2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

증기분사기 다중구멍 효과를 고려한 B&C Loop 수조 온도분포 해석

Numerical Analysis for Temperature Distribution in the B&C Loop Considering the Multi-holes Effect of the Sparger

강형석, 김연식, 박춘경, 조석, 송철화

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150 번지

요 약

한국원자력연구소에서 수행된 B&C Loop 열혼합 특성실험에 대하여 전산유체역학(CFD) 코드인 CFX4.4 를 사용하고, 증기분사기 다중구멍 효과를 고려해서 증기가 응축된 후의 수조 내 열혼합 현상을 해석하였다. 증기분사기(sparger) 표면에 있는 4 열, 64 개의 구멍을 4 열의 증기응축영역으로 모사한 다음, 증기가 증기응축영역에서 전부 응축된 후 수조 내로 제트유동 형태로 흘러가는 것으로 모사하였다. 천이과정으로 약 20 초간 계산된 CFX4.4 의 결과를 B&C Loop 실험결과와 기존에 수행한 단일 증기응축영역을 이용한 해석결과와 비교해보면 전체적으로는 단일 증기응축영역보다는 실험결과와 잘 일치하는 것으로 나타났지만, 일부 지역에서는 단일 증기응축영역 모델보다 잘못 예측하는 것으로 나타났다. 따라서 증기가 과냉각수 수조 내로 방출될 때의 열혼합 현상을 위한 수치해석모델을 개발하기 위해서는 4 열 증기응축영역 모델을 좀더 보완할 필요가 있는 것으로 판단된다.

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 with the steam condensation region model considering the multi-holes effect of the sparger. A steam discharge through the sparger and the condensation phenomenon were modeled with the choking flow and the four rows steam condensation region model to generate the boundary condition of CFX4.4 for the thermal mixing calculation. The transient calculation results in about 20 seconds show better an agreement of the temperature distribution with that of experiment than that of the single steam condensation region model. However, it is judged that this numerical model should be improved a little to apply to the calculation of the IRWST pool temperature in the APR1400.

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 수치해석적인 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 단일 증기응축영역 모델[4,5]을 사용해서 응축수의 속도와 온도를 계산하여 비교해 보았다[6]. 단일 증기응축모델을 이용한 계산은 전체적으로 실험결과와 비교적 잘 일치하지만, 증기분사기 주변에서는 잘 일치하지는 않는 것으로 나타났다[6]. 따라서 이를 개선하기 위해서 실제 유동현상을 잘 모사할 수 있는 4 열의 증기응축모델을 도입하여 수조 내의 열혼합 현상을 천이과정으로 약 20 초간 계산하였다.

2. B&C Loop 열혼합 특성 실험 및 기존 해석결과[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 160bar 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 단일 증기응축영역 모델을 사용한 해석결과[6]

단일 증기응축영역을 사용한 CFD 해석은 여러 조건에서 수행된 실험 중에서 LRR 을

고려하지 않고, 초기 가압기 압력이 100 bar 이고 수조의 초기 온도가 20 °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 쉽기 때문이다. 이 해석결과에 의하면, 수평방향으로 방출되는 응축수는 단일 증기응축영역으로부터 제트유동의 형태로 수조 내를 흘러가다가 수조 벽면에 부딪힌 다음, 벽면을 따라서 위쪽과 아래쪽 방향으로 나누어 흘러간다. 위쪽으로 흘러가는 응축수 및 응축수 운동량에 의해 이끌러 가는 수조수의 대부분은 수조수와 공기 경계면까지 올라갔다가 방향을 바꾸어 증기분사기쪽으로 다시 돌아오고, 나머지 일부는 벽면에 충돌한 다음 제트유동의 응축수쪽으로 되돌아 온다. 벽면을 따라서 아래쪽 방향으로 흘러가는 응축수 및 수조수는 수조바닥에 충돌한 다음, 수조 바닥면을 따라 증기분사기쪽으로 흘러가다가 증기분사기 밑바닥쪽으로부터 흘러오는 응축수 및 수조수와 충돌하면서, 그 진행방향이 바뀌어 약 45 도의 기울기를 가지고 증기분사기 쪽으로 흘러간다. 그리고 증기분사기 밑바닥으로부터 방출되는 응축수도 수조 바닥면을 따라서 흘러오는 응축수의 영향으로, 진행방향을 바꾸어 증기분사기쪽으로 흘러간다. 이와 같은 유동형상에 기인한 온도분포를 실험결과와 비교해보면, 전체적으로는 비교적 잘 일치하지만 증기분사기 아래쪽에서는 온도분포를 실험결과보다 낮게 계산하고, 수조수와 공기 경계면 근처에서는 실험결과 보다 높게 계산하였다.

