2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

CFD를 이용한 B&C Loop 열혼합 특성실험 분석

Analysis for Thermal Mixing Experiment in B&C Loop using CFD

강형석, 김연식, 박춘경, 조석, 송철화

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동150

요 약

한국원자력연구소에서 수행된 B&C Loop 열혼합 특성실험에 대하여 전산유체역학(CFD) 코드인 CFX4.4 를 사용하여 모의계산을 수행하여 증기가 응축된 후 수조 내 열혼합 현상에 대하여 수치적인 모델을 개발하고 계산방법에 대하여 검증하고자 하였다. 실험에서 증기가 증기분사기(sparger)를 통하여 수조로 방출되어 과냉각수에 의하여 응축될 때의 현상을 쵸킹(chocking) 유동과 증기응축영역 모델을 적용하여 수조 내의 열혼합 현상을 모사하였다. 천이과정으로 약 20 초간 계산된 CFX4.4 의 결과를 B&C Loop 실험결과와 비교해보면 전체적으로 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 증기응축영역 모델을 이용한 CFD 계산방법은 수조 내에서 증기응축 후의 열혼합 현상을 비교적 잘 모의하는 것으로 나타났고, 이를 이용한 열혼합 현상에 대한 수치모델 개발은 가능한 것으로 판단되었다. 그러나 보다 정밀한 수치모델 개발을 위해서는 보완 계산이 필요한 것으로 나타났다.

Abstract

The benchmark calculation for a thermal mixing experiment in the B&C Loop facility was performed to develop a thermal mixing model in quenching tank using CFX4.4. A steam discharge through the sparger and the condensation phenomenon were modeled with the chocking flow and the steam condensation model to generate the boundary condition of CFX4.4 for the thermal mixing behavior. The transient calculation results in about 20 seconds show a good agreement of the temperature distribution with that of experiment. Therefore, the CFD code with the steam condensation region model can simulate the thermal mixing behavior when the steam is condensed in quenching tank. The numerical model for the thermal mixing taking place for a long time can be developed by this method.

1. 연구배경 및 목적

한국원자력연구소에서는 APR1400 설계개념에 대한 검증실험의 하나로 B&C Loop 에서 증기가 증기분사기(sparger)를 통해 방출 될 때에 응축수조 내에서 열혼합과 압력하중에 대해서 실험을 수행하였다[1]. 이 실험은 APR1400 에서 사고로 고온 고압의 일차계통 냉각재가 이상유동의 형태로 안전감압배기계통을 통하여 IRWST 로 방출될 때 IRWST 에서 발생할 수 있는 불안정 증기응축과 응축하중 및 열혼합 거동[2]을 연구하기 위해서 수행되었다. B&C loop 실험은 기존의 실험장치를 개조하여 실험을 수행한 관계로 증기를 생산하는 가압기의 용량이 작아서 수조 내에서 열혼합 현상을 관찰 할 수 있는 시간이 약 60 초 이내이다. 그러나 APR1400 의 IRWST 에서는 열혼합 현상에 대해 관심을 가지고 관찰해야 시간은 약 30 분 이상으로 판단된다[3]. 따라서 B&C Loop 실험결과를 바탕으로 수조 내의 열혼합 거동의 특성을 분석하고 수치적인 모델을 개발하여 APR1400 에 적용하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 이를 위해서는 먼저 전산유체역학(CFD)을 이용하여 B&C Loop 열혼합 실험에 대해 검증하는 계산을 수행하는 것이 필요하다. 그런데 본 연구에 사용한 CFX4.4 는 증기응축현상을 모사하는 모델이 현재까지는 없으므로 증기응축영역 모델[4,5]을 인용해서 응축수의 속도와 온도를 계산한 다음, 이것을 CFX 계산의 경계조건으로 사용해서 B&C Loop 수조 내의 열혼합 계산을 약 20 초 동안 수행하였다.

2. B&C Loop 열혼합 특성 실험[1]

2.1 실험장치

B&C Loop 실험장치의 전체적인 개략도와 온도와 압력 등의 계측위치는 그림 1 에 나타나 있다[1]. 증기를 생산하는 가압기는 내부 지름이 0.6m, 높이가 3m 인 원통형 형태의 고압 탱크이며, 내부에는 100kW 의 가열기를 가지고 있고 2 inch 방출노즐을 통해 최대 16MPa 의 증기를 방출 할 수 있다. 가압기에 연결된 배관 하단부에는 증기분사기가 설치되어 있는데, APR1400 원형과 동일한 규격으로 설계제작 되었고 다만 수평방출구멍 개수만 144 개에서 64 개로 축소되었다. 수평방출구멍의 직경은 0.01m 이고 증기분사기 밑바닥에는 직경 0.025m 인 분사구멍이 한 개 있고, 증기분사기 밑바닥으로부터 1.95m 상부에 약 0.00256m^2 의 유로면적을 가진 LRR(Load Reduction Ring)이 설치되어 있다. 실험은 가압기의 압력과 수조수의 온도 등의 초기조건이 만족되면 격리밸브인 HV-202 를 개방하여 시작한다. 또한 실험은 수조의 온도(20~90^{o}C), 가압기의 압력(60~150bar) 및 LRR 유무 등에 따라 조건을 달리하여 수행하였다.

2.2 CFD 해석대상 실험결과 분석

여러 조건에서 수행된 실험 중에서 CFD 해석을 적용하는 실험은 LRR 을 고려하지 않고, 초기 가압기 압력이 100 bar 이고 수조의 초기 온도가 20 ^{o}C 인 것으로 선택하였다. 그 이유는 LRR 을 고려하지 않으면 격자모델링이 비교적 쉽고 2 차원 축대칭 격자모델

