



차세대원자로 재장전수조내의 유동장에 대한 수치해석적 연구

A numerical study of the flow field in the IRWST of KNGR

강형석¹⁾, 김환열, 윤주현, 배운영, 박종균

Hyung Seok Kang, Hwan Yeol Kim, Juhyeon Yoon, Yoon Yeong Bae, Jong Kyun Park

Safety Depressurization System of the Korean Next Generation Reactor prevents the Reactor Coolant System from over-pressurization by discharging the coolant with high pressure and temperature into the In-containment Refueling Water Storage Tank(IRWST) during an accident. If temperature in the IRWST rises above the temperature limit of 200 °F due to the discharged coolant, an unstable steam condensation may occur and cause large load on the IRWST wall. To investigate whether this condition can be reached or not for the design basis accident, the flow and temperature distributions of water in the IRWST were calculated by using CFX 4.2 computer code. The results show that the local water temperature does not exceeds the temperature limit within the transient time of 5 seconds.

1. 서론

현재 국내에서 개발중인 차세대원자로(Korean Next Generation Reactor)는 안전성과 경제성이 획기적으로 향상된 개량형 신형원자로이다. 차세대원자로는 공학적 안전설비로 안전감압계통(Safety Depressurization System)과 재장전수조(In-containment Refueling Water Storage Tank, IRWST)를 설치하여 사고시 고온, 고압의 원자로냉각재를 IRWST로 방출하여 원자로냉각재계통의 압력을 신속하게 감압하여 원자로를 보호한다. 사고시 가압기로부터 원자로냉각재계통의 고압 증기가 sparger를 통해서 IRWST 수조로 방출될 때 증기는 sparger 주변에서 물로 응축된다. 이 경우에 총 증기방출 시간이 작을 때는 IRWST내 sparger 주변의 수조수 온도상승이 적어 방출되는 증기가 안정적으로 잘 응축되지만 증기방출이 어느 정도 진행되어 sparger 주변의 수조수 온도가 어떤 한계온도를 초과하면 증기응축이 불안정해지면서 응축진동 현상이 발생하여 IRWST 구조물에 큰 하중을 유발할 수 있다[1,2,3,4,5]. 이와 같은 불안정한 증기응축으로 인한 하중발생으로 비등경수로(Boiling Water Reactor)에서는 응축수조(suppression pool)의 지지대 등이 파손되는 사고가 일어난 경우가 있다[2,3,4,5]. 따라서 원자력 규제기관에서는 사고분석과 불안정한 증기응축현상을 실험 및 수치해석으로 해석한 결과를 바탕으로 비등경수로 응축수조 냉각수의 국부적 온도가 능동적 냉각작동이 없을 때 200 °F를 넘지 않도록 권고하고 있다[1,4,5]. 차세대원자로의 안전감압계통과 IRWST는 비등경수로의 안전감압계통 및 응축수조와 기능과 계통구성이 유사하므로 비등경수로의 요건을 IRWST 수조수 온도요건에 적용할 수 있다[2,5]. 따라서 차세대원자로의 안전감압계통 및 IRWST의 설계가 능동적 냉각작동이 없을 때 불안정 증기응축 관련 온도요건을 만족시키는지를 평가하기 위해서는 증기가 IRWST로 방출될 때 IRWST내의 유동현상을 먼저 파악해야만 한다. 이를 위해서 범용 전산유체코드인 CFX 4.2를 사용하여 안전감압계통 설계기준사고인 IOPOSRV(Inadvertent Opening Power Operated Safety Relief Valve)시 원자로냉각재가 IRWST내로 방출될 때의 유동현상 및 IRWST 수조수 온도분포 현상을 천이과정으로 약 5초 정도 계산하였다.

2. 차세대원자로 안전감압계통/IRWST 개요

차세대원자로의 안전감압계통은 그림 1과 같이 가압기에 연결된 배관, 밸브 및 sparger로 구성되어 있다. 증기를 방출하는 sparger는 두 개의 공동헤더에 6개씩 연결되어 총 12개가 있으며, sparger 형상은 그림 2에 나타나 있고 sparger 방출구 둘레와 밑바닥의 작은 구멍을 통해서 원자로 냉각재가 방출된다. IRWST는 그림 3과 같이 격납용기하부에 환형모양으로 위치해 있고 상부

1) 한국원자력연구소

에는 콘크리트 구조물이 지붕덮개로 있고 4개의 공기방출밸브가 덮개위에 있다. Sparger의 잠김깊이와 수조수의 높이를 알 수 있는 도면은 그림 4에 나타나 있으며 IRWST 수조수의 초기높이는 약 3.65m 이고 수조수와 상부 공기의 온도 및 압력은 상온, 대기압이다.

