

증기분사기로 방출된 공기기포에 의해 형성되는 유동장 수치해석

Numerical Analysis of Flow Field Formed by Air Bubble Discharging through a Sparger

김환열, 배운영
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

비등경수로 및 건설이 시작된 개량형 가압경수로 APR1400에서 감압계통이 작동하면 물, 공기 및 증기가 sparger를 통해 과냉각 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. 본 연구에서는 sparger를 통해 수조 내로 방출되는 공기 기포군에 의해 형성되는 유동장에 대한 수치해석을 상용 열수력 해석 코드인 FLUENT Version 4.5를 사용하여 수행하였다. 대형 기포의 해석에 적합하고 제 1상인 공기에 대해 압축성 유동을 모의할 수 있는 VOF(Volume Of Fluid) 모델을 사용하여 물, 공기 및 증기 유동 등을 모의하였다. 해석결과를 sparger 개발을 위해 ABB-Atom이 수행하였던 실험결과와 비교하여 만족할만한 결과를 얻었다.

Abstract

In both a boiling water reactor and an advanced type of pressurized water reactor APR1400 being constructed in Korea, water, air and steam successively discharge into a subcooled water pool through spargers, when a pressure relieving system is in operation. During the discharging processes, the air bubble clouds produce a low-frequency and high-amplitude oscillatory loading, which may result in significant damages to the submerged structures if the resonance between bubble clouds and structures occur. This study deals with a numerical analysis of the flow field due to the oscillation of air bubble clouds by using a commercial thermal hydraulic analysis code, FLUENT, version 4.5. The VOF (Volume Of Fluid) model was used to simulate the interface of water, air and steam flows, since it is known to be suitable for the large bubble simulation and it enables to treat air as a compressible fluid. A good agreement between the analysis results and the ABB-Atom test results, which had been performed for the development of BWR sparger, was obtained.

1. 서 론

비등경수로(BWR: boiling water reactor)에서 사고시 안전감압계통이 작동하면, 물, 공기 및 증기가 wet well로 방출하게 되며, 이중에서 공기 기포의 진동에 의해 침수 구조물에 치명적인 손상이 초래될 수 있다. 공기 기포의 진동 하중을 줄이고 공기 기포의 진동수가 침수 구조물의 고유 진동수 근처로 유지되어 발생하는 공진 현상을 막기 위해 여러 종류의 증기분사기(sparger)가 개발되었다. 지금까지의 가압경수로(pressurized water reactor)에서는 비등경수로와 유사한 안전감압계통이 존재하지 않았지만, 최근에 건설이 시작된 차세대원자로 APR1400에는 진일보한 안전개념이 도입되어 안전감압계통에 격납 건물내 핵연료재장전수조(IRWST: in-containment refueling water storage tank)와 증기 분사기 등이 설치되므로 사고시 비등경수로에서 일어난 것과 유사한 현상이 발생하리라 예상된다.

APR1400에서 사고시 안전감압계통이 작동하면 가압기 상부에 있는 고온 고압의 증기가 방출되어 방출배관에 차있던 공기를 가압하면서 방출배관의 압력을 증가시킨다. 공기가 점차 가압되면서 방출배관의 하단을 점유하고 있던 물이 초기에 방출되게 된다. 물의 방출에 이어 가압된 공기가 방출되고, 이후 증기가 방출되면서 응축된다. 이러한 방출 과정에 발생하는 현상들은 물 방출시의 물제트(water jet), 공기 방출시의 기포군(air bubble cloud)에 의한 압력진동 및 증기방출시의 증기의 응축 현상 등이다. 이중에서 물과 증기가 방출되는 과정 중에 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)}.

기포의 진동은 주파수가 수 내지 수십 Hz 정도인 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 실험자료²⁾ 중에서 최적 sparger 하중실험 데이터를 이용하여 해석모델을 검증하여 전산코드 및 해석모델의 적용가능성을 평가하였다. Sparger 개발을 위해 우선적으로 요구되는 것이 공기 방출시에 형성되는 수력학적 부하이므로, 공기 방출시 기포의 형성에 따른 유동장을 해석하였으며 증기 응축시의 거동은 분석범위에서 제외하였다. 해석에 사용한 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.

2. 수학적 모델 검토

2-1. VOF 모델

FLUENT 코드에 내재된 다상유동 해석 모델 중에서 대형 기포의 거동을 해석하기 적절하며 또한 제 1상에 한해 압축성(compressible) 유동을 모의할 수 있는 VOF 모델을 해석 모델로 선정하였다.

