

수조로 방출되는 기포 거동에 대한 수치해석

김환열 · 김영인 · 배운영 · 송진호 · 김희동

한국원자력연구소

Numerical Simulation on the Behavior of Air Cloud Discharging into a Water Pool

Hwan Yeol Kim, Young In Kim, Yoon Yeong Bae, Jin Ho Song and Hee Dong Kim

Korea Atomic Energy Research Institute

요 약

한국형차세대원자로 APR-1400의 안전감압계통이 작동하면 물, 공기 및 증기가 sparger를 통해 격납건물내 핵연료재장전 수조로 차례로 방출된다. 방출 과정 중 생기는 여러 현상 중에서 수조 내의 공기 기포군은 저주파, 고진폭의 진동 하중을 발생하며, 주파수가 침수 구조물의 고유 주파수와 거의 같은 경우에는 구조물에 심각한 영향을 줄 수 있다. 이러한 현상은 복잡하기 때문에 주파수와 하중에 대한 규명은 주로 실험에 의존해 왔으며 수치해석적 연구는 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 sparger를 통해 수조내로 방출되는 공기 기포군의 거동에 대한 수치해석을 상용 열수력 해석 코드인 FLUENT Version 4.5를 사용하여 수행하였다. 다상유동 해석모델중 VOF(Volume Of Fluid) 모델을 사용하여 물, 공기 및 증기 등의 다상유동을 모의하였다. 해석결과를 sparger 개발을 위해 ABB-Atom이 수행하였던 실험결과와 비교하여 만족할만한 결과를 얻었다.

Abstract — If the safety depressurization system of APR-1400, the Korean next generation reactor, is in operation, water, air and steam are successively discharging into a in-containment refueling water storage tank through spargers. Among the phenomena occurring during the discharging processes, the air bubble clouds produce a low-frequency and high-amplitude oscillatory loading, which may result in the most significant damages to the submerged structures if the oscillation frequency is the same or close to the natural frequency of the structures. The involved phenomena are so complicated that most of the prediction of frequency and pressure loads has been resorted to experimental work and computational approach has been precluded. This study deals with a numerical simulation on the behavior of air bubble clouds discharging into a water pool through a sparger, by using a commercial thermal hydraulic analysis code, FLUENT, version 4.5. Among the multiphase flow models, the VOF (Volume Of Fluid) model was selected to simulate the water, air and steam flows. A satisfactory result was obtained comparing the analysis results with the ABB-Atom test results which had been performed for the development of sparger.

1. 서 론

차세대원자로 APR-1400에는 설계기준초과 사고시 가압기로부터 방출되는 물/공기/증기에 의해 격납건물내 핵연료재장전수조(IRWST : in-containment refueling water storage tank) 및 수조내 구조물이 받는 하중을 작게 하고 수조 내부로 방출되는 증기를 효율적으로 응축시키기 위해 Fig. 1과 같이 총 12개의 sparger가 안전감압계

통(safety depressurization system) 배관 끝에 설치되어 있다.

원자로냉각계통의 과압에 의해 안전방출밸브가 열려 가압기 상부에 있는 고온 고압의 증기가 수조로 방출될 때, 증기는 방출배관에 차있던 공기를 가압하면서 방출배관의 압력을 증가시킨다. 공기가 점차 가압되면서 방출배관의 하단을 점유하고 있던 물이 초기에 방출되게 된다. 물의 방출에 이어 가압된 공기가 방출되고, 이

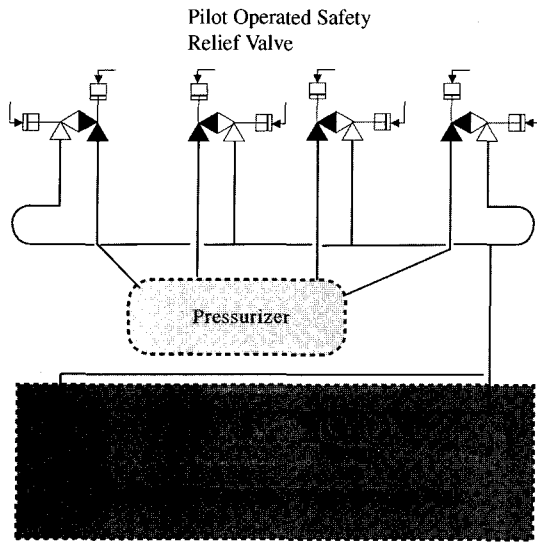


Fig. 1. Schematic of safety depressurization system for APR-1400.

후 증기가 방출되면서 응축된다. 이러한 방출 과정에 발생하는 현상들은 물 방출시의 물제트(water jet), 공기 방출시의 기포군(bubble cloud)에 의한 압력진동 및 증기 방출시의 증기의 응축 현상 등이다. 이 중에서 물과 증기가 방출되는 과정에서 발생하는 압력하중은 비교적 작으며 고압으로 방출된 공기방울이 저주파로 진동하면서 구조물에 미치는 하중이 커서 침수 구조물 및 수조 벽면에 심각한 영향을 준다는 것이 많은 실험과 해석을 통하여 알려져 있다^{[1][2]}.