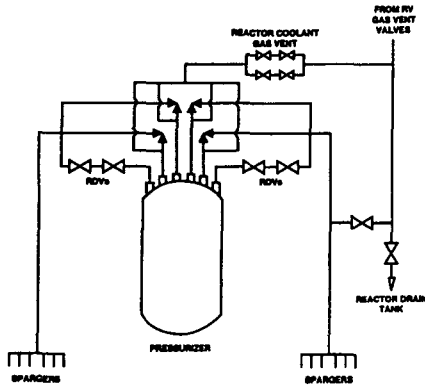


그림 1 안전감압계통 개략도

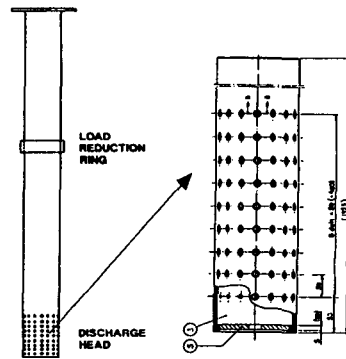


그림 2 Sparger 형상

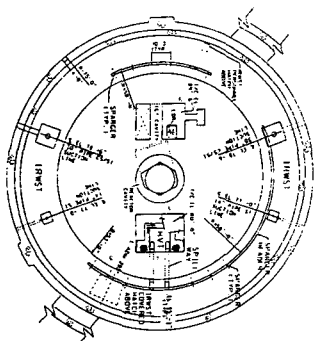


그림 3 IRWST (위에서 본 모양)

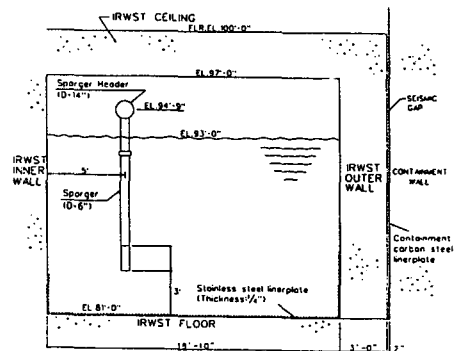


그림 4 IRWST (옆에서 본 모양)

3. 수치해석

3.1 입계유동 및 응축영역 모델

차세대원자로 IOPOSrv시 sparger를 통해 방출되는 증기는 IRWST 수조수에 의해 응축된다. 이때 방출되는 증기의 압력은 최고 1.5 MPa 정도이고 IRWST 수조수는 대기압이기 때문에 입계유동 조건에 해당하여 sparger로부터 방출되는 증기유량은 IRWST 압력에 상관없이 어떤 한 계치 이상으로는 증가하지 않는다[6]. 따라서 IOPOSrv시 IRWST로 방출되는 증기속도는 Lahey-Moody의 입계유동 모델을 이용해서 구하였다[6]. 또한 방출된 증기는 곧 응축이 되는데 CFX와 같은 범용 전산유체코드는 증기의 응축현상을 모사하지 못하므로 본 해석에서는 증기가 sparger에서 방출된 다음 일정한 거리인 응축영역 내에서 전부 응축하여 물로 변환된다고 가정하고 물이 IRWST 수조내로 분사되는 현상을 해석하였다. 이 응축영역(condensation area)은 sparger 증기방출구멍 지름의 8~10 배로 정의되는 증기분사거리를 바탕으로 그림 5와 같이 가정하였다[3,4]. 이 응축영역에서 증기가 물로 응축될 때 운동량과 에너지가 그대로 보존된다고 가정



하여 응축영역을 벗어나는 물의 속도와 온도를 구하여 본 계산의 입구경계조건으로 활용하였다. Sparger 방출구에서 분사되는 증기속도는 증기의 압력 1.5 MPa와 그림 6에 나타나 있는 증기의 엔탈피를 바탕으로 증기의 건도(equilibrium quality)를 구한 다음 임계유속을 계산한 결과 약 272m/s 이다. 이 증기속도 및 sparger 방출구멍의 면적과 응축영역 표면적 값을 이용하여 식(1)에서 응축영역을 벗어나는 물의 속도를 구한 결과 약 3.7m/s 이다. 물의 온도는 증기의 최고 엔탈피 값과 응축영역에서의 물의 압력 값을 이용하여 ASME steam table에서 구한 결과 그림 7과 같다. 응축영역에서 물의 압력 값은 대기압에 응축영역의 잠김깊이에 해당하는 수두를 더한 값인 0.122MPa로 하였다[8,9].

