

하중저감 링이 없는 증기분사기에서 방출된 공기기포 진동

Oscillation of Air Bubble Discharging through a Sparger without  
Load Reduction Ring

김환열, 배운영, 송진호, 김희동  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하중저감 링은 안전감압계통 작동시 발생하는 공기 기포군의 진동 하중을 줄이기 위해 ABB-Atom sparger에 설치된 기구이다. 본 연구에서는 하중저감 링이 없는 sparger를 통해 수조 내로 방출되는 공기 기포군의 진동에 대한 수치해석을 상용 열수력 해석 코드인 FLUENT Version 4.5를 사용하여 수행하였다. 코드에 내재된 다상유동 모델 중 VOF(Volume Of Fluid) 모델을 사용하여 물, 공기 및 증기 유동을 모의하였다. 해석결과를 기존의 해석결과와 비교하여 하중저감 링은 벽면 압력 하중을 거의 반으로 줄이는 효과가 있음을 확인하였다. 아울러 배관내의 공기량과 배관 입구 조건이 벽면 압력 진동에 미치는 영향도 분석하였다.

Abstract

Load reduction ring(LRR) was installed on the ABB-Atom sparger to reduce the oscillatory loadings due to the air bubble clouds in case of safety relief system operations. This study presents a numerical analysis on the oscillation of air bubble clouds discharging through a sparger without LRR by using a commercial thermal hydraulic analysis code, FLUENT, version 4.5. Among the multi-phase models contained in the code, the VOF (Volume Of Fluid) model was used to simulate the interface of water, air and steam flows. By comparing the analysis results with the previous ones, the load reduction ring has an effect on reducing the oscillatory loads at the wall almost by half. It also includes the effect of air mass and inlet boundary conditions of the pipe on the pressure oscillations at the wall.

## 1. 서론

비등경수로(BWR: boiling water reactor)나 APR1400과 같은 개량형 가압경수로(PWR: pressurized water reactor)에서 사고시 안전감압계통이 작동하면, 물, 공기 및 증기가 과냉각 수조로 방출하게 된다. 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. 이 중에서 물과 증기가 방출되는 과정 중에 발생하는 압력하중은 비교적 작으며 고압으로 방출된 공기 기포군은 저주파, 고진폭의 진동하중을 발생하며 특히 주파수가 침수 구조물의 고유 주파수와 거의 같은 경우에는 침수 구조물 및 수조 벽면에 심각한 영향을 준다는 것이 많은 실험과 해석을 통하여 알려져 있다<sup>1, 2)</sup>.

공기 기포의 진동 하중을 줄이고 공기 기포의 진동수가 침수 구조물의 고유 진동수 근처로 유지되어 발생하는 공진 현상을 막기 위해 여러 종류의 sparger가 개발되었다. ABB-Atom은 방출된 증기가 공기와 섞여 suppression pool로 주입되면서 일어나는 현상과 구조물에 가해지는 하중을 규명하기 위한 광범위한 실험을 수행하여 sparger를 개발하였다. ABB-Atom sparger에서 특징중의 하나는 공기 기포의 진동을 줄이기 위해 sparger 상부에 설치되어 있는 하중저감 링(LRR: load reduction ring)이다[Fig. 1].

ABB-Atom sparger를 통해 과냉각 수조로 방출되는 물/공기/증기의 수력학적 거동에 대한 수치해석은 Kim 등<sup>3)</sup>에 의해 수행되었다. Kim 등<sup>3)</sup>에서는 sparger 개발을 위해 ABB-Atom이 수행하였던 실험자료 중에서 최적 sparger 하중실험 데이터를 이용하여 해석모델을 검증하여 전산코드 및 해석모델의 적용 가능성을 평가하여 만족할 만한 결과를 얻었고, LRR과 sparger head에서 형성된 두 개의 공기 기포군이 각각 진동을 하면서 상호작용에 의해 압력장을 이루고 있음을 확인하였다. 본 연구는 Kim 등<sup>3)</sup>에 의해 수행된 수치해석의 후속 연구로서, LRR이 공기 기포군의 압력진동에 미치는 영향을 알아보기 위해 LRR을 인위적으로 막은 후 물/공기/증기의 수력학적 거동에 대한 수치해석을 수행하였다. 아울러 배관내의 공기량과 배관 입구 조건이 벽면 압력 진동에 미치는 영향도 분석하였다. 해석에 사용한 CFD 코드는 범용 열수력 해석 코드인 FLUENT Version 4.5이었으며, 내재된 다상유동 해석모델중 압축성 VOF(Volume Of Fluid) 모델을 사용하여 물/공기/증기 등의 다상유동을 모의하였다.

## 2. 수학적 모델 및 지배 방정식

### 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  $\varepsilon_k$ 라 표시할 때,  $\varepsilon_k=0$ 는 제어체적이  $k$ 번째 유체가 전혀 없음을  $\varepsilon_k=1$ 은 제어체적이  $k$ 번째 유체로 전부 채워져 있음을  $0<\varepsilon_k<1$ 는 제어체적이 다상유동의 경계면에 위치함을 각각 의미한다. 따라서 각 제어체적에서는 체적분율  $\varepsilon_k$  값을 기초로 하여 적절한 변수값 및 물성치들이 할당되게 된다. 지배방정식 및 물성치는 다음과 같이 표시된다<sup>4)</sup>.

