2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

수직원관의 과냉비등 유동에 대한 전산해석

Computational Analysis of Subcooled Boiling Flow in a Vertical Tube

인왕기, 신창환, 오동석, 전태현
한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

다차원 2상유동 모델에 기초한 과냉 비등모델을 가열 수직원관에 적용하여 기포율과 액체와 기체의 속도 및 온도 분포 등을 예측하였다. 본 연구에 적용한 비등모델은 기포의 발생과 가열면과 2상유동 열전달의 분할모델에 대한 상관식을 이용한다. 기포에 의해 야기되는 난류효과를 고려한 주유동방향 기포율 분포의 예측결과는 실험결과와 비교적 잘 일치하였으며 액체온도의 분포도 잘 예측되었다. 과냉비등이 현저하게 발생하는 원관 단면에서 예측된 액체와 기체 속도 및 기포율의 반경방향 분포는 만족할만한 것으로 평가되었다. 원관 계통압력이 4.5 Mpa과 1.5 Mpa인 경우에 대한 예측성능의 차이는 미미한 것으로 나타났다.

Abstract

The volume fraction of gas phase and velocities and temperatures of liquid and gas were predicted in a heated vertical tube using a subcooled boiling model based on multidimensional two-phase flow model. The boiling model used in this study includes correlations for the split of heat from a wall into the two phases, as well as creation of the gas phase. The predicted void fractions in mainstream direction with the bubble-induced turbulence agree with the experimental results fairly well and the distributions of liquid temperature were also reasonably predicted. The radial profiles of two-phase velocities and void fraction predicted at significantly subcooled boiling region were evaluated to be satisfactory. There was also insignificant difference in prediction performance for system pressures of 4.5 Mpa and 1.5 Mpa.

1. 서 론

열전달과 비등(boiling)은 열교환기와 원자력발전소 등 많은 산업분야에서 발생하는 매우 중요한 물리적인 현상이다. 특히 원자로 노심의 기포율(void fraction) 분포에 대한 정확한 정보는 적절한 원자로 안전해석을 수행하기 위해 필수적이다. 기포율 분포는 원자로 노심의 압력손실과 열전달 및 유동 안정성에 영향을 주며 중성자 감속에도 영향을 주어 결국에는 원자로 출력에도 영

향을 미친다. 그러나 비등현상은 물리적으로 매우 복잡하므로 많은 실험적인 연구와 함께 1차원적 해석적인 연구가 주로 수행되었다. 그러나 최근에는 3차원 비등모델의 개발에 대한 연구가 많이 보고되고 있다.

과냉 유체가 가열수로에 유입되면 초기에 열은 강제대류에 의해 전달되며 벽 온도와 평균 유체온도가 증가한다. 만약 벽이 유체의 포화온도에 비해 충분히 과열되면 증기 기포가 발생하는 과냉비등(subcooled boiling) 현상이 시작된다(onset of nucleate boiling, ONB). 대부분의 유체는 과냉상태이지만 가열면 근처에서는 국소적으로 비등이 발생하며 열적 비평형 상태에 이르게 된다. 이후 과냉비등은 계속되지만 초기에는 높은 과냉도로 인해 기포율은 현저히 증가하지 않다가 유효 기포 시작점(onset of significant void, OSV) 이후 크게 증가한다(Fig. 1). OSV 이후 유동 평균 엔탈피가 포화 액체 엔탈피와 같아지는 포화비등(saturated boiling)에 도달할 때까지 과냉비등은 지속된다. 과냉비등 영역에서의 열전달은 단상유동의 대류영역보다 현저히 증가한다. 가열면에서 생성된 증기 기포는 잠열을 수로 중심부의 차가운 유동영역으로 전달한다(기포 응축). 기포 사이의 액체의 대류열전달은 기포의 빠른 성장과 응축으로 인해 더욱 증가한다. 즉, 가열면과 유동사이의 열전달은 부분적인 핵비등(nucleate boiling)과 부분적인 대류열전달로 이루어진다.

과냉 비등모델에 대한 연구는 기포의 발생과 크기의 차이로 인해 고압영역과 저압영역에 대해 각각 이루어졌다. Kurul(1)은 2유체 모델을 이용한 다차원 과냉 비등모델을 제안하여 2상유동에 대한 보다 정확하고 상세한 전산해석의 기반을 마련하였다. Kurul의 비등모델은 상대적으로 압력이 높은 4.5Mpa의 실험결과와 비교하여 타당성이 검증되었다. Anglart(2)은 범용 전산유체역학(CFD) 코드인 CFX-4.2(3)와 연계하여 Kurul의 비등모델을 사용하여 Bartolomei(4)의 고압(4.5Mpa) 실험결과와 비교하였다. Anglart과 Nylund(5)은 1개 및 6개 핵연료 봉다발에서의 기포율 분포를 예측하여 5.0Mpa 근처의 실험결과와 비교하여 타당성을 검증하였다. 한편, Zeitoun과 Shoukri(6)은 1차원 저압 과냉 비등모델을 개발하여 1기압 근처의 실험결과와 비교하였다. Tu와 Yeoh(7)는 고압조건에 개발된 비등모델을 저압조건에 적용하여 기포율 분포의 정확한 예측을 위해 필요한 새로운 상관식을 제안하였다. 최근 Krepper(8)는 다양한 압력범위에서 CFX-4 비등모델을 평가하고 기포 크기에 대한 새로운 상관식을 사용하여 다소 개선된 결과를 제시하고 있다.