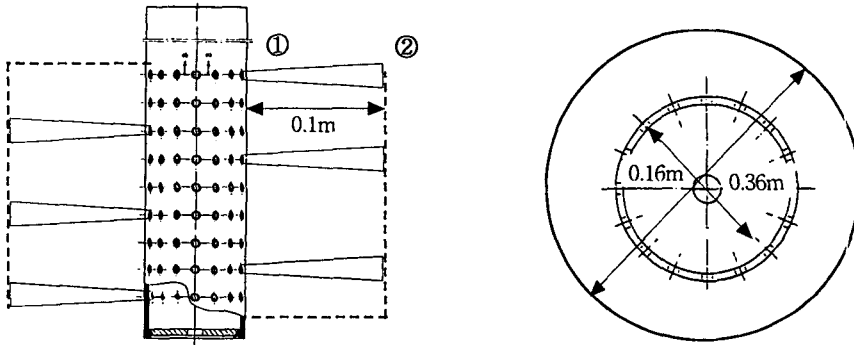


그림 5 응축영역 모델

$$A_1 \rho_1 V_1^2 = A_2 \rho_2 V_2^2 \tag{1}$$

$$A_1 : \text{area of sparger discharger hole } (144 \times \frac{\pi \times 0.01^2}{4} = 0.0126 \text{ m}^2)$$

V_1 : hole exit velocity

ρ_1 : hole exit density

A_2 : area of at plane ②

ρ_2 : average density of hot water at plane ②

V_2 : average velocity of hot water at plane ②

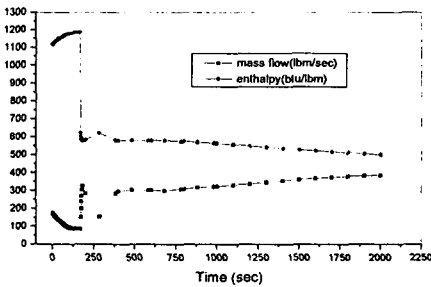


그림 6 Sparger로 향하는 증기유량과 엔탈피

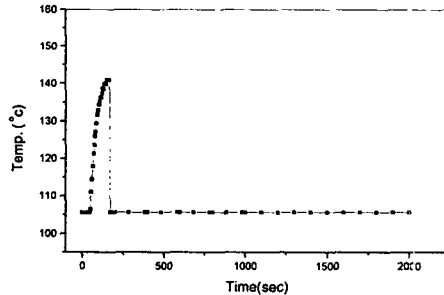


그림 7 응축영역을 벗어나는 물의 온도

3.2 지배방정식 및 계산알고리즘

본 해석에 사용된 범용전산유체코드인 CFX 4.2는 경계밀착좌표계(body fitted coordinate), 제어 체적방법(control volume method), 비엇물림격자(non staggered grid), 정렬격자(structured grid)와 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) 알고리즘을 사용하며

Navier-Stokes 운동량, 에너지 및 난류방정식 등을 푼다. 본 계산에 사용된 CFX의 난류 모델은 표준 $k-\epsilon$ 이다. CFX 4.2와 같은 범용 전산유체코드는 유한차분방법(FDM)을 복잡한 3차원의 기하학적인 모양을 가진 물리적인 해석모형에 적용하기 위해 경계밀착좌표계를 도입하였다. 범용 전산유체코드의 전처리기인 CFX-Meshbuild를 사용하여 복잡한 계산영역을 모사하는 해석대상 격자를 만든 다음 식 (2), (3)와 같이 경계밀착좌표계를 사용하여 매핑(mapping)하면 유한차분법을 적용하기 쉬운 직교좌표계(cartesian coordinate)로 변환된다. 여기에 유한차분방법을 적용하여 유동장을 계산하는 것이다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \xi^i} = \frac{\partial x^j}{\partial \xi^i} \frac{\partial \Phi}{\partial x^j} = J^j_i \frac{\partial \Phi}{\partial x^j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x^i} = \frac{\partial \xi^j}{\partial x^i} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi^j} = \bar{J}^j_i \frac{\partial \Phi}{\partial \xi^j} \quad (3)$$