VOF 모델에서는 체적분율이라는 개념을 사용하여 각 상을 구분한다. 만약 다상유동 시스템에서 k 번째 유체의 체적분율을 ϵ_k 라 표시할 때, $\epsilon_k=0$ 는 제어체적에 k 번째 유체가 전혀 없음을 $\epsilon_k=1$ 은 제어체적이 k 번째 유체로 전부 채워져 있음을 $0<\epsilon_k<1$ 는 제어체적이 다상유동의 경계면에 위치함을 각각 의미한다. 따라서 각 제어체적에서는 체적분율 ϵ_k 값을 기초로 하여 적절한 변수값 및 물성치들이 할당되게 된다. 지배방정식 및 물성치는 다음과 같이 표시된다³⁾.

k 번째 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

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

운동량보존방정식

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

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 $k-\epsilon$ 모델³⁾을 사용하였다.

2-3. 다공성매질 모델

해의 수렴성을 향상시키기 위하여 sparger의 하중저감링(LRR: load reduction ring), sparger 옆면(head)의 작은 구멍 및 밑면(bottom)의 구멍들이 존재하는 세 영역을 다공성매질(porous media) 영역으로 설정하였다.

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 관성저항계수 만을 사용하여 압력손실과 유량이 계산된다. 임계조건에 도달하기 전까지는 사용된 관성저항계수에 의하여 압력과 유량이 계산되고, 임계조건에 도달하게 되면 다공성매질 영역을 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 이상기체 법칙(ideal gas law)을 적용하였고, 압력은 운전압력에 국부적인 상대압력을 더한 값을 사용하도록 선택사항을 설정하여 계산하였다.

3. 계산 방법

3-1. 해석대상 및 격자

본 해석대상으로 사용된 ABB-Atom 실험은 최적 sparger로 선정된 M150 sparger를 사용하여 수행된 unit cell test의 run 186²⁾으로 방출배관 내의 시간에 따른 압력변화와 탱크 바닥면과 옆면에서의 동압 등을 측정하였다. Fig. 1 과 같이 탱크는 직경 3.2m 높이

6.6m 인 실린더 형으로서 탱크바닥으로부터 약 5.5m까지 물이 채워져 있고 sparger는 방출 배관 끝에 부착되어 있으며 sparger bottom은 탱크 바닥면으로부터 약 0.5m 떨어져있다. 본 해석에서는 경계조건으로 sparger bottom으로부터 5.5m 떨어진 배관에서 측정된 압력(P5)을 사용하였고 탱크 옆면에서 측정된 동압(P10)을 해석결과와 비교하였다.

Sparger에서 공기가 방출되어 형성되는 대형 기포의 형상은 구와 유사한 형상이므로 이차원 축대칭 격자로 해석이 가능하므로 이차원 축대칭 격자(141 x 61)를 사용하여 해석을 수행하였다. Fig. 2 와 같은 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 inlet으로 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.

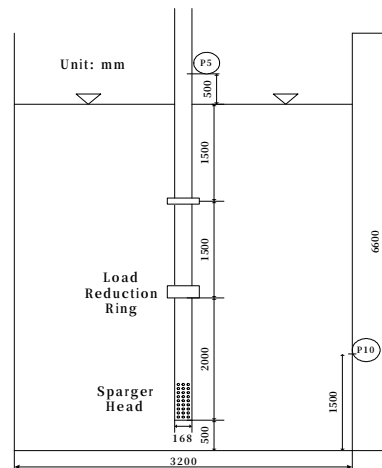


Fig. 1 Location of sparger and pressure sensor

3-2. 해석 입력자료 및 절차

Table 1은 해석시 사용된 물, 공기 및 증기가 유입되는 입구(inlet①)에서의 시간에 따른 압력 및 온도로서 Nilsson²⁾에 나타난 ABB-Atom의 측정값을 근거로 산정하였다. 주어진 시간 이외의 시간에서의 압력 및 온도는 선형 보간법으로 계산된 값을 사용하였다.

출구 압력은 정압(static pressure) 0 Pa, 체적력(body force)은 9.8 m/sec^2 을 사용하였다. 초기조건은 수조의 운전압력을 10^5 Pa 로 설정하고, 물의 수위 이상 및 이하의 격자에 대해서 물의 체적분율을 각각 0과 1로 설정하였다. 물의 밀도는 1000 kg/m^3 , 증기의 밀도는 10 kg/m^3 로 설정하였다. 제 1상의 유체를 공기로 결정하였고, 공기에 대해서는 이상기체방정식에 의해 압력에 따른 밀도변화가 가능하도록 하였다.