3. 증기분사기 다중구멍을 고려한 CFD 해석

3.1 임계유동모델 및 4 열 증기응축모델

B&C Loop 실험에서 가압기 초기 압력이 100 bar 에서 포화증기를 대기압의 20 °C 온도인 수조 내로 방출한다. 그림 2 에 의하면 가압기의 압력은 100 bar 로부터 시간이 지남에 따라 점차 감소하여 20 초에서는 약 50 bar, 50 초에서는 약 20 bar 정도로 많이 감소하지만, 증기분사기 방출구멍 바로 위에 위치한 PT207 의 압력은 실험개시 후 초기에만 격리밸브의 개방과 증기분사기 배관에 차있던 공기의 압축으로 인해 실험개시 후 초기에만 급격하게 약 20 bar 정도로 상승했다가 배관에 차있던 수조수 및 공기방출(water and air clearing) 후에는 약 8 bar 정도로 감소하고 그 이후로는 조금씩 감소하여 20 초에서는 4~5 bar, 50 초에서는 2~3 bar 정도를 나타낸다. 이때 수조의 압력은 대기압 상태이기 때문에 증기분사기 방출구멍에서 쵸킹(choking)이 발생할 수 있다[2,4,5]. 따라서 증기가 증기분사기 방출구멍을 통과할 때의 순간 압력과 온도는 이상기체가 등엔트로피 노즐에서 쵸킹이 발생할 때 사용되는 관계식인 식(1), (2)을 사용하면 구할 수 있다. 식 (1), (2)에서 정압(P_o)과 정온도(T_o)는 PT207 의 압력과 이에 해당하는 포화온도를 이용하였다. 방출구멍을 통과하는 증기유량은 방출구멍에서 쵸킹이 발생하더라도 질량보존법칙에 의하여 가압기 후단에 설치되어 있는 유량계에서 측정된 유량(그림 3)과 동일할 것으로 판단된다.

$$\frac{T^*}{T_o} = \frac{2}{k+1} \qquad (1)$$

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

CFX 4.4 는 증기제트의 응축현상을 잘 모사하는 모델이 현재까지는 없다. 따라서 본 연구는 증기응축영역 모델[2,3,4,5]을 도입하여, 증기가 방출된 후 식(3)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 4.4 의 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]. 증기분사기 표면과 밑바닥의 방출구멍을 통과한 증기는 실험을 수행하는 약 60 초 동안 평균적으로 반경방향으로 약 5.3cm, 축방향으로 약 1.3cm 를 진행한 다음 응축되는 것으로 계산되었다. 증기는 제트유동으로 방출되기 때문에 응축되는 지점에서 폭은 식 (3)에 의하여 각각 1.2cm 와 3cm 계산되었다[10]. 그러나 이것은 상변환이 없는 단상유동과 단일 제트유동에 대한 것이므로 실제 유동현상과는 다를수 있다. 이러한 증기분사거리와 제트 유동의 폭을 바탕으로 증기분사기 표면에 4 열과 밑바닥에 한 개의 증기응축영역을 그림 4 와 같이 설정하였다. 여기서 증기분사기 표면에 있는 4 열의 증기응축영역은 각 열의 방출구멍으로부터 반경방향으로 5.3cm 떨어진 곳에서 축방향으로는 1.2cm 인 영역으로 정의되며, 증기의 방출로 인해서 증기응축영역 내로 흘러들어오는 유입수조수는 증기응축영역의 위, 아래면을 통하여 균일하게 들어온다고 가정하였다.

$$\frac{x_c}{r_o} = \frac{\left[20.57\left(\frac{G_o}{G_s}\right)^{0.713}\right]}{\left[\left(\frac{\rho_\infty}{\rho_s}\right)^{0.384} B^{0.801}\right]} \qquad B = \frac{\left(h_f - h_\infty\right)}{\left(h_s - h_f\right)} \qquad (3)$$

$$\frac{width}{x} = \tan 13^o \qquad (3)$$

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.

$$\dot{m}_e + \dot{m}_{entrain} = \dot{m}_{cond} \qquad (4)$$

$$P_e A_e + P_\infty(\pi DH - A_e) + \rho_e V_e^2 A_e = P_{cond} A_{cond} + \rho_{cond} V_{cond}^2 A_{cond} \quad (5)$$

$$\dot{m}_e h_e + \dot{m}_{entrain} h_{entrain} = \dot{m}_{cond} h_{cond} \quad (6)$$

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 인용한 식 (1), (2)을 이용하여 구할 수 있다. 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. 식 (6)에서 유입수조수의 엔탈피는 실험개시 후 초기에는 초기 수조수 조건인 대기압 상태의 20 °C 이다. 그러나 실험이 진행됨에 따라 방출구멍 주변의 수조수 온도가 상승할 것이고, 이 수조수가 증기응축영역으로 유입될 것이므로 유입수조수의 온도는 계산을 진행함에 따라 계속 증가되어야 할 것이다. 실험개시 후 1 초에서 식(4), (5), (6)에 사용되는 물성치 값 등은 표 1 에 나타나 있다.

3.2 해석대상 격자모델 및 경계조건

B&C Loop 의 증기분사기와 응축수조를 모사하는 해석대상 격자는 CFX-Build 를 사용해서 그림 9 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 소요될 것으로 예상하여 2 차원 축대칭으로 계산을 수행하였다. 해석대상 격자는 온도측정을 위한 열전대의 위치(그림 1)를 고려하여 그림 9 와 같이 다중 블록으로 나누어 형성해서 CFX 결과 파일에서 열전대 위치에 해당하는 지점의 온도를 읽기가 용이하도록 하였다. 본 격자모델에서는 총 9,560 개의 격자 셀이 생성되었고, 격자를 증기분사기 4 열 증기응축영역 부근에 집중적으로 분포 시켰고 공기와 수조수의 경계부근에 격자를 많이 분포시켰다. 여기서 증기분사기 내부와 증기응축영역 내부는 격자 셀을 생성하지 않고 고체영역으로 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[11]. 압력출구조건은 Neumann 조건을 사용하여 응축수조의 최상부에 참조압력을 지정하고 공기만 유출되도록 하였다. 각 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 주어야 한다.