본 해석의 대상인 IRWST는 그림 5와 같이 물과 공기가 자유표면(free surface)을 형성하고 있는 상태에서 증기가 물 속에 잠겨있는 sparger를 통해 방출되면서 응축하여 시간이 지남에 따라 수조수의 양이 증가하게 된다. 이와 같이 물과 공기가 자유표면을 형성하고 있는 유동장은 CFX의 다상유동(multi-phase flow)의 "homogeneous model"을 사용하여 모델링하였다. Homogeneous model은 "multi-fluid model"의 간략한 형태로 연속방정식을 제외한 다른 지배방정식은 상의 구분없이 해를 구하므로 각 상 간의 운동량과 열전달은 무시되며, 본 계산에 이용된 "homogeneous model"의 질량보존방정식, 운동량 방정식, 에너지방정식, 및 $k-\epsilon$ 난모델 방정식은 식(4)~(13)과 같다. 여기서 α, β 는 각상을 나타내며 ν_α 는 상의 체적분율을 의미한다. 또한 본 계산은 천이과정으로 계산을 수행하며 CFX에서 지배방정식의 시간에 대한 차분은 식(14)과 같이 완전내재적 후향차분방법(fully implicit backward difference method)으로 하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\nu_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (\nu_\alpha \rho_\alpha V_\alpha) = \sum_{\beta=1}^{N_p} (\dot{m}_{\alpha\beta} - \dot{m}_{\beta\alpha}) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\nu_\alpha \rho_\alpha V_\alpha) + \nabla \cdot (\nu_\alpha (\rho_\alpha V_\alpha \otimes V_\alpha - \mu_\alpha (\nabla V_\alpha + (\nabla V_\alpha)^T))) = \\ & \nu_\alpha (B - \nabla P_\alpha) + \sum_{\beta=1}^{N_p} C_{\alpha\beta}^{(d)} (U_\beta - U_\alpha) + F_\alpha + \sum_{\beta=1}^{N_p} (\bar{m}_{\alpha\beta} U_\beta - \bar{m}_{\beta\alpha} U_\alpha) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\nu_\alpha \rho H_\alpha) + \nabla \cdot (\nu_\alpha (\rho_\alpha V_\alpha H_\alpha - \lambda_\alpha \nabla T_\alpha)) = \\ & \sum_{\beta=1}^{N_p} C_{\alpha\beta}^{(h)} (T_\beta - T_\alpha) + \sum_{\beta=1}^{N_p} (\bar{m}_{\alpha\beta} H_\beta - \bar{m}_{\beta\alpha} H_\alpha) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\nu_\alpha \rho_\alpha k_\alpha) + \nabla \cdot (\nu_\alpha (\rho_\alpha V_\alpha k_\alpha - (\mu + \frac{\mu \tau_\alpha}{\sigma_k}) \nabla k_\alpha)) = \\ & \nu_\alpha S_{k\alpha} + \sum_{\beta=1}^{N_p} C_{\alpha\beta}^{(k)} (k_\beta - k_\alpha) + \sum_{\beta=1}^{N_p} (\bar{m}_{\alpha\beta} k_\beta - \bar{m}_{\beta\alpha} k_\alpha) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\nu_\alpha \rho_\alpha \epsilon_\alpha) + \nabla \cdot (\nu_\alpha (\rho_\alpha V_\alpha \epsilon_\alpha - (\mu + \frac{\mu \tau_\alpha}{\sigma_\epsilon}) \nabla \epsilon_\alpha)) = \\ & \nu_\alpha S_{\epsilon\alpha} + \sum_{\beta=1}^{N_p} C_{\alpha\beta}^{(\epsilon)} (\epsilon_\beta - \epsilon_\alpha) + \sum_{\beta=1}^{N_p} (\bar{m}_{\alpha\beta} \epsilon_\beta - \bar{m}_{\beta\alpha} \epsilon_\alpha) \end{aligned} \quad (8)$$

$$S_{k\alpha} = P_\alpha + G_\alpha - \rho_\alpha \epsilon_\alpha \quad (9)$$

$$S_{\epsilon\alpha} = \frac{\epsilon_\alpha}{k_\alpha} (C_{1\epsilon} (P_\alpha + C_{3\epsilon} \max(G_\alpha, 0)) - C_{2\epsilon} \rho_\alpha \epsilon_\alpha) \quad (10)$$

