2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

CFD 해석을 위한 예비 증기제트 응축영역 모델 개발 및 검증 해석

The development of the condensation region model of the steam jet for CFD analysis

강형석, 김연식, 윤영중, 전형길, 송철화

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

한국원자력연구소에서는 증기제트가 증기분사기(sparger)를 통하여 과냉각 수조로 방출된 후, 직접접촉 응축현상에 의하여 응축되고 그 응축수가 과냉각 수조수와 열혼합을 일으키는 현상에 대하여 실험적 연구를 수행하고 있다. 이 열혼합 특성 실험에 대해서 CFD 코드를 사용하여 검증해석을 수행하였다. CFD 코드로 해석할 때 증기제트가 응축되는 현상을 고려하기 위해서 증기분사기 방출구멍 주변의 온도분포를 바탕으로 기존에 개발되었던 증기응축영역 모델을 수정 보완하였다. 이 모델과 CFD 코드를 사용해서 과냉각수조 내의 열혼합 현상을 약 10 초 정도 해석한 결과에 의하면, 실험결과와 CFD 해석결과가 비교적 잘 일치하였다. 그러나 일부 지역에서 CFD 해석의 온도분포 결과가 실험결과에 비해서 약간 높고 상승속도도 빠른 것으로 나타났다. 따라서 이에 대한 수정보완이 필요한 것으로 판단된다.

Abstract

The experiment research for a steam, discharged from the sparger, condensation phenomenon by the direct contact condensation and thermal mixing between the condensed water and the subcooled water in the large pool has been performed in the KAERI. The benchmark calculation for a thermal mixing experiment pool has also been performed to develop the thermal mixing model with the condensation region model. The condensation region model based on the experiment results around the sparger was developed to generate the temperature and velocity of the condensed water and the entrained water. A CFD calculation with these values as the boundary conditions was performed for about 10 seconds to verify the condensation region model. The CFD analysis result generally shows a good agreement of the temperature distribution with that of experiment. However, the temperature distribution at a local point shows a little different value and pattern. Therefore, the modification for this point should be performed.

1. 연구배경 및 목적

한국원자력연구소 열수력안전연구부에서는 APR(Advanced Power reactor)1400 IRWST(In-containment Refueling Water Storage Tank) 수조 내의 열혼합 특성과 관련하여 과냉각수조에서 증기제트가 증기분사기(sparger)를 통해 방출 될 때에 증기제트의 불안정 응축현상과 응축하중 및 수조 내의 열혼합 특성에 대해서 실험을 수행해오고 있다[1,2]. 이 실험을 통해서 구한 증기제트의 모형과 수조 내의 응축현상 및 유입 수조수의 정보를 바탕으로 증기응축영역 모델을 개발한 다음, CFD 코드에 경계조건으로 응축수 및 유입수조수의 온도와 속도를 이용하여 검증해석을 수행해서 열혼합 특성 전산해석 모델을 개발하는 것이 본 연구의 목적이다. 증기응축영역 모델을 개발하여 응축수의 온도와 속도를 구하고자 하는 이유는 현재 증기제트의 응축현상 자체를 잘 모사하는 모델이 없기 때문이다. 검증해석을 위해서는 상용 CFD 코드인 CFX4.4 를 이용하여 천이과정으로 약 10 초 정도 해석하였고 실험결과와 비교 평가하였다.

2. 과냉각수조 내의 열혼합 특성 실험[1]

2.1 실험장치

과냉각수조 내 열혼합 특성을 실험하는 장치의 전체적인 개략도와 온도와 압력 등의 계측위치는 그림 1, 2 에 나타나 있다[1]. 이 실험장치는 기존의 B&C Loop 을 개조한 것으로[3], 증기분사기 방출구멍 주변에서 반경방향으로 10cm 이내에 온도계측기를 8 개 설치하였다. 이 온도계측기들은 증기제트의 온도 및 증기제트가 응축된 된 후의 응축수 온도와 증기제트로 흘러가는 수조수의 온도 정보를 제공한다. 그리고 수조 내에 위치한 온도계측기의 개수도 기존의 B&C Loop 의 24 개에서 27 개로 증가되었고, 편심효과를 보기위하여 27 개의 온도계측기가 추가로 설치되었다. 이 계측기들은 수조 내의 응축수와 수조수의 전체적인 열혼합 거동과 그 거동이 축대칭인 지를 보여줄 것으로 판단된다. 증기분사기도 기존의 것에 비해서 약간 변경되었다. 방출구쪽의 모양은 B&C Loop 및 APR1400 에서 사용하던 것과 동일하지만, 방출구멍 위부분의 배관은 직경 17cm 에서 직경 5cm 로 감소하였다. 그리고 직경 1cm 의 방출구멍은 기존의 것과 동일하게 1 열에 16 개씩 4 열이 설치되었지만 바닥에 설치된 직경 2.5cm 방출구멍 1 개와 증기분사기 상단에 위치한 하중감쇄링(Load Reduction Ring)은 증기가 흐르지 않도록 막았다.

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 있다. 대형수조는 직경 3m 이고 높이는 4m 이며, 초기에 수조수가 3.5m 까지 채워져 있다. 실험은 가압기의 압력과 수조수의 온도 등의 초기조건이 만족되면 격리밸브 및 유량조절밸브를 개방하여 시작해서 약 60 초 정도 수행된다. 또한 실험은 수조의 온도(20~90^{o}C), 가압기의 압력(60~150bar) 등에 따라 조건을 달리하여 수행하고 있다.

2.2 열혼합특성 실험결과 분석

증기제트 응축영역 모델 개발에 사용된 실험결과는 과도상태 실험 중에서 초기 가압기 압력이 150 bar 이고 대형수조 수조수의 초기 온도가 26 ^{o}C 인 것으로 선택하였다. 이 실험결과를 바탕으로 증기제트 응축영역 모델을 개발한 다음, 다른 실험결과에 대해서도 검증해석을 수행할 계획이다. 또한 지금 현재 과도상태 실험이 계속 진행 중이기 때문에 응축영역 모델 개발에 직접 사용되는 실험은 추후 변경될 수 있으며, 응축영역 모델도 일부 수정될 수 있다.