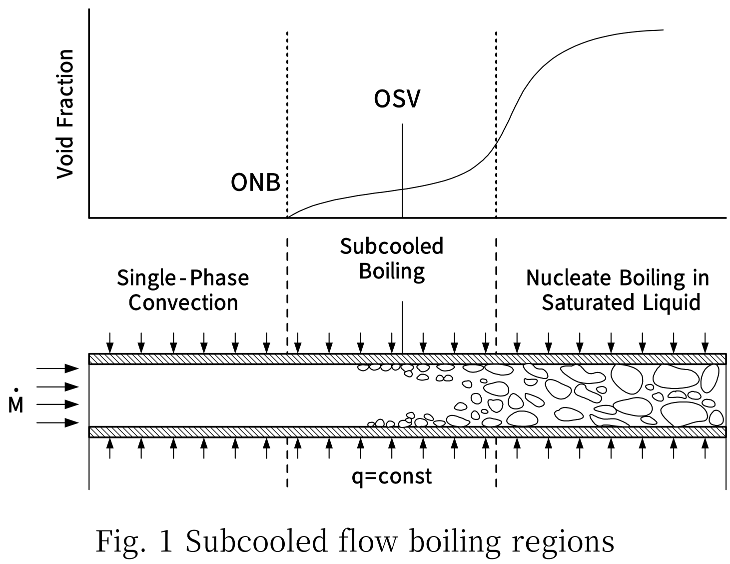

Fig. 1 Subcooled flow boiling regions

본 연구의 주목적은 범용 CFD 코드인 CFX-4.4[9]의 과냉 비등모델을 검토하고 평가하는 것이며 부차적으로는 비등모델의 개선방향과 원자로 핵연료 봉다발의 적용 가능성을 검토하는 것이다. CFX-4.4의 과냉 비등모델을 평가하기 위해 Bartolomei의 수직원관에서의 비등실험을 모의 계산하였다.

2. CFX-4 비등모델

CFX-4는 RPI(Rensselaer Polytechnic Institute)의 Kurul이 제안한 다차원 2상유동 모델을 이용한 과냉 비등모델을 채택하고 있다. 기체와 액체는 모두 연속체(continua)이며 각각에 대한 질량, 운동량 및 에너지 보존 방정식의 해를 구한다. 두 유체 경계면에서의 운동량, 에너지 및 질량의 전달현상은 적절한 모델 또는 실험자료에 기초한 상관식을 이용하여 나타낸다.

2.1 경계면 운동량 및 에너지 전달(Inter-phase momentum and heat transfer)

2-유체 사이의 운동량 및 에너지 전달은 입자(particle) 모델을 이용하며 다음과 같은 상관식을 적용한다. 경계면의 단위 체적당 운동량 전달률(M_k)은 각각의 물리적 현상을 나타내는 항들의 조합으로 아래와 같이 표현된다.

$$M_k = M_k^d + M_k^{vm} + M_k^L + M_k^{LW} + M_k^{TD} \tag{1}$$

식(1)의 오른쪽 항들은 각각 항력, 가상 질량력(virtual mass force), 양력, 벽 윤활력(wall lubrication force) 및 난류 전파력(turbulent dispersion force) 등을 나타내며 각각의 상관식들은 아래와 같다.

$$M_L^d = -M_G^d = \frac{3}{4}\frac{C_D}{d_b}\alpha_G\rho_L\left|\vec{U}_G - \vec{U}_L\right|\left(\vec{U}_G - \vec{U}_L\right) \tag{2}$$

$$M_L^{vm} = -M_G^{vm} = C_{vm}\alpha_G\rho_L\left(\frac{D\vec{U}_G}{Dt} - \frac{D\vec{U}_L}{Dt}\right) \tag{3}$$

$$M_L^L = -M_G^L = C_L\alpha_G\rho_L\left(\vec{U}_G - \vec{U}_L\right)\times\left(\nabla\times\vec{U}_L\right) \tag{4}$$

$$M_L^{LW} = -M_G^{LW} = \frac{\alpha_G\rho_L\left(\vec{U}_G - \vec{U}_L\right)^2}{d_b}\cdot Max\left(C_1 + C_2\frac{d_b}{y_w},\ 0\right)\vec{n} \tag{5}$$

$$M_L^{TD} = -M_G^{TD} = C_{TD}\rho_L k_L \nabla\alpha_G \tag{6}$$

본 연구에 사용된 각 상관식 계수 값은 다음과 같다.

$$C_D = \frac{24}{\mathrm{Re}}\left(1 + 0.1\mathrm{Re}^{0.75}\right), C_{vm} = 0.0, C_L = 0.03, C_1 = -0.01, C_2 = 0.05, C_{TD} = 0.03 \tag{7}$$