적용이 가능하며, 수조내의 유동형상도 LRR 을 고려한 것보다 비교적 간단하여 실험결과와 CFX 해석결과를 비교하기가 용이하기 때문이다. 실험결과는 그림 2 에 나타나 있다. 이것은 수조 내의 24 개 열전대(그림 1)에서 측정한 것으로 정성적인 분석을 하면 다음과 같다. 방출되는 증기의 온도는 약 120~170 °C 이지만 수조 내에서 측정되는 온도는 대부분 약 25°C 이내이고 증기분사기로부터 가장 가까운 TC636 의 온도도 28~29°C 이내이다. 이것은 증기가 수조 내로 방출되자 말자 수조수와 직접접촉응축 현상에 의하여 응축되고 방출되는 증기로 끌려 들어오는 유입수조수의 양이 상당히 많아서 응축수의 온도가 상당히 낮기 때문인 것으로 판단된다. 방출된 증기는 즉시 응축되어 TC635 와 TC636 사이를 지나서 수조 벽에 충돌한 다음, 벽면을 따라서 위, 아래 방향으로 흘러가다가 일부는 증기분사기 쪽으로 다시 흘러가고 나머지 일부는 벽면을 따라 더 진행하여 흘러가는 것으로 추정된다. 이것은 증기분사기 위쪽에 위치한 TC649, TC650 의 온도가 TC641, TC642 의 온도 보다 더 빠르고, 더 많이 상승한 것에서 추정할 수 있다. 그러나 증기분사기 아래 쪽인 TC653, TC654 와 TC645, TC646 를 비교해 보면 그러한 현상을 명확하게 발견할 수 없는데, 이것은 증기분사기 밑바닥의 방출구멍을 통과한 증기의 영향 때문인 것으로 판단된다. TC638, TC646 및 TC654 의 온도를 비교해 보면 TC638 의 온도가 실험 개시 후 즉시 상승하고 다른 TC 보다 계속 약 2~3 °C 정도 높게 나타난다. 이것으로부터 수조 밑바닥 부근의 유동은 증기분사기 밑바닥 방출구멍을 통과한 증기의 영향을 많이 받음을 알 수 있다.

3. CFD 해석

3.1 임계유동 및 증기응축모델

B&C Loop 실험에서 가압기의 초기 압력이 100 bar 에서 포화증기를 대기압 상태의 20 °C 온도인 수조로 방출한다. 그림 3 에 의하면 가압기의 압력은 100 bar 로부터 시간이 지남에 따라 점차 감소하여 20 초에서는 약 50bar, 50 초에서는 약 20 bar 정도로 많이 감소하지만, 증기분사기 방출구멍 바로 위에 위치한 PT207 의 압력은 실험개시 후 초기에만 격리밸브의 개방으로 인해 급격하게 증가하여 약 20 bar 로 상승했다가 공기방출(air clearing) 후에는 약 8 bar 정도로 감소하고 그 이후로는 조금씩 감소하여 20 초에서는 4~5bar, 50 초에서는 2~3 bar 정도를 나타낸다. 이때 수조의 압력은 대기압 상태이기 때문에 증기분사기 방출구멍에서 쵸킹(chocking)이 발생할 수 있고, 응축수조 내로 방출된 증기는 과냉각 수조수 내에서 제트유동으로 흘러가다가 곧 응축된다[2,4,5]. 실험시작 후 1~2 초 동안은 물 및 공기방출 과정이기 때문에 증기의 쵸킹유량 평가는 2 초부터 식 (1)에 의하여 계산하였고 그림 4 에 나타내었다. 식 (1)에서 P_o 은 PT207 의 압력으로 하였고 T_o 는 PT207 압력에 해당하는 포화온도로 하였으며 C_f 는 방출계수[6]이다. 여기서 PT207 과 동일한 지점에서의 TC217 의 온도는 PT207 압력에 해당하는 포화온도보다 약 3 °C 정도 낮은데, 이것은 계측오차로 판단되기 때문에 포화온도를 사용하였다.

$$\dot{m} = C_f A_t P_o \sqrt{\frac{k}{RT_o}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \qquad k = \frac{C_p}{C_v} \tag{1}$$

그림 4 에 의하면 B&C Loop 실험장치의 유량계(그림 1, FE201)에서 측정된 유량이 계산된 쵸킹유량 보다 큰 것으로 나타났다. 식(1)은 이상기체가 등엔트로피 노즐을 통과할 때를 가정하고 도출한 식이고[7,8], 그림 4 와 같이 방출계수에 따라 계산되는 유량이 변할 수 있기 때문에 유량계에 측정된 유량이 수조 내로 흘러가고 증기분사기 방출구멍에서는 쵸킹이 발생한다고 가정하였다.

CFX4.4 코드는 증기가 과냉각 수조수 내로 흘러갈 때 발생하는 응축현상을 모사하는 모델이 현재까지는 없다. 따라서 본 연구는 증기응축영역 모델[2,3,4,5]을 도입하여, 증기가 방출된 후 식(2)에 의해 계산된 증기분사거리(steam penetration length) 내에서 완전히 응축되고 증기의 운동량과 에너지는 모두 보존되어 응축수에 전달된다고 가정하였다. 그리고 증기응축영역 출구에서 응축수의 속도와 온도를 계산하여 CFX 코드의 경계조건으로 주어서 B&C Loop 수조 내의 열혼합 현상을 계산하였다. 증기는 증기분사기 표면에 있는 직경 1cm 의 방출구멍 64 개와 밑바닥에 있는 직경 2.5cm 의 방출구멍 한 개를 통하여 제트유동 형태로 방출된다[1]. 여기서 증기분사기 표면과 밑바닥의 방출구멍을 통과한 증기는 수조 내를 각각 반경방향으로 약 5.3cm, 축방향으로 약 13cm 를 진행한 다음 응축되는 것으로 평가되었다. 증기는 제트유동으로 방출되기 때문에 응축되는 지점에서 폭은 식 (3)에 의하여 각각 1.2cm 와 3cm 계산되었다[9]. 이러한 증기분사거리와 제트 유동의 폭을 바탕으로 증기응축영역을 그림 5 와 같이 설정할 수 있다. 여기서 증기분사기 표면을 통과한 증기의 응축영역은 증기분사기 표면의 방출구멍으로부터 반경방향으로 5.3cm 떨어진 곳에서 축방향으로는 17cm 인 영역으로 정의하여 응축수와 증기의 방출 유동으로 인해 증기응축영역 내로 흘러온 유입수조수 및 증기응축영역 내에 있던 수조수가 균일하게 증기응축영역을 통과한다고 가정하였다.

$$\frac{x_c}{r_o} = \frac{\left[20.57(\frac{G_o}{G_s})^{0.713}\right]}{\left[(\frac{r_\infty}{r_s})^{0.384} B^{0.801}\right]} \qquad B = \frac{(h_f - h_\infty)}{(h_s - h_f)} \tag{2}$$

$$\frac{width}{x} = \tan 13^o \tag{3}$$

증기응축영역에서 방출되는 증기($\dot{m}_e$)와 유입수조수($\dot{m}_{entrain}$) 및 응축수($\dot{m}_{cond}$)에 대하여 질량, 운동량 및 에너지 보존 방정식을 적용하면 식 (4), (5), (6) 와 같다.

$$\dot{m}_e + \dot{m}_{entrain} = \dot{m}_{cond} \tag{4}$$

$$P_e A_e + P_\infty (pDH - A_e) + r_e V_e^2 A_e = P_{cond} A_{cond} + r_{cond} V_{cond}^2 A_{cond} \tag{5}$$

$$\dot{m}_e h_e + \dot{m}_{entrain} h_{entrain} = \dot{m}_{cond} h_{cond} \tag{6}$$

