2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

스파저 및 상류배관계통 유동특성 분석

Analysis of Flow Behaviors in Sparger and its Upstream Piping System

이병은, 권순범
경북대학교 기계공학부
대구광역시 북구 산격 3 동 1370

안형준, 방영석, 김인구
한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

가압기로부터 증기가 방출되는 경우 IRWST(In-containment Refueling Water Storage Tank)는 열침원 기능을 수행한다. 고온고압의 증기는 reducer, expander, 90° elbow 와 같은 다양한 형상의 배관을 통과하여 응축수조에 잠겨있는 sparger 를 통하여 응축수조로 방출된다. Sparger 에서 발생되는 수력학적거동은 다양한 운전조건과 복잡한 기하학적 형상으로 인하여 매우 복잡하다. 본 연구에서는 전산유체해석 기법을 이용하여 응축수조에 잠겨있는 sparger 를 통하여 공기방출이 일어나는 경우 발생되는 수력학적 거동을 조사하였다. Sparger 를 통하여 물 및 공기방출이 진행되는 동안 sparger header 에 작용하는 압력의 영향을 조사하였다. 아울러 sparger 를 포함한 IRWST 설계 및 공기방출 메커니즘에 대한 보다 자세한 이해를 위하여 sparger 를 통하여 공기방출이 진행되는 동안 나타나는 IRWST 내부 압력진동을 조사하였다.

Abstract

The In-containment Refueling Water Storage Tank (IRWST) has the function of heat sink when steam is released from the pressurizer. The steam having high pressure and temperature pass through various type of tubes, such as reducer, expander, and 90° elbow etc., and finally discharged into condensation pool through spargers submerged into it. The hydrodynamic behaviors occurring at the sparger are very complex because of the wide variety of operating conditions and the complex geometry. Hydrodynamic behavior when air is discharged through a sparger in a condensation pool is investigated using CFD techniques in the present study. The effect of pressure acting on the sparger header during both water and air discharge through the sparger is studied. In addition, pressure oscillation occurring during air discharge through the sparger is studied for a better understanding of

mechanisms of air discharge and a better design of the IRWST, including sparger.

1. 서 론

차세대원자로에 새롭게 도입되는 격납건물내재장전수탱크(IRWST: In-containment Refueling Water Storage Tank)는 안전주입계통(safety injection system)과 격납건물살수계통(containment spray system)에 냉각수를 공급한다. 아울러 원자력발전소 사고 발생시 가압기로부터 증기가 방출되는 경우 열침원(heat sink) 기능을 수행한다. 원자력발전소 사고 발생시 고온고압의 증기는 POSRV(Pilot Operated Safety Relief Valve) 하류에 설치되어 있는 다양한 형상의 배관을 통과하여 최종적으로 IRWST 내부에 잠겨있는 sparger 를 통해서 응축수조(condensation pool)로 방출된다. POSRV 상류와 하류의 압력차이는 매우 극심한 관계로 POSRV 가 개방되는 경우 각종 배관에서는 복잡한 비정상상태 유동이 형성된다. 또한, sparger 에서는 물, 공기, 증기의 순으로 작동유체 방출과정이 진행되며, 이 과정 중에 심각한 수력학적 하중이 발생되는 관계로 핵심 부품(core parts)들이 손상을 받을 우려가 있다.

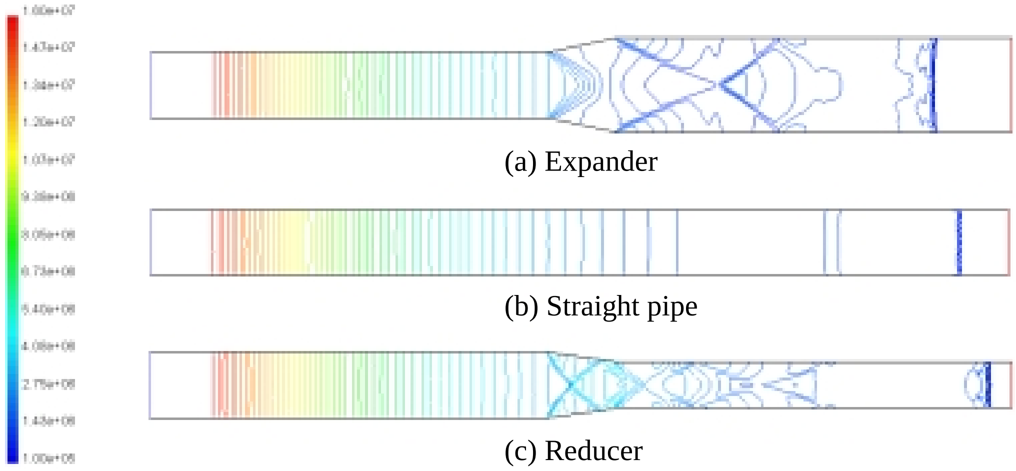
Sparger 에서 작동유체 방출이 진행되는 동안 발생되는 수력학적 거동은 극심한 운전조건과 복잡한 구조로 인하여 매우 복잡하다. 또한, 방출과정이 진행되면서 작동유체는 물, 공기, 증기의 순으로 바뀌게 된다. 더구나 증기방출이 일어나는 동안에는 응축수조에서 증기응축이 일어나는 관계로 상변화(phase change)가 동반된다. 이런 복잡한 유동을 해석하기 위하여 많은 연구자들이 기포방출에 대한 실험적/이론적 연구를 수행하고 있다[1-5]. 공기방출이 일어나는 경우 다양한 크기와 형상을 가지는 하나의 공기방울 군(group)이 형성된다. 또한 공기방울의 거동은 병합(coalescence) 및 분열(breakup)로 인하여 매우 불규칙하다. 따라서 많은 연구자들이 공기방울의 병합 및 분열에 대한 연구를 통하여 이들의 거동을 예측하기 위한 모델을 제시하였다[6-7]. 한편, Tiselj and Petelin[8]은 컴퓨터해석을 통하여 원자력발전소 사고를 모사하였다. 그러나 sparger 를 통하여 작동유체 방출이 일어나는 동안 발생되는 많은 현상들은 아직 확실하게 규명되지 않고 있다.

