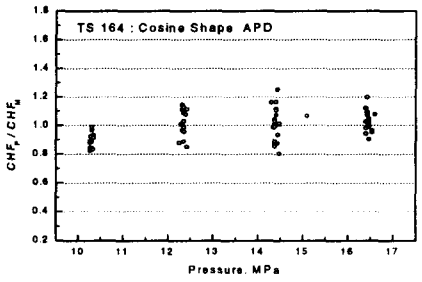

Figure 3 CHF ratio w/o correction versus local pressure

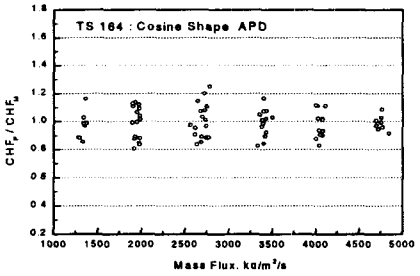

Figure 4 CHF ratio w/o correction versus local mass flux

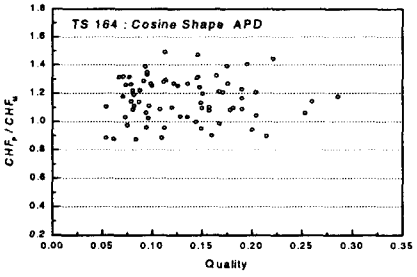

Figure 5 CHF ratio w/o correction versus local quality

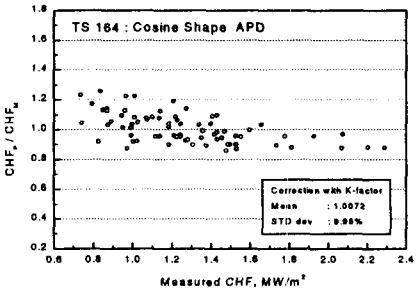

Figure 6 CHFcorrected with K-factor versus measured CHF

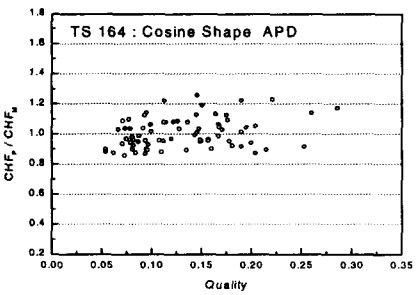

Figure 7 CHF ratio corrected with K-factor versus local quality