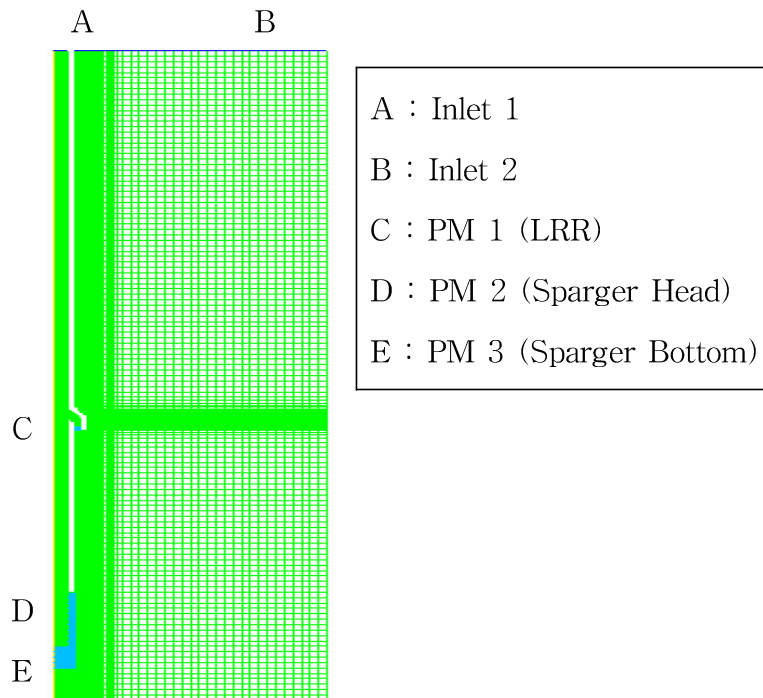


Fig. 2 Configuration of grid

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 2 에 나타내었다.

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 K 를 곱하여 관성저항계수 값을 산정하였다. 해석 case 1 - 5에서 사용된 K 값과 관성저항계수는 Table 3에 수록하였다.

Table 1 Boundary condition at inlet 1

Time (s)	Pressure (MPaG)	Temperature ($^{\circ}\text{K}$)
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	0.00285	0.03519	0.04	29.97
PM 2	0.01131	0.25133	0.04	16.65
PM 3	0.00049	0.04524	0.2	4.02

Table 3 K value and inertial resistance factor

	K Value / Inertial Resistance Factor (m ⁻¹)		
	PM 1	PM 2	PM 3
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

본 해석에 사용된 VOF 모델에서 최대 Courant Number $\left(= \frac{\Delta t}{\Delta x_{cell} / v_{fluid}} \right)$ 값을 0.25로 하였기 때문에, 계산 과정에서 시간 간격은 격자간격 및 유속 등을 고려하여 $2.5 \times 10^{-4} - 1.0 \times 10^{-3}$ 을 사용하였다. 수렴 조건은 엔탈피에 대해서는 1.0×10^{-6} 이하로, 속도 및 압력 등의 엔탈피 이외의 변수에 대해서는 1.0×10^{-3} 이하로 설정하였다. 배관 내에서 유체의 흐름방향인 축방향으로 중력가속도 (9.8 m/s^2)가 존재함을 가정하였다.

공기의 주입에 이어 주입되는 증기는 본 연구에서 수행하는 연구범위를 벗어나므로, 여기서는 일정한 양의 공기가 수조 내로 유입될 수 있도록 방출배관까지는 입구조건에 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 설정하고 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 x 속도 x 면적 x 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 실

제면적과 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(최적 sparger인 M150 부착)에서 배관 내부에 차 있는 공기량은 약 $0.4046kg$ 으로 계산되었으므로 본 해석에서도 동일한 양의 공기가 수조로 방출되어 진동하는 현상을 Table 3과 같은 5가지의 case에 대해 모의하였다. 현재 ABB-Atom의 I형 sparger에 대한 손실계수를 예측할 수 있는 자료는 없으며 다만 Idelchik⁴⁾에서 반구 형태의 sparger에서 손실계수를 1 - 11 정도로 추천하고 있는 바, 본 해석 case에서는 이 범위 내에 있는 값을 사용하였다.

Table 4 는 각 해석 case에 따라 배관입구에 증기가 들어오기 시작하는 시간, LRR을 통한 공기 방출이 완료되어 LRR을 blocking한 시간, sparger head를 통한 공기 방출이 완료되어 전 배관을 blocking한 시간 등을 나타낸 것이다. 배관입구에 증기가 들어오기 시작하는 시간은 배관입구 부근인 격자점(12, 4)에서 시간에 따른 공기 속도와 밀도를 구하고 이를 토대로 배관의 넓이($0.020106 m^2$)를 고려하여 계산한 총 공기 주입량이 배관 내부에 차 있는 공기량인 $0.4046kg$ 과 같아지는 시간을 계산하여 구하였다.