실험개시 후 1 초에서 증기분사기 옆면 쪽의 4 열의 증기응축영역을 통과하는 응축수의 속도와 온도는 3.1 절에 기술된 방법으로 구해서 10.5m/s, 28 °C 의 값을 얻었고, 유입수조수의 속도와 온도는 1.5m/s, 20 °C 의 값을 얻었다. 증기분사기 밑바닥의 증기응축영역을 통과하는 응축수의 속도와 온도는 27.7m/s, 40 °C 이고 유입수조수의 속도와 온도는 1.13m/s, 20 °C 이다. 본 해석에 사용된 응축수와 유입수조수의 속도와 온도 표 2 와 그림 5, 6, 7, 8 에 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[11]. 고온과 저온 유체로 인한 부력효과를 모사하기 위해서 Boussinesq 가정을 사용하였고 공기와 수조수의 경계층 거동의 모사를 위해서는 multi-fluid homogeneous 모델을 사용하였다[11]. 이 모델에서는 공기와 수조수 사이의 열전달 및 운동량 전달은 고려하지 않고 공기와 수조수의 체적비율만 체적방정식을 이용하여 계산한다[11]. 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-04 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.

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\partial) + \nabla \bullet (r_\alpha \rho_\partial V_\alpha) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\partial V) + \nabla \bullet \left(r_\alpha \left(\rho_\partial V_\alpha \otimes V_\alpha - \mu_\alpha \left(\nabla V_\alpha + (\nabla V_\alpha)^T\right)\right)\right) = r_\alpha (\mathrm{B} - \nabla P_\alpha) \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\partial H_\alpha) + \nabla \bullet \left(r_\alpha \left(\rho_\partial V_\alpha H_\alpha - \lambda_\alpha \nabla T_\alpha\right)\right) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \bullet (\rho V k) - \nabla \bullet \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k}\right)\nabla k\right] = P + G_{buoy} - \rho\varepsilon \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \bullet (\rho V \varepsilon) - \nabla \bullet \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla \varepsilon\right] = C_1 \frac{\varepsilon}{k} P - C_2 \rho \frac{\varepsilon}{k} \quad (11)$$

$$\rho = \sum_{\alpha=1}^{N_p} r_\alpha \rho_\alpha \qquad V = \frac{1}{\rho} \sum_{\alpha=1}^{N_p} r_\alpha \rho_\alpha V_\alpha \tag{12}$$

$$\mu_T = \sum_{\alpha=1}^{N_p} r_\alpha \mu_{T\alpha} \qquad \mu_{\alpha,eff} = \mu_\alpha + \mu_{T\alpha} \tag{13}$$

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{14}$$

$$G_{buoy} = -\frac{\mu_T}{\sigma_T} \beta g \bullet \nabla T \tag{15}$$

$$\rho = \rho_o \left[1 - \beta\left(T - T_o\right)\right] \tag{16}$$

3.4 해석결과 및 토의

B&C Loop 열혼합 특성실험에 대하여 CFX4.4 코드를 사용해서 계산한 결과는 그림 10 과 11 에 나타나 있다. 그림 10 의 속도분포는 5.0, 11.5, 17.5 초에서 증기응축영역 주변에서 응축수와 유입수조수 및 수조수의 속도분포를 나타낸 것이다. 증기분사기 옆부분의 4 열의 증기응축영역으로부터 방출되는 응축수의 속도는 약 10 m/s 로 수조벽면을 향해 수평방향으로 제트유동 형태로 진행하다가, 증기분사기 밑바닥 증기응축영역으로부터 방출되는 약 25m/s 속도를 가진 응축수의 영향으로 수조 바닥면쪽으로 약간 내려가면서 벽면에 충돌한 다음, 밑으로 선회하여 제트유동쪽으로 되돌아 온다. 이 되돌아 오는 유동은 벽면을 향해가는 응축수를 방해하여, 응축수가 약간 위쪽으로 올라가도록 하면서 벽면에 충돌하게 한다. 이렇게 충돌한 응축수 중의 일부는 다시 제트 유동쪽으로 선회하여 되돌아가면서 수조벽면을 향해 흘러가는 응축수의 흐름을 방해하여, 그 응축수가 다시 밑바닥쪽으로 향하게 만든다. 그리고 나머지 일부는 수조벽면을 따라서 위쪽으로 올라가다가 증기분사기쪽으로 다시 돌아오는 것을 볼수 있다.