한편, 기체와 액체 경계면 사이의 열전달은 두 유체 사이의 단위 면적, 단위 시간 및 단위 온

도차이에 의한 에너지 전달을 나타내는 열전달 계수를 이용하여 나타낸다. 즉, 두 유체사이 경계면적 A_{LG}에서의 단위시간당 열전달률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{LG} = h_{LG} A_{LG} \left(T_G - T_L \right) \tag{8}$$

여기서 열전달 계수는 기포의 직경(d_b)과 액체의 열전도도 k_L을 이용하여 무차원 Nusselt 수로 표현된다.

$$Nu = \frac{h_{LG} d_b}{k_L} \tag{9}$$

Nusselt 수는 기포 레이놀즈 수(Re_b)와 액체의 Prandtl 수(Pr)의 함수이며 본 연구에서는 Ranz와 Marshall(10)의 상관식을 사용하였다.

$$Nu = 2 + 0.6 \left(\mathrm{Re}_b \right)^{0.5} \mathrm{Pr}^{0.3} \tag{10}$$

구형 기포에 대한 단위체적당 경계면적은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$A_{LG} = \frac{6\alpha}{d_b} \tag{11}$$

여기서 α는 기포율을 나타내며 기포직경이 기체와 액체 사이의 운동량과 에너지 전달에 큰 영향을 주는 인자임을 알 수 있다. 평균 기포직경은 액체 국소 과냉도의 함수로 나타내며

$$d_b = \frac{d_1 \left(\theta - \theta_0 \right) + d_0 \left(\theta_1 - \theta \right)}{\theta_1 - \theta_0} \tag{12}$$

상수들은 Anglart과 Nylund(5)가 추천한 다음의 값들을 사용한다.

$$d_0 \left(\theta_0 = 13.5K \right) = 1.5 \times 10^{-4}\, m, d_1 \left(\theta_1 = 0K \right) = 1.5 \times 10^{-3}\, m \tag{13}$$

2.2 비등 열전달(Boiling heat transfer)

과냉 비등모델의 가장 중요한 부분은 가열면 열유속의 분할 모델이다. 앞에서 이미 언급한 바와 같이 CFX-4.4 코드에 도입된 비등모델은 RPI 비등모델로 벽 전체 열유속을 Fig. 2에 도시한 바와 같이 3개 부분으로 나눈다. 즉, 가열면과 액체 사이의 대류(convection) 열전달률(Q_f), 기포가 가열면을 떠나면서 생기는 증발(evaporation) 열전달률(Q_e) 및 기포가 떠난 자리로 액체가 유입되면서 발생하는 급속냉각(quenching) 열전달률(Q_q)로 구분한다. 즉, 벽 전체 열유속 Q_{tot}은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{tot} = Q_f + Q_e + Q_q \tag{14}$$

여기서

$$Q_f = h_f\left(T_W - T_L\right) \tag{15}$$

$$Q_q = h_q\left(T_W - T_L\right) \tag{16}$$

$$Q_e = \frac{\pi}{6} d_{Bw}^3 \rho_G f n h_{LG} \tag{17}$$

이며 T_w는 벽면온도이고 T_L은 벽에 인접한 액체온도이다.

한편, 대류 열전달 계수 h_f 와 h_q 는 다음과 같은 관계식을 이용하여 얻어진다.

$$h_f = A_{1f} St \rho_L C_{pL} U_L \tag{18}$$

$$h_q = \frac{2}{\sqrt{\pi}} f A_{2f}\left(t_W k_L \rho_L C_{pL}\right)^{0.5} \tag{19}$$

여기서 St와 C_{pl}은 각각 국소 Stanton 수와 액체의 정압비열을 나타낸다. 기포증발 관련 변수들인 기포핵 밀도(n), 가열면 이탈 기포 직경(d_{Bw}), 대류와 급속냉각 열전달 면적(A_{1f}, A_{2f}), 기포 발생 빈도(f) 및 대기시간(t_W)은 아래와 같은 상관식을 이용한다.

$$n = \left(210\left(T_W - T_{sat}\right)\right)^{1.805} \tag{20}$$

$$d_{Bw} = 0.0014\exp\left(\frac{T_{sat} - T_L}{45}\right) \tag{21}$$

$$A_{2f} = \pi d_{Bw}^2 n \tag{22}$$

$$A_{1f} = \max(1 - A_{2f}, 0) \tag{23}$$

$$f = \left(\frac{4g\Delta\rho}{3d_{Bw}\rho_L}\right)^{0.5} \tag{24}$$

$$t_W = \frac{0.8}{f} \tag{25}$$

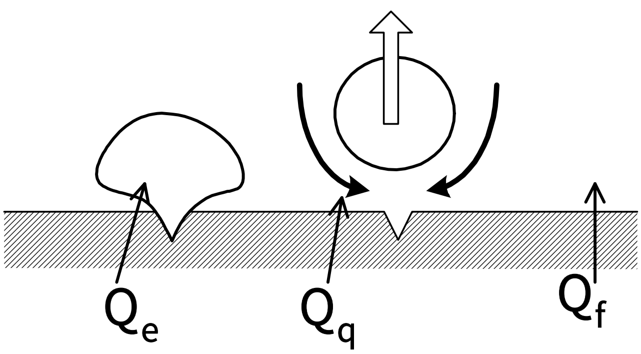

Fig. 2 Wall heat partition model

2.3 경계면 질량 전달(Inter-phase mass transfer)