Table 4 Time at the specific event for case 1 - case 5

	Steam entrance at Inlet 1	LRR blocking (Wall 3)	All pipings blocking (Wall 4)
Case 1	0.165 sec.	0.265 sec.	0.307 sec.
Case 2	0.181 sec.	0.330 sec.	0.380 sec.
Case 3	0.194 sec.	0.376 sec.	0.445 sec.
Case 4	0.170 sec.	0.285 sec.	0.310 sec.
Case 5	0.192 sec.	0.361 sec.	0.439 sec.

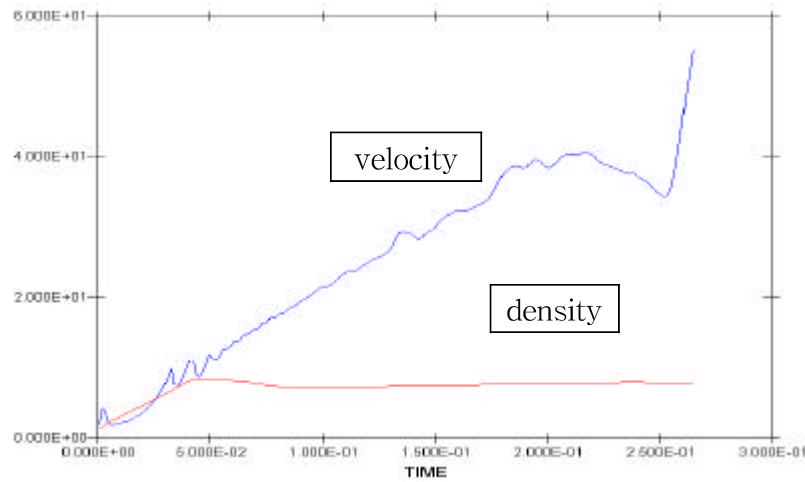


Fig. 3 Velocity and density of air at (12, 4) for case 1

Fig. 3 은 case 1의 경우 격자점(12, 4)에서 시간에 따른 공기 속도와 밀도를 나타낸 것으로 이를 토대로 증기가 배관입구에 들어오기 시작하는 시간을 계산한 결과 0.165 sec. 이었다. LRR, sparger head, 및 sparger bottom 각각의 손실계수를 동일하게 한 해석 case 1 - case 3에서, 손실계수가 커질수록 배관 입구로 공기가 유입되는 시간 및 배관에서 공기 방출이 완료되는 시간 등이 길어짐을 알 수 있다.

Fig. 4 는 배관 입구 조건을 동일하게 하고 LRR, sparger head 및 sparger bottom의 K 값을 변화시켰을 때 벽면에서의 압력을 나타낸 것이다. K 값이 변함에 따라 기포 진동의 시작점, 진폭 및 최대압력 등이 변화하는 것을 알 수 있다. 이는 K 값에 따라 LRR과 sparger head 에 형성되는 기포군 형성시점 및 크기가 다르고, 아울러 벽면의 압력은 각 기포군의 진동이 중첩되어 일어난 결과로 나타나기 때문이다.

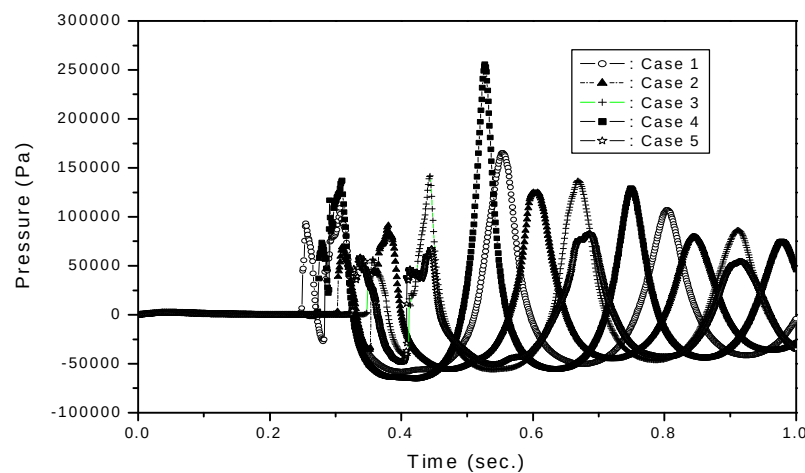


Fig. 4 Wall dynamic pressure with various loss coefficients (P10 of Fig. 1)