가압기에서 생성된 증기는 격리밸브가 개방되면 증기관을 따라 흐르다가 유량조절밸브를 지난 다음 증기분사기를 통해서 과냉각수조로 방출된다. 이때 가압기의 압력(PT101)과 온도(TC101) 및 증기유량(FE201), 증기관을 지나는 동안 계측된 압력(PT201~PT206) 및 온도(TC201~TC205)은 그림 2 에 나타나 있다. 또한 증기제트 응축영역 모델에 중요한 정보를 제공하는 증기분사기 내의 증기 압력(PT207)과 온도(TC206)도 그림 2 에 나타나 있는데, 각각 격리밸브를 개방하자 말자 10bar, 180^{o}C 로 상승했다가 실험시작 후 60 초에서는 3bar, 120^{o}C 로 감소한다. 또한 실험장치의 계측시스템은 격리밸브를 개방하기 5 초 전부터 작동하기 시작한다.

증기분사기 방출구멍 주변에 설치된 온도계측기(TC711~TC720)에서 측정된 온도분포는 그림 2 에 나타나 있다. 이 결과로부터 증기제트가 응축된 다음, 예상되는 평균 응축수 온도와 증기제트의 강한 운동량으로 인해서 끌려오는 유입수조수의 온도에 대한 정보를 알수 있다. 방출된 증기제트는 반경방향으로 약 6cm 근방에서 응축될 것으로 예상되기 때문에[3], 응축수의 평균온도는 TC712 의 온도와 TC718 의 온도 사이의 값인 34~36^{o}C 정도가 될 것으로 판단된다. 방출구멍 주변의 위치한 온도계측기(TC711, TC712, TC717, TC718)의 온도분포는 전반적으로 시간에 따라 요동을 많이 치면서 상승하는 경향을 나타낸다. 이것은 증기제트가 4 열에서 나오고 방출구멍 위, 아래쪽에서 흘러오는 많은 양의 유입수조수로 인해서 증기제트 사이에 복잡한 상호작용을 하기 때문인 것으로 판단된다. 특히 방출구멍 2 열과 3 열 사이에 위치한 TC 712 의 온도분포는 다른 곳의 온도계측기 보다 시간에 따라 온도가 더 상승하는 것으로 나타났다. 이것은 1 열과 4 열에서 방출되는 증기제트에 비해서 상대적으로 저온의 유입수조수 영향이 적기 때문인 것으로 판단된다.

증기제트로 흘러가서 증기를 응축시킬 열침원 역할을 할 유입수조수의 온도는 TC713 및 TC716 와 같이 초기 수조수 온도인 26^{o}C 에서 시간이 지남에 따라 약 1~2 ^{o}C 정도 증가함을 알수 있다. 유입수조수의 온도가 증가하는 원인은 증기분사기 방출구멍으로부터 방출된 증기가 응축된 다음, 바로 수조 벽에 부딪히고 벽면을 따라 위, 아래 방향으로 흐르다가 다시 방출구멍쪽으로 흘러오기 때문에 증기분사기 방출구멍 위쪽의 온도가 약간 상승하기 때문인 것으로 판단된다.

과냉각수조 내의 온도분포 결과는 그림 3 에 나타나 있다. 이것은 수조 내의 27 개 온도계측기(그림 1)에서 측정한 결과 중에서 가장 상부에 위치한 온도계측기 3 개를 제외한 온도분포 결과이다. 방출되는 증기의 온도는 약 120~180 ℃ 이지만 수조 내에서 측정되는 온도는 증기분사기와 유사한 높이에 위치한 온도계측기에서는 32~35 ℃ 정도이고, 그 이외의 온도계측기에서의 온도는 약 26~28 ℃ 정도를 나타내고 있다. 이것은 방출되는 증기의 유량이 수조 내의 수조수의 양에 비해서 매우 작기 때문에 고온의 증기제트가 급격하게 직접접촉 응축 현상에 의해 응축되고, 고온의 응축수도 수조 내를 흐르면서 저온의 수조수와 열혼합을 하여 그 온도가 상당히 떨어지기 때문인 것으로 판단된다.

3. 증기응축영역 모델 및 CFD 검증계산

3.1 임계유동 및 증기응축영역 모델

고온과 고압의 증기제트가 증기분사기를 통해서 대기압의 과냉각수가 채워져 있는 수조로 방출 될 때 증기분사기 방출구멍에서 쵸킹(choking)이 발생할 수 있고, 응축수조 내로 방출된 증기는 과냉각 수조수 내에서 제트유동으로 흘러가다가 곧 응축된다[3,4,5]. 본 실험장치에서는 기존의 B&C Loop 의 air chamber 장치를 제거하였기 때문에 증기분사기 내에 있던 공기의 방출로 인한 압력파 발생등은 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

증기응축영역 모델은 증기제트가 응축될 때까지의 거리인 식 (1)의 증기분사거리[4]에 도달할 때까지 그 폭이 식 (2)[6]와 같이 확장하다가, 증기분사거리 끝에서 균일하고 완전히 응축되어, 응축수로 증기제트의 운동량과 에너지가 모두 전달되어 과냉각 수조 내로 흘러간다는 것이다. 여기서 응축수는 증기분사거리 끝에서 방출구멍 1 열부터 4 열까지의 높이에 걸쳐서 균일한 온도와 속도를 가진다고 가정하였고, 방출구멍 1 열과 4 열을 통과한 증기제트로 수직한 방향으로 유입수조수가 외부에서 흘러 들어온다고 가정하였다. 실제상황에서는 응축수가 균일한 온도와 속도를 가지 않을 것으로 예상되지만, 방출구멍의 각 열에 해당하는 응축수의 온도와 속도를 달리하여 평가해본 결과에 의하면 과냉각수조 내의 온도분포에 큰 차이점을 발견할 수 없었기[7] 때문에 타당한 가정이라고 판단된다. 증기응축영역의 기하학적인 모형은 그림 4 에 나타나 있다. 여기서 식 (1), (2) 모두 증기제트 한 개에 대해서만 고려한 것이므로 4 열의 증기제트와는 약간 다를 수 있다.