기체와 액체 사이의 질량전달은 가열면에서의 증발 및 유동 내부에서의 응축 또는 증발에 의해 발생한다. 가열면에서 액체 증발에 의한 질량전달은 증발 열전달률을 이용하여 다음과 같이 얻어진다.

$$m = \frac{Q_e}{h_{LG} + C_{pL} T_{sub}} \tag{26}$$

유동 내부에서의 질량전달은 액체가 과냉상태이면 기체로부터 액체로의 응축이 발생하고 액체가 과포화이면 액체로부터 기체로의 증발현상이 발생한다. 응축 및 증발에 의한 질량전달률은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$m_{GL} = \max\left(\frac{h_{LG}\left(T_{sat} - T_L\right) A_{LG}}{h_{LG}}, 0 \right) \tag{27}$$

$$m_{LG} = \max\left(\frac{h_{LG}\left(T_L - T_{sat}\right) A_{LG}}{h_{LG}}, 0 \right) \tag{28}$$

2.4 난류모델

2상유동에 대한 난류모델은 아직까지 많은 연구가 진행되지 않아 일반적으로 액체유동의 난류와 기포에 의해 유발되는 난류를 선형적으로 중첩하여 사용한다. 즉, 액체의 난류 점성계수는 아래와 같이 표현되고

$$\mu_L^t = \mu_L^{t(SI)} + \mu_L^{t(BI)} \tag{29}$$

여기서 액체유동의 shear에 의한 난류 점성계수($\mu_L^{t(SI)}$)는 표준 k-e 모델로부터 구해지며 기포유발 난류 점성계수는 Sato 등[11]이 제안한 아래와 같은 상관식을 사용한다.

$$\mu_L^{t(BI)} = \rho_L C_{tb} \frac{d_b}{2} \alpha_G \left| U_G - U_L \right| \tag{30}$$

여기서 상관식 계수 C_{tb}는 1.2이다.

3. 전산해석 방법

본 연구에서는 Bartolomei[4]의 Fig. 3과 같은 수직원관에서의 물을 이용한 과냉 비등실험을 모의 계산하였다. 원관의 직경과 가열면 길이는 각각 15.4mm, 2m이다. 범용 CFD 코드인 CFX-

4.4를 이용하여 축대칭 2차원 모델을 구성하였으며 전산격자는 15x500 개의 셀을 사용하였다. 액체유동의 난류모델은 표준 k-e 모델을 사용하였고 기포유동은 층류 또는 Sato 등의 선형 중첩 난류모델을 각각 이용하였다. 대류항의 이산화는 hybrid 차분도식을 이용하였으며 보다 안정적인 수치해를 얻기 위해 압력, 기포율 및 엔탈피에 대한 방정식은 algebraic multigrid 방법을 적용하였다. Fig. 4는 액체 질량, 액체 엔탈피 및 기포율 방정식 잔차(residual)의 변화를 보여준다. 여기서의 잔차는 모든 제어체적에서의 각 방정식 잔차의 절대값을 합한 것이다.

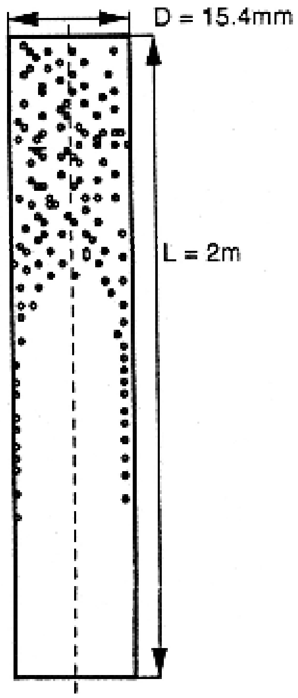

Fig. 3 Test geometry (Bartolomei[4])

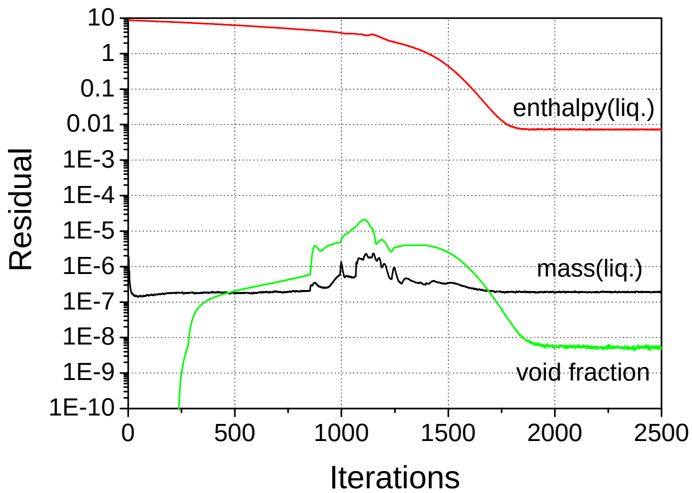

Fig. 4 Plot of the residuals for mass(liquid), enthalpy(liquid) and volume fraction