공기 기포가 수조 내부로 방출되면 주위를 둘러싸고 있는 물과의 압력차이 때문에 팽창하게 되고, 따라서 주위 물은 기포를 중심으로 바깥쪽으로 이동하게 된다. 공기 기포는 이러한 물의 가속운동 때문에 과다하게 팽창하고, 이에 따라 기포의 압력이 기포 주위의 물 압력보다 작아지게 된다. 기포의 압력이 주위 물 압력보다 작아지기 때문에 물의 운동 방향이 역전되며, 따라서 기포는 다시 압축되기 시작한다. 압축이 진행되면 물의 관성 때문에 기포의 압력이 다시 물보다 커지게 되고, 다시 기포의 팽창이 재개된다. 이러한 진동현상이 몇 차례 반복되면서 물의 점성효과 및 기포 주위의 비가역 열전달에 의해 진동의 감쇄가 일어나며 이와 동시에 기포는 부력으로 인하여 IRWST 수면으로 상승하게 되며, 점차 에너지를 상실하게 된다. 이러한 기포의 팽창과 압축, 그리고 상승 운동 때문에 기포 압력은 점차 감소하게 되며 기포가 수면에 도달하면 기포의 운동이 끝나게 된다.

이러한 기포의 진동은 주파수가 수 내지 수십 Hz 정

도인 저주파로서 주파수가 수백 Hz 정도인 증기의 응축진동과는 확연히 구분되며 진폭 또한 증기의 응축진동에 비해 매우 크다. 아울러 기포는 저주파 진동을 하기 때문에 침수 구조물 및 수조 벽면과의 공진에 의해 막대한 하중을 초래할 수 있어 안전에 매우 심각한 결과를 가져올 수 있다. 따라서 IRWST와 이에 인접하는 구조물의 안전성 확보를 위하여 기포진동에 의한 하중을 되도록 작게 유지할 수 있는 sparger의 개발과 이러한 압력하중을 정확하게 예측할 수 있는 방법의 개발이 요구된다.

본 연구에서는 sparger를 통해 IRWST 내로 방출되는 물/공기/증기의 수력학적 거동을 해석하였고 sparger 개발을 위해 ABB-Atom이 수행하였던 실험자료^[2] 중에서 최적 sparger 하중실험 데이터를 이용하여 해석모델을 검증하였다. Sparger 개발을 위해 우선적으로 요구되는 것이 공기 방출시에 형성되는 수력학적 부하이므로, 공기 방출시 기포의 형성에 따른 압력형성 및 변동에 초점을 맞추어 배관 및 수조 내에서 발생하는 수력학적 현상을 해석하였으며 증기 응축시의 거동은 분석범위에서 제외하였다. 해석 CFD 코드는 범용 열수력 해석 코드인 FLUENT Version 4.5를 사용하였으며, 내재된 다상유동 해석모델중 압축성 VOF(Volume Of Fluid) 모델을 사용하여 물/공기/증기 등의 다상유동을 모의하였다. 해석결과에 영향을 크게 미치지 않는 실험설비의 일부를 단순화하여 해석을 수행하고, 해석결과를 실험결과와 비교 분석하여 전산코드 및 해석모델의 적용 가능성을 평가하였다.

2. 수학적 모델

2-1. VOF 모델

FLUENT 코드에 내재된 다상유동 해석 모델 중에서 기포군의 거동을 유사하게 해석할 수 있는 모델에는 Eulerian multiphase 모델과 VOF 모델이 있다^[3]. Eulerian multiphase 모델은 기포 하나 하나의 거동을 모사하기에 적합하며, 공기방울 입자 상호간에 형성되는 인력을 나타낼 수 없어 이 모델로는 공기방울이 방출되어 서로 혼합되면서 대형기포를 형성하는 것을 모의할 수는 없다. 반면 VOF 모델은 자유표면 또는 대형 기포의 거동을 해석하기 위해 개발된 모델이므로 sparger에서 방출되는 공기방울 입자군에 의해 형성된 대형 기포군을 모의하기에 적절하며 또한 VOF 모델은 제 1상에 한해 압축성(compressible) 유동을 모의할 수 있다. 따라서 기포군의 거동과 제 1상에 대해 압축성 유동을 동시에 모의할 수 있는 VOF 모델을 해석 모델로 선정하였다.

VOF 모델에서 체적분율이라는 개념을 사용하여 각 상을 구분한다. 만약 다상유동 시스템에서 k번째 유체의

체적분율을 ϵ_k 라 표시할 때, $\epsilon_k=0$ 는 제어체적이 k번째 유체가 전혀 없음을 $\epsilon_k=1$ 은 제어체적이 k번째 유체로 전부 채워져 있음을 $0<\epsilon_k<1$ 은 제어체적이 다상유동의 경계면에 위치함을 의미한다. 따라서 각 제어체적에서는 체적분율 ϵ_k 값을 기초로 하여 적절한 변수값 및 물성치들이 할당되게 된다. 지배방정식 및 물성치는 다음과 같이 표시된다^[3].

k번째 상에 대한 연속방정식

$$\frac{\partial \epsilon_k}{\partial t} + u_j \frac{\partial \epsilon_k}{\partial x_j} = S_{\epsilon k} \quad (1)$$

밀도, 점성계수 및 열전도도

$$\phi = \sum \epsilon_k \phi_k \quad (2)$$

비열

$$C_p = \frac{\sum \epsilon_k \rho_k C_{pk}}{\sum \epsilon_k \rho_k} \quad (3)$$

엔탈피

$$h_p = \frac{\sum \epsilon_k \rho_k h_{pk}}{\sum \epsilon_k \rho_k} \quad (4)$$

운동량보존방정식

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

에너지보존 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} k \left(\frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_h \quad (6)$$

2-2. 난류 모델

실험에서 나타난 유동의 Reynolds 수는 매우 크므로 유동 계산시 난류를 고려하여야 한다. 특히 방출배관 방출구의 유동이 섞이는 부분에서는 고속 고압의 압축성 및 비압축성 유체가 유입되는 영역에서는 난류모델을 고려하여야 보다 정확한 해석 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 유동해석에 가장 일반적으로 사용되는 난류모델인 표준 k-ε 모델^[3]을 사용하였다.