$$\frac{x_c}{r_o} = \frac{\left[20.57\left(\frac{G_o}{G_s}\right)^{0.713}\right]}{\left[\left(\frac{\rho_\infty}{\rho_s}\right)^{0.384} B^{0.801}\right]} \qquad B = \frac{\left(h_f - h_\infty\right)}{\left(h_s - h_f\right)} \tag{1}$$

$$\frac{width}{x} = \tan 13^o \tag{2}$$

증기응축영역 끝에서의 응축수 온도와 속도를 구하기 위해서 증기응축영역에 대해서 식 (3), (4), (5)와 같이 질량보존, 운동량 보존 및 에너지 보존 법칙을 적용하였다. 운동량 방정식을 풀기 위해서는 방출구멍을 통과하는 증기제트의 속도와 압력을 알아야 한다. 이 값들은 증기분사기 내의 압력(PT207)과 온도(TC206)의 결과를 정압력과 정온도로 가정한 다음, 방출구멍에서 쵸킹이 발생한다고 가정하여 이상기체가 등엔트로피 노즐에서 쵸킹이 발생할 때의 사용되는 관계식인 식(6), (7), (8)를 적용하여 구할 수 있다[8]. 여기서 증기제트의 유량은 유량계측기(FE201)에서 계측된 유량을 사용하였다. 또한 식 (3), (4), (5) 를 풀기 위해서는 유입수조수의 유량과 압력을 알아야 한다. 유량은 증기제트 증기분거리에 해당하는 환상관의 유로면적을 유입수조가 균일하게 흘러간다고 가정하고, 증기분사기 잠김깊이에 해당하는 수두와 TC713, TC716 의 온도분포 결과를 참조하여 결정하였다. 또한 방출구멍 주변의 상, 하 방향에서 증기제트로 흘러가는 유입수조수의 운동량에 의한 힘은 그 방향이 반대이고, 유입수조수가 증기제트에 대해 수직한 방향으로 흘러간다고 가정하였기 때문에 서로 상쇄되어 증기응축영역에는 영향을 미치지 못한다. 실제상황에서는 유입수조수가 증기제트에 수직한 방향으로만 흘러가지는 않을 것으로 예상된다. 그래서 유입수조수가 여러 각도를 가지고 증기제트로 흘러가는 것을 가정하여 응축수의 속도를 구해본 결과에 의하면, 수직한 방향에 비해서 응축수의 속도가 약 20% 정도 밖에 증가하지 않는 것으로 나타났다[7].

$$\dot{m}_e + \dot{m}_{entrain} = \dot{m}_{cond} \quad (3)$$

$$P_e A_e + P_\infty(\pi DH - A_e) + \rho_e V_e^2 A_e = P_{cond} A_{cond} + \rho_{cond} V_{cond}^2 A_{cond} \quad (4)$$

$$\dot{m}_e h_e + \dot{m}_{entrain} h_{entrain} = \dot{m}_{cond} h_{cond} \quad (5)$$

$$\frac{T^*}{T_o} = \frac{2}{k+1} \quad (6)$$

$$\frac{P^*}{P_o} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)} \quad (7)$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_o} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{1/(k-1)} \quad (8)$$

식 (3), (4), (5)를 반복적으로 풀고, 에너지 보존방정식의 오차가 10% 이내로 하여 구한 응축수의 속도와 온도 및 유입수조수의 속도와 온도는 그림 5 에 나타나 있다. 여기서 유입수조수의 온도는 증기분사기 방출구멍 주변의 상, 하 방향에서 다를수 있는데, 실험결과에는 방출구멍 상부쪽의 정보밖에 없기 때문에 CFD 해석결과를 참조하여 유입수조수의 온도를 결정하였다.

3.2 CFD 검증계산을 위한 격자모델 및 경계조건

3.1 에서 증기응축영역 모델을 개발하여 도출한 응축수 및 유입수조수의 속도와 온도를 상용 CFD 코드인 CFX4.4 에 경계조건으로 활용하여 약 10 초 정도 천이과정으로 계산하고, 그 결과를 실험결과와 비교하였다.

증기분사기와 대형 수조를 모사하는 해석대상 격자는 CFX-Build 를 사용해서 그림 6 과 같이 증기분사기를 기준으로 2 차원 축대칭과 원통형(cylindrical) 좌표계로 형성하였다. 증기분사기 방출구멍이 원주방향으로 균일하게 위치하기 때문에 방출구멍을 통과한 증기제트는 원주방향으로는 큰 변화가 없을 것으로 판단되어 축대칭 유동으로 가정하였다. 격자모델에서는 약 11,00 개의 격자 셀이 생성되었고, 격자를 증기분사기 방출구멍에 집중적으로 분포 시켰고, 공기와 수조수의 경계부근에도 격자를 많이 분포시켰다. 여기서 증기분사기 내부와 증기응축영역 내부는 격자 셀을 생성하지 않고 고체로 처리하였다. 그리고 공기와 수조수의 경계면과 수조 출구 사이의 거리가 0.5m 밖에 되지 않아서 발생할 수치계산상의 확산오류를 방지하기 위해서 출구조건을 후단으로 0.5m 연장하였다.

입구경계조건은 Dirichlet 조건을 사용하여 증기분사기 옆면에 있는 증기응축영역 출구에 지정한 다음, 그림 5 에 나타나 있는 응축수의 온도와 속도를 사용하여 지정해 주었다. 여기서 난류강도(turbulent intensity)는 증기가 64 개의 방출구멍을 통과할 때 그 강도가 상당히 증가할 것으로 예상되어 10%로 하였다. 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 실험과 CFX 해석결과를 이용하여 다시 지정해 주었다.

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[9]. 고온과 저온 유체로 인한 부력효과를 모사하기 위해서 Boussinesq 가정을 사용하였고 공기와 수조수의 경계층 거동의 모사를 위해서는 multi-fluid homogeneous 모델을 사용하였다[9]. 이 모델에서는 공기와 수조수 사이의 열전달 및 운동량 전달은 고려하지 않고 공기와 수조수의 체적비율만 체적방정식을 이용하여 계산한다[9]. 계산은 천이과정으로 약 10 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 하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\partial) + \nabla \bullet (r_\alpha \rho_\partial V_\alpha) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(r_\alpha \rho_\partial V\right) + \nabla \bullet \left(r_\alpha \left(\rho_\partial V_\alpha \otimes V_\alpha - \mu_\alpha \left(\nabla V_\alpha + \left(\nabla V_\alpha\right)^T\right)\right)\right) = r_\alpha \left(\mathrm{B} - \nabla P_\alpha\right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(r_\alpha \rho_\partial H_\alpha\right) + \nabla \bullet \left(r_\alpha \left(\rho_\partial V_\alpha H_\alpha - \lambda_\alpha \nabla T_\alpha\right)\right) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho k\right) + \nabla \bullet \left(\rho V k\right) - \nabla \bullet \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k}\right)\nabla k\right] = P + G_{buoy} - \rho\varepsilon \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho \varepsilon\right) + \nabla \bullet \left(\rho V \varepsilon\right) - \nabla \bullet \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla \varepsilon\right] = C_1 \frac{\varepsilon}{k} P - C_2 \rho \frac{\varepsilon}{k} \quad (13)$$

$$\rho = \sum_{\alpha=1}^{N_p} r_\alpha \rho_\alpha \qquad V = \frac{1}{\rho}\sum_{\alpha=1}^{N_p} r_\alpha \rho_\alpha V_\alpha \quad (14)$$

$$\mu_T = \sum_{\alpha=1}^{N_p} r_\alpha \mu_{T\alpha} \qquad \mu_{\alpha,eff} = \mu_\alpha + \mu_{T\alpha} \quad (15)$$

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (17)$$

$$G_{buoy} = -\frac{\mu_T}{\sigma_T} \beta g \bullet \nabla T \quad (18)$$

$$\rho = \rho_o \left[1 - \beta\left(T - T_o\right)\right] \quad (19)$$

3.4 CFD 해석결과 분석 및 토의

과냉각수조 열혼합 특성실험에 대하여 증기응축영역 모델과 CFX4.4 를 사용해서 해석한 온도 및 속도분포 결과는 그림 7 과 8 에 나타나 있다. 또한 대형수조 내의 온도계측기 위치에서 실험결과와 CFD 해석결과를 비교한 것이 그림 9 에 나타나 있다.