$$\mu_{\alpha eff} = \mu_\alpha + \mu \tau_\alpha, \mu \tau_\alpha = C_\mu \rho_\alpha \frac{k_\alpha^2}{\epsilon_\alpha} \quad (11)$$



$$\sum_{\alpha=1}^{N_r} \nu_{\alpha} = 1, \rho = \sum_{\alpha=1}^{N_r} \nu_{\alpha} \rho_{\alpha}, \mu = \sum_{\alpha=1}^{N_r} \nu_{\alpha} \mu_{\alpha} \tag{12}$$

$$V = \frac{1}{\rho} \left(\sum_{\alpha=1}^{N_r} \nu_{\alpha} \rho_{\alpha} V_{\alpha} \right) \tag{13}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = F(\Phi), \frac{\Phi^n - \Phi^{n-1}}{\Delta t} = F(\Phi^n) \tag{14}$$

3.3 해석대상 격자 및 경계조건

해석대상격자는 그림 3, 4의 IRWST 도면을 바탕으로 CFX의 전처리기인 CFX-Meshbuild를 사용하여 그림 8과 같이 다중블록으로 형성하였다. 생성된 해석대상격자에서 IRWST의 폭은 5.7m, 높이는 4.8m, 응축영역을 고려한 sparger의 반경은 0.4m 이다. 본 격자는 IOPOSrv시 방출되는 증기가 안전감압계통의 한 트레인(train)만 통과하여 6개의 sparger를 통하여 IRWST로 방출되고, 정지냉각계통을 이용한 IRWST 수조수 냉각은 고려하지 않고 증기방출로 인한 수조수 온도상승만 고려하기 때문에 계산시간을 절약하기 위해 1/4 대칭조건을 사용하였고 sparger가 위치해 있는 부분은 세밀하게 격자를 형성하였다. 본 격자에서 sparger 배관은 수치해석영역에서 solid에 해당하므로 격자를 형성하지 않았고 sparger 방출구 부분은 Dirichlet 조건인 입구조건을 주기위해서 방출구를 모사하는 블록은 계산격자로 형성하지 않고 빈 공간으로 두었다. 해석대상격자의 출구조건은 IRWST의 상부가 공기로 채워졌기 때문에 대기압의 공기만 통과할수 있는 Neumann 압력출구조건을 주었다. 절단된 해석대상격자 부분에서는 수조수의 유동이 약할 것으로 예상되어 대칭조건을 적용하지 않고 벽면조건을 주었다. 초기조건은 한국전력기술에서 제공한 자료를 바탕으로 수조수와 공기의 온도, 압력은 29℃, 대기압으로 설정하였고 수조수의 초기 높이는 그림 8과 같이 3.65m 로 하였다[7].