2-3. 다공성 매질 모델

해의 수렴성을 향상시키기 위하여 sparger의 하중저감 링(LRR : load reduction ring), sparger 옆면(head)의 작

은 구멍 및 밑면(bottom)의 구멍들이 존재하는 세 영역을 다공성매질(porous media) 영역으로 설정하였다. Sparger 방출면에서 전단과 후단 압력차가 작은 영역에서는 유체의 방출량이 저항계수 값(K-factor)에 의해 지배되나, 압력차가 매우 크면 임계유속 조건에 의해 지배된다. 본 해석에서 방출면 전단의 압력은 시간이 경과함에 따라 급속하게 상승하므로 실제적으로 유체저항계수 값의 지배를 받는 영역은 매우 작고 대부분 방출 유체의 임계유속에 의해 방출유량이 결정된다.

다공성매질 영역은 침투성(permeability)과 관성저항계수(inertial resistance factor)등에 의하여 운동량의 변화를 나타낼 수 있게 되어 있다. 본 해석에서는 LRR과 sparger head 및 bottom의 유체저항계수 값에 의한 운동량 변화를 모의하므로 관성저항계수만을 사용하여 압력손실과 유량이 계산된다. 임계조건에 도달하기 전까지는 사용된 관성저항계수에 의하여 압력과 유량이 계산되고, 임계조건에 도달하게 되면 porous영역을 통과하는 유체의 유속은 격자면적에 따라 환산된 임계유속으로 고정(fixed velocity)되게 된다.

2-4. 압축성 모델

FLUENT 코드의 VOF 모델에서 한 개의 상에 대한 압축성 유동해석이 가능하므로 본 해석에서 제 1상인 공기에 대해 압축성 모델을 적용하였다. 공기 밀도 계산시 이상기체법칙(ideal gas law)을 적용하였고, 압력은 운전압력에 국부적인 상대압력을 더한 값을 사용하도록 선택사항을 설정하여 계산하였다.

3. 계산방법

3-1. 해석대상 및 격자

본 해석대상으로 사용된 ABB-Atom 실험은 최적 sparger로 선정된 M150 sparger를 사용하여 수행된 unit cell test의 run 186^[2]으로 방출배관 내의 시간에 따른 압력변화와 탱크 바닥면과 옆면에서의 동압 등을 측정하였다. Fig. 2에서 보여지는 바와 같이 탱크는 직경 3.2 m 높이 6.6 m인 실린더 형으로서 탱크바닥으로부터 약 5.5 m 까지 물이 채워져 있고 sparger는 방출 배관 끝에 부착되어 있으며 sparger bottom은 탱크 바닥면으로부터 약 0.5 m 떨어져있다. 본 해석에서는 경계조건으로 sparger bottom으로부터 5.5 m 떨어진 배관에서 측정된 압력(P5)을 사용하였고 탱크 옆면에서 측정된 동압(P10)을 해석 결과와 비교하였다.

Sparger에서 공기가 방출되어 형성되는 대형 기포의 형상은 구와 유사한 형상이므로 이차원 축대칭 격자로 해석이 가능하므로 이차원 축대칭 격자(141×61)를 사용

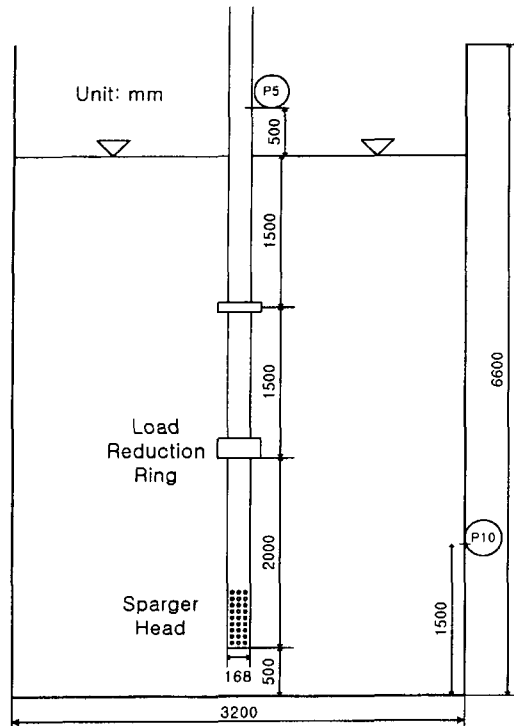


Fig. 2. Schematic of ABB-Atom test.

하여 해석을 수행하였다. Fig. 3에 보여지는 해석격자의 A면(격자의 좌측 상단)을 물, 공기 및 증기가 유입되는 입구(inlet①)로, B면(격자의 우측 상단)을 외부 대기로 개방되어 있는 출구(outlet)로 모델링하였다. 단 FLUENT에서는 압력-압력의 경계조건인 경우에는 출구도 inlet로 지정하게 되어 있으므로 본 해석에서는 출구를 inlet②로 설정하였다. 또한 C, D와 E 부근의 방출배관과 수조를 연결하고 있는 셀을 다공성매질(porous media) 영역; PM 1(LRR), PM 2(sparger head), PM 3(sparger bottom)으로 각각 모델링하였다.