그림 7, 8 로부터 수조 내의 전체적인 유동분포와 열혼합 과정을 알수 있다. 증기분사기 방출구멍 옆부분의 증기응축영역으로부터 방출되는 응축수의 속도 약 6㎧ 이기 때문에 방출 즉시 수조 벽면에 부딪힌 다음, 벽면을 따라 위로 흘러가는 응축수는 공기와 물의 경계면 부근까지 상승하다가 그 방향으로 변경하여 다시 내려오고, 아래로 흘러가는 응축수는 수조 밑바닥 면에 충돌한 다음, 그 방향을 바꾸어 증기분사기 쪽으로 다시 올라간다. 이와 같이 약 35 ℃ 의 응축수가 흘러가면서 약 26 ℃ 인 과냉각 수조수와 열혼합을 일으키면서, 그 온도가 떨어진다. 또한 증기분사기 아래쪽에서 벽면 때문에 선회하는 유동은 증기분사기쪽에서 방출되는 응축수의 흐름을 약간 위로 상승하게 만들고, 증기분사기 위쪽보다는 수조수의 양이 적어서 열혼합으로 인해서 하강하는 온도가 위쪽보다는 약간 작다. 그리고 방출되는 응축수 주변에 있는 수조수는

응축수 쪽으로 흘러가서 응축수와 같이 수조 벽에 충돌하는 것을 볼 수 있고, 증기응축영역 쪽으로 유입되는 수조수의 영향으로 인해서 그 주변의 수조수도 증기응축영역 쪽으로 끌려오는 것을 볼 수 있다.

그림 9 는 과냉각 수조 내의 온도계측기 위치에서 실험결과와 CFD 해석의 온도분포 결과를 시간에 따라서 비교하였다. 여기서 실제 실험을 시작한 시간은 계측시스템이 작동한 후 5 초가 지난 후이기 때문에, CFD 해석결과는 5 초부터 나타내었다. 수조 내 총 27 개의 온도계측기 중에서 응축수의 주 유동 방향에 위치하거나 열혼합 특성을 잘 표현할 수 있는 온도계측기 6 개만 우선 선택하여 비교하였다. 전체적으로는 실험결과와 해석결과의 온도분포 변화 경향은 유사하고, 온도 값의 차이는 2~3 ℃ 이내에서 CFD 해석결과가 약간 높은 것으로 나타났다. 이것은 증기응축영역 모델에 의해서 계산된 응축수의 온도가 실제 현상보다 약간 높은 것을 의미하고, 응축수의 주 유동방향에 위치한 TC732, TC736, TC737 에서 CFD 해석의 온도분포 결과가 실험결과보다 먼저 증가하는 것을 보여주고 있다. 이것은 계산된 응축수의 속도가 실제 현상보다 약간 빠르다는 것을 의미할 수도 있고, 실제 실험에서는 응축수가 수조 내를 흘러가면서 주변의 수조수와 열혼합이 CFD 해석결과 보다 더 활발하게 일어나서 응축수의 온도가 더 떨어진다고 볼수도 있다. 또한 TC704 에서의 온도분포 비교를 보면, 실험결과가 더 높게 나타난다. 이것은 TC704 의 위치가 증기분사기의 맨 아래쪽에 위치한 방출구멍에서 하부로 4cm 떨어진 지점인 것을 고려하면, 증기제트의 폭이 식(2)에서 계산된 것보다 넓게 퍼지면서 흘러가기 때문에 실험결과가 높게 나타난 것으로 판단된다.

증기분사기 아래쪽에 위치한 TC722 와 TC732 에서의 온도분포 비교를 보면 온도분포 변화경향은 유사하지만, 실험초기에 온도 값 차이가 약 3~4 ℃ 이상 있는 것으로 나타났다. 이것은 실험에서 초기 수조수 온도가 25 ℃ 이하이기 때문인 것으로 판단되며, 수조수의 초기 온도가 일정하지 않고 약간 성층화 되어있는 것으로 판단된다.

4. 결론 및 향후 보완 사항

증기제트가 방출될 때 과냉각수조 내에서 열혼합 특성실험을 수행하고, 실험결과를 활용하여 기존의 증기응축영역 모델을 수정하여 응축수와 유입수조수의 속도 및 온도를 도출하였다. 이 값들을 CFD 코드에 경계조건으로 사용하여 약 10 초 정도 수조 내의 열혼합 현상을 해석한 다음, 실험결과와 비교하여 증기응축영역 모델의 타당성을 평가하였다. CFD 해석결과와 실험결과를 비교해보면 전체적으로 잘 일치하지만, 일부 지역에서는 CFD 해석의 온도분포 결과가 실험결과 보다 높고, 빠르게 상승하는 것으로 나타났다. 그리고 일부 지역에서는 증기제트가 증기응축영역 모델의 가정보다 더 넓게 퍼지면서 흘러감으로 인해서 실험의 온도분포 결과가 더 높게 나타나는 것처럼 보이기도 하였다. 따라서 이러한 평가결과를 바탕으로 실험결과를 더 분석한 다음, 증기응축영역

모델을 개선할 필요성을 있는 것으로 판단된다.