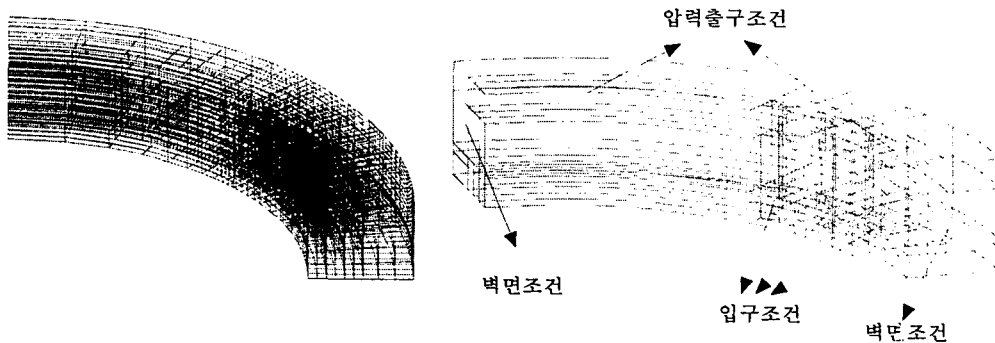
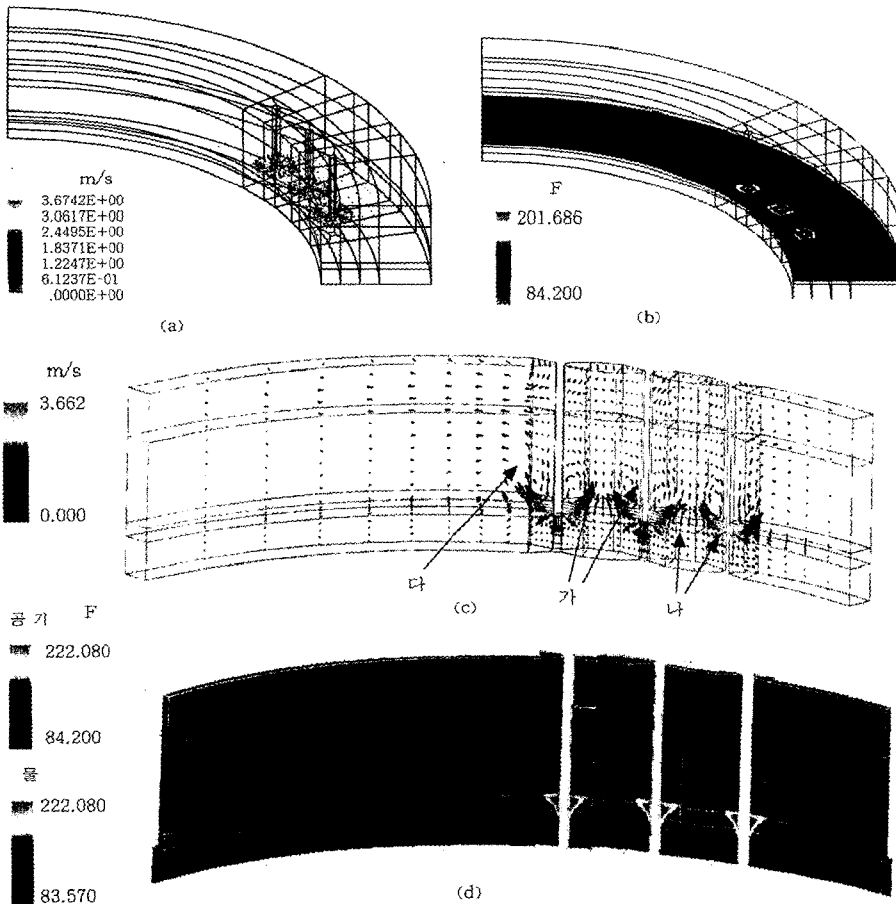