본 연구에서는 컴퓨터해석을 통하여 POSRV 하류에 위치하는 다양한 형상의 배관에서 POSRV 가 갑자기 개방되었을 때 형성되는 유동을 조사하였다. 이는 현재 배관해석에서 널리 사용되고 있는 RELAP5 코드의 1 차원해석 결과의 타당성을 조사하기 위함이다. 한편, sparger 를 통하여 응축수조로 공기방출이 일어나는 경우 발생되는 수력학적 거동을 조사하였다. 이를 위해 Sparger 를 통하여 물 및 공기방출이 진행되는 동안 sparger header 에 작용하는 압력의 영향을 조사하였다. 또한 sparger 를 포함한 IRWST 의 설계와 공기방출 메커니즘에 대한 자세한 이해를 위하여 공기방출 동안에 일어나는 압력변화(pressure oscillation)를 연구하였다.

2. 배관유동해석

POSRV 가 작동되는 경우 유동 특성은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 하나는 밸브개방시간(valve opening time)이 아주 짧은 경우이고, 다른 하나는 밸브개방시간이 약간 긴 경

우이다. 밸브개방시간이 짧은 경우 밸브 전단은 고온고압 상태이고 후단은 저온저압 상태의 정지유동이 높은 압력차에 의해서 순간적으로 유동이 형성된다. 이는 고온고압 측과 저온저압 측 사이에 격막(diaphragm)이 설치되어 있다가 그 격막이 순간적으로 파열될 때 일어나는 유동과 유사하다. 따라서 밸브개방시간이 짧은 경우의 유동은 shock tube 유동과 거의 같다. Shock tube 유동에 대해서는 정확해(exact solution)가 존재하고 또 그 유동 형태가 잘 알려져 있어서 쉽게 문제해결이 가능하다. 그러나 일반적인 경우 밸브 후단에 복잡한 구조물이 설치되어 있거나 배관 형상이 직선관이 아니라 확대관, 축소관, 또는 곡관과 같은 다양한 형태의 관이 연결되기 때문에 실제적으로는 수치해석이나 실험을 통해서 유동을 해석해야 한다. 한편 밸브개방시간이 짧은 경우 밸브 후단에 발생되는 급격한 유동변화로 인하여 구조물의 구조적 안정성 여부를 염려해야 되는 상황에 직면하게 된다. 이런 문제를 회피하기 위하여 밸브개방시간을 지연시키는 방법이 적용될 수 있다. 본 연구에서는 밸브개방시간이 짧은 경우에 국한시켜 문제를 해석하였다.



(a) Expander

(b) Straight pipe

(c) Reducer

Fig. 1 Pressure distribution

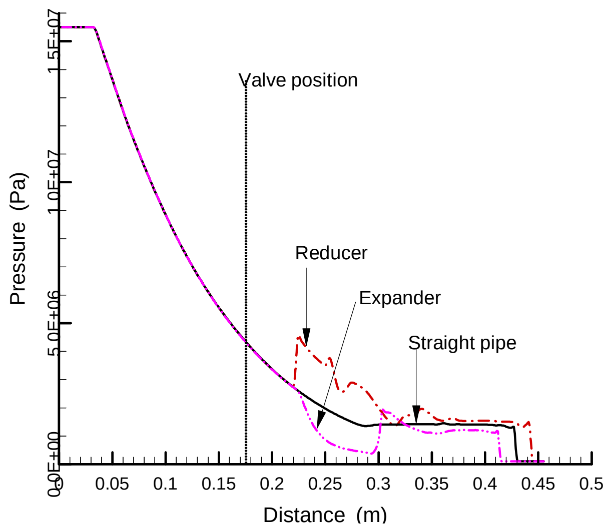


Fig. 2 Pressure distribution, P_{driver} = 15,508,929 Pa, P_{driven} = 101,325 Pa, Time = 0.0002 sec.

POSRV 개방 시 reducer 와 expander 에서 발생되는 유동을 분석하기 위하여 직선관 유동과 비교하여 살펴보았다. 해석에 이용된 유동조건으로서 밸브 상류압력은 153 기압이고 하류에서의 압력은 1 기압이며 작동유체는 공기이다. Figure 1 에 압력분포를 나타내었는데, 여기서 볼 수 있듯이 확대부 및 축소부와 그 하류에서 팽창파(expansion wave) 및 충격파(shock wave)가 형성되는 것을 볼 수 있다. 또한 유동 전면에 수직충격파(normal shock wave)가 형성되는 것을 알 수 있다. Figure 2 는 배관 중앙에서의 압력분포를 나타낸 것이다. Reducer 및 expander 에서의 유동은 직선관 유동과 비교하여 확대부 및 축소부에서 약간의 차이를 나타내내고 있으나 큰 차이는 아니다. 다만 이 두 그림에서 볼 수 있듯이 유동 전면에 형성되는 수직충격파의 속도가 직선관에 비하여 expander 에서는 느려지고 reducer 에서는 빨라지는 것을 알 수 있다.

유동의 진행방향이 바뀌는 곳에 설치되는 90° elbow 에는 비교적 복잡한 유동이 형성된다. 본 연구에서는 90° elbow 에 대한 2 차원해석 및 3 차원해석 결과를 비교하여 2 차원해석으로 3 차원해석을 대체할 수 있는가의 여부를 조사하였다. 또한, 90° elbow 에서의 곡률이 유동에 미치는 영향을 조사하였다. Figure 3 은 본 연구에 사용된 90° elbow 의 기하학적 형상을 나타내고 있다. 본 연구에서 계산영역을 작게 설정하기 위하여 직경 35 mm 의 튜브로 구성되어 있는 수평 직선관 70 mm 지점에 POSRV 가 설치되어 있다고 가정하였다. POSRV 상류 압력은 10 기압이고 하류 압력은 1 기압으로 설정하였으며, 작동유체는 공기이다.