3-2. 해석 입력자료 및 절차

공기와 증기가 들어오는 inlet①의 압력 및 온도 조건은 Nilsson²⁾에 나타난 ABB-Atom의 측정값을 근거로 산정하였다. 계산의 입력값으로 사용되는 압력과 온도는 정체압력(stagnation pressure)과 정체온도(stagnation temperature)이므로 측정된 정압(static pressure)을 가지고 이를 구하게 되는데, 배관 내부의 마하수(Mach number)가 약 0.1~0.2로 작기 때문에 정체압력은 측정된 정압과 동일하다고 가정하였다. 정체온도 역시 같은 이유로 정온(static temperature)와 같다고 가정하였고, 정온을 구하기 위해 다음과 같은 압축성 유동의 관계식을 사용하

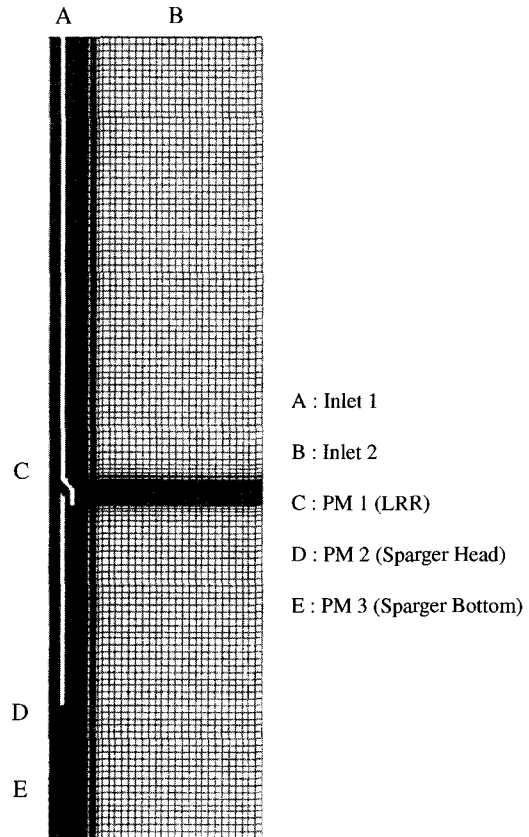


Fig. 3. Configuration of grid

었다.

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \tag{7}$$

Table 1은 해석시 사용된 물, 공기 및 증기가 유입되는 입구(inlet①)에서의 시간에 따른 압력 및 온도이며, 주어진 시간 이외의 시간에서의 압력 및 온도는 선형 보간법으로 계산된 값이 사용된다.

출구 압력은 정압(static pressure) 0 Pa, 체적력(body force)은 9.8 m/sec²을 사용하였다. 초기조건은 수조의 운전압력을 10⁵ Pa로 설정하고, 물의 수위 이하의 격자에 대해서 물의 체적분율을 1, 물의 수위 이상의 격자에 대

Table 1. Boundary condition at inlet 1.

Time (s)	Pressure (MPaG)	Temperature (°K)
0	0	293
0.041	1.06	590
0.237	1.33	626
0.463	1.11	597

Table 2. Parameter at porous media region.

	Real area (m ²)	Grid area (m ²)	Grid length (m)	Fixed velocity (m/s)
PM 1 (LRR)	0.00285	0.03519	0.04	29.97
PM 2 (Sparger Head)	0.01131	0.25133	0.04	16.65
PM 3 (Sparger Bottom)	0.00049	0.04524	0.2	4.02

해서는 물의 체적분율을 0으로 설정하였다. 물의 밀도는 1000 kg/m³, 증기의 밀도는 10 kg/m³로 설정하였다. 본 해석이 과냉각수로 방출되는 대형 기포의 압력 변동을 계산하는 것이므로 재 1상의 유체를 공기로 결정하였고, 공기에 대해서는 이상기체방정식에 의해 압력에 따른 밀도변화가 가능하도록 하였다.

다공성매질 영역을 통과하는 공기의 임계 유속은 LRR, sparger head 및 bottom의 실제 면적을 해석격자 면적으로 나눈 값에 실제 공기 임계 유속(본 계산에서는 370 m/s 사용)을 곱하여 산정하였다. 유동이 임계조건에 도달하게 되면 산정된 임계유속으로 고정(fixed velocity)된다. 각각의 다공성매질 영역의 실제면적, 그리드 면적 및 유동방향의 그리드 길이 그리고 산정된 임계 유속은 Table 2에 나타나있다.

다공성매질 영역에서의 운동량 변화는 관성저항계수를 사용하여 나타내었다. 다공성매질 영역으로 나타나는 LRR, sparger head 및 bottom의 해석격자 면적을 실제 면적으로 나눈 값을 제공하여 유동방향의 다공성매질 해석격자 길이로 나눈 후 이 값에 손실계수 K를 곱하여 관성저항계수 값을 산정하였다. 해석 case 1~5에서 사용된 K 값과 관성저항계수는 Table 3에 수록하였다.

공기의 주입에 이어 주입되는 증기는 본 연구에서 수행하는 연구범위를 벗어나므로, 여기서는 일정한 양의 공기가 수조 내로 유입될 수 있도록 방출배관까지는 입구 조건에 따라 증기가 주입할 수 있게 하고, 공기가 수조 내로 모두 유입되고 나면 증기가 유입되는 부분(PM 1, PM 2, PM 3)을 벽면으로 처리하여 증기 유입을 차단하였다.

계산 절차는 다음과 같다.

- 물의 수위, 압력 등 초기조건과 경계조건을 설정하

고 계산을 시작한다. 시간에 따른 공기의 주입량 변화를 계산할 수 있도록 한다.