본 모의계산에 사용한 Bartolomei의 실험조건은 두가지 경우이며 원관 입구에서의 액체 질량 유속은 900 kg/m^2s 로 동일하다. 첫번째는 계통압력(P)이 4.5 Mpa이며 가열면 열유속(Q_w)과 원관 입구 과냉도(T_{sub})는 각각 570000 W/m^2 과 60.0 K이다. 두번째 조건은 P=1.5 Mpa, Q_w=380000 W/m^2, T_{sub}=42.8 K이다.

4. 결과 및 고찰

Kurul[(1)]이 제안한 다차원 2상유동 모델을 이용한 범용 CFD 코드인 CFX-4.4의 과냉 비등모델을 가열 수직원관에 적용하여 기포율과 온도 및 속도 분포 등을 예측하였다. Fig. 5는 P=4.5 Mpa, Q_w=570000 W/m^2, T_{sub}=60.0 K인 경우의 기포율 분포를 나타낸 것으로 원관 축방향 단면에서의 분포와 각 단면평균 분포를 실험결과와 비교하였다. 원관 입구로부터 약 0.8m 떨어진 지점 (x=0.8m)에서 가열면 온도가 충분히 과열되면서 기포가 발생하는 것을 보여주고 있다. 하류로 갈수록 기포율은 계속 증가하고 가열면에서 다소 떨어진 위치에서 국소적으로 최대가 나타나는 분포를 보이고 있다. 기포율은 약 1.2m 이후 현저히 증가하는 것을 알 수 있으며 Sato 모델을 이용하여 기포에 의한 난류를 고려한 예측결과가 측정결과에 보다 근접한 분포를 보이고 있다. 기포유동을 층류(laminar flow)로 가정한 예측결과는 단면평균 기포율이 0.1-0.2에서 측정치보다 현저히 높은 분포를 나타내고 있다.

원관 축방향 단면에서의 액체온도 분포와 각 단면평균 온도, 원관중심 온도 및 벽 근처 온도 분포는 Fig. 6에 나타냈다. 원관중심을 기준으로 포물선형의 온도분포가 하류로 갈수록 보다 평탄한 분포로 변해가는 것을 알 수 있다. 원관 단면평균의 액체온도는 측정결과와 동일하게 하류로 갈수록 계속적으로 증가한다. 원관중심 온도는 입구로부터 약 0.4m 지점까지 변화가 작고 약 1.7m 까지 선형적으로 증가하며 이후에는 더욱 크게 증가하는 것으로 예측되었다. 한편, 가열면에 인접한 곳에서의 액체온도는 약 1.2m 지점까지 빠르게 증가하지만 이후에는 포화온도 (T_{sat}=530 K)까지 서서히 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 액체속도, 기체속도와 기포율에 대한 반경방향의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 7에 도시한 x=0.5m에서의 액체속도는 기포가 발생하기 이전이므로 발달된 단상 난류유동 속도분포를 보이고 있다. 그러나 기포가 많이 발생한 x=1.75m ($\alpha_{G,avg} = 0.3$)에서는 액체속도가 증가하고 원관중심(R_n=0)보다 벽 근처(R_n=0.75)에서 최대가 나타나는 분포로 변하는 것을 알 수 있다. x=1.75m에서의 기체속도는 액체속도와 비슷한 분포를 보이고 있으며 벽면으로 갈수록 상대적으로 더욱 증가하는 경향을 보이고 있다. 한편, Fig. 8의 반경방향 기포율 분포는 상향 기포유동 (bubbly flow)의 전형적인 기포율 분포인 벽면에 근접할 수록 기포율이 증가하는 ‘wall-peaking’ 특징을 나타내고 있다. Sato 모델을 이용하여 기포의 난류효과를 포함한 경우에는 벽 근처 (R_n=0.75)에서 최대값을 나타내고 있으나 Sato 모델을 이용하지 않고 기체유동을 층류로 가정한 경우 벽면에서 다소 떨어진 영역(R_n<0.75)에서는 상대적으로 낮고 벽 근처에서는 높은 기포율 분포를 보이고 있으며 최대값의 위치도 뚜렷하지 않다. 기포율의 최대값이 나타나는 위치에서 액체와 기체의 속도도 각각 최대치를 보이고 있음을 알 수 있다.