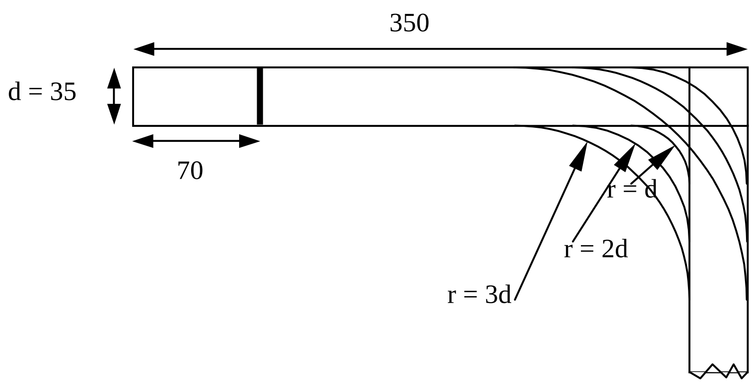
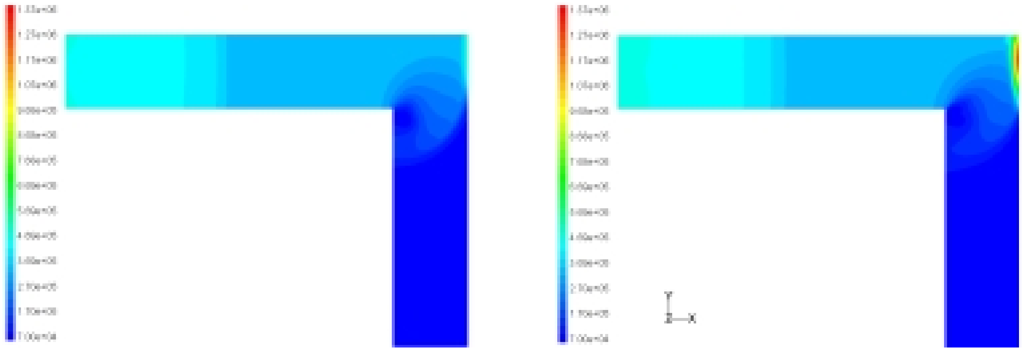
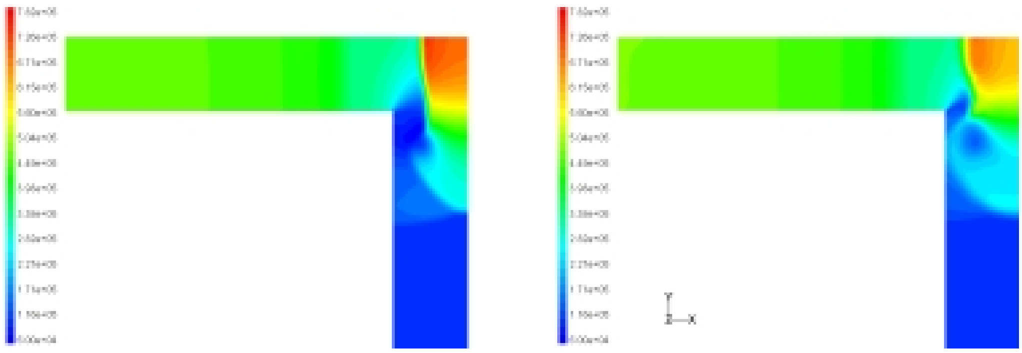


Fig. 3 Outline of the 90° elbow.

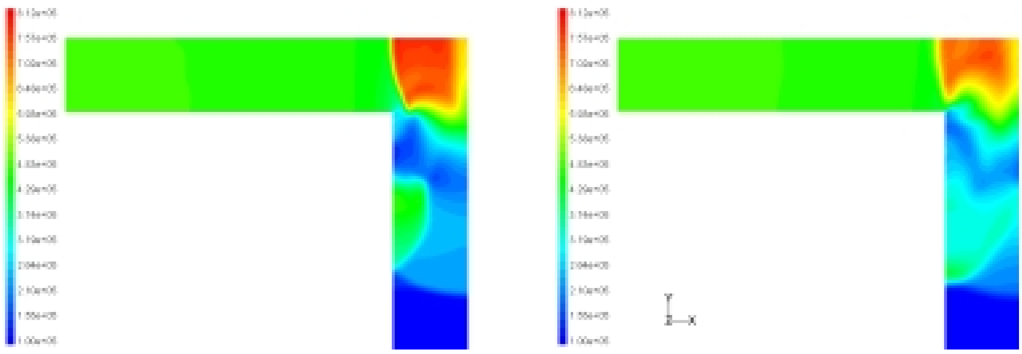
Figure 4 에 연결부에서 곡률이 zero(r = 0)인 90° elbow 에 형성되는 유동에 대한 2 차원해석 및 3 차원해석 결과를 비교하였다. 이 그림으로부터 2 차원해석 결과와 3 차원해석 결과는 정성적으로 거의 일치함을 알 수 있다. 또 한가지 중요한 사실은 90° elbow 를 지난 유동은 하류로 가면서 점점 1 차원유동 형태로 변해간다는 것이다. 따라서 90° elbow 부분에서 발생되는 유동특성을 반영할 수 있다면 1 차원해석을 통해서도 배관해석을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) Time = 0.000469 sec



(b) Time = 0.000537 sec



(c) Time = 0.000611 sec

Fig. 4 Pressure distribution in a 90° elbow (LHS = 2-d analysis, RHS = 3-d analysis).

2 차원해석과 3 차원해석의 정량적 비교를 위하여 x-방향으로 작용하는 힘의 크기를 비교하였다. 밸브개방시간이 아주 짧은 경우 관 내부를 흐르는 유동은 수직충격파 형태이다. 일반적으로 밸브 전후의 압력 차이가 큰 경우 이 수직충격파의 이동속도는 음속(sonic velocity)보다 빨라서 충격파 하류에 있는 물체를 인식하지 못하게 된다. 따라서 90° elbow 에서처럼 유동의 방향이 급격히 변하는 경우 관 벽면에 충격파가 부딪치게 된다. 이 경우 두 가지 힘이 관 벽면에 작용하게 되는데, 그 가운데 하나는 갑작스러운 관 내부압력 변화이고 또 다른 하나는 고속의 유동이 순간적으로 벽면에 부딪치면서 생기는 동압

(dynamic pressure)에 의한 힘이다. 이런 두 가지 변화는 아주 극히 짧은 시간에 동시에 일어나게 된다. 또한 벽에 부딪친 충격파는 반사되어 반대 벽면에 또 다시 부딪치게 되는데 이런 변화가 연속적으로 일어나게 된다. 따라서 90° elbow 에서는 아주 복잡한 유동이 일어나며 순간적으로 관 내벽에 서로 반대방향의 큰 교번하중이 작용하게 된다. 따라서 이 교번하중에 대한 주기와 크기를 비교하면 유동특성을 정량적으로 비교할 수 있다.