그림 10 의 온도분포는 시간에 따른 수조 내의 온도분포를 나타낸 것으로 앞에서 언급한 응축수가 수조벽면에 충돌한 다음, 수조수와 응축수와 반응하는 유동형상에 따라서 열혼합이 발생하여 온도분포가 변하는 것을 알수 있다. 시간에 따라서 고온의 응축수가 증기분사기 방출구멍을 중심으로 아래쪽으로 움직였다가, 다시 위쪽으로 움직였다가 하면서 열혼합이 발생하는 것을 볼수 있다. 또한 증기분사기 밑바닥 쪽에서 방출되는 응축수로 인해서 아래쪽에 위치한 수조수의 온도분포는 위쪽에 위치한 수조수 보다 약 2~3 ℃ 가 높게 분포하면서 시간에 따라서 급격하게 변하는 것을 알수 있다. 20.5 초에서는 응축수가 수조벽면에 충돌한 다음, 일부는 수조벽면을 따라서 위쪽으로 올라가다가 다시 증기분사기쪽으로 되돌아 오면서 수조수와 열혼합이 발생하는 것을 볼수 있다. 그러나 계산시간이 약 20 초 밖에 되지 않아서, 수조수와 공기 경계면쪽의 수조수 온도는 초기온도인 20 ℃ 를 유지하고 있는 것으로 나타났다. 또한 8.0 초 부터는 증기응축영역 4 열 중에서 가운데 2 열로 유입되는 유입수조수의 온도가 35 ℃ 이상으로 상승하고, 이 영향으로 응축수의 온도가 증가하는 것을 볼수 있다.

B&C Loop 실험장치의 24 개의 열전대 위치에서 단일 및 4 열 증기응축영역을 사용한 CFX 해석결과와 실험결과를 비교한 것이 그림 11 에 나타내었다. 전체적으로는 4 열 증기응축영역을 사용한 해석결과가 실험결과와 더 유사한 것으로 나타났다. 특히 증기분사기 주변과 아래쪽에 위치한 11 개의 열전대 위치에서는 실험결과와 유사한 온도분포 진동의 경향을 모사하고 있는 것으로 나타났다. 그리고 수조벽면쪽에 위치한 열전대 TC648, TC649, TC650, TC651 위치에서도 약간 시간이 지연되었지만 실험결과와 유사한 온도분포 상승을 나타내고 있다. 그러나 증기분사기 근처에서 방출구멍 위쪽으로 위치한 TC631, TC632, TC633, TC634 에서 실험결과는 실험개시 후 약 15 초부터 온도상승이 나타나기 시작하는데, 해석결과는 아직 온도가 상승되지 않았다. 이것은 계산시간을 더 증가시키면, 이부분의 수조수 온도가 상승할 것으로 예상된다. 그러나 이렇게 온도상승이 늦게 나타나는 것은 증기응축영역으로부터 방출되는 실제 응축수의 속도가 본 연구에서 평가한 속도보다 빠르다는 것을 의미하는 것으로 판단된다.

4. 결론 및 향후 보완 사항

B&C Loop 열혼합 특성실험에 대하여 증기분사기 다중구멍 효과를 고려한 4 열의 증기응축영역을 사용해서 CFD 해석을 수행하여 증기가 과냉각수의 수조로 방출될 때, 수조 내의 열혼합 현상에 대하여 전산해석 모델을 개발하고자 하였다. 4 열의 증기응축영역모델을 사용하여 천이과정으로 약 20 초간 모사한 CFX4.4 해석결과에 의하면 단일 증기응축영역을 사용한 해석결과 보다 실험결과와 잘 일치하지만, 증기분사기 근처에서 방출구멍 위쪽에 위치한 수조수의 온도분포는 잘 예측하지 못하는 것으로 나타났다. 이것은 4 열 증기응축영역 모델이 응축수가 수조 벽면을 따라서 크게 선회하는 유동을 주어진 계산시간 내에서는 잘 계산하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 이에 대한 보완계산 및 평가를 수행하면 APR1400 IRWST 수조의 온도분포 해석에 적용할 수 있을 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) 강형석 외, “CFD 를 이용한 B&C Loop 열혼합 특성실험 분석”, 2003 추계학술대회 논문집, 한국원자력학회, 2002

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

8) 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

9) Frank M. White, Fluid Mechanics, 2nd ed., McGRAW-HILL International Editions, 1986

10) Frank M. White, Viscous Fluid Flow, 2nd ed., McGRAW-HILL International Editions, 1991