운동량보존 방정식에서 증기응축영역의 위, 아래 면을 통해 흘러 들어오는 유입수조수의 운동량은 각각 면에 수직한 방향으로 들어온다고 가정하여 그 운동량을 상쇄시켰다. 증기분사기 방출구멍을 통과하는 증기의 압력(P_e), 밀도(ρ_e), 엔탈피(h_e) 등은 방출구멍에서 쵸킹이 발생한다고 가정하고 이상기체가 등엔트로피 노즐에서 쵸킹이 발생할 때 사용되는 관계인 식(7), (8), (9)를 이용하여 구하였다[8]. 여기서 정압(P_o)과 정온도(T_o) 등의 데이터는 PT207 의 압력과 이에 해당하는 포화온도를 기준으로 구하였다. 응축수의 속도는 식 (5)에서 응축수의 밀도를 증기분사기 잠김 깊이에 해당하는 수두에서 온도를 적절히 가정하여 구한 다음, 식 (4), (6)에 대입하여 반복적으로 풀어서 응축수의 속도와 엔탈피를 구하였다. 실험개시 후 2 초에서 식(4), (5), (6)에 사용되는 물성치 값 등은 표 1 에 나타나 있다.

$$\frac{T^*}{T_o} = \frac{2}{k+1} \tag{7}$$

$$\frac{P^*}{P_o} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)} \tag{8}$$

$$\frac{r^*}{r_o} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{1/(k-1)} \tag{9}$$

실험개시 후 2 초에서 증기분사기 옆면 쪽의 증기응축영역을 통과하는 응축수의 속도와 온도는 식(4), (5), (6)을 풀어서 5.2m/s, 25 °C 의 값을 얻었고, 유입수조수의 속도와 온도는 9.6m/s, 20 °C 의 값을 얻었다. 여기서 유입수조수의 온도는 B&C Loop 응축수조의 초기 온도를 사용했는데, 시간이 경과 함에 따라 유입되는 수조수가 위치하는 곳의 온도가 열혼합으로 인해서 상승할 수 있다. 따라서 이 영향은 천이과정으로 계산하는 CFX 결과를 분석하여 고려해 주었다. 이와 같은 방법으로 20 초까지의 응축수와 유입수조수의 속도와 온도는 평가하였다.

3.2 해석대상 격자모델 및 경계조건

B&C Loop 의 증기분사기와 응축수조를 모사하는 해석대상 격자는 CFX-Build 를 사용해서 그림 와 같이 증기분사기를 기준으로 2 차원 축대칭과 원통형(cylindrical) 좌표계로 형성하였다. 본 연구가 비교하고자 하는 실험은 LRR 을 고려하지 않았고,

증기분사기 표면의 64 개의 방출구멍과 밑바닥의 한 개의 방출구멍을 통하여 응축수조로 방출되는 증기의 유동 형상이 축방향으로는 변화가 없을 것으로 판단되어 축대칭 유동으로 가정하였다. 또한 3 차원 격자를 이용한 예비해석에서 수십만 개의 격자 셀이 생성되어, 천이 계산을 수행해야만 하는 본 계산에서는 과도한 계산시간이 소요되었기 때문에 2 차원 축대칭으로 계산을 수행하였다. 해석대상 격자는 온도측정을 위한 열전대의 위치(그림 1)를 고려하여 그림 6 과 같이 다중 블록으로 나누어 형성해서 CFX 결과 파일에서 열전대 위치에 해당하는 지점의 온도를 읽기가 용이하도록 하였다. 본 격자모델에서는 총 3,608 개(41×88)의 격자 셀이 생성되었고, 격자를 증기분사기 방출구멍에 집중적으로 분포 시켰고 초기상태에서 공기와 수조수의 경계부근에 격자를 많이 분포시켰다. 여기서 증기분사기 내부와 증기응축영역 내부는 격자 셀을 생성하지 않고 고체로 처리하였다.

입구경계조건은 Dirichlet 조건을 사용하여 증기분사기 옆면과 밑부분에 있는 증기응축영역 출구에 지정하여 응축수의 온도 및 압력과 k_i 및 ε_i 를 지정해주었다. 여기서 난류강도(turbulent intensity)는 증기가 64 개의 방출구멍을 통과할 때 그 강도가 상당히 증가할 것으로 예상되어 10%로 하였다[10]. 압력출구조건은 Neumann 조건을 사용하여 응축수조의 최상부에 참조압력을 지정하고 공기만 유출되도록 하였다. 증기응축영역으로 흘러가는 유입수조수는 입구경계조건을 적용하되, 속도는 부(-)의 값을 지정하고 온도는 계산초기에는 수조수의 초기온도를 지정하고, 시간이 경과한 후는 CFX 해석결과를 분석하여 증기응축영역 부근의 온도를 다시 지정해 주었다. 본 계산에 사용된 경계조건은 표 2 나타나 있다.

3.3 유동장 모델과 지배방정식

본 CFD 해석을 위해서 B&C Loop 수조 내의 열혼합 현상을 비압축성 유동, 공기와 물의 자유표면이 존재하는 다상유동, 난류 유동 및 부력효과가 존재하는 유동장으로 모델링 하였다. 이와 같은 유동장을 풀기 위해서 CFX4.4 의 Navier-Stokes 방정식과 에너지 방정식을 사용하였으며 표준 k-ε 난류 모델을 적용하였다[10]. 고온과 저온 유체로 인한 부력효과를 모사하기 위해서 Boussinesq 가정을 사용하였고 공기와 수조수의 경계층 거동의 모사를 위해서는 multi-fluid homogeneous 모델을 사용하였다[10]. 이 모델에서는 공기와 수조수 사이의 열전달 및 운동량 전달은 고려하지 않고 공기와 수조수의 체적비율만 체적방정식을 이용하여 계산한다[10]. 계산은 천이과정으로 약 20 초 동안 수행하였는데, 시간간격은 0.001 0.01 초로 하여 각 시간간격마다 60 70 번 정도 반복계산을 수행해서 질량, 엔탈피 및 속도의 계산오차가 1.0E-03 이하로 되게 하였다. 대류항의 차분 방법은 hybrid 로 하였고 수렴을 향상시키기 위해서 하향이완인자(under relaxation factor)는 0.25~0.35 로 하였고 차분방정식을 AMG(Algebraic Multi-grid) 방법으로 풀었다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_a r_\partial) + \nabla \bullet (r_a r_\partial V_a) = 0 \qquad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_a\, r_\partial V) + \nabla \bullet \left(r_a \left(r_\partial V_a \otimes V_a - m_a \left(\nabla V_a + (\nabla V_a)^T\right)\right)\right) = r_a (\mathrm{B} - \nabla P_a) \qquad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_a\, r_\partial H_a) + \nabla \bullet (r_a (r_\partial V_a H_a - l_a \nabla T_a)) = 0 \qquad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(rk) + \nabla \bullet (rVk) - \nabla \bullet \left[\left(m + \frac{m_T}{s_k}\right)\nabla k\right] = P + G_{buoy} - re \qquad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(re) + \nabla \bullet (rVe) - \nabla \bullet \left[\left(m + \frac{m_T}{s_e}\right)\nabla e\right] = C_1 \frac{e}{k} P - C_2 r \frac{e}{k} \qquad (14)$$