Figure 5 는 90° elbow 에 x-방향으로 벽면에 작용하는 힘의 크기 변화를 나타내었다. 이 그림에서도 면적효과를 배제시키면 2 차원해석결과와 3 차원해석결과가 거의 유사하다는 것을 확인할 수 있다. 그리나 교번하중이 생기는 주기는 약간 다르게 나타나고 있다. 따라서 진동특성을 고려해야 되는 경우에는 3 차원해석이 요구된다는 것을 알 수 있다.

Figure 6 에 연결부에서 서로 다른 곡률을 가지는 90° elbows 에 대한 x-방향 힘의 변화를 나타내었다. 이 그림으로부터 연결부에서의 곡률이 커질수록 x-방향으로 작용하는 힘의 변화 폭이 작아진다는 것을 확인할 수 있다. 한편 이와 같은 결과들을 1 차원해석 결과와 비교하는 것은 매우 유익한 작업이 될 것이다. 본 연구에서는 1 차원해석은 배제되었다.

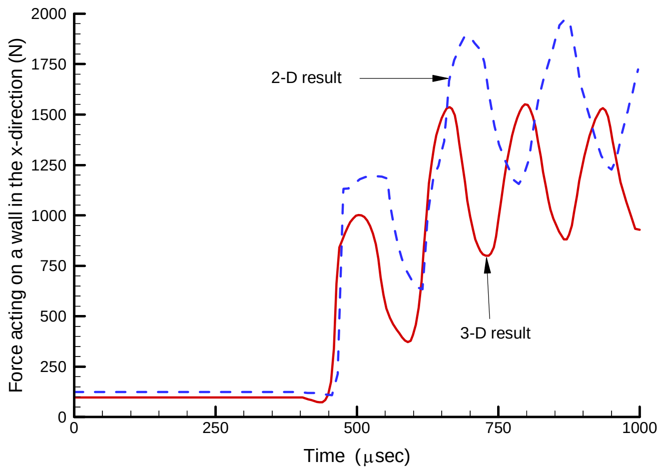


Fig. 5 Force acting on the wall in the x-direction for a 90° elbow having a zero of radius at the corner.

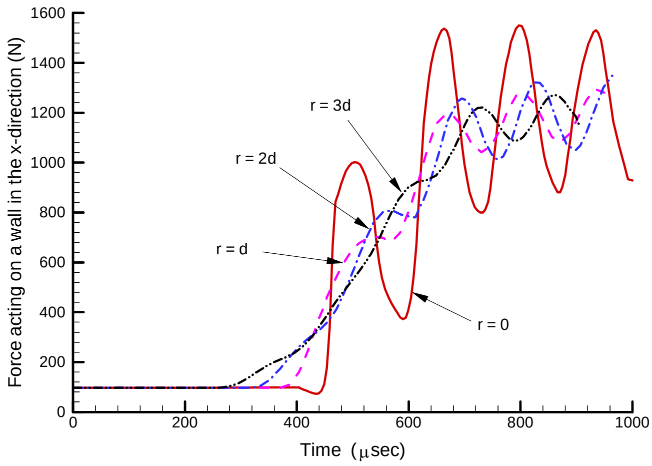


Fig. 6 Comparison of force acting on the wall in the x-direction for 90° elbows having different radii at the corner.

3. VOF 모델

Hirt et al.[9]은 2 상유동(two-phase flow)의 두 상 사이의 경계면을 계산하기 위하여 VOF(Volume of Fluid) 모델을 개발하였다. 이 VOF 모델은 많은 단열 2 상유동 모사에 성공적으로 이용되고 있다. 그러나 이 모델은 상변화에 대한 완전한 형태의 에너지 방정식이 개발되지 않고 있는 관계로 상변화가 일어나면서 열전달이 포함된 2 상유동 문제에는 적용되지 못하고 있다. VOF 모델에 대한 이용방법 및 보다 자세한 사항은 참고문헌[10]에 나와있다.

VOF 모델의 중요 특징 가운데 하나는 고정격자계(fixed grid system)를 사용한다는 것이다. 고정격자계는 이동격자계보다 계산시간이 짧아지는 장점이 있다. VOF 모델에서 모든 계산격자에서 각각의 유체에 대한 체적분율(volume fraction)은 유체들에 의해 공유되는 한 세트의 운동량방정식에 의하여 계산되어 진다.

VOF 모델은 두 가지 이상의 유체들이 서로 섞이지 않는 경우에 대한 유동해석을 위해서 개발되었다. 이를 위하여 각각의 유체에 대한 추가적인 상(phase) 이외에 하나의 새로운 변수가 도입되는데 그것이 바로 체적분율(volume fraction)이다. 그리고 각각의 제어체적(control volume)에서 모든 유체의 체적분율 합(sum)은 1(unity)이 된다. 모든 변수 및 물성치(variables and properties)는 각각의 유체에 의하여 공유되며 각각의 위치에서 체적분율을 알고 있는 한 체적평균값(volume averaged values)을 나타낸다. 그러므로 어느 한 격자(cell)에서의 변수나 특성은 체적분율 값에 따라서 순수하게 하나의 유체에 대한 대표값일 수도 있으며, 또는 여러 유체의 혼합체(mixture)에 대한 대표값이 될 수도 있다. 즉, 만약 q 번째 유체의 체적분율을 α_q 로 표기한다면 다음과 같은 세가지 경우가 가능하다.

$\alpha_q = 0$	the cell is empty (of the *q*th fluid)
$\alpha_q = 1$	the cell is full (of the *q*th fluid)
$0 < \alpha_q < 1$	the cell contains the interface between the fluids

따라서 이 α_q 의 값을 기준하여 계산영역 내의 각 제어체적에 적당한 특성과 변수가 할당되게 되는 것이다.