후기

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

참고문헌

1) 김연식외 5 명, “수조내 I-Sparger 의 증기제트 응축에 의한 열혼합 실험”, 2003 추계학술대회 논문집, 한국원자력학회, 2003

2) C. K. Park et al, "A Test Program for Steam Condensation Capability of Steam Sparger and Preliminary Test Results", KNS Conference, October, 2003

3) 강형석외 4 명, CFD 를 이용한 B&C Loop 열혼합 특성실험 분석, 2002 추계학술대회 논문집, 한국원자력학회, 2002

4) J.C. Weimer et al, "Penetration of Vapor Jets Submerged in Subcooled Liquids", AIChE Journal, Vol. 19, No. 3, 1973

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

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

7) 강형석외 4 명, 증기분사기 다중구멍 효과를 고려한 B&C Loop 수조 온도분포 해석, 2003 추계학술대회 논문집, 한국원자력학회, 2003

8) Gordon J. Van Wylen and Richard E. Sonntag, “Fundamentals of Classical Thermodynamics, 3nd ed

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

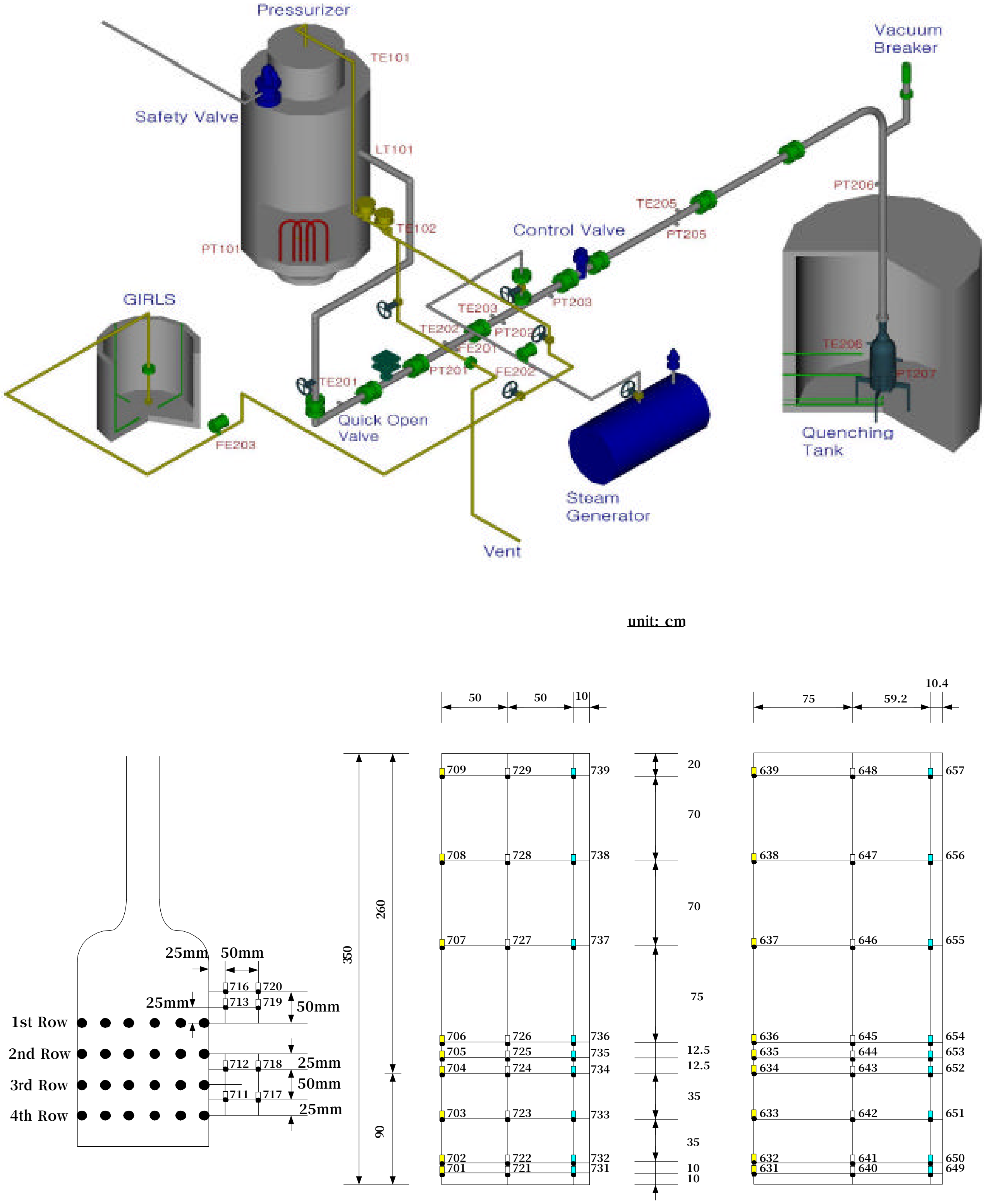

그림 1 대형수조 열혼합 실험장치[1]