$$r = \sum_{a=1}^{N_p} r_a\, r_a \qquad V = \frac{1}{r}\sum_{a=1}^{N_p} r_a\, r_a V_a \qquad (15)$$

$$m_T = \sum_{a=1}^{N_p} r_a m_{Ta} \qquad m_{a,eff} = m_a + m_{Ta} \qquad (16)$$

$$m_T = C_m\, r \frac{k^2}{e} \qquad (17)$$

$$G_{buoy} = -\frac{m_T}{s_T} bg \bullet \nabla T \qquad (18)$$

$$r = r_o [1 - b(T - T_o)] \qquad (19)$$

3.4 해석결과 및 토의

B&C Loop 열혼합 특성실험에 대하여 CFX4.4 코드를 사용해서 계산한 결과는 그림 7 과 8 에 나타나 있다. 그림 7 의 (a)는 1 초에서 수조 내의 전체적인 속도분포와 증기분사기 방출구멍 부근을 확대하여 증기응축영역 주변에서 응축수와 유입수조수 및 수조수의 속도분포를 나타낸 것이다. 증기분사기 옆부분과 밑바닥 쪽의 증기응축영역으로부터 방출되는 응축수의 속도는 각각 약 5.6㎧ 와 23.5㎧ 로 상당히 빠르기 때문에 방출 즉시 수조 벽면에 부딪힌 다음, 벽면을 따라 이동하면서 수조수와 열혼합하는 유동형상을 나타낸다. 그리고 방출되는 응축수 주변에 있는 수조수는 응축수 쪽으로 끌려가서 같이 수조 벽에 충돌하는 것을 볼수 있고, 증기응축영역 쪽으로 유입되는 수조수의 영향으로 인해서 그 주변의 수조수도 증기응축영역 쪽으로 끌려오는 것을 볼수 있다. 그림 7 의 (b)는 시간에 따른 수조 내의 온도분포를 나타낸 것으로 앞에서 언급한 응축수와 수조수의 유동형상에 따라서 온도분포가 변하는 것을 알수 있다. 온도분포 그림에 의하면 증기분사기 옆부분의 증기응축영역 쪽을 통과하는 응축수가 수조 내의 온도분포를 지배하는 것으로 나타났는데, 이것은 이곳을 통과하는 응축수의 유량이 증기분사기 밑바닥 쪽보다 방출 유량이 약 9 배 정도 많기 때문인 것으로 판단된다. 증기분사기 옆쪽에서 방출된 응축수는 벽면에 충돌한 다음(A), 벽면을 따라 위로 흘러가는 응축수는 공기와 물의 경계면 까지 상승하다가 그 방향으로 변경하여 다시 내려오고, 아래로 흘러가는 응축수는 수조 밑바닥 면에 충돌한 다음, 그 방향을

바꾸어 증기분사기 쪽으로 다시 흘러가다가 증기분사기 밑바닥의 증기응축영역 쪽에서 방출되는 응축수와 만나게 된다. 이와 같은 유동 및 온도분포 현상으로 인해 증기분사기 아래쪽에 위치한 수조수의 온도가 위쪽에 위치한 수조수 보다 약 2~3°C 가 높게 분포한다. 증기응축영역 위쪽에 위치한 수조수도 수조벽면 쪽은 온도가 비교적 빠른 속도로 상승하는데 비해서 증기분사기 주변은 초기설정 온도에서 약 1~2°C 정도만 천천히 상승하는 것을 볼수 있다. 이와 같은 온도분포 형상은 실험결과를 분석하여 2.2 절에서 언급한 것과 거의 유사하다.

B&C Loop 실험장치의 24 개의 열전대 위치에서 CFX 해석결과와 실험결과를 약 1 초 간격으로 2 초부터 20 초까지 비교하여 그림 8 에 나타내었다. 전체적으로는 실험결과와 해석결과가 유사하지만 5~6 개 정도의 열전대 위치에서 약간 상이한 온도분포 경향을 나타내었다. 24 개의 열전대 위치에서 증기분사기 방출구멍과 가장 가까운 TC636, TC644 위치에서 실험과 해석결과가 약간 다르다. 이것은 실험 개시 후 1~2 초간에 일어나는 물과 공기 방출과정으로 인해서 수조수의 온도가 상승한 것 같은데, 해석에서는 수조수의 초기온도 조건을 이러한 영향을 무시하고 20°C 로 만 설정하였기 때문인 것으로 판단되기도 하고 증기가 64 개의 방출구멍을 통과할 때의 발생하는 난류강도를 적절하게 고려하지 못했기 때문인 것으로 판단된다. TC638 위치에서도 실험과 해석결과가 약 2~3°C 의 차이가 나는데, 이것도 초기조건 설정을 적절하게 하지 못한 것으로 판단된다. 수조벽면 쪽에서 가장 높은 곳에 위치한 TC647 에서는 해석결과가 실험결과 보다 약 1~2°C 높게 나타났는데, 이것은 CFX 가 벽면을 따라 흐르는 유동현상을 실제보다 과도하게 계산했기 때문 인 것으로 판단된다. 이러한 현상은 벽면 쪽에서 축방향으로 격자분포를 조밀하게 할 필요가 있음을 보여준다. TC642 와 TC643 에서는 해석이 실험결과 보다 약 2~3°C 낮은데, 이것은 응축수가 수조 벽면에 충돌한 다음 방향을 바꾸어 증기분사기 쪽으로 되돌아 올 때의 현상을 정확하게 모사하지 못해서 발생한 것으로 판단된다.