각 상(phase) 사이의 경계면(interface)은 상 가운데 하나(또는 다수)의 체적분율에 대한 연속방정식(continuity equation)을 이용하여 구한다. q 번째 상에 대한 체적분율 연속방정식은 다음과 같다:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = S_{\alpha_q} \tag{1}$$

이 식의 오른쪽에 있는 source term 은 VOF model 에서는 0(zero)이 된다. 한편 체적분율 방정식에서 1 차상(primary phase)에 대한 체적분율은 직접 풀지 않고 다음과 같은 관계식을 이용하여 구한다.

$$\sum_{q=1}^{n}\alpha_q = 1 \tag{2}$$

유체의 물성치는 각 제어체적에 존재하는 유체들에 의하여 결정된다. 예를 들면, 두 개의 상이 존재하는 유동장에서 상을 하첨자 1 과 2 로 표기하는 경우 두번째 상에 대한 체적분율을 구했다면 각 cell 에서의 밀도는 다음과 같이 구해진다.

$$\rho = \alpha_2\rho_2 + (1-\alpha_2)\rho_1 \tag{3}$$

일반적으로 N 개의 상을 가지는 유동장의 경우 밀도는 다음과 같이 구해진다.

$$\rho = \sum\alpha_q\rho_q \tag{4}$$

VOF model 에서는 전 계산영역에 걸쳐서 하나의 운동량 방정식이 사용된다. 따라서 각각의 상은 속도장을 서로 공유한다. 따라서 단일 cell 에서 모든 유체는 같은 속도를 가진다. 운동량 방정식은 아래 보여진 것처럼 물성치 ρ와 μ를 통해서 모든 상의 체적분율에 의해 좌우되게 된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho u_j + \frac{\partial}{\partial x_i}\rho u_i u_j = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i}\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) + \rho g_j + F_j \tag{5}$$

4. Sparger 유동해석

본 연구에서는 sparger 를 통한 공기방출과 공기방출이 IRWST 에 미치는 영향을 조사하기 위하여 수치적 연구를 수행하였다. 공기방출 동안에 일어나는 수력학적 거동을 조사하기 위하여 ‘I’형 sparger 가 선정되었다. 이 sparger 는 Fig. 7 에 나타나 있는 것처럼 하중감소링(LRR; Load Reduction Ring), 10 mm 직경을 가지는 144 개의 작은 구멍과 하부에 25 mm 의 직경을 가지는 하나의 구멍으로 구성되어 있다.

Figure 8 에 sparger 와 IRWST 에 대한 outline 을 나타내었다. 또한 이 그림에 나와있는 것처럼 공기방출을 축대칭 형태로 해석하기 위하여 2 차원 사각형 비정렬격자를 이용하였다. 여기서는 LRR 과 sparger head 주위에 대한 격자만을 나타내었다. Sparger head 에는 작은 구멍들이 9 열로 배치되어 있으나 본 연구에서는 축대칭으로 해석을 수행하기 위하여 이들 작은 구멍들을 3 개의 원주방향 홈으로 나타내었다. 그 홈들의 높이는 전체 방출면적을 기준으로 산출하였으며, 여기서 방출계수(discharge coefficient)는 고려하지 않았다. 공기방출이 일어나는 동안에 두 개의 공기방울 군이 형성되는데 하나는 LRR 근처에 그리고 다른 하나는 sparger head 근처에 형성된다. 한편, sparger head 를 통하여 공기방출이 진행되는 동안 sparger head 의 형상에 따라서 하나의 큰 공기방울이나 아니면 작은 공기방울들이 형성된다. 일반적으로 큰 공기방울은 작은 공기방울들에 비해서 응축수조 내부에

서 보다 더 큰 압력변화를 유발시키기 때문에 바람직하지 못한 것으로 알려져 있다. 그러나 불행하게도 본 연구에서는 축대칭해석을 수행한 관계로 sparger head 에서 방출되는 공기방울의 크기를 평가하지 못하였다. 따라서 본 연구는 LRR 을 통한 공기방출에 대해서 중점적으로 살펴보았다.

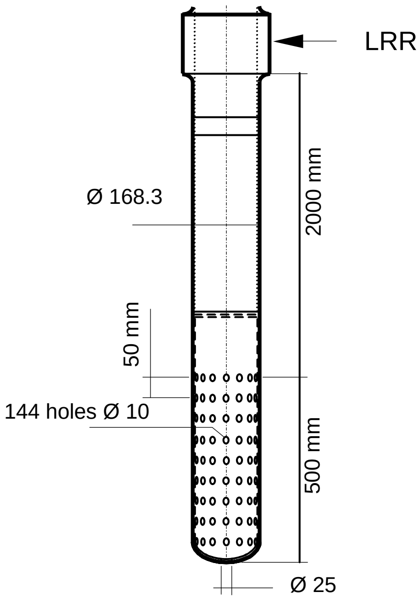


Fig. 7 Schematic of I-type sparger.