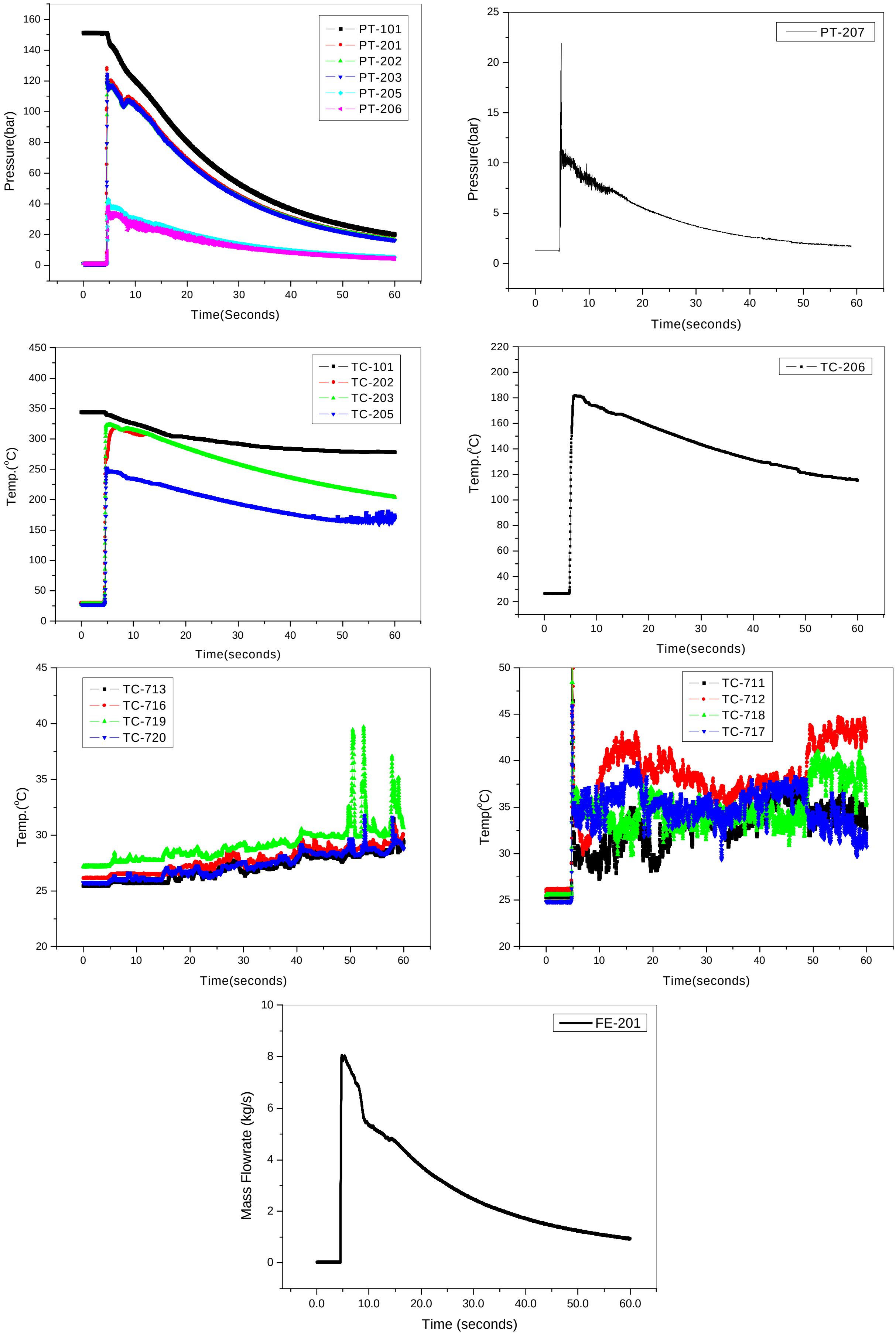

그림 2 증기관 및 증기분사기 내의 유량, 온도 및 압력[1]