Table 5 Max. negative and positive pressures

	Max. negative Time (sec.) / Press. (Pa)	Max. positive Time (sec.) / Press. (Pa)
Case 1	0.400 / -58300	0.555 / 165000
Case 2	0.474 / -56000	0.607 / 125000
Case 3	0.539 / -55700	0.669 / 137000
Case 4	0.422 / -64800	0.527 / 256000
Case 5	0.542 / -50800	0.686 / 82700
ABB-Atom	NA / -44700	NA / 65100

Table 5 는 각각의 case에 대해 격자점(132, 62)이 나타내는 벽면(ABB-Atom 실험의 P10 압력센서가 위치한 지점)에서의 max. negative pressure 및 max. positive pressure 가 발생하는 시간과 크기를 나타내었다. ABB-Atom unit cell 실험에서 측정된 압력에 비해 절대값이 상당히 큰 결과를 보여주고 있으며, 이 중 case 5가 압력의 측정값에 가장 근접함을 보여준다.

Fig. 5 는 case 5와 ABB-Atom 실험과의 비교 결과를 나타낸 것이다. 여기에서 시간축은 ABB-Atom 실험과의 비교를 위해 실제 계산 시간축에서 약 0.224 sec. 이동시켰다. 해석결과 벽면에서 max. negative pressure는 -50800 Pa로서 ABB-Atom 실험 측정값인 -44700 Pa 보다 약 15% 크게 계산되었으며, max. positive pressure는 82700 Pa로서 ABB-Atom 실험 측정값인 65100 Pa보다 약 30% 크게 계산되었다. 주파수는 4.37 Hz로

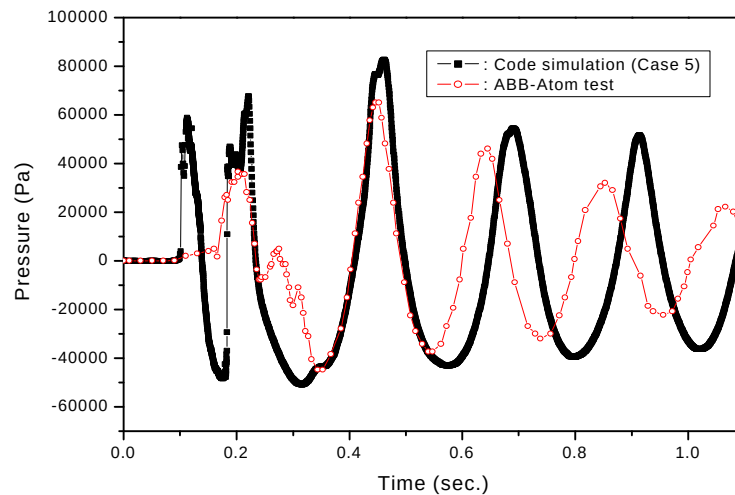


Fig. 5 Comparison of ABB-Atom test and simulation results (P10 of Fig. 1)

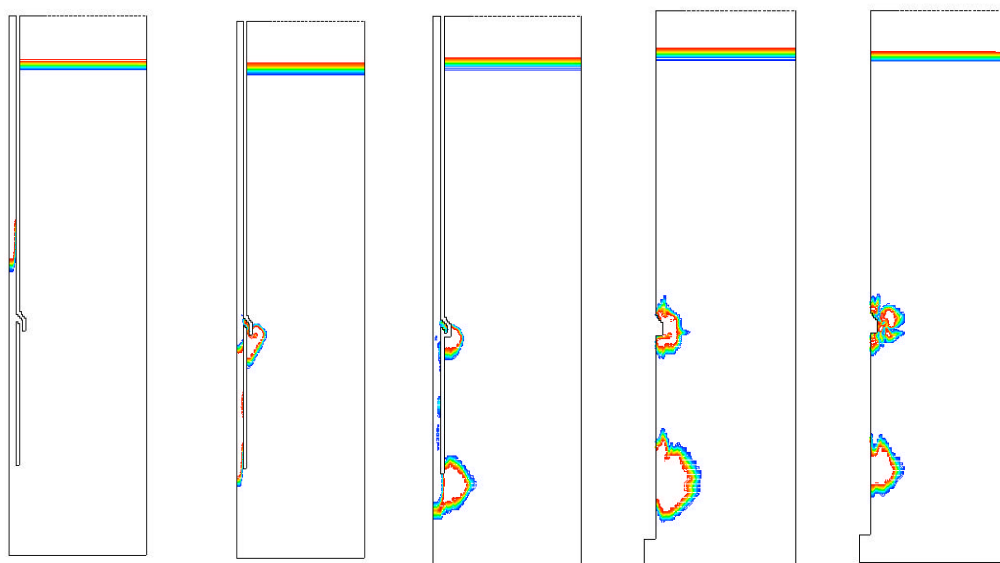
서 측정값인 5.18 Hz 보다 약 20% 작게 계산되었으며, 이는 해석에서는 순수 공기만 진동하는 것으로 가정하지만 실제 실험에서는 기포군에 상당량의 증기가 유입되어 진동하기 때문인 것으로 추측된다.

