

증기제트 방출시 과냉각수조 내의 열혼합 현상 CFD 해석

강형석* · 송철화**

CFD Analysis for Thermal Mixing in a Subcooled Water during Steam Jet Discharge

Hyung Seok Kang* and Chul Hwa Song**

Keywords : Steam Jet(증기제트), Direct Contact Condensation(직접접촉응축), Thermal Mixing(열혼합)

Abstract

A CFD analysis for a thermal mixing experiment during steam jet discharge was performed to develop the analysis methodology for the thermal mixing between steam and subcooled water and to find the optimized numerical method. In the CFD analysis, the steam condensation phenomena by a direct contact was modelled by the so-called condensation region model. The comparison of the CFD results with the test data showed a good agreement as a whole, but a small temperature difference was locally found at some locations. However, the commercial CFD code of CFX4.4 together with the condensation region model can simulate the thermal mixing behaviour reasonably well when a sufficient number of mesh distribution and a proper numerical method are adopted

1. 서론

한국원자력연구소에서는 APR1400(Advanced Power Reactor 1400 MWe)의 IRWST(In-containment Refueling Water Storage Tank) 내에서 발생할 수 있는 증기제트 방출시 직접접촉에 의한 불안전 증기응축 현상을 이해하기 위해서 실험과 CFD 해석연구를 수행하였다[1-3]. CFD 해석연구에서는 수조 내의 열혼합 거동과정과 유입수조수 온도분포를 예측할 수 있는 수치해석 방법을 상용코드인 CFX4.4를 사용하여 개발하였다[1-3]. 현존하는 상용 CFD 코드에는 증기제트의 직접접촉 응축현상을 해석할 수 있는 모델이 없다[4]. 따라서 본 연구에서는 실험을 통하여 관찰한 증기제트 주변의 수조수 온도분포를 활용하여 증기응축영역 모델을 개발하여 직접접촉 응축현상을 모사하였다[3]. 이 모델을 통해서 구한 응축수제트의 온도와 속도를 CFD 해석의 경계조건으로 활용하여 열혼합 실험을 모사하였다.

2. CFD 해석

2.1 증기응축영역 모델

본 CFD 연구의 주요 관심대상인, 증기제트의 직접접촉응축 현상을 증기침투거리 실험상관식(식 (1))을 바탕으로 개발한 증기응축영역 모델(Fig. 1)을 도입하여 모사하였다[3]. 증기가 이 영역 내에서는 완전히 응축수로 상변환 된다고 가정하였고, 증기제트의 운동량과 에너지가 응축수에 보존 전달되어 응축수가 모델 출구를 균일한 속도와 온도로 통과하며, 모델의 상, 하면을 통해서 주변 수조수가 수직인 방향으로만 유입된다고 가정하였다[3].

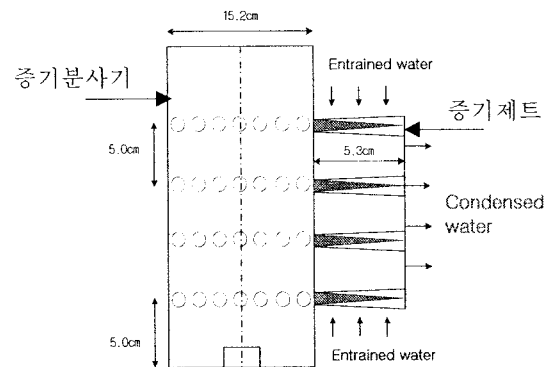


Fig. 1 Steam Condensation Region Model

$$\frac{x_c}{r_o} = 20.57 \left(\frac{G_o}{G_s} \right)^{0.713} / \left[\left(\frac{p_\infty}{p_s} \right)^{0.384} B^{0.801} \right] \quad (1)$$

$$B = (h_f - h_\infty) / (h_s - h_f) \quad (2)$$

$$\text{Jet Width} / \text{Steam Length} = \tan 13^\circ \quad (3)$$

열혼합 실험이 진행되는 동안 증기침투거리는 약 5~8cm 정도일 것으로 예상되며, 수조수 엔탈피가 증가할수록 길어진다. CFD 해석에서는 증기응축영역 모델의 길이를 실험 초기의 값인 5.3cm를 계속 사용하였다. 증기응축영역 모델의 출구는 방출구멍 1열 상부에서 4열 하부까지를 연결한 영역이 된다 (Fig. 1). 1열 중심에서 1열 상부까지와 4열 중심에서 4열 하부까지의 길이는 식 (3)의 제트 폭을 고려하여 결정하였다[5].

$$m_s + m_e = m_c \quad (4)$$

$$P_s A_s + P_c (\pi DH - A_s) + \rho_s V_s^2 = P_c A_c + \rho_c V_c^2 \quad (5)$$

$$m_s h_s + m_e h_e = m_c h_c \quad (6)$$

* 한국원자력연구소 열수력안전연구부, hskang3@kaeri.re.kr

** 한국원자력연구소 열수력안전연구부, chsong@kaeri.re.kr

증기응축영역 출구를 통과하는 응축수 온도와 속도를 구하기 위해서 증기응축영역에 대해서 식 (4)~(6)의 질량, 운동량 및 에너지 보존방정식을 적용하였다.

2.2 격자모델 및 민감도 계산조건

CFD 해석을 위한 격자모델은 CFX-Build[5]를 사용해서 과냉각수조와 증기분사기를 증기분사기 중심선을 기준으로 2차원 축대칭, 정렬격자로 생성하였다. 격자모델과 수치차분방법 민감도 계산을 위해서 동일한 기하학적 모양에 격자 셀 수를 다르게 분포시킨 3가지 경우와 대류항 차분방법을 달리한 1가지 경우에 대해서 CFD 해석을 수행하였다(Table 1).