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

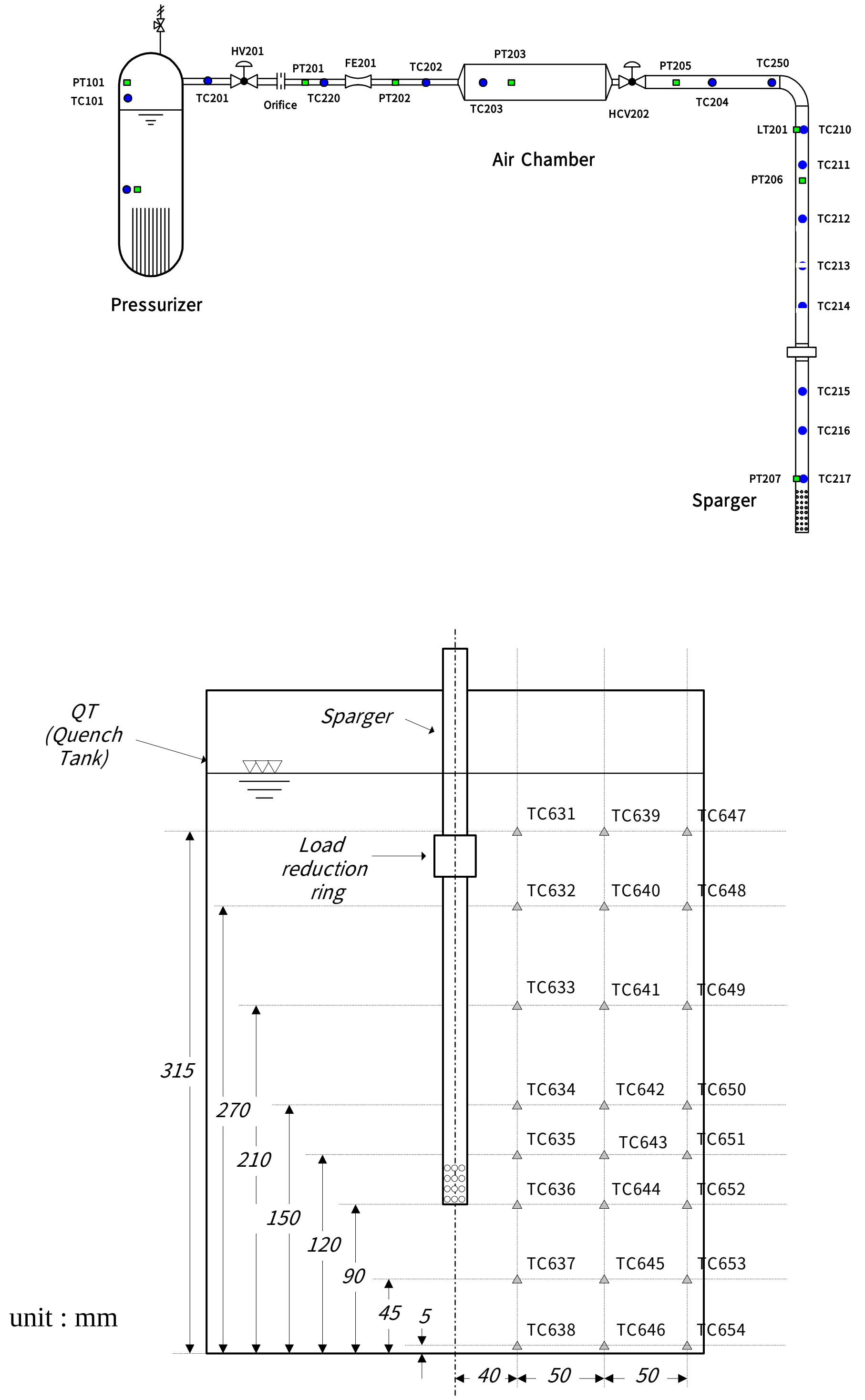
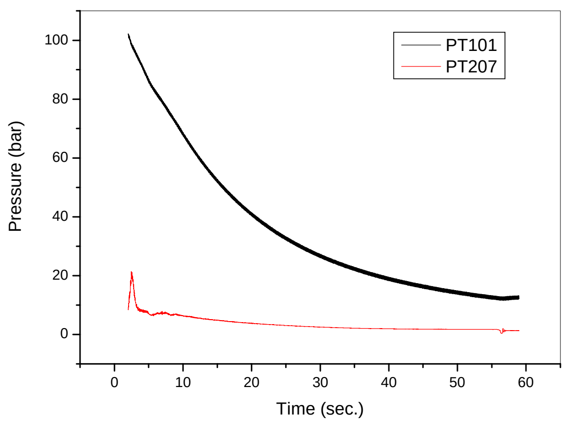


Fig. 1 Schematic diagram of B&C Loop facility[1]