- 공기주입이 시작되면 방출배관 상단의 공기가 가압되기 시작하고, 공기와 물의 경계면이 하강하면서 LRR과 sparger head로 물이 빠지기 시작한다.
- 주입된 공기의 양을 계산(밀도×속도×면적×시간)하여 실험값과 일치한 시점에서 공기의 주입을 차단하고 입구경계조건을 증기로 변경한다. 이 시점부터 증기와 공기의 경계면이 계산격자 내에 형성되기 시작한다.
- PM 1으로 처리한 LRR에서 유동이 임계조건에 도달하게 되면 LRR 셀의 속도는 실제면적과 격자면적을 고려하여 환산된 임계유속으로 고정(fixed velocity)된다. LRR의 여러 셀은 속도가 고정되는 시점이 다를 수 있으므로 이를 고려하여 셀 속도를 고정시킨다.
- PM 2로 처리한 sparger head에서 유동이 임계조건에 도달하게 되면 sparger head 셀의 속도는 실제면적과 격자면적을 고려하여 환산된 임계유속으로 고정(fixed velocity)된다. Sparger head의 여러 셀은 속도가 고정되는 시점이 다를 수 있으므로 이를 고려하여 셀 속도를 고정시킨다.
- 공기가 LRR 부분을 완전히 통과하면 LRR의 porous 셀은 wall로 변경되어 더 이상의 증기가 수조 내로 유입되지 못하도록 한다.
- 공기가 sparger head를 완전히 통과하면 sparger head의 porous 셀은 wall로 변경되고, 아울러 전 배관 내부도 wall로 변경되어 증기의 수조 유입을 차단시킨다.

4. 결과 및 토의

ABB-Atom에서 수행하였던 run 186 실험 장치에서 배관 내부에 차 있는 공기량은 약 0.4046 kg으로 계산되었으므로 본 해석에서도 동일한 양의 공기가 수조로 방출되어 진동하는 현상을 모의하였다.

Fig. 4 및 Fig. 5는 배관 입구 조건을 동일하게 하고 LRR, sparger head, 및 sparger bottom의 K값(손실계수)를 변화시켰을 때 벽면에서의 압력을 나타낸 것이다. K 값이 변함에 따라 기포 진동의 시작점, 진폭, 및 최대압력 등이 변화하는 것을 알 수 있다. 이는 K값에 따라

Table 3. K value and inertial resistance factor.

	K Value/Inertial Resistance Factor (m ⁻¹)		
	PM 1 (LRR)	PM 2 (Sparger Head)	PM 3 (Sparger Bottom)
Case 1	2.6/9907	2.6/32097	2.6/110363
Case 2	5.2/19814	5.2/64194	5.2/220726
Case 3	7.8/29721	7.8/96291	7.8/331089
Case 4	5.2/19814	2.6/32097	2.6/110363
Case 5	5.2/19814	7.8/96291	7.8/331089

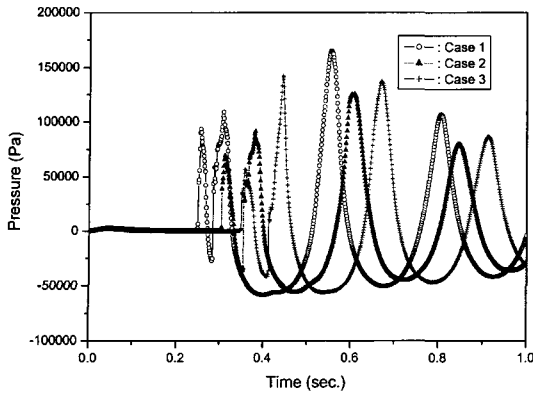


Fig. 4. Wall dynamic pressure with various loss coefficients (I).

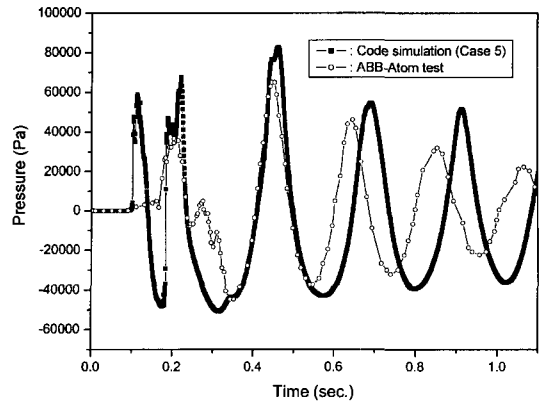


Fig. 6. Comparison of ABB-Atom test and simulation results.

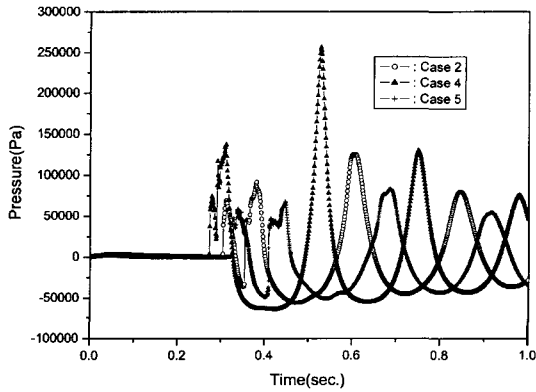


Fig. 5. Wall dynamic pressure with various loss coefficients (II).

LRR과 sparger head 에 형성되는 기포군 형성시점 및 크기가 다르고, 아울러 벽면의 압력은 각 기포군의 진동이 중첩되어 일어난 결과로 나타나기 때문이다. 이 중에서 ABB-Atom의 벽면 측정압력에 가장 근접한 결과를 나타내는 경우는 case 5로서 LRR, sparger head 및 sparger bottom K값은 각각 5.2, 7.8, 7.8이었다.