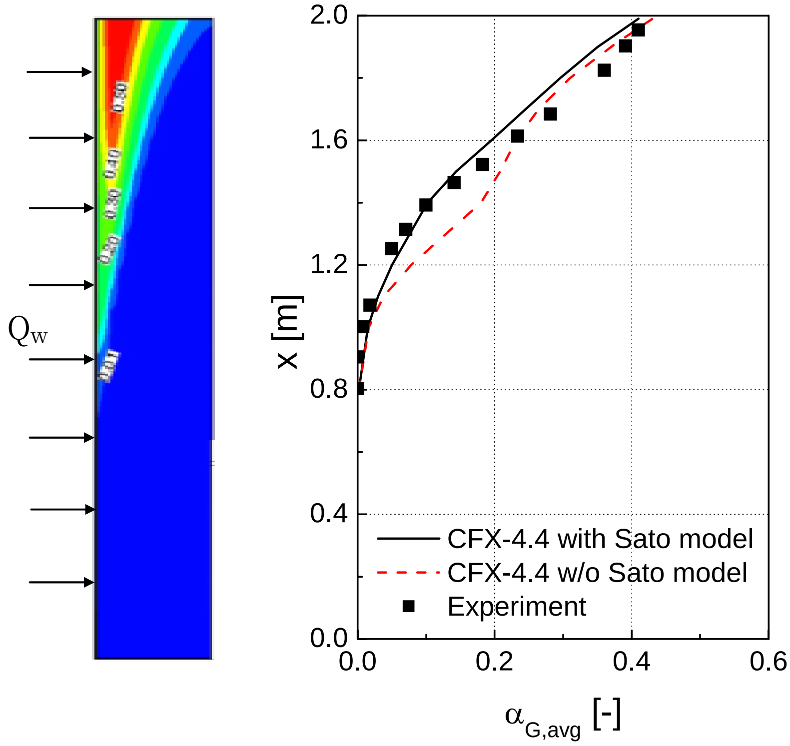

Fig. 5 Distributions of void fractions for P=4.5 Mpa, Q_w=570000 W/m^2, T_{sub}=60.0 K

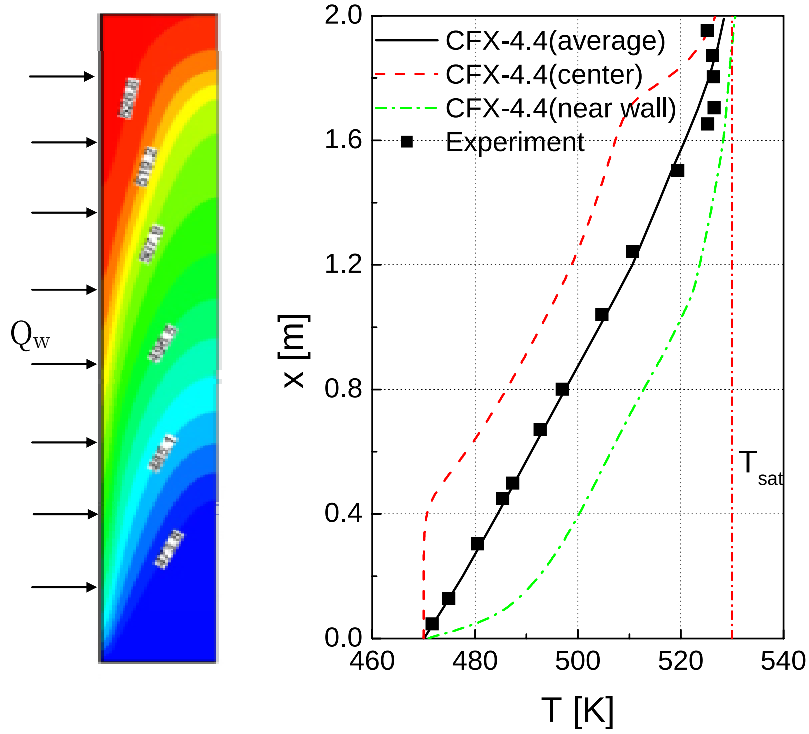

Fig. 6 Distributions of liquid temperatures for P=4.5 Mpa, Q_w=570000 W/m^2, T_{sub}=60.0 K

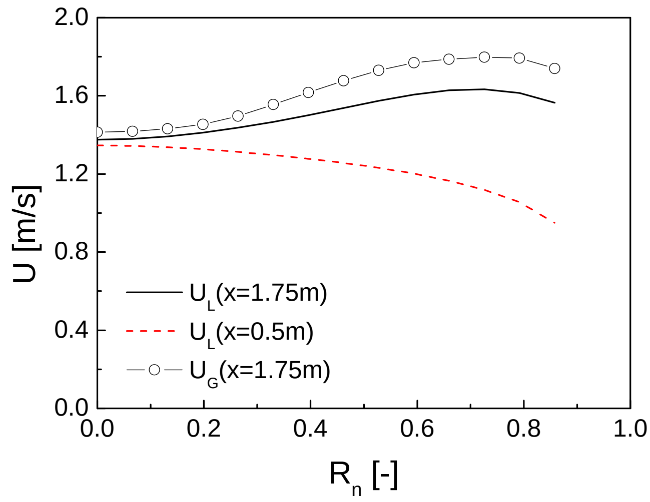

Fig. 7 Radial profiles of phase velocities for P=4.5 Mpa, Q_w=570000 W/m^2, T_{sub}=60.0 K