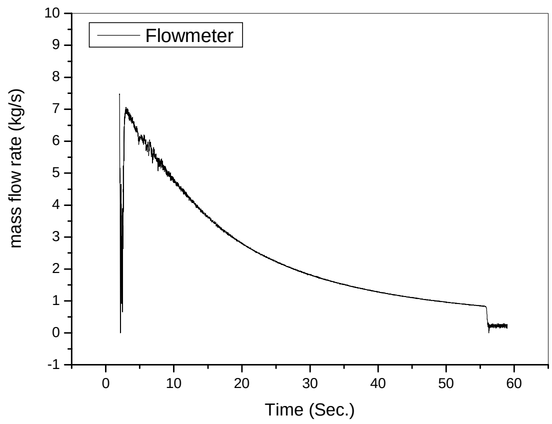


Fig. 2 Pressure behavior at PZR & sparger head

Fig. 3 Mass flow rate

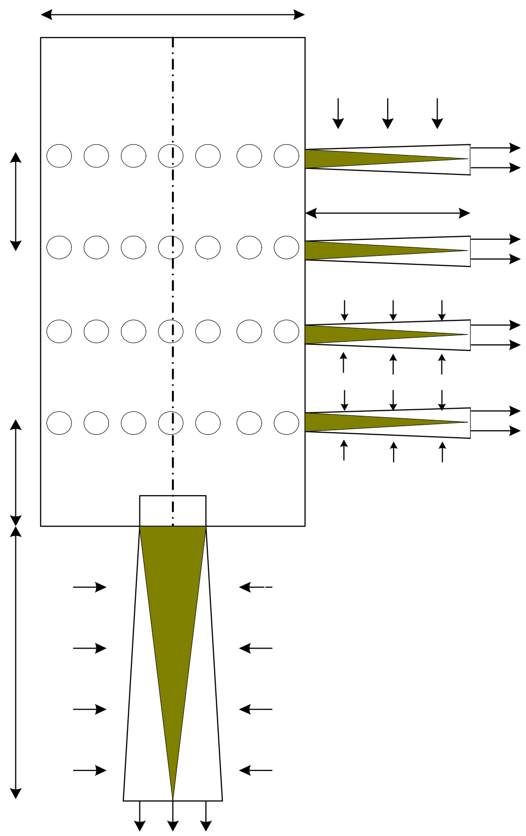


Fig. 4 Steam condensation region model around

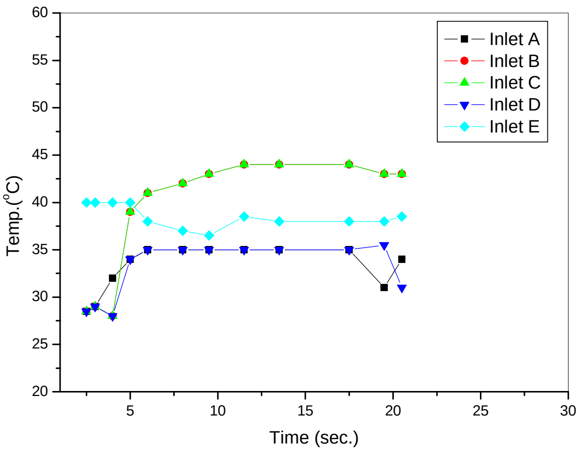


Fig. 5 Temp. of the condensed water from inlets

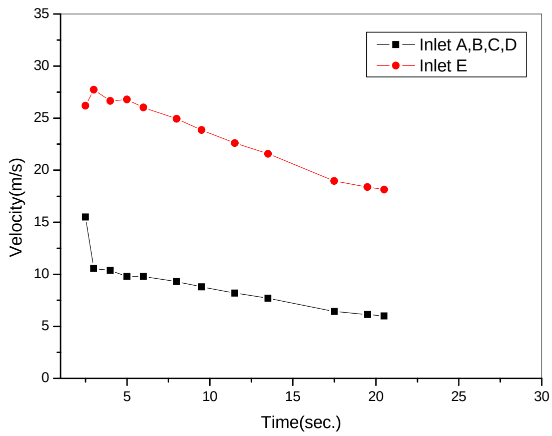


Fig. 6 Velocity of the condensed water from inlets

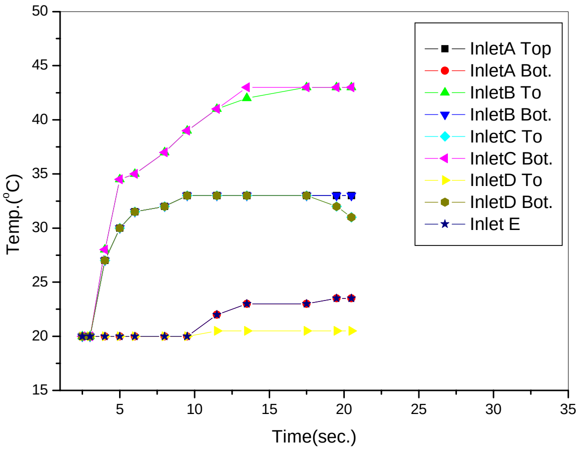


Fig. 7 Temp. of the entrained water into inlets

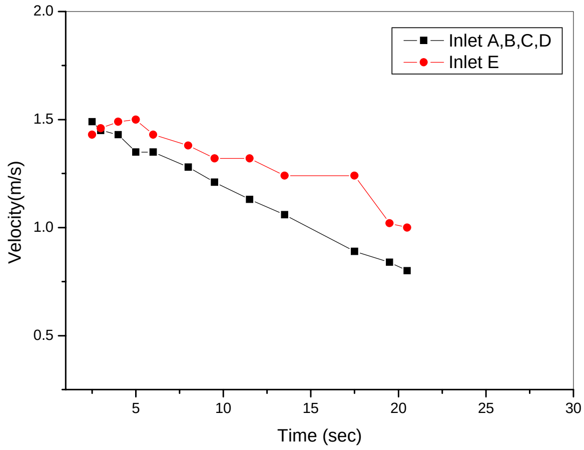