Table 1 Sensitivity Calculations

	Cell No.	Horizontal × Vertical	Convection Discretization
Case 1	9,588	63 × 160	Upwind 1st
Case 2	23,835	103 × 263	Upwind 1s
Case 3	31,020	113 × 273	Upwind 1s
Case 4	9,588	63 × 160	QUICK

3.3 경계조건

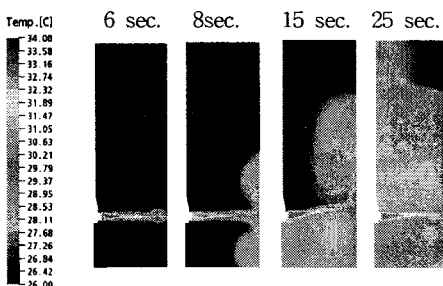
응축수제트를 모사하기 위한 입구 경계조건은 증기응축영역 출구에 지정한 다음, 응축수의 온도와 속도를 시간에 따라 지정해 주었다. 입구 경계조건에서 난류조건은 증기가 증기분사기 64개의 방출구멍을 통과할 때 난류강도가 상당히 증가할 것으로 예상되어 난류강도를 속도의 10%로 하였다[3]. 압력 출구조건은 Neumann 조건을 사용하여 과냉각수조의 최상부에 참조압력을 지정하고 공기만 유출되도록 하였다. 유입수조수는 수조수가 증기제트 쪽으로 흘러가서 증기 응축현상에 참여하는 것을 모사해야 하므로, CFD 해석영역에서 빠져나가도록 했다.

3.4 CFD 해석 유동모델

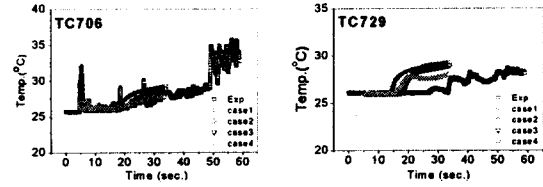
과냉각수조 내의 열혼합 현상을 비압축성 유동, 공기와 물의 자유표면이 존재하는 2상 유동 및 부력효과가 존재하는 난류 유동장으로 가정하였다. 난류 유동장을 모사하기 위해서는 표준 k-ε 난류모델을 적용하였다[5]. 고온과 저온 유체로 인한 부력효과를 모사하기 위해서 Boussinesq 가정을 사용하였고 공기와 수조수의 자유표면 거동을 모사하기 위해서는 multi-fluid homogeneous 모델을 사용하였다[4].

3.5 CFD 해석결과 분석

CFD 해석결과인 과냉각수조 내의 온도 분포 그림은 Fig. 2 (a)에 나타나 있고, 수조 내의 온도계측기 위치에서 시간에 따른 온도변화 경향에 대해 실험결과와 CFD 해석결과를 비교한 것이 Fig. 2 (b)에 나타나 있다.



(a) Temp. Distribution (case 1)



(b) Comparison of Test Data with CFD Results

Fig. 2 CFD Analysis Results

증기분사기 방출구멍과 유사한 높이에 위치한 온도계측기 TC706에서의 온도분포를 비교해보면, TC706에서는 실험개시 후 순간적으로 약 32°C까지 증가하였다가, 수조수 초기온도인 26°C로 감소한 다음, 다시 약 25초에서 상승하는 것으로 나타났다. 실험의 이런 경향을 Case 1~4의 CFD 해석이 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났고, Case 4가 초기의 온도증가는 잘 예측하지는 못하지만, 전체적인 온도변화 경향을 제일 잘 예측하는 것으로 나타났다. 과냉각수조 상부 쪽에 위치한 TC729의 온도분포에 대해서 비교하면, Case 1~4가 모두 온도증가 시점을 빠르게 예측하고 있는 것으로 나타났고, Case 1~3은 온도변화 경향을 실험결과와 달리 지속적으로 증가만 하는 것으로 예측했다. 따라서 CFD 해석이 수조벽면 전단에 위치한 온도계측기에서는 Case 1~4의 결과가 모두 유사하지만, 수조 상부에 위치한 온도계측기에서는 Case 4의 결과가 실험결과를 제일 잘 예측하는 것으로 나타났다.

4. 결론

CFD 해석이 실험결과를 7~8% 오차 내에서 잘 예측하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구를 통해서 개발한 증기응축영역 모델과 CFD 해석 민감도평가 결과를 활용하면, 증기제트 방출시 과냉각수조 내의 열혼합 현상을 CFD 해석으로 예측이 가능할 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중장기 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] C.H. Song, W.P. Baek, M.K. Chung and J. K. Park, 2003, "Multi-dimensional Thermal- Hydraulic Phenomena in Advanced Nuclear Reactor Systems: Current Status and Perspectives of the R&D Program at KAERI", Proc. NURETH-10, Seoul, Korea, October 5-9.
- [2] Y.S. Kim, H.G. Chun, Y.J. Yoon, H.S. Kang and C.H. Song, 2005, Steam Condensation Induced Thermal Mixing Experimental Using B&C Facility, KAERI Report, KAERI/TR-2933/2005
- [3] H.S. Kang, Y.S. Kim, H.G. Chun, Y.J. Yoon and C.H. Song, 2005, A CFD Analysis of the Thermal Mixing Under the Transient of the Steam Discharging in a Subcooled Water Tank, KAERI Report, KAERI/TR-3008/2005.
- [4] Ansys, Inc., 2004, CFX4.4 Manual.
- [5] Frank M. White, 1991, "Viscous Fluid Flow 2nd," McGraw-Hill, Inc., pp.476-476.