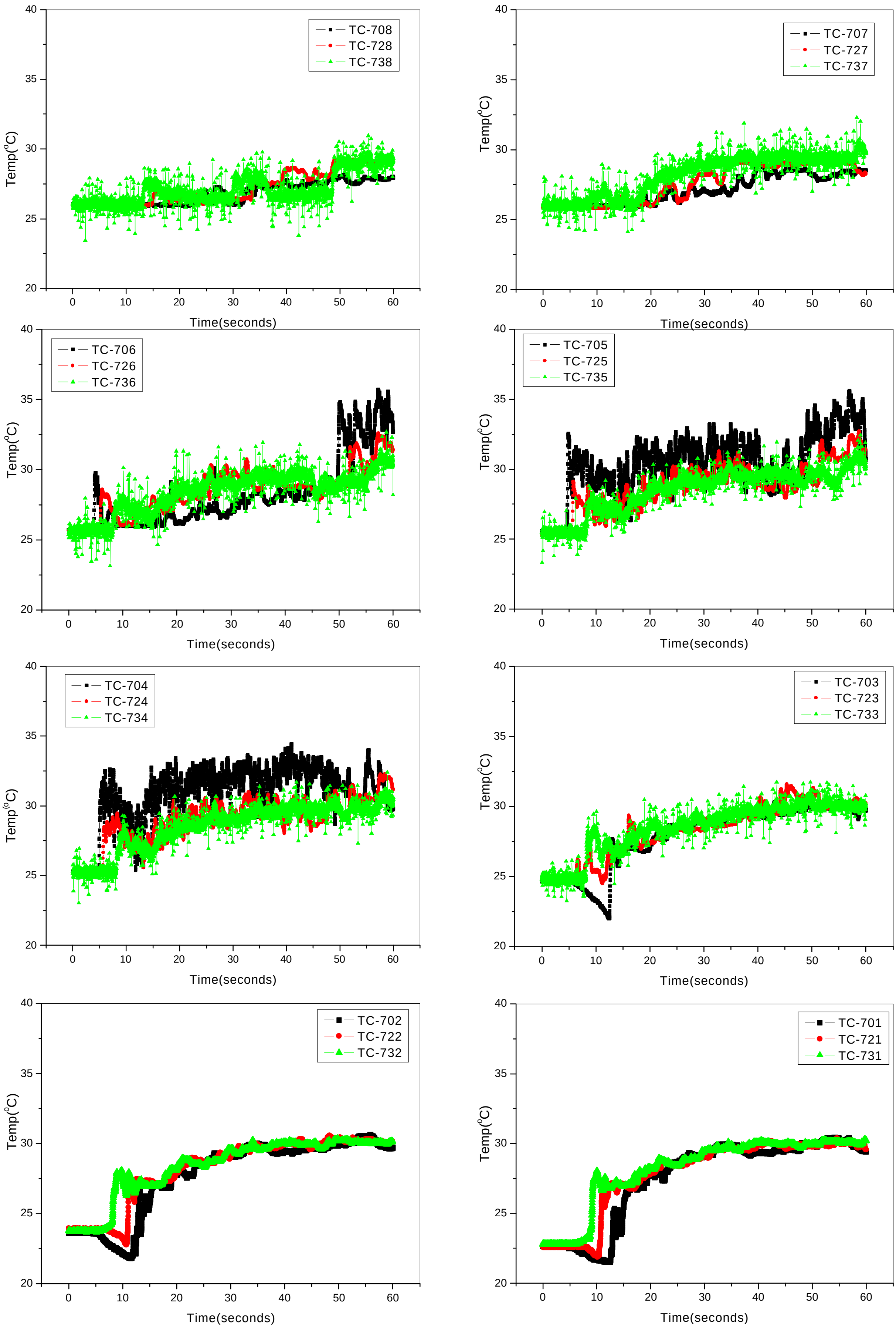

그림 3 대형수조 내의 온도분포

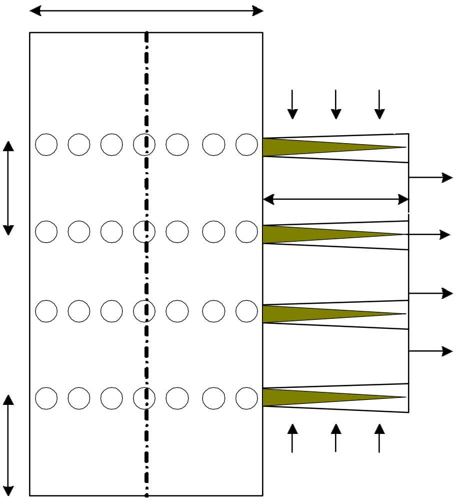

그림 4 증기분사기 주변의 증기응축영역 모형

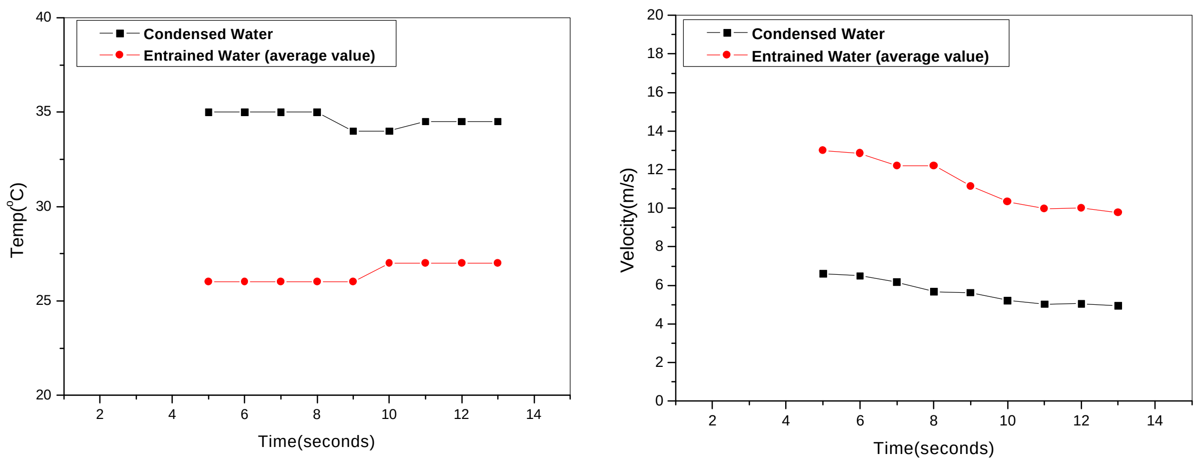

그림 5 응축수와 유입수조수의 온도 및 속도

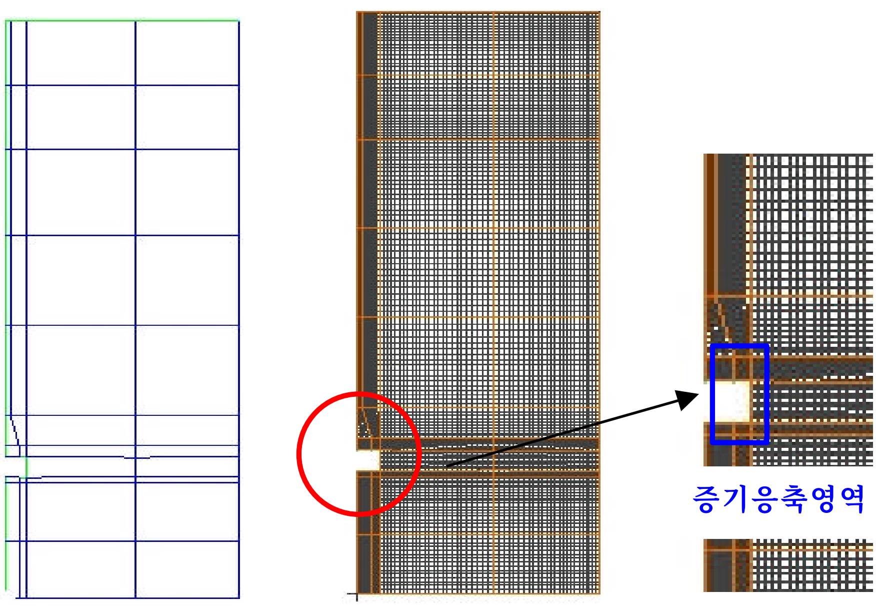