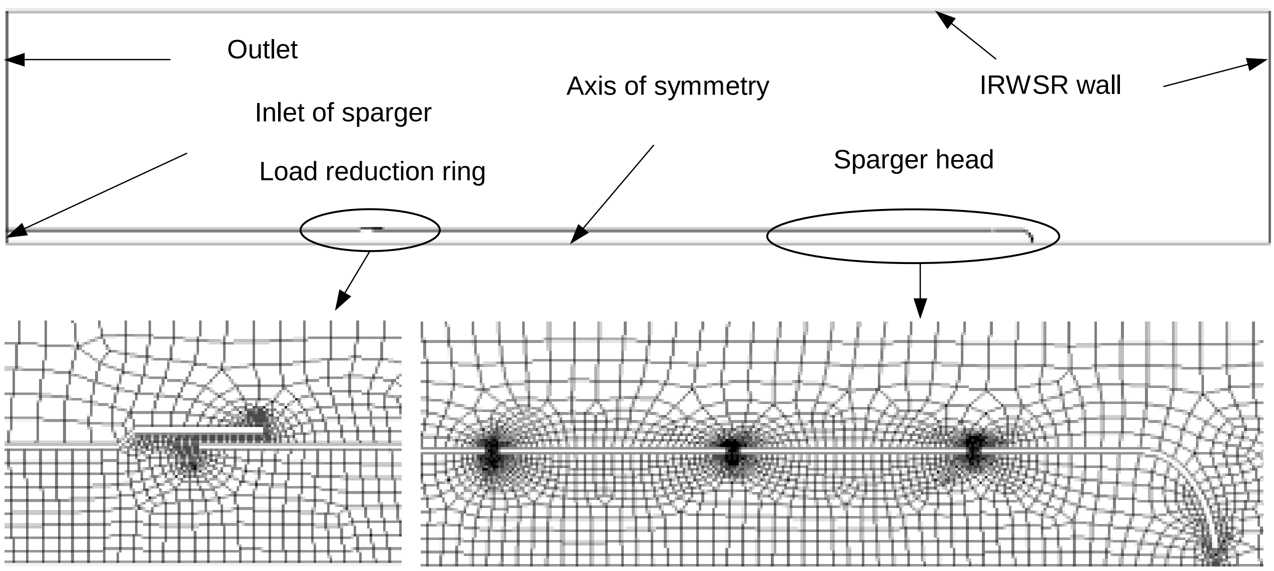


Fig. 8 Outline and grid for I-type sparger.

본 연구에서 입구에서는 압력경계조건을 사용하였다. 입구에서 압력경계조건을 사용하는 경우 총압력을 사용해야 한다. 그러나 실제운전조건에서 sparger header 에 작용하는 시

간에 따른 압력변화(pressure history)를 측정하기는 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서 입구 압력은 Park et al.[11]이 unit cell test 를 통하여 획득한 압력을 사용하였다. 이 압력은 Fig. 9 에 나타냈는데, 안전밸브 개방 바로 이후에 극심한 압력변화가 발생되고 있음을 알 수 있다.

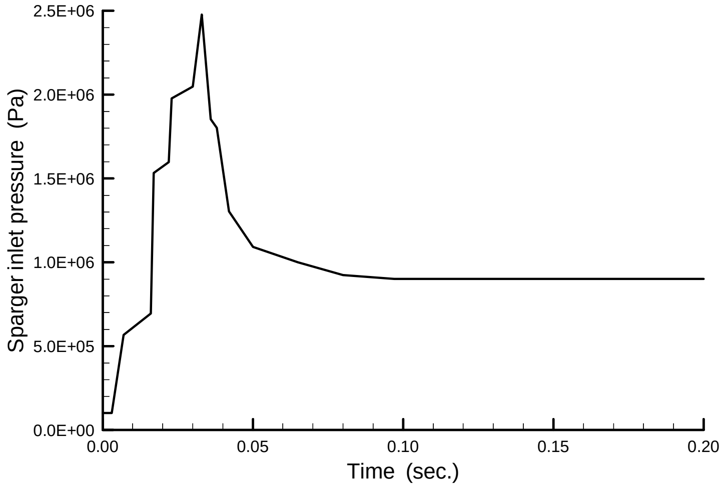


Fig. 9 Pressure history at the inlet of a sparger.

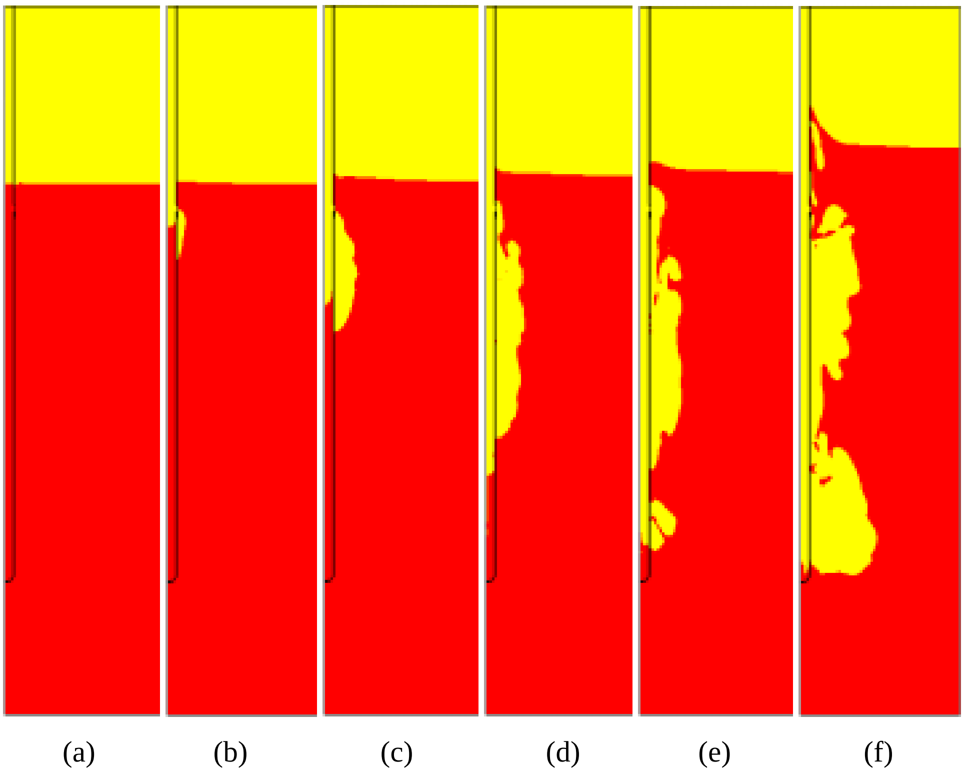


Fig. 10 The shape of the bubble during air discharge (a) Time = 0.0 sec, (b) Time = 0.0325 sec, (c) Time = 0.060 sec, (d) Time = 0.130 sec, (e) Time = 0.170 sec, (f) Time = 0.270 sec.