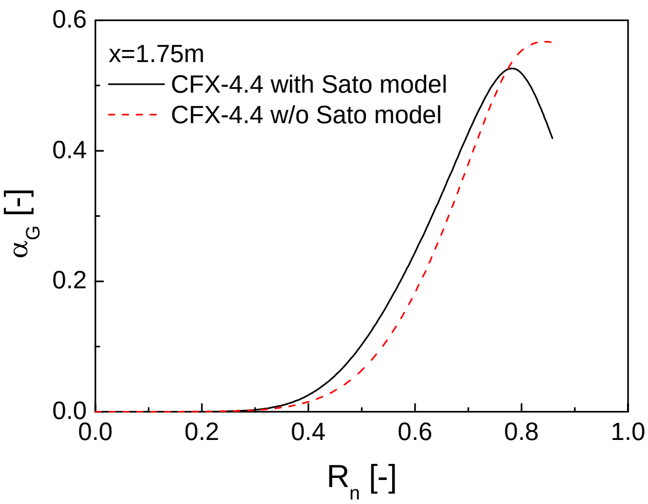

Fig. 8 Radial profiles of void fractions for P=4.5 Mpa, Q_w=570000 W/m^2, T_{sub}=60.0 K

Fig. 9는 P=1.5 Mpa, Q_w=380000 W/m^2, T_{sub}=42.8 K인 경우 원관 단면평균 기포율과 액체온도의 주유동방향 분포를 나타낸 것이다. 기포율 분포는 압력이 4.5 Mpa인 경우(Fig. 5)와 비슷한 측정결과 및 예측결과를 보이고 있다. 약 x=0.9m에서 기포가 발생하기 시작하여 x=1.2m까지 서서히 증가하다가 이후에는 보다 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 기포의 난류효과를 포함한 경우의 예측결과는 실험결과에 비해 다소 낮지만 비교적 만족할만한 기포율 분포를 보이고 있으나 층류로 가정한 경우의 예측 기포율은 0.15-0.25에서 크게 증가하여 측정치보다 현저히 높은 분포를 나타내고 있다. 원관 단면평균 온도와 중심온도 및 벽 근처의 액체온도 분포는 Fig. 6의 압력이 4.5 Mpa인 경우와 비슷한 특징일 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 P=1.5 Mpa, Q_w=380000 W/m^2, T_{sub}=42.8 K인 경우 x=1.75m에서 액체와 기체 속도

및 기포율의 반경방향 분포를 나타낸 것이다. 액체와 기체 속도 모두 원관 중심에서 서서히 증가하여 벽 근처인 R_n=0.8에서 최대치를 나타내고 있으며 기체속도가 약 12% 높게 예측되었다. 한편, 기포율은 원관 중심에서 벽면으로 가까이 갈수록 급격히 증가하여 R_n=0.8에서 최대값을 나타내고 있으며 이후 다시 감소하는 분포를 보이고 있다. 기포율이 최대가 되는 위치에서 액체와 기체 속도 모두 최대값을 보이고 있음을 다시 한번 확인할 수 있다.

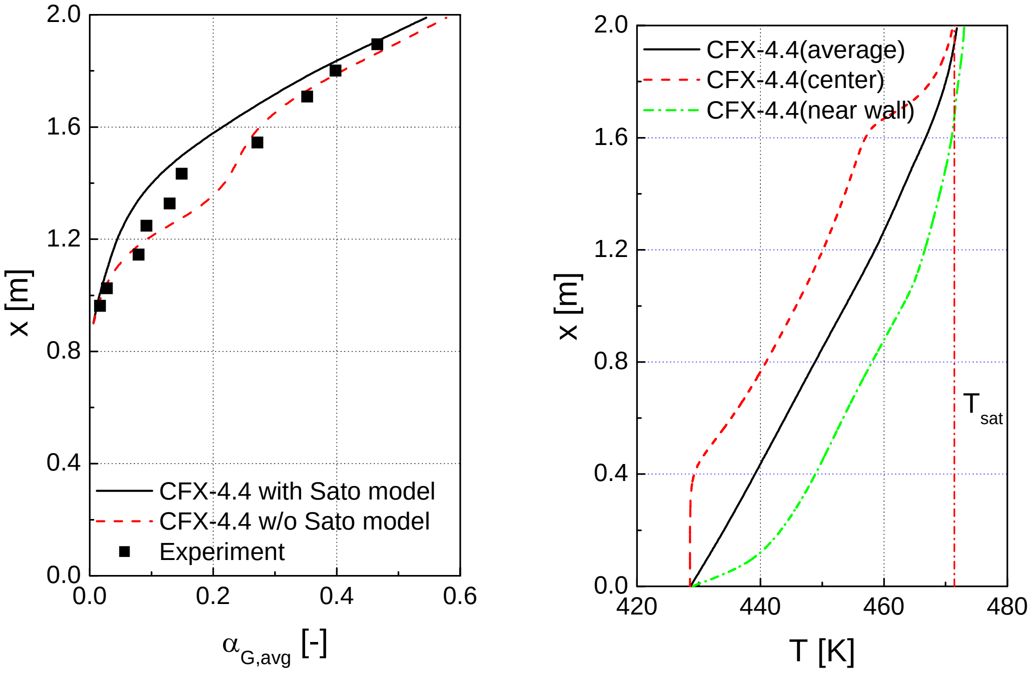

Fig. 9 Distributions of void fraction and liquid temperatures for
P=1.5 Mpa, Q_w=380000 W/m^2, T_{sub}=42.8 K