그림 6 증기분사기와 대형 수조의 격자모델

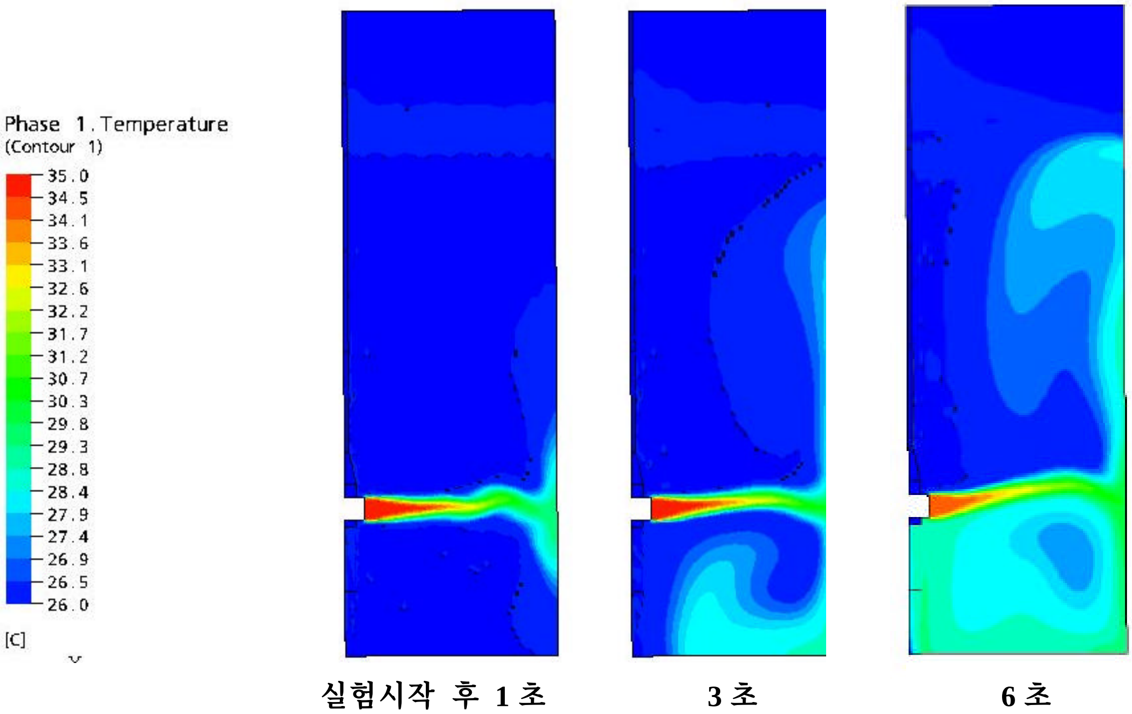

그림 7 CFD 해석 온도분포 결과

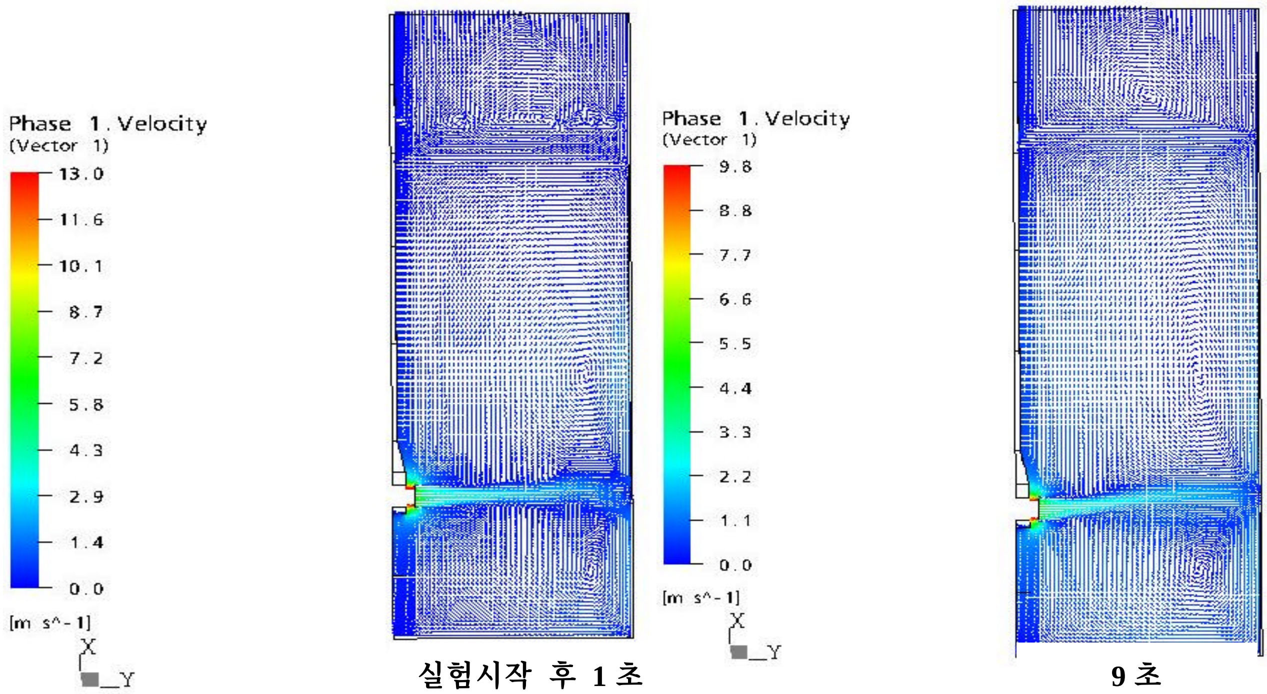

그림 8 CFD 해석 속도분포 결과

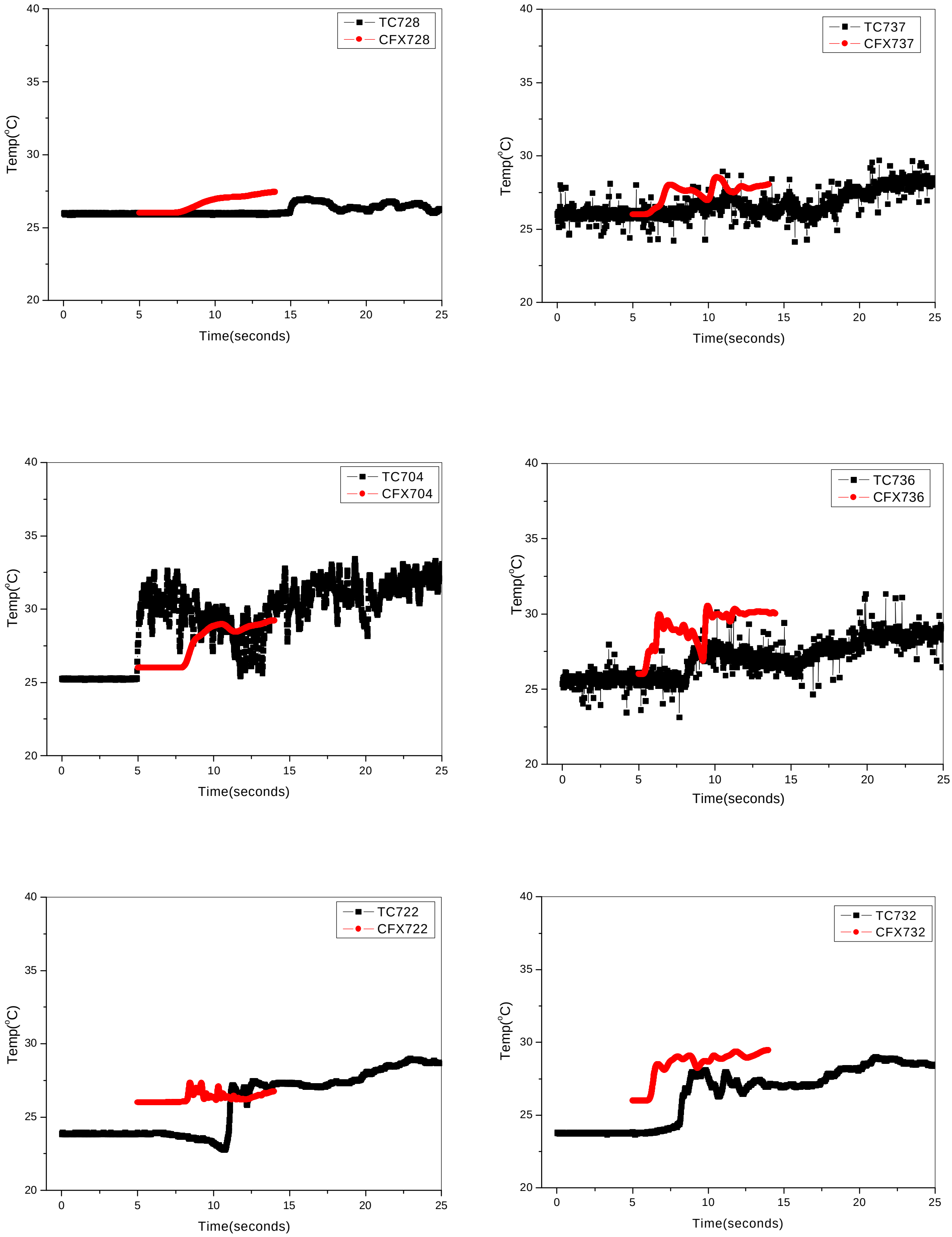

그림 9 실험과 CFD 해석 온도분포 결과 비교교