4. 결론 및 향후 보완 사항

B&C Loop 열혼합 특성실험에 대하여 CFX4.4 를 사용하여 검증계산을 수행하여 증기가 과냉각수 수조로 방출될 때의 수조 내의 열혼합 현상에 대하여 수치적인 모델을 개발하고자 하였다. 증기가 증기분사기를 통하여 수조로 방출되어 과냉각수에 의하여 응축될 때의 현상을 CFX 계산에서는 증기응축영역 모델을 사용하여 천이과정으로 약 20 초간 모사하였다. CFX4.4 의 해석결과와 실험결과를 비교해보면 전체적으로 잘 일치하지만 수조 내의 국부지역에서 온도차이가 어느 정도 발생하는 것으로 나타났다. 이것은 실험개시 직후의 물 및 공기의 방출 현상을 CFX 계산에서 적절한 초기조건으로 잘 설정하고 수조 내에서 속도 구배가 큰 곳에서의 격자분포를 적절하게 재조정하면 해결될 것으로 판단된다. 따라서 증기응축영역 모델을 이용한 수조 내의 열혼합 현상 모의는 타당하고 장기간의 걸친 열혼합 모델 개발은 가능한 것으로 판단된다. 그러나

보다 정밀한 검증과 타당한 열혼합 모델 개발을 위해서는 B&C Loop 열혼합 실험에 대한 검증 계산시간을 더 늘리고 격자민감도 계산을 수행해야 할 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 연구개발사업의 일환으로 이루어졌으며, 이에 대하여 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1) 조석 외, “증기분출시 수조내 열혼합 및 압력하중 특성 연구”, 2002 춘계학술대회 논문집, 한국원자력학회, 2002

2) U.S NRC, 1981, "Suppression Pool Temperature Limits for BWR Containments", NUREG-0783

3) H. S. Kang, Y. Y. Bae, J. K. Park, “Numerical Study on the Local Temperature in IRWST Pool”, Proceedings of the ICONE10, April, 2002

4) D. H. Cook, 1994, "Pressure Suppression Pool Thermal Mixing", NUREG-3471, ORNL/TM-8906

5) Per F. Peterson, et al, “Pressure Suppression Pool Mixing in Passive Advanced BWR Plants”, Proceedings of NURETH-9, October, 1999

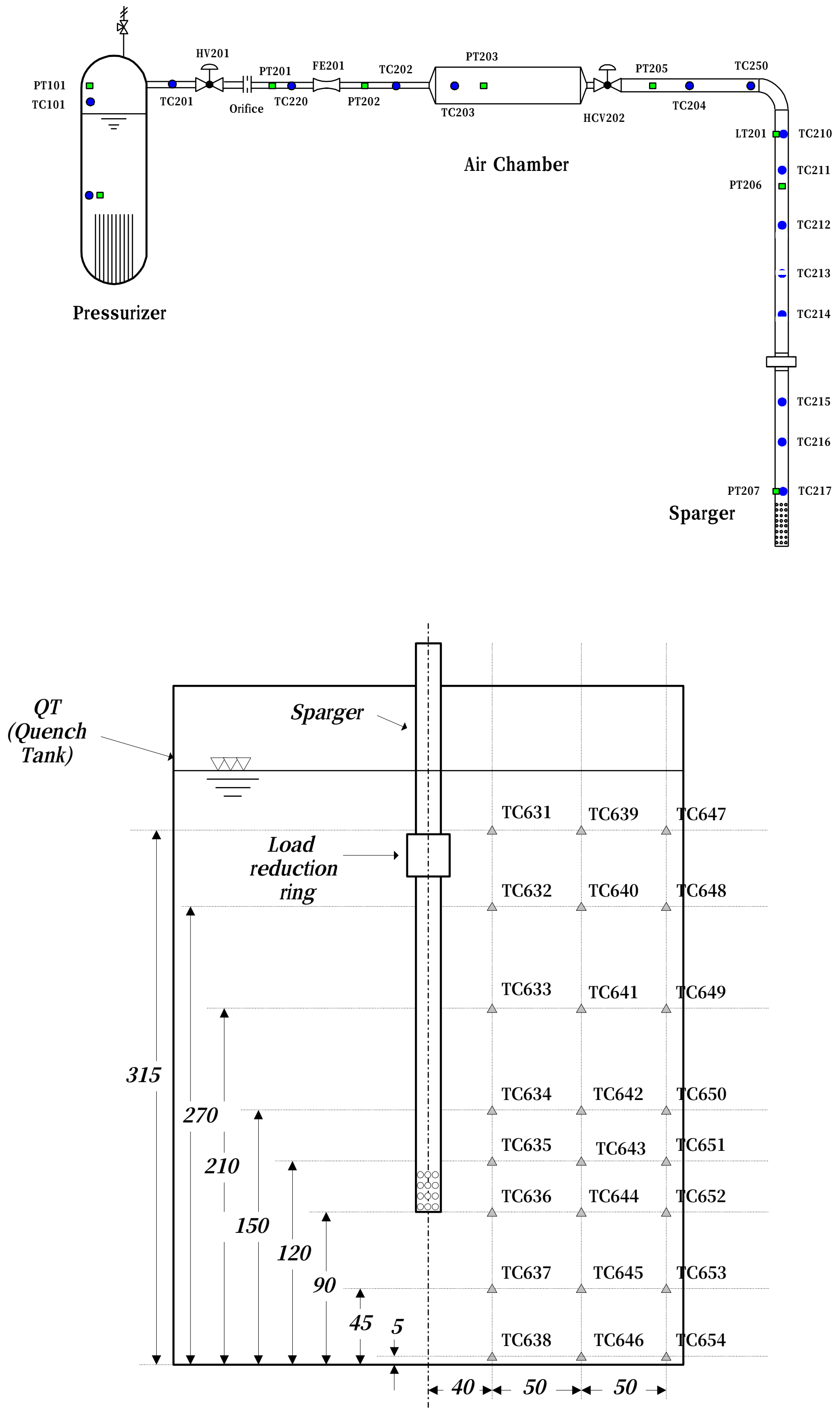
6) I. E. Idelchik, 1986, Handbook of Hydraulic Resistance, 2nd ed., Hemisphere Publishing Corporation

7) Y. Y. Bae etc, 2000, "Analysis on Flow Transients in a Pipe with Sparger and Load Reduction Ring", Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 27, No. 8, pp.1131-1142

8) Frank M. White, Fluid Mechanics, 2^{nd} ed., McGRAW-HILL International Editions, 1986

9) Frank M. White, Viscous Fluid Flow, 2^{nd} ed., McGRAW-HILL International Editions, 1991