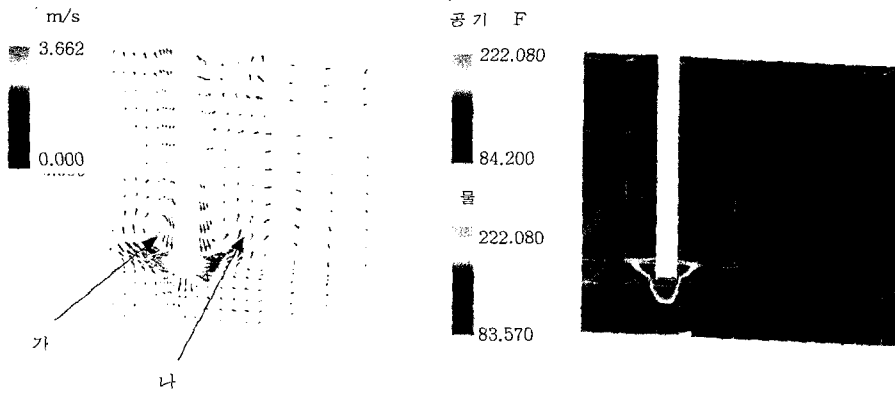
그림 8 해석대상격자 및 경계조건

3.4 해석결과

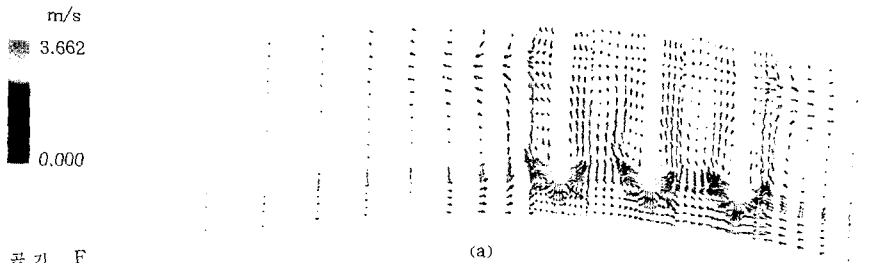
IOPOSrv시 원자로냉각재가 IRWST 수조로 방출될 때의 열수력적 현상을 CFX로 약 5초 동안 해석하여 다음과 같은 결과를 얻었다. IOPOSrv후 2.5초에서 IRWST 수조 내의 속도 및 온도 분포는 그림 9에 나타나 있고 5.5초에서의 속도 및 온도분포는 그림 10에 나타나 있다. 그림 9의 (a), (b)에서와 같이 IOPOSrv시 원자로냉각재는 각 sparger를 통해서 약 3.7m/s로 균일하게 방출되고 이로 인해서 sparger 주변의 수조수 온도는 상온인 84 °F에서 150~200 °F로 상승함을 알 수 있다. 유동형상을 자세히 살펴보기 위해 그림 9의 (a), (b)를 sparger가 위치한 곳을 기준으로 원주방향으로 절단해 보면 (c), (d)와 같다. 이 그림을 이용해서 sparger사이의 유동특징을 살펴보면, 방출되는 냉각재가 그림 9에서 (c)의 "가"와 같이 위쪽으로 향하다가 선회하여 다시 방출구쪽으로 흐르는 것을 알 수 있다. 이것은 부력 및 방출된 냉각재들 사이의 상호작용 때문에 일어난

것으로 판단된다. Sparger 방출구 밑쪽 "나"에서도 "가"의 영향으로 위쪽으로 향하는 유동이 있음을 알 수 있다. 그림 9에서 (c)의 "가" 지점에서와 같이 sparger 방출구 주변에서 방출구쪽으로 선회하여 오는 수조수의 온도가 불안정 증기응축 관련 국부적 온도이다. 오른쪽과 왼쪽에 위치한 sparger를 통해서 분출된 냉각재는 다른 sparger에서 분출된 냉각재의 영향을 받지않기 때문에 "다"와 같이 부력효과로 인해 45도 방향으로 위로 상승하여 각각의 벽면쪽으로 흘러감을 알 수 있다. 이와 같은 유동형태로 인해서 온도분포는 그림 (d)와 같이 각 sparger 45도 위쪽 부근에서 약 170~180 °F를 나타낸다. 또한 가운데 sparger를 기준으로 측면방향으로 절단한 그림은 (e), (f) 같. 이 그림에서도 왼쪽 sparger 분출구에서 방출된 냉각재는 "가"와 같이 벽면에 부딪혀서 다시 분출구쪽으로 선회하여 되돌아오고 오른쪽 분출구에서 방출된 냉각재는 45도 방향으로 상승하여 올라갔다다 다시 하강하면서 오른쪽 벽면으로 흘러감을 알 수 있다. 이런 유동현상으로 온도분포는 (f)와 같이 나타난다. IOPOSRV후 5.5초에서의 속도 및 온도분포는 그림 10과 같다. 전체적인 속도 및 온도분포는 2.5초에서와 거의 유사하며, 단지 2.5초에 비해서 냉각재 방출 양이 많아져 그림 10의 (a), (c)와 같이 IRWST내에서 방출된 냉각재의 진행방향을 명확히 알 수 있다. 이와 같은 유동현상에 의해 온도분포는 (b), (d)와 같이 나타난다. 따라서 본 계산에서 IOPOSRV시 원자로냉각재가 방출된 후 5.5초 까지는 국부적 온도요건을 초과하지 않음을 알 수 있다