ABB-Atom test 결과와 case 5의 해석 결과의 비교를 Fig. 6에 나타내었다. 여기에서 시간축은 ABB-Atom과의 비교를 위해 실제 계산 시간축에서 약 0.224초 좌측으로 이동시킨 것이다. 해석결과 벽면압력의 최대값은 82713 Pa로서 test에서 측정된 최대값인 65100 Pa 보다 약 30% 크게 나타났다. 해석결과 LRR과 sparger head 에 형성된 기포군의 진동에 의한 주파수는 4.37 Hz로서 일정하였으며 이는 test에서 측정된 최대 압력과 두 번째 최대 압력 사이의 주파수인 5.18 Hz 보다 약 20% 작게 나타났다. Test에서 시간이 경과할수록 주파수는 점

점 감소하는 경향을 보이고 있는데 이는 기포군에 상당량의 증기가 유입되어 진동하기 때문인 것으로 추측된다. 현재 ABB-Atom sparger의 K값을 예측할 수 있는 자료는 없으며 다만 Idelchik⁴⁾에서 반구 형태의 sparger에서 K값을 1~11 정도로 추천하고 있는 바, 본 해석 모델은 이 범위에 있는 K값을 사용하여 ABB-Atom 실험 결과를 비교적 잘 예측함을 보여준다.

Fig. 7은 ABB-Atom 실험결과를 잘 예측하는 case 5에서 시간에 따른 수조내의 기포 거동을 나타낸 것이다. 여기에서 0.192초는 배관입구에 증기가 형성되는 시점이며, 0.361초는 LRR에 증기가 도달하여 이 부분을 wall로 처리한 시점을 0.439초는 sparger head에 증기가 도달하여 배관 전체를 wall로 처리한 시점을 나타낸다. 또한 0.542초는 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점을 0.686초는 벽면에 최대 양압이 형성되는 시점을 나타내며 그 외의 시간은 계산 과정 중의 임의의 시간을 나타낸다. 시간이 경과함에 따라 먼저 LRR 부분에 기포군이 형성되고 이어 sparger head 부분에 기포군이 형성되어 두 개의 대형 기포군은 각각 진동을 하면서 상호작용에 의해 압력장을 이루고 있으며 수조내로 방출된 기포군은 점차 찌그러들어 부력에 의해 수면 위로 상승함을 알 수 있다. 또한, 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.542초에 기포의 총 부피는 대략 최대가 되며 최대 양압이 형성되는 시점인 0.686초에 기포의 총 부피는 대략 최소가 됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.542초, 벽면에 최대 양압이 형성되는 시점인 0.686초 및 계산 종료 시점인 1.4초에서 수조내 압력분포를 나타낸 것이다. LRR과 sparger head 부분에서 형성된 각각의 기포군을 중심으로 각각 진동하면서 상호 작용에 의해 수조내 압력장을 형성하는 것을 알 수 있다.

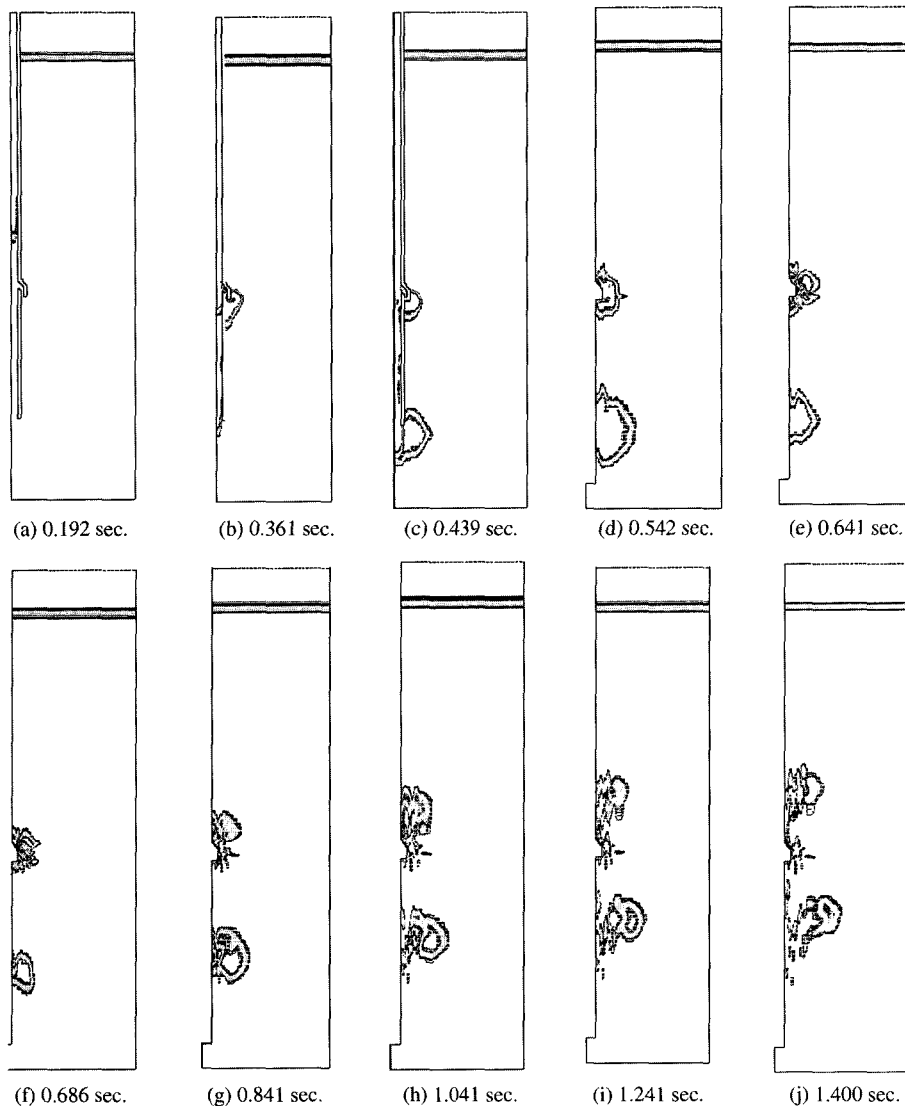


Fig. 7. Configuration of bubble cloud with time.