10) AEA Technology, “CFX4.4 Manual”, 2001



unit : mm

Fig. 1 Schematic diagram of B&C Loop facility

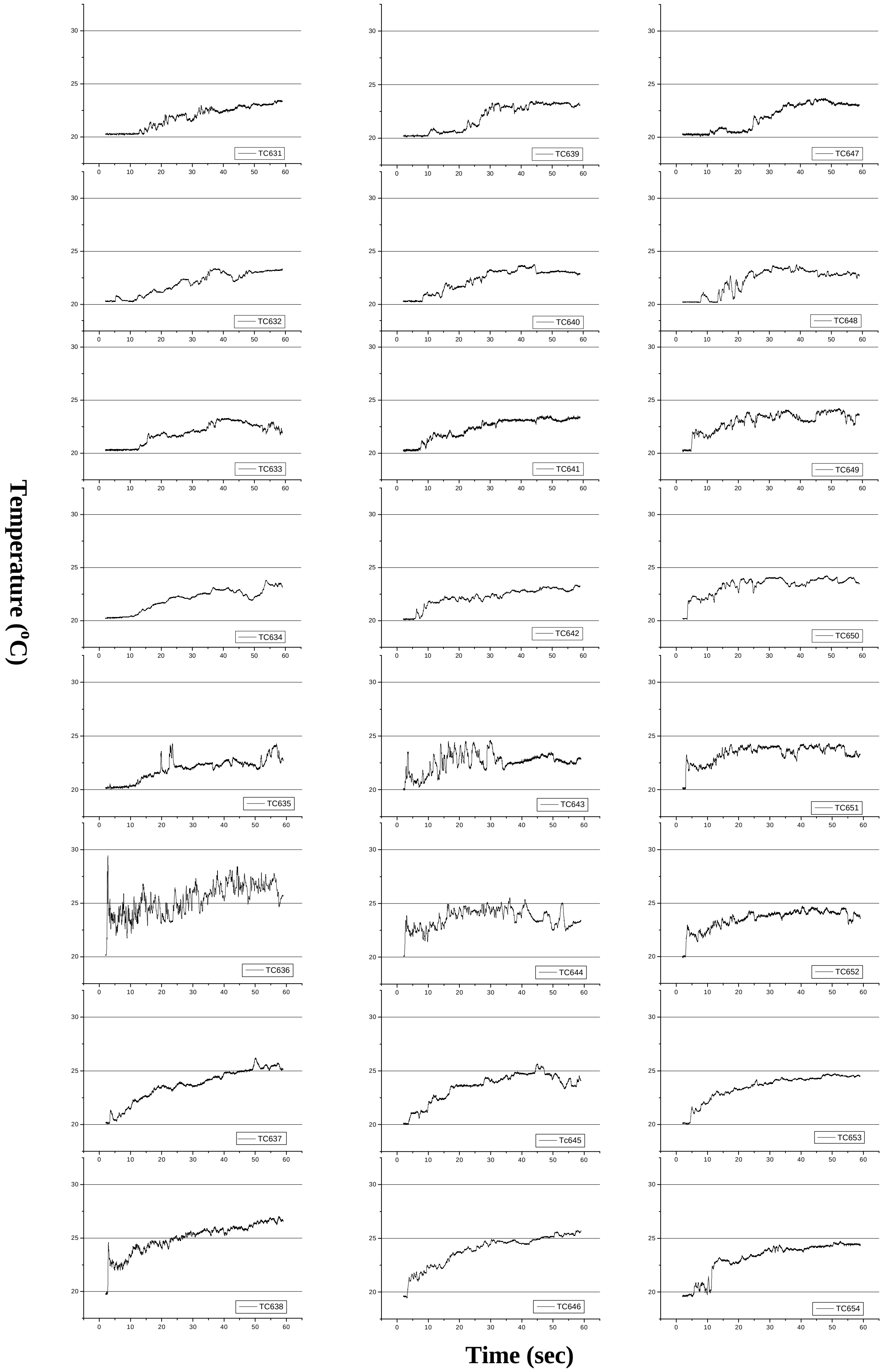


Fig. 2 Temp. distribution in the quench tank [1]

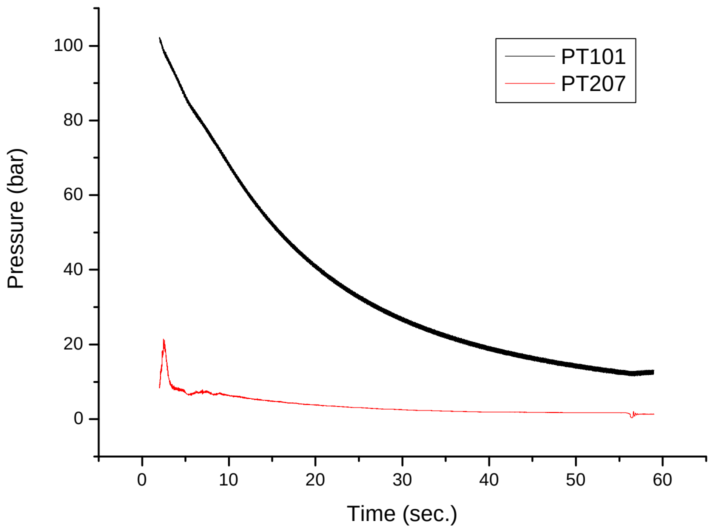


Fig. 3 Pressure behavior at PZR and sparger head

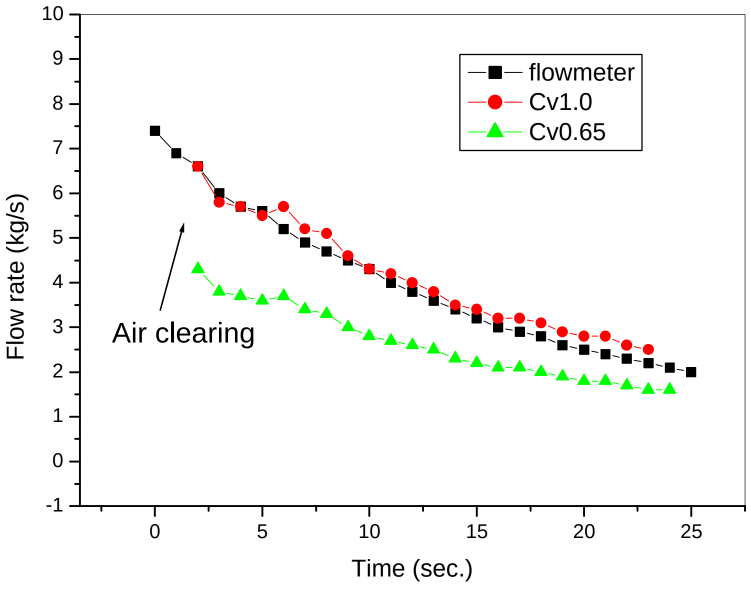


Fig. 4 Mass flow rate from sparger (flow meter vs calculation)