Figure 10 은 공기방출이 진행되는 동안 수치해석을 통해 얻어진 공기-물의 경계면을 나타낸다. 일반적으로 공기방출이 진행되는 초기에 구형의 공기방울이 LRR 및 sparger head 주위에 형성된다고 알려져 있다. 따라서 Figure 10 에서 볼 수 있듯이 수치해석을 통해서 구형의 공기방울을 예측할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

Figure 11 은 LRR 을 통하여 공기방출이 진행되는 동안 sparger head 높이의 IRWST 벽면에 작용하는 압력을 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 다음과 같은 세 가지 중요한 사항을 확인할 수 있다: 첫번째는 POSRV 개방 후에 발생되는 충격파(shock wave)로 인하여 발생되는 sparger header 에서의 극심한 압력변화(Fig. 9 참조)는 LRR 을 통하여 물방출이 진행되는 동안에는 IRWST 벽면의 압력변화에 영향을 미치지 못한다는 것이다. 두 번째는 LRR 을 통하여 공기방출이 시작되는 순간 IRWST 벽면에서의 압력이 급격히 증가한다는 것이다. 세 번째는 LRR 을 통하여 공기방출이 진행되는 동안에 IRWST 벽면의 압력변화가 심하게 발생된다는 것이다. 그러나 이 현상은 극히 짧은 시간 동안 진행되다가 다시 압력은 떨어지고 변화도 매우 작아지게 된다.

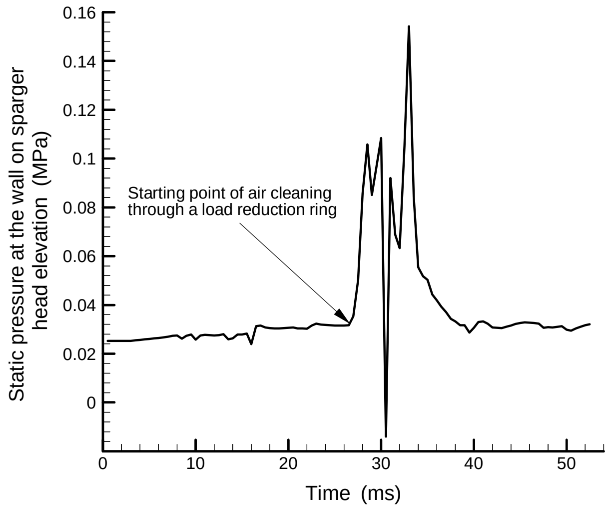
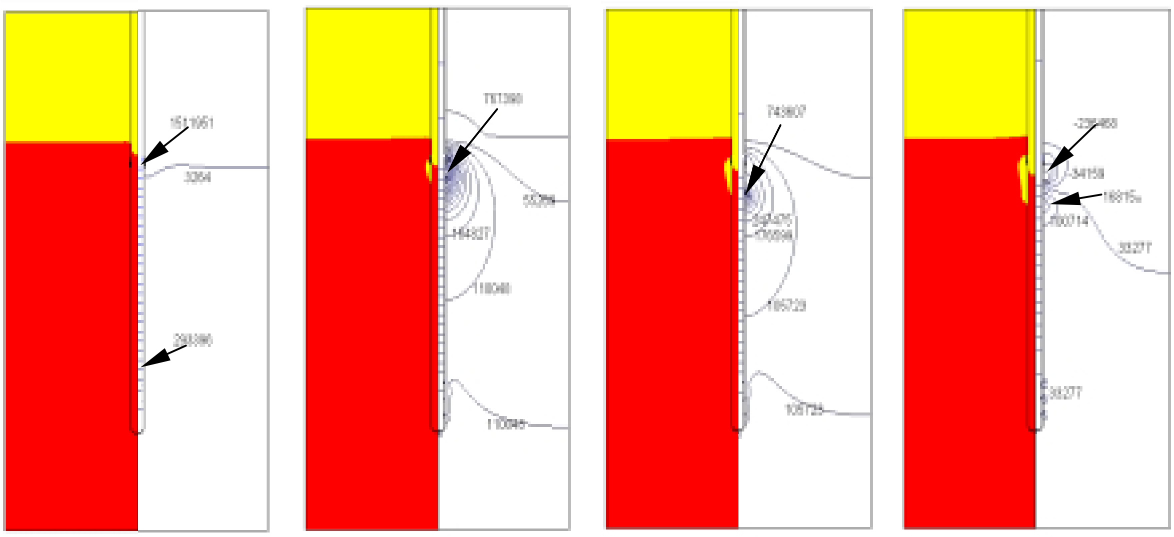


Fig. 11 IRWST wall pressure on sparger head elevation during air cleaning through a load reduction ring.

LRR 을 통하여 공기방출이 시작된 직후 발생되는 IRWST 내부에서의 급격한 압력증가 원인을 살펴보기 위하여 물 및 공기방출에 대한 자세한 조사를 수행하였다. Figure 12(a)에 LRR 과 sparger head 를 통하여 물방출이 진행되는 동안 IRWST 내부 압력분포를 나타내었다. Figure 12(b)~(d)는 LRR 을 통하여 공기방출이 시작된 직후 IRWST 내부 압력분포를 나타낸 것이다. 물방출이 진행되는 동안 IRWST 내부 압력변화는 매우 작은 편이다. 이는 LRR 과 sparger head 를 통하여 IRWST 로 전달된 압력이 물의 비압축성으로 인하여 IRWST 내부 자유표면에 작용하는 압력과 매우 빠르게 평형을 이루기 때문인 것으로 여겨진다. 한편 공기방출이 시작되는 순간 IRWST 내부압력은 Fig. 12(b)에 나타나 있는 것

처럼 급격히 증가한다. Figure 1 에 주어진 압력을 사용하는 경우 LRR 에서 물방출이 일어나는 동안 물방출 최대속도는 약 50 m/s 가 됨을 수치해석을 통하여 확인하였다. 그러나 공기방출이 시작되는 경우 이 방출속도는 급격히 증가하는데, 본 연구에서는 이 속도가 약 1570 m/s 가 됨을 확인하였다. 이와 같은 급격한 방출속도 증가는 마치 햄머링(hammering)과 같은 현상을 초래할 것으로 여겨진다. 또한 공기방출이 시작되는 순간에 발생되는 IRWST 내부압력의 급격한 증가는 sparger header 에 작용하는 압력이 LRR 을 통하여 IRWST 내부로 직접 전달되기 때문인 것으로 여겨진다.