Fig. 8 Velocity of the entrained water into inlets

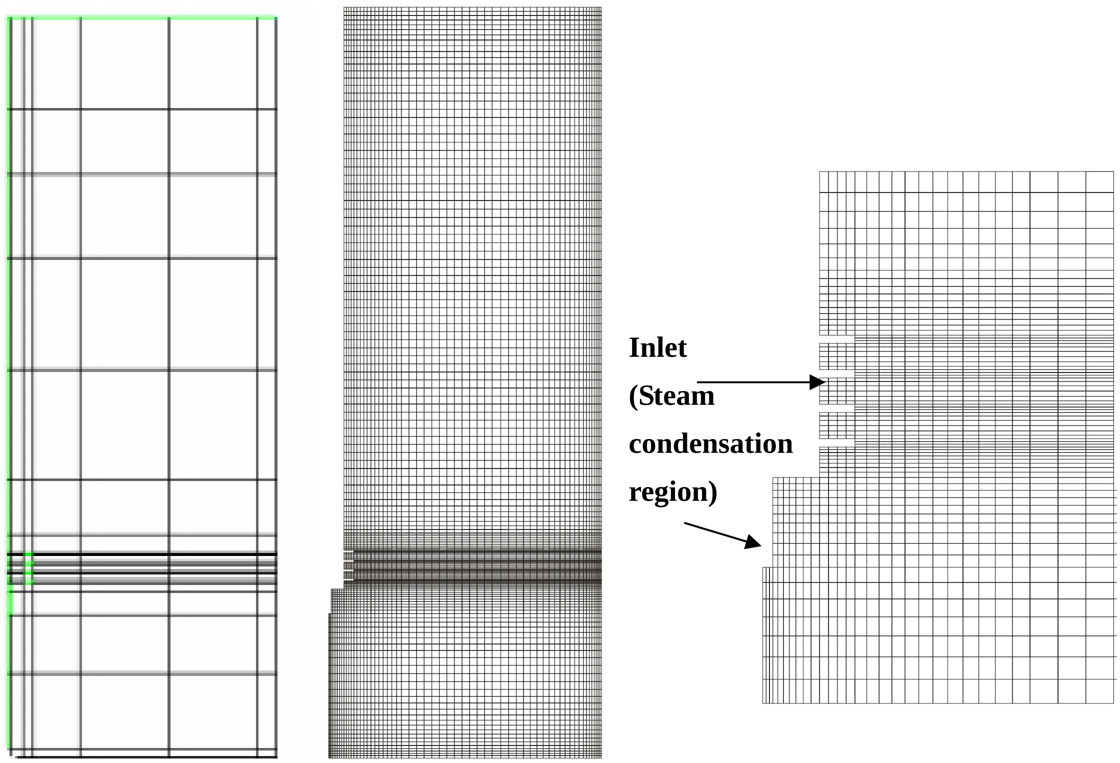


Fig. 9 Geometry and Grid model

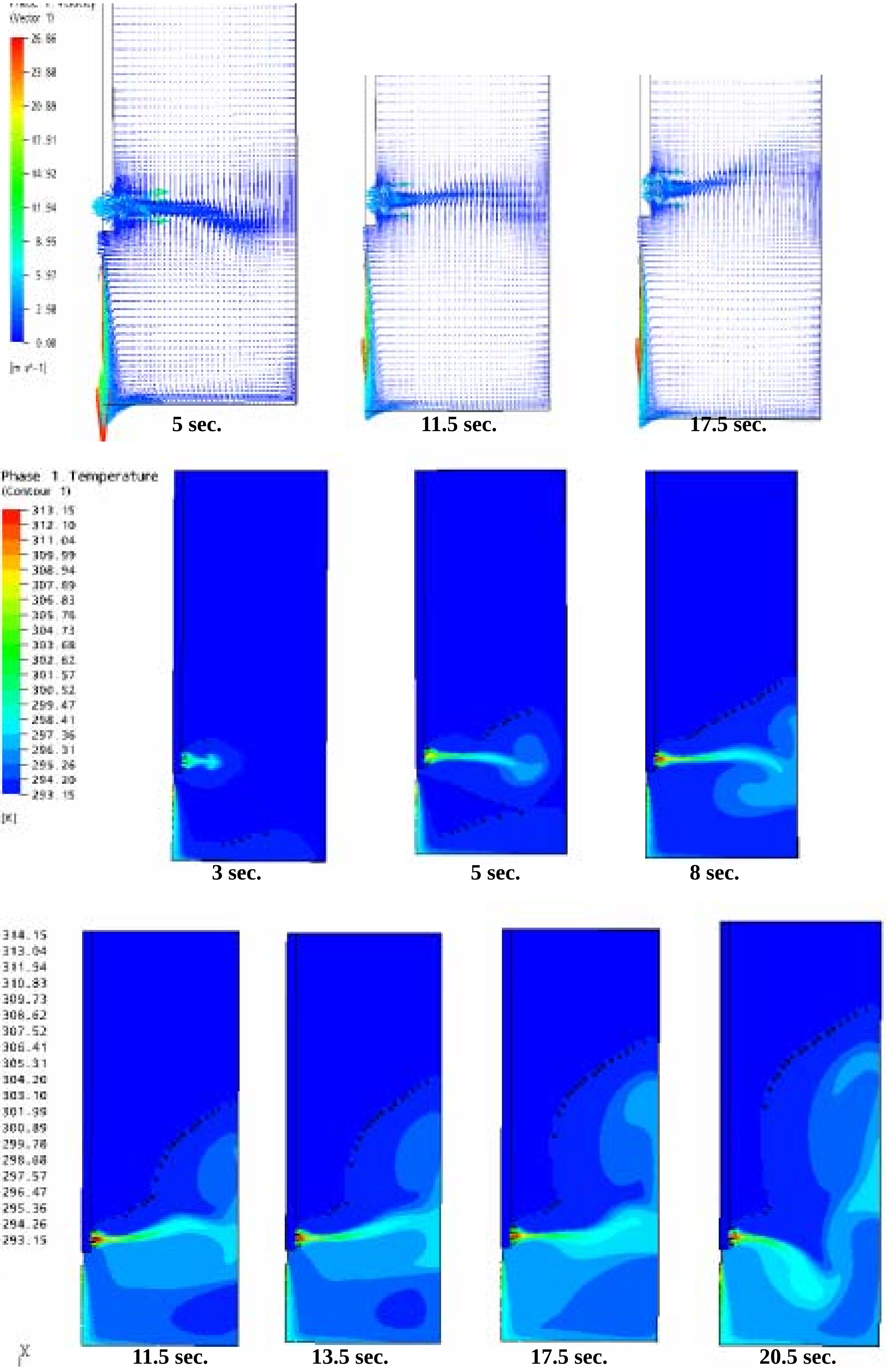


Fig. 10 Velocity profile and temperature distribution

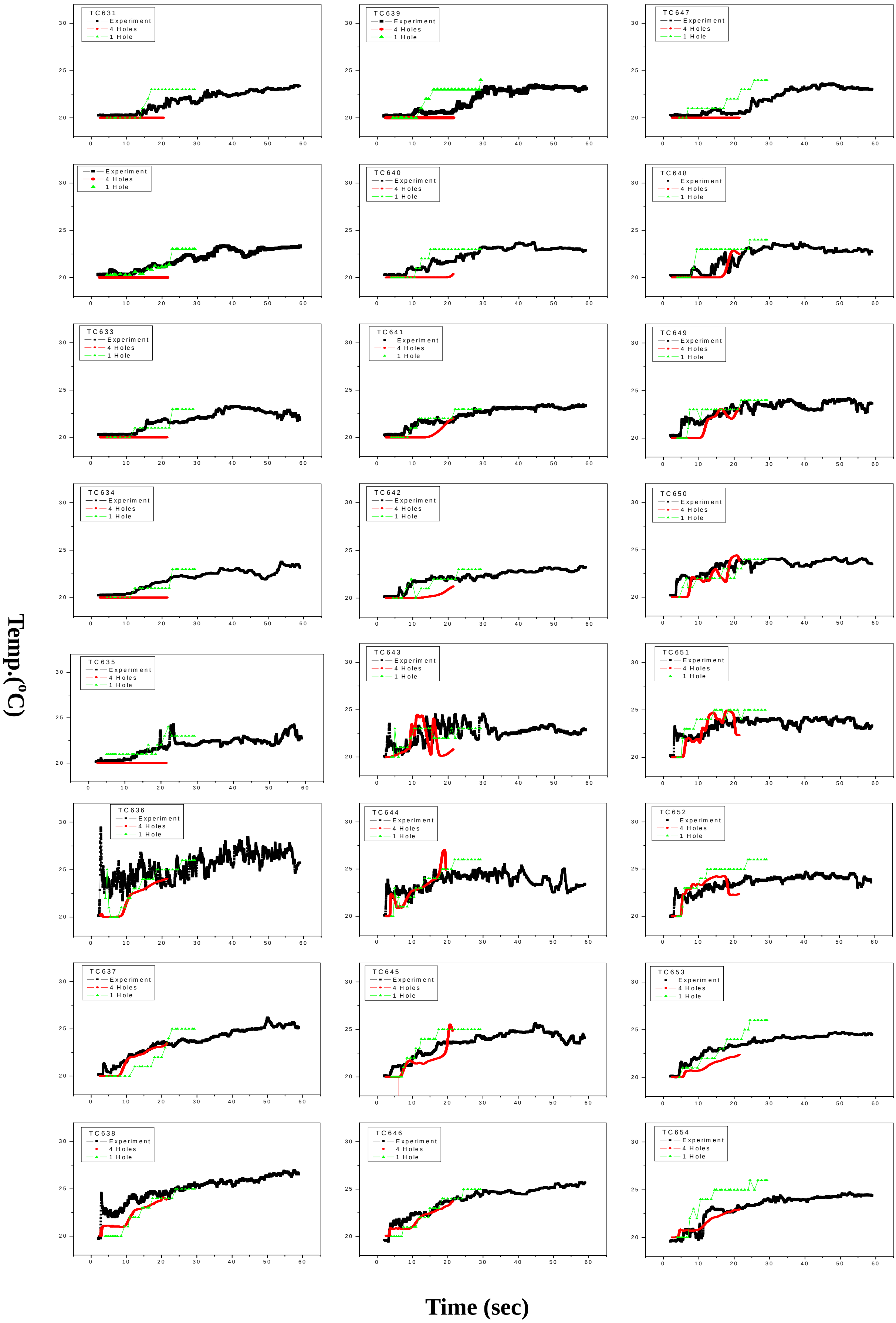


Fig. 11 Temp. distribution in quench tank (Experiment vs CFD)

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

Input Parameter	**Unit**	**Value**
Steam pressure at a hole, P_e	bar	4.35
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 1 second after the start of experiment

Item		**Unit**	**Value**
Sparger side part (Inlet A, B, C, D) / (Bottom part, Inlet E)	Condensed water velocity	m/s	10.5 / (27.7)
	Condensed water temp.	°C	28 / (40)
	Condensed water ki	m^2/s^2	1.669 / (11.534)
	Condensed water εi	m^2/s^3	719.07/ (5223.1)
	Entrained water velocity	m/s	-1.5 / (1.15)
	Entrained water temp.	°C	20 / (20)
	Water expansion coeff.	K^{-1}	2.504E-04
	Water density	kg/m^3	998.3
	Water viscosity	Pa sec	1.002E-03
	Tank air density	kg/m^3	1.190E+00
	Tank air viscosity	Pa sec	1.8160E-05
	Pressure condition at Tank upper region	Bar	1.0