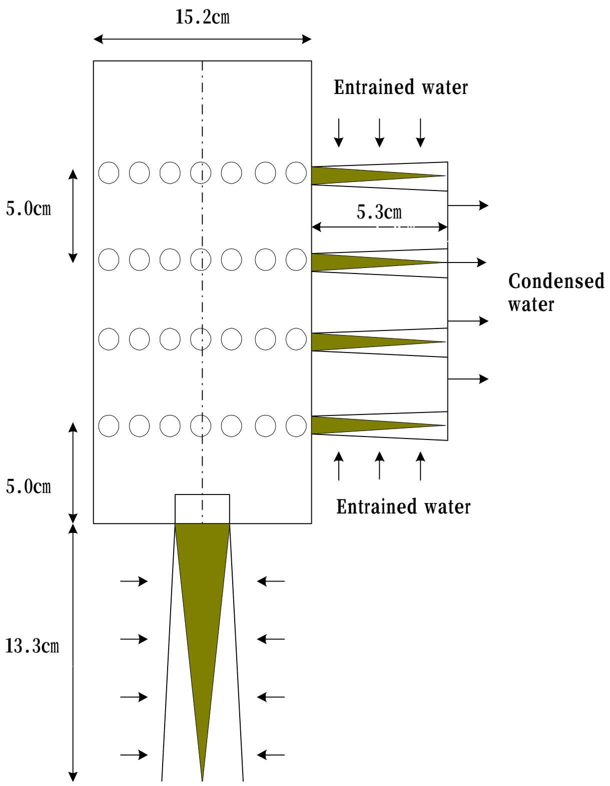


Fig. 5　Steam condensation region model around

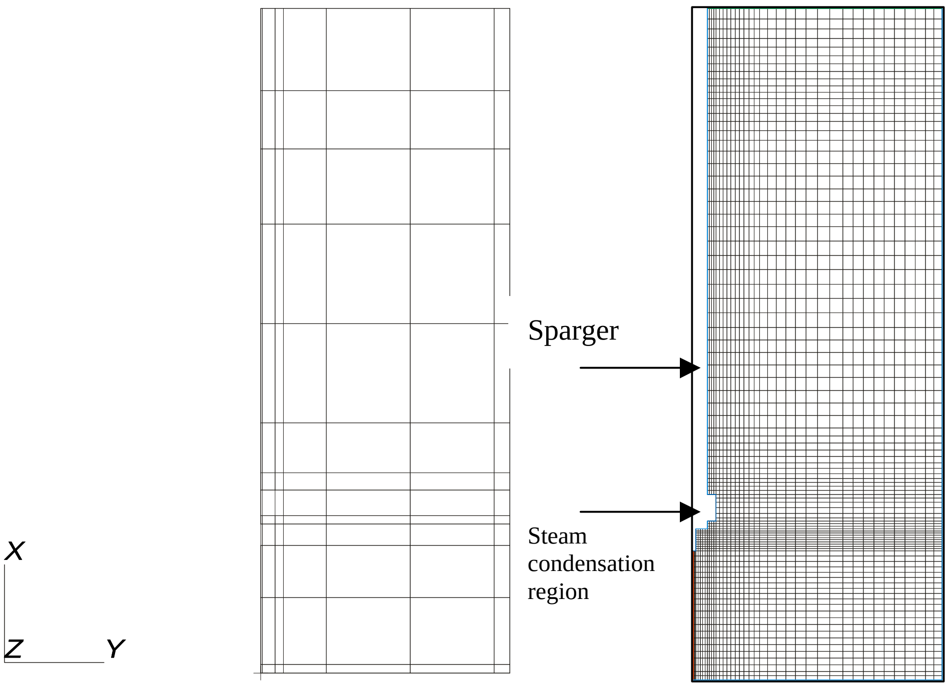


Fig. 6　Geometry and grid model

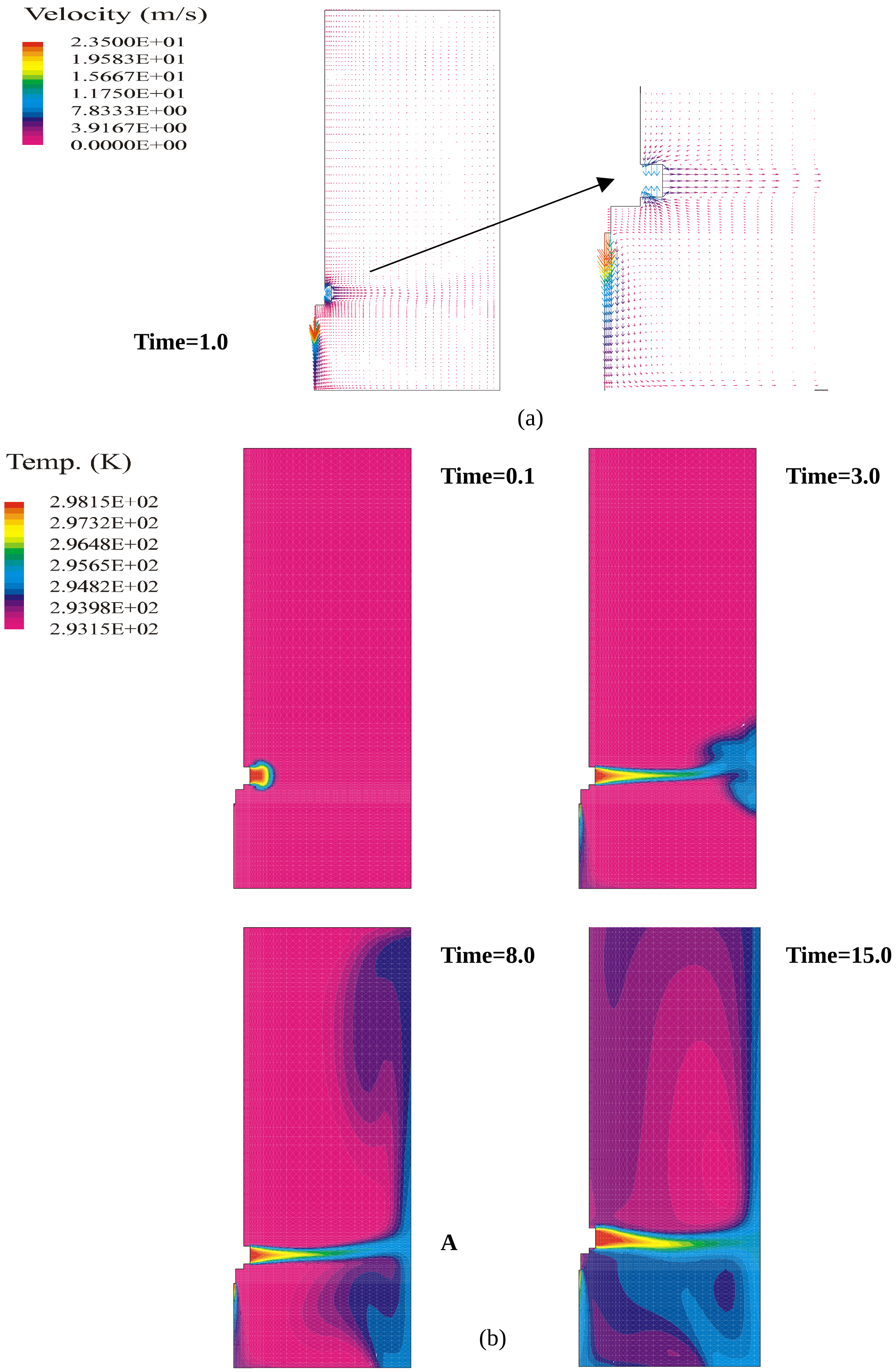


Fig. 7 Velocity profile and temp. distribution

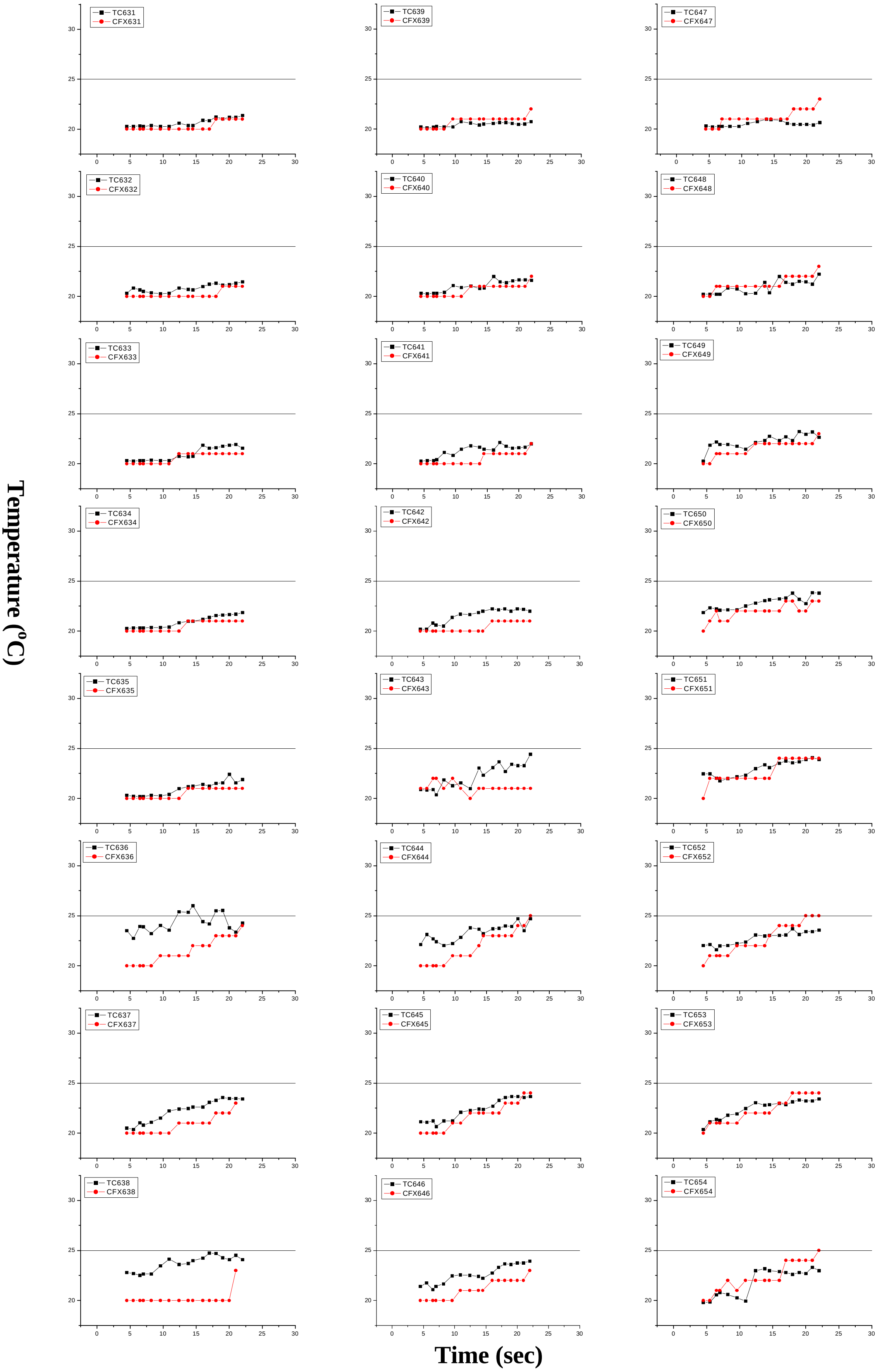


Fig. 8 Temp. distribution in quench tank (Experiment vs CFD)

Table 1 Input Parameters for Governing Eqs. (4) & (6) at time 2 sec.

Input Parameter	**Unit**	**Value**
Steam pressure at a hole, P_e	bar	4.3
Total area of 64 holes (Bottom), A_e	m^2	0.005(0.005)
Steam density at a hole, ρ_e	kg/m^3	2.58
Condensed water pressure, P_{cond}	bar	1.2
Flow area of condensed water (Bottom), A_{cond}	m^2	0.1387(0.0007)
Condensed water density, ρ_{cond}	kg/m^3	995.7
Flow area of entrained water (Bottom), $A_{entrain}$	m^2	0.12(2.9E-04)
Entrained water density, $\rho_{entrain}$	kg/m^3	998.3

Table 2 B. C. properties at 2 seconds after the start of experiment

<table>