Fig. 9는 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.542초, 벽면에 최대 양압이 형성되는 시점인 0.686초 및 계산 종료 시점인 1.4초에서 수조내 온도분포를 나타낸 것이다. 기포가 팽창 또는 수축을 함에 따라서 기포 내부의 온도가 변하는 것을 보여주고 있으나 이는 기포의 핵심에 해당되는 부분에 국한된 현상으로서 대부분의 기포 온도는 대략 주위 물 온도와 같음을 알 수 있다. 이러한 현상은 기포 외부와 내부에서 모두 격렬한 난류 현상이 발생되어 순간적으로 기포에서 주위 물로 열전달이 일어난 결과로 판단된다.

Fig. 10은 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.542

초, 벽면에 최대 양압이 형성되는 시점인 0.686초 및 계산 종료 시점인 1.4초에서 깊이에 따른 벽면의 압력분포를 나타낸다. 양압과 음압 모두 깊이가 증가할수록 선형적으로 변화하다가 대략 sparger 끝부분에서 수조 바닥까지는 일정하게 되는 경향을 보여준다.

Fig. 11은 모든 계산조건이 동일할 때 배관내 공기량에 따른 수조 벽면압력 변화를 보여준다. 공기량 변화에 따른 벽면압력 변화의 뚜렷한 경향은 나타나지 않고 있는데, 이는 벽면의 압력이 LRR과 sparger head에 두 개의 기포군의 상호진동에 의해 형성되므로 각 기포군의 진동 위상이 벽면압력에 중요한 영향을 주기 때문인

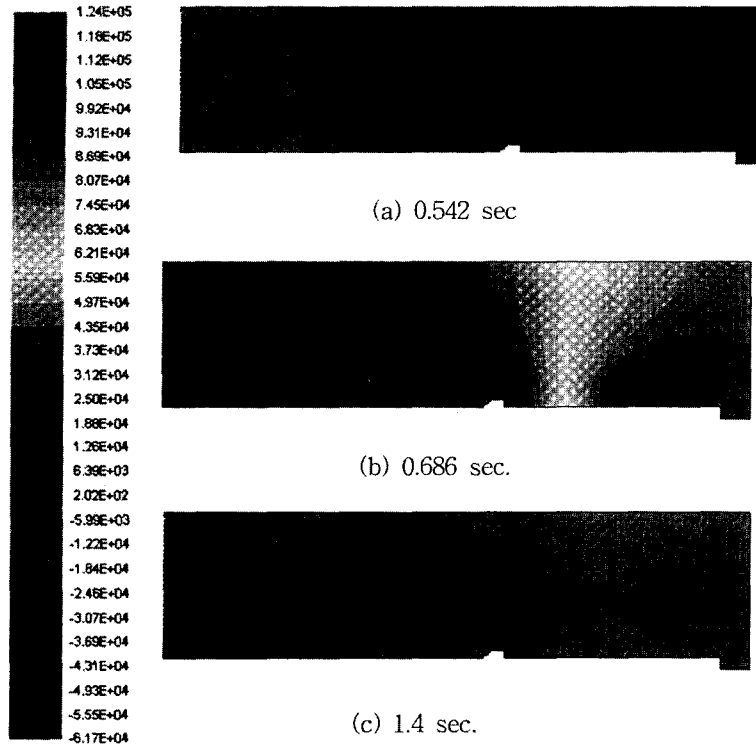


Fig. 8. Pressure distribution in the tank.

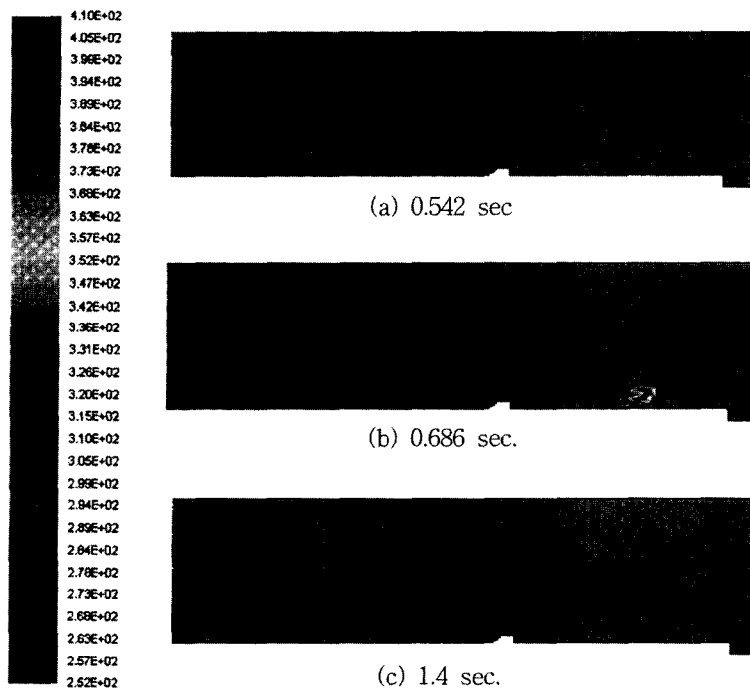


Fig. 9. Temperature distribution in the tank.