Fig. 6 은 ABB-Atom 실험결과를 잘 예측하는 해석 결과인 case 5에 대한 시간에 따른 수조내의 기포 거동을 나타낸 것이다. 여기에서 0.192 sec. 는 배관입구에 증기가 형성되는 시점이며, 0.361 sec. 는 LRR에 증기가 도달하여 이 부분을 wall로 처리한 시점을 0.439 sec. 는 sparger head에 증기가 도달하여 배관 전체를 wall로 처리한 시점을 나타낸다. 또한 0.542 sec. 는 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점을 0.686 sec. 는 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 찌그러들며 부력에 의해 수면 위로 상승함을 알 수 있다. 또한, 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.542 sec. 에 기포의 총 부피는 대략 최대가 되며 최대 양압이 형성되는 시점인 0.686 sec. 에 기포의 총 부피는 대략 최소가 됨을 알 수 있다.

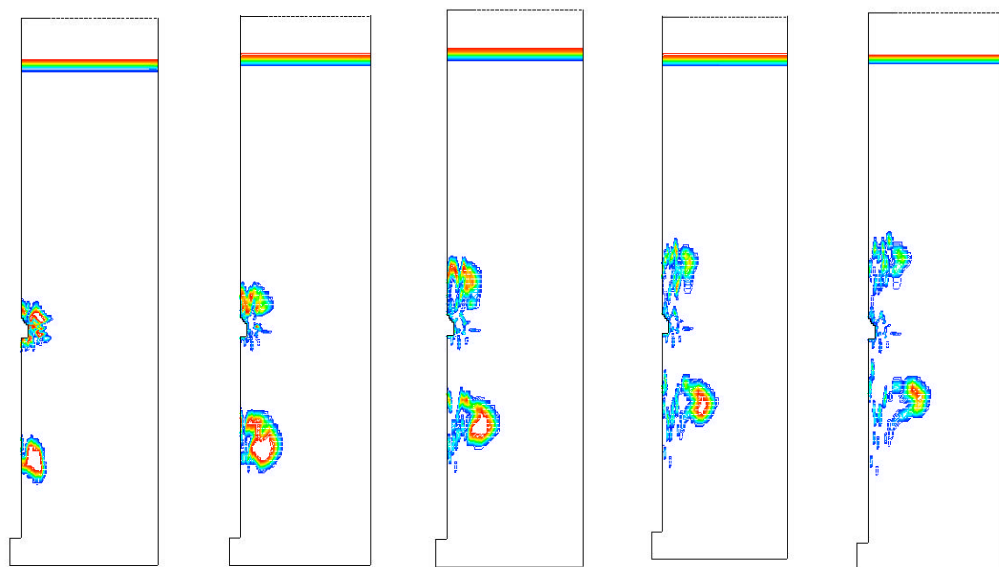
Fig. 7 은 case 5에 대해 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.542 sec. , 벽면에 최대 양압이 형성되는 시점인 0.686 sec. 및 계산 종료 시점인 1.4 sec. 에서 수조내 압력분포를 나타낸 것이다. LRR과 sparger head 부분에서 형성된 각각의 기포군을 중심으로 각각 진동하면서 상호 작용에 의해 수조내 압력장을 형성하는 것을 알 수 있으며, 수조내 압력장의 크기를 작게 하기 위해서는 LRR과 sparger head에 형성된 각 기포군의 위상을 정반대가 되도록 하여야 함을 알 수 있다.

Fig. 8 은 case 5에 대해 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.542 sec. , 벽면에 최대 양압이 형성되는 시점인 0.686 sec. 및 계산 종료 시점인 1.4 sec. 에서 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. 9 는 case 5에 대해 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.542 sec. , 벽면에 최대 양압이 형성되는 시점인 0.686 sec. 및 계산 종료 시점인 1.4 sec. 에서 깊이에 따른 벽면의 압력분포를 나타낸다. 양압과 음압 모두 깊이가 증가할수록 선형적으로 변화하다가 대략 sparger 끝부분에서 수조 바닥까지는 일정하게 되는 경향을 보여준다.