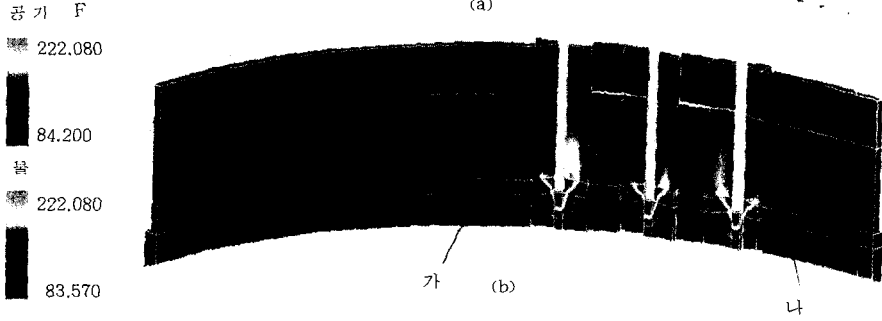




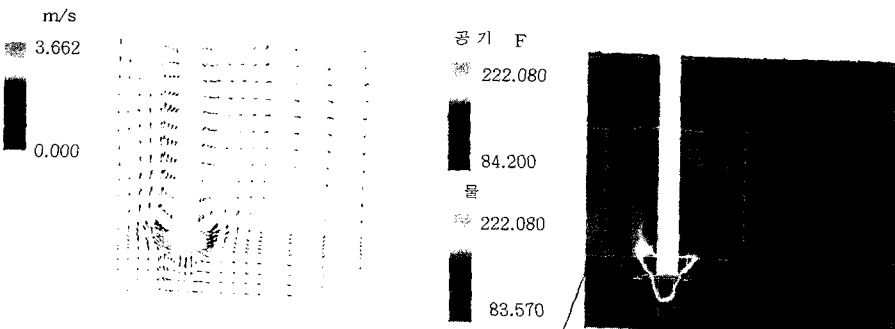
(e) (f) 그림 9 2.5초에서의 속도 및 온도분포



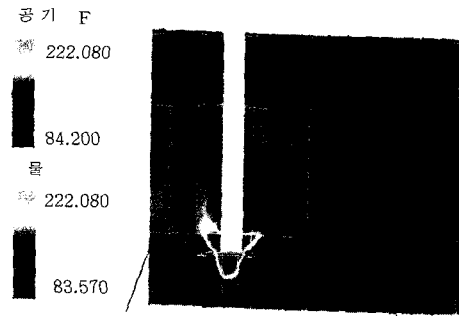
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 10 5.5초에서의 속도 및 온도분포

4. 결론 및 향후연구과제

차세대원자로의 안전감압계통 및 IRWST의 설계가 불안정 증기응축 관련 온도요건을 만족하는지를 조사하기 위한 예비평가로 안전감압계통의 설계기준사고인 IOPOSRV시 원자로 냉각재가 IRWST 수조로 방출 될 때의 열수력적 현상을 범용 전산유체코드인 CFX를 사용하여 천이상태로 해석하였다. 본 해석을 통하여 원자로냉각재가 sparger를 통해서 방출될 때의 유동형상은 부력 및 방출된 냉각재들 사이의 상호작용이 크게 영향을 미침을 알 수 있다. 또한 IOPOSRV 개시 후 약 5.5초까지는 IRWST 수조내의 국부적 온도가 불안정 증기응축 관련 온도요건을 초과하지 않음을 확인하였다. 그러나 차세대원자로 안전감압계통 및 IRWST 설계가 최종적으로 불안정 증기응축 관련 온도요건을 만족하는지 여부와 IRWST 냉각계통의 흡입 및 배출구의 최적위치를 평가하기 위해서는 본 계산을 천이과정으로 2000초 정도 계산을 해야한다. 따라서 이러한 계산을 수행하는데 있어 효과적인 방법을 강구해야 한다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. System 80+; " Summary of program to evaluate DCRT issues related to the safety depressurization system and IRWST" , FSP-92-143, ABB CE, 1992
2. " Suppression Pool Temperature Limits for BWR Containments" ,NUREG-0783, NRC
3. " Pressure Suppression Pool Thermal Mixing" , NUREG-3471, NRC
4. " IRWST T/H Load Analysis" , 한국전력기술, 1996
5. " IRWST 열수력 하중 분석" , 한국전력기술, 1997
6. R. T. Lahey and F. J. Moody, " The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor", ANS
7. " IRWST Pressure Dynamics 관련 IR 자료, NES/RD-98024M" , 한국전력기술, 1998
8. 문영태, " IRWST Water Bulk Temperature Calculation, N-001-END379-301" , 한국전력기술, 1997
9. 김원태, " IRWST Water Temperature Distribution Calculation" , N-001-END379-302, 한국전력기술, 1997
10. " ABB-CE Standard Safety Analysis Report for System 80+ Design Certification, ABB CE, 1997
11. 심윤섭, "증기방출계통의 열수력적 특성연구", KAERI/RR-1440/94, 한국원자력연구소, 1994
12. 김환열외 7인, "Quenching Tank내 Bubble 거동과 최적의 Sparger 설계에 관한 연구", KAERI/TR-962/98, 한국원자력연구소, 1998
13. 조봉현외 4인, "증기방출배관의 급격과도현상에 대한 해석적 연구", 한국에너지공학회지, 제7권 제2호, 1998
14. CFX 4.2 User Guide, AEA Technology, 1998