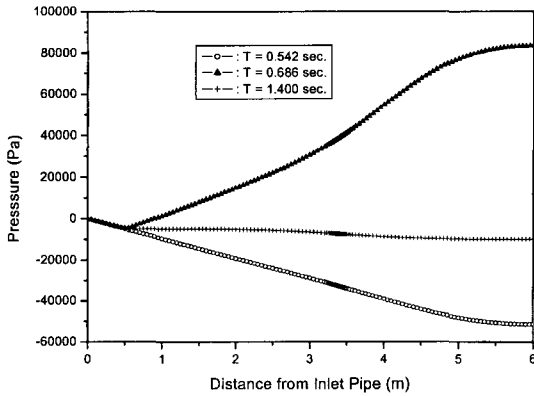


Fig. 10. Wall dynamic pressure vs. distance from inlet pipe.

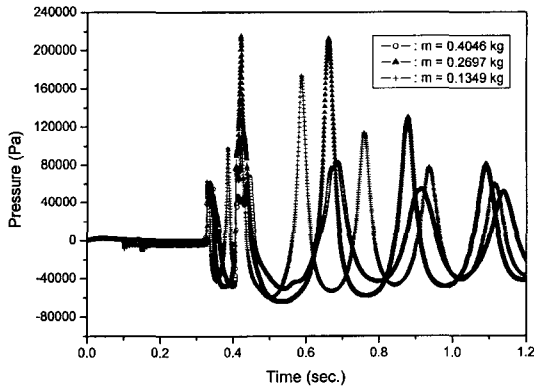


Fig. 11. Wall dynamic pressure with the change of air mass.

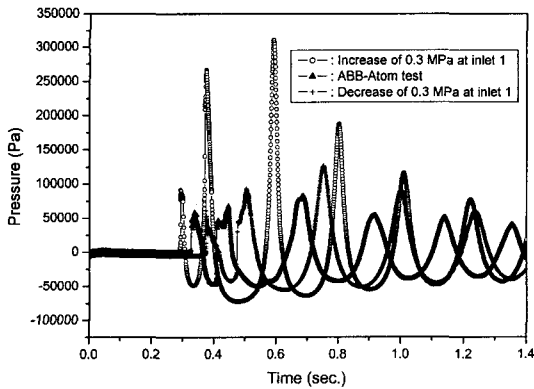


Fig. 12. Wall dynamic pressure with the change of inlet pressure.

것으로 판단된다. 배관내 공기량이 작을수록 주파수는 증가하였으며, 이는 공기 기포의 반경이 작을수록, 즉 공

기량이 작을수록 주파수는 증가하는 일반적으로 알려진 경향에 잘 일치하고 있음을 보여준다.

Fig. 12는 배관 입구조건 변화에 따른 수조 벽면압력 변화를 보여주는 것으로 배관 입구압력을 ABB-Atom 실험에서 측정된 값보다 0.3 MPa 각각 크게 한 경우와 작게 한 경우에 대한 해석결과를 같게 했을 경우의 해석결과를 비교한 것이다. 그림에서 보여지듯이 배관 입구압력이 변화에 따른 수조 벽면압력 변화의 뚜렷한 경향은 나타나지 않고 있다. 이러한 해석결과는 앞서의 공기량을 변화시켰을 때의 해석결과와 마찬가지로 벽면압력에 중요한 영향을 주는 인자는 각 기포군의 진동 위상을 보여준다.

5. 결 론

Sparger를 통해 IRWST 내로 방출되는 물/공기/증기의 수력학적 거동을 범용 열수력 해석 코드인 FLUENT Version 4.5를 사용하여 해석하였다. 다상유동 해석모델 중 압축성 VOF(Volume Of Fluid) 모델을 사용하여 물/공기/증기 등의 다상유동을 모의하였다. 해석결과를 sparger 개발을 위해 ABB-Atom이 수행하였던 실험결과와 비교하여 만족할만한 결과를 얻었다. ABB-Atom에서 개발한 sparger에서는 먼저 LRR 부분에 기포군이 형성되고 이어 sparger head 부분에 기포군이 형성되어 두 개의 대형 기포군은 각각 진동을 하면서 상호작용에 의해 압력장을 이루고 있는 것을 확인할 수 있었다. 모든 경계 및 초기조건이 동일할 때, 배관내 공기량이 수조 벽면 동압에 미치는 뚜렷한 경향은 나타나지 않았으며 또한 배관 입구 압력이 수조 벽면 동압에 미치는 뚜렷한 경향도 나타나지 않았다. 이는 벽면의 압력이 LRR과 sparger head에 두 개의 기포군의 상호진동에 의해 형성되므로 각 기포군의 진동 위상이 벽면압력에 중요한 영향을 주기 때문인 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 계획의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Utamura, M.: "An Analysis of Multiple Bubble Behaviors in a BWR Suppression Pool", 2nd Int. Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Santa Barbara, CA, USA, Jan. (1983).
2. Nilsson, L.: "Experimental investigation of steam

- vent clearing phenomena at system relief into a condensation pool of water”, AE-RL-1630, (1975).
3. FLUENT user's guide manual, version 4.3 (1995).
 4. Idelchik, I.E.: Handbook of Hydraulic Resistance, 2nd ed., Hemishere Publishing Corp. (1986).
 5. Moody, F. J., Introduction to Unsteady Thermofluid Mechanics, John Wiley & Sons, Inc. (1990).