(a) 0.192 sec. (b) 0.361 sec. (c) 0.439 sec. (d) 0.542 sec. (e) 0.641 sec.



(f) 0.686 sec. (g) 0.841 sec. (h) 1.041 sec. (i) 1.241 sec. (j) 1.400 sec.

Fig. 6 Configuration of bubble cloud with time

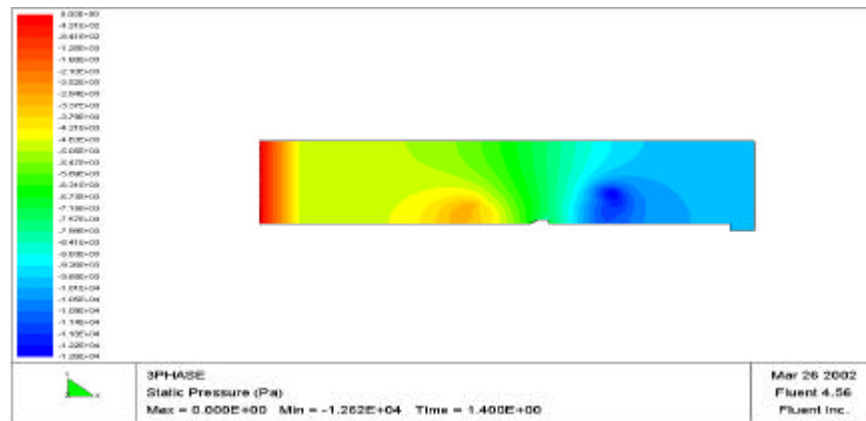
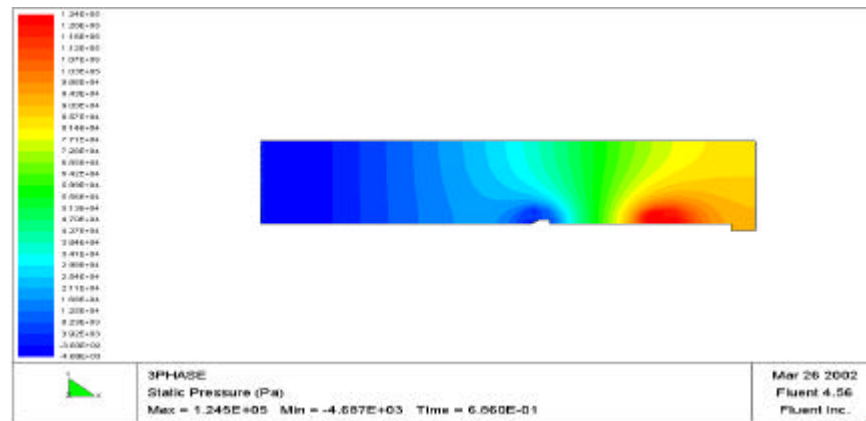
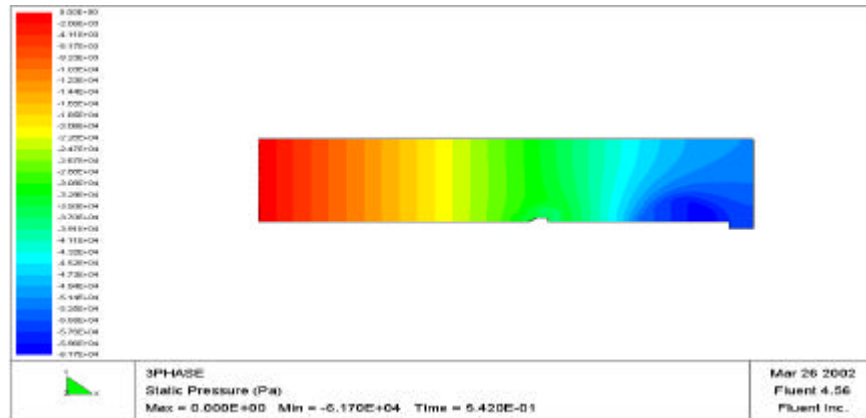