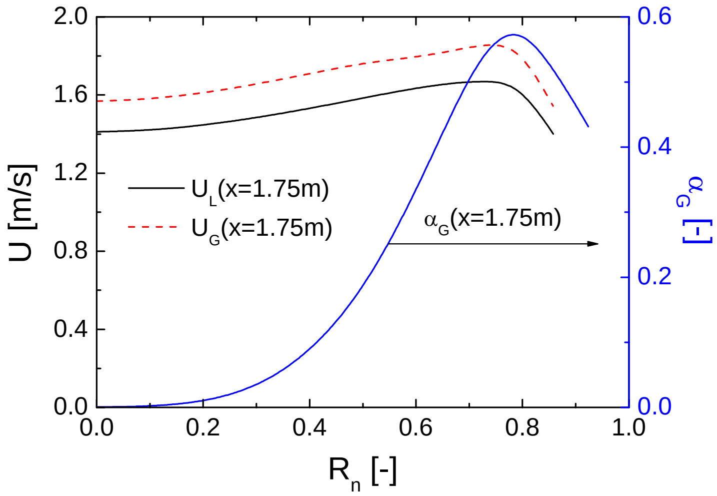

Fig. 10 Radial profiles of phase velocities and void fraction for
P=1.5 Mpa, Q_w=380000 W/m^2, T_{sub}=42.8 K

5. 결론

범용 CFD 코드를 이용하여 가열 수직원관의 과냉 비등유동에 대한 축대칭 2차원 전산해석을 수행하였다. 본 연구에 적용한 비등모델은 가열면에서의 기포발생과 2상유동 열전달 기구(mechanism)에 대한 상관식을 이용하는 것이다. 기포율 및 2상유동 속도와 온도에 대한 전산해석 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 유동단면 평균 기포율 및 온도의 주유동방향 분포에 대한 예측결과는 실험결과와 비교적 잘 일치하였다.
2) 원관 반경방향의 2상유동 속도와 기포율의 예측결과는 물리적으로 타당한 것으로 판단된다.
3) 기포에 의해 야기되는 난류효과를 포함하는 것이 보다 정확한 전산해석을 위해 필요하다.
4) 가열면 이탈 기포직경과 기포 발생빈도 및 평균 기포직경의 영향에 대한 평가가 필수적이다.
5) 비등유동 전산해석의 타당성 확보와 응용성 확대를 위해 다양한 범위의 비등조건에 대한 검증계산이 필요하다.

후기

본 연구는 한국원자력연구소 자체연구개발사업의 일환으로 이루어졌으며 이에 대하여 관계자 여러분께 감사드립니다.

기호설명

P	계통압력(Mpa)
Q_w	가열면 열유속(W/m^2)
R_n	무차원 반경방향 거리
T_{sub}	원관입구 과냉도(K)
x	주유동방향 좌표(m)
$\alpha_{G,avg}$	유동단면 평균 기포율

6. 참고문헌

(1) M. Kurul, Multidimensional effects in two-phase flow including phase change, Ph.D. Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, (1990).
(2) H. Anglart, “Modelling of vapor generation rate at wall in subcooled boiling two-phase flow,” First CFDS International User Conference, Oxford, UK, pp. 183-207, (1993).
(3) AEA Technology, CFX-4.2: Solver, 1997, Oxfordshire, UK.
(4) G.G. Bartolomei and V.M. Chanturia, “Experimental study of true void fraction when

boiling subcooled water in venturi tubes," Thermal Engineering, 114, pp. 123-128, (1967).

(5) H. Anglart and O. Nylund, "CFDS application to prediction of void distribution in two-phase bubbly flows in rod bundles," Nucl. Sci. Eng., 163, pp. 81-99, (1996).

(6) O. Zeitoun and M. Shoukri, "Axial void fraction profile in low pressure subcooled flow boiling," Int. J. Heat Mass Transfer, 40(4), pp. 869-879, (1997).

(7) J.Y. Tu and G.H. Yeoh, "On numerical modeling of low-pressure subcooled boiling flows," Int. J. of Heat and Mass Transfer, 45, pp. 1197-1209, (2002).

(8) E. Krepper, "CFD modeling of subcooled boiling," The 10th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics(NURETH-10), Seoul, Korea, October 5-9, (2003).

(9) AEA Technology, CFX-4.4: Solver, 2001, Oxfordshire, UK.

(10) W.E. Ranz and W.R. Marshall, Chem. Eng. Prog., 48, pp. 141-148, (1952).

(11) Y. Sato, M. Sadatomi and K. Sekoguchi, "Momentum and heat transfer in two-phase bubbly flow – I," Int. J. Multiphase Flow, 7, pp. 167-177, (1981).