<tr><th colspan="2">Item</th><th>Unit</th><th>Value</th></tr>
<tr><td rowspan="6">Sparger side part / (bottom part)</td><td>Condensed water velocity</td><td>m/s</td><td>5.6 / (23.5)</td></tr>
<tr><td>Condensed water temp.</td><td>°C</td><td>28 / (28)</td></tr>
<tr><td>Condensed water ki</td><td>m^2/s^2</td><td>0.47 / (9.30)</td></tr>
<tr><td>Condensed water εi</td><td>m^2/s^3</td><td>107.54/ (3781.58)</td></tr>
<tr><td>Entrained water velocity</td><td>m/s</td><td>10.4 / (24.9)</td></tr>
<tr><td>Entrained water temp.</td><td>°C</td><td>20 / (20)</td></tr>
<tr><td rowspan="6"></td><td>Water expansion coeff.</td><td>K^{-1}</td><td>2.504E-04</td></tr>
<tr><td>Water density</td><td>kg/m^3</td><td>998.3</td></tr>
<tr><td>Water viscosity</td><td>Pa sec</td><td>1.002E-03</td></tr>
<tr><td>IRWST air density</td><td>kg/m^3</td><td>1.190E+00</td></tr>
<tr><td>IRWST air viscosity</td><td>Pa sec</td><td>1.8160E-05</td></tr>
<tr><td>Pressure condition at IRWST upper region</td><td>Bar</td><td>1.0</td></tr>
</table>