Fig. 7 Pressure distribution in the pool

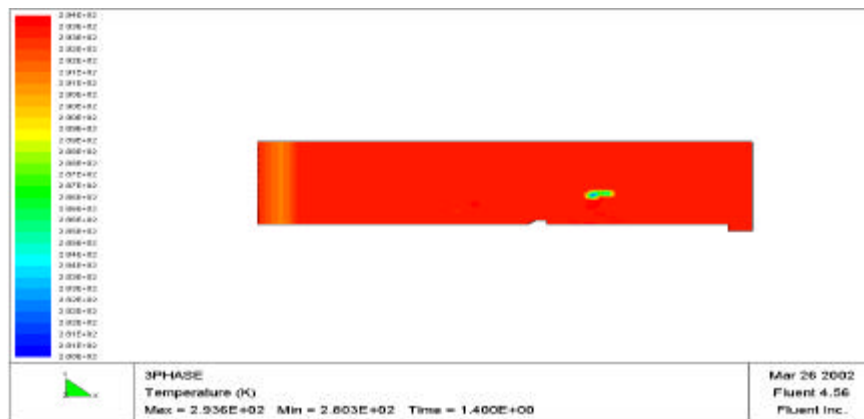
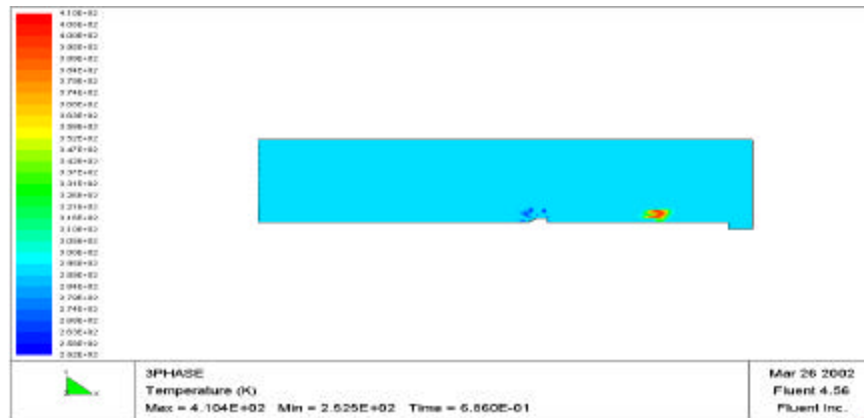
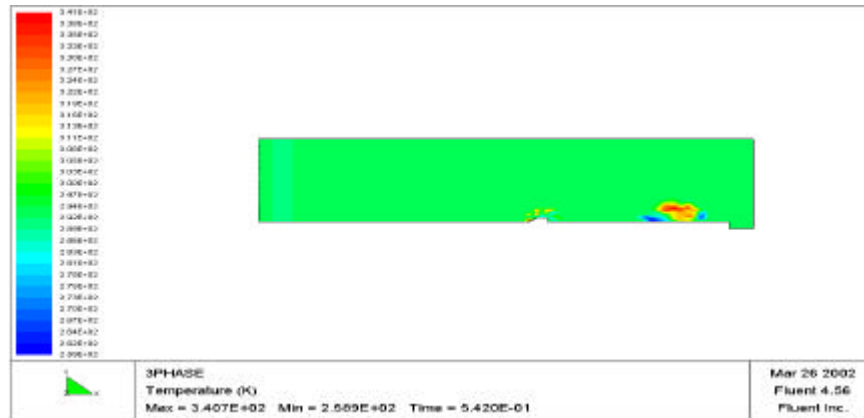


Fig. 8 Temperature distribution in the pool

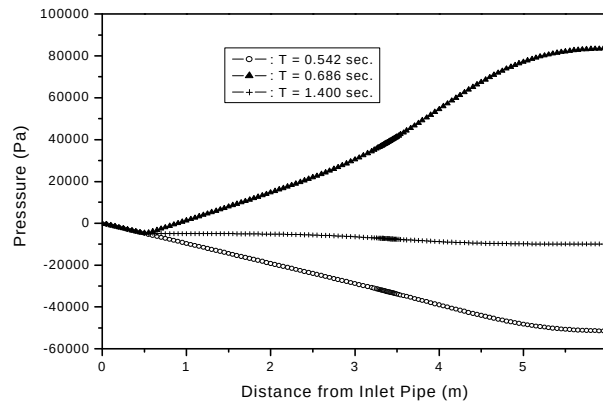


Fig. 9 Wall dynamic pressure vs. distance from inlet pipe

5. 결 론

Sparger를 통해 과냉각 수조내로 방출되는 공기 기포군에 의해 형성된 유동장에 대한 해석을 범용 열수력 해석 코드인 FLUENT Version 4.5를 사용하여 수행하였다. 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 I형 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.

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., Hemisphere Publishing Corp., (1986).