일반적으로 공기방출이 진행되는 동안 방출된 공기방울은 주기적으로 수축과 팽창을 반복되며, 이는 IRWST 내부 큰 압력진동(pressure oscillation)의 가장 큰 원인이라고 알려져 있다. LRR 을 통하여 공기방출이 진행되는 동안에 발생되는 IRWST 내부 압력진동을 조사하기 위하여 IRWST 내부 압력분포를 조사하였다. IRWST 내부 응축수조에서의 최대압력 위치는 공기방출이 진행됨에 따라 sparger tube 를 따라 하방으로 내려가며, 이로 인해 sparger head 높이의 IRWST 벽면에서의 압력도 영향을 받게 된다. 이후 응축수조 내부의 최대압력은 작아지게 된다. 이는 방출된 공기방울 근처에 형성되는 최대압력이 물의 비압축성으로 인하여 자유표면의 낮은 압력과 평형을 이루려는 과정으로 여겨진다. 이런 현상은 공기방출 개시 이후 압력진동이 잦아들기 전까지 아주 짧은 시간동안 진행된다. 그 이후 공기는 비교적 안정적으로 방출된다(Fig. 11 참조). 공기는 압축성 유체이지만 본 연구에서는 사용된 전산유체해석코드인 FLUENT 의 제약에 의하여 비압축성 유체로 처리하였다. 따라서 공기방출 동안에 발생되는 IRWST 응축수조 내부의 압력진동은 방출된 공기방울의 주기적인 수축 및 팽창에 의해서 뿐만이 아니라 주기적으로 형성되는 높은 압력이 물의 비압축성으로 인하여 IRWST 자유표면에 작용하는 낮은 압력과 평형을 이루려는 특성에 의한 것이라 결론 내릴 수 있다.



(a) (b) (c) (d)

Fig. 12 Pressure distribution during water and air discharge (Pa), (a) Time = 0.002 sec, (b) Time = 0.0325 sec, (c) Time = 0.035 sec, (d) Time = 0.0375 sec.

큰 압력진동 후의 안정된 증기방출 동안에 응축수조 내부 압력은 Fig. 12(d)에서 볼 수 있는 것처럼 낮아지게 된다. 그런데 이 그림으로부터 LRR 주위에 부압이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 캐비테이션으로 여겨지는 이런 부압이 어떻게 발생되는지 아직 명확하지 않다.

본 연구에서 sparger head 를 통한 공기방출은 LRR 을 통한 공기방출과 거의 유사한데, 이는 축대칭으로 공기방출을 해석하기 위하여 sparger head 에 있는 작은 방출구를 원주 형태의 홈으로 처리했기 때문에 방출 방향만 다를 뿐 LRR 과 거의 유사하기 때문이다. Sparger head 를 통하여 공기가 방출되는 순간에 발생되는 압력진동은 LRR 에서 생기는 그것과 거의 유사함을 확인하였다. 그러나 sparger head 주위에 형성되는 공기방울 형상은 구형이 아니다. 이는 작은 원형 방출구 대신에 원주형 홈을 사용했기 때문인 것으로 여겨진다.

5. 결론

본 연구에서 IRWST 에 잠겨있는 sparger 를 통하여 작동유체가 방출되는 경우 발생되는 수력학적 거동을 수치해석 방법을 통해서 살펴보았다. Sparger 를 통한 물 및 공기방출을 해석하기 위하여 VOF(Volume of Fluid) 모델을 사용하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다:

1. Sparger 를 통하여 물방출이 진행되는 동안 sparger head 의 압력변화는 IRWST 벽면의 압력에 영향을 미치지 않는다.
2. Sparger 를 통하여 공기방출이 시작되는 경우 IRWST 응축수조에 작용하는 압력은 급격히 증가된다. 이는 sparger 내부의 고압이 직접 응축수조로 전달되기 때문이며, 또한 공기방출속도가 급격히 증가되기 때문이다.
3. 공기방출 동안에 나타나는 응축수조 내부의 압력진동은 방출된 공기의 주기적인 팽창 및 수축에 의한 것일 뿐만이 아니라 국부적으로 형성되는 고압이 물의 비압축성으로 인하여 수조 자유표면 압력과 평형을 이루려는 특성 때문인 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] F. Yamamoto, M. Iguchi, J. Ohta, and M. Koketsu, “Measurement of Bubbling-Jet Two-Phase Flow Using 3-D PTV Based on Binary Image Cross-Correlation Method”, FED-Vol. 209, *Flow Visualization and Image Processing of Mutiphase Systems*, pp. 131-136, 1995.

[2] Y. Murai and Y. Matsumoto, “Three Dimensional Structure of a Bubble Plume – Measurement of the Three Dimensional Velocity”, FED-Vol. 209, *Flow Visualization and Image Processing of Multiphase Systems*, pp. 187-194, 1995.

[3] M.E. Simpson and C.K. Chan, “Hydrodynamics of a Subsonic Vapor Jet in Subcooled Liquid”, *J. Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 271-278, 1982.

[4] L-D. Chen and G.M. Faeth, “Condensation of Submerged Vapor Jets in Subcooled Liquids”, *J. Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 774-780, 1982.
[5] J.C. Weimer, G.M. Faeth, and D.R. Olson, “Penetration of Vapor Jets Submerged in Subcooled Liquids”, *AIChE Journal*, Vol. 19, No. 3, pp. 552-558, 1973.
[6] H. Luo and H. Svendsen, “Theoretical Model for Drop and Bubble Breakup in Turbulent Dispersions”, *AIChE Journal*, Vol. 42, No. 5, pp. 1225-1233, 1996.
[7] M.J. Prince, and H.W. Blanch, “Bubble Coalescence and Break-Up in Air-Sparged Bubble Columns”, AIChE Journal, Vol. 36, No. 10, pp. 1485-1499, 1990.
[8] I. Tiselj And S. Petelin, “Modelling of Two-Phase Flow with Second-Order Accurate Scheme”, *J. Computational Physics*, Vol. 136, pp. 503-521, 1997.
[9] C.W. Hirt and B.D. Nichols, “Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundary”, *J. Computational Physics*, Vol. 39, pp. 201-225, pp. 1981.
[10] FLUENT Inc., “FLUENT manual, User’s Guide”, 1998.
[11] J.K. Park, K.J. Ryu, Y.S. Shim, Y.S. Kim, K.Y. Lee, J. Lee, and Y.I. Kim, “The Analysis of the Characteristics of Steam Condensation and Thermal Mixing inside IRWST and Flow through Pressurizer Discharge Pipe”, *Technical Report*, *KAERI/TR-609/95*, Korea, 1995.