#### $k$ 번째 상에 대한 연속방정식

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

#### 밀도, 점성계수 및 열전도도

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

#### 비열

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

#### 엔탈피

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

#### 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 방출구와 같이 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  $k-\varepsilon$  모델<sup>4)</sup>을 사용하였다.

### 2-3. 다공성매질 모델

해의 수렴성을 향상시키기 위하여 sparger head의 작은 구멍 및 sparger bottom의 구멍들이 존재하는 영역을 다공성매질(porous media) 영역으로 설정하였다. 이 영역은 침투성(permeability)과 관성저항계수(inertial resistance factor)등에 의하여 운동량의 변화를 나타낼 수 있게 되어 있다. 본 해석에서는 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

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 bottom 은 탱크 바닥면으로부터 약 0.5m 떨어져 있다. 본 해석에서는 경계조건으로 sparger bottom으로부터 5.5m 떨어진 배관에서의 압력(P5)을 사용하였고 탱크 옆면에서 측정된 동압(P10)을 해석결과로 사용하였다.

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(inlet 1)로, B면(격자의 우측 상단)을 외부 대기로 개방되어 있는 출구(inlet 2)로 모델링하였다. 또한 C와 D 부근의 방출배관과 수조를 연결하고 있는 셀을 다공성매질(porous media) 영역; PM 1 (sparger head)와 PM 2 (sparger bottom)로 각각 모델링하였고 Kim 등<sup>3)</sup>과는 다르게 LRR은 인위적으로 막아 LRR이 존재하지 않는 것으로 모사하였다.

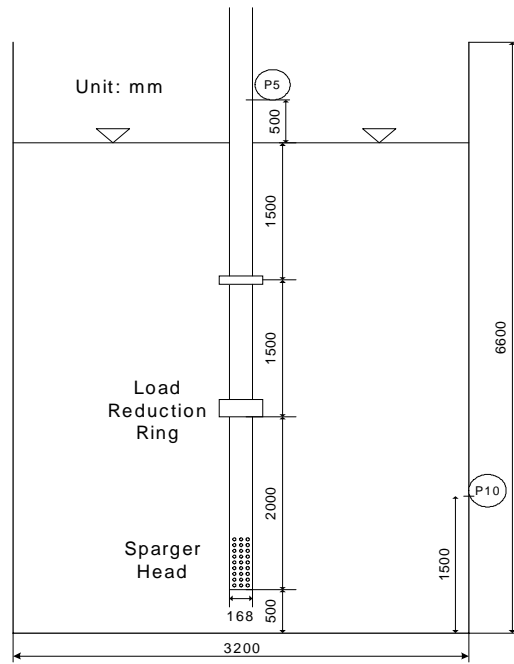


Fig. 1 Location of sparger and pressure sensor

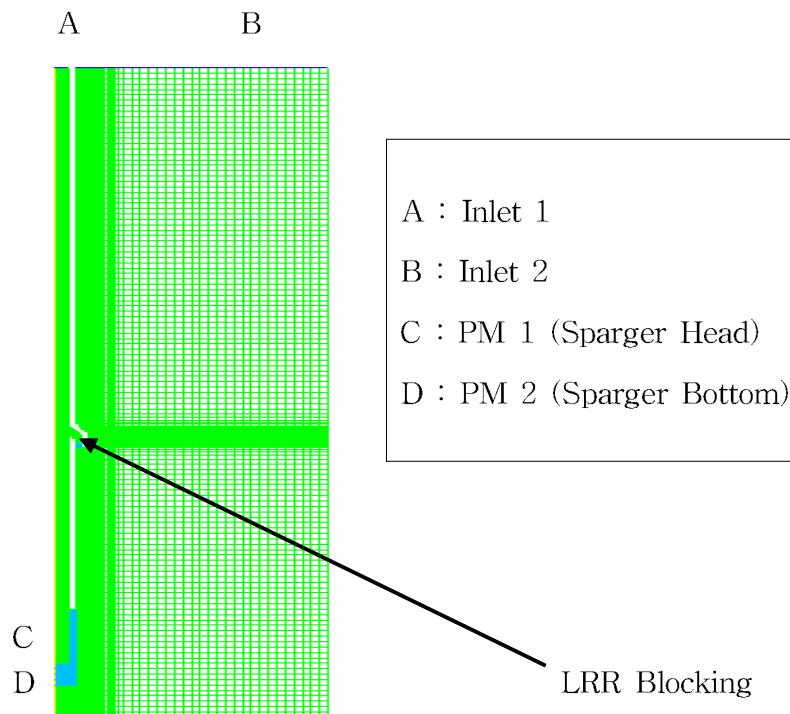


Fig. 2 Configuration of grid

### 3-2. 해석 입력자료 및 절차

Table 1은 해석시 사용된 물, 공기 및 증기가 유입되는 입구(inlet 1)에서의 시간에 따른 압력 및 온도로서 Nilsson<sup>2)</sup>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  $9.8 \text{ m/sec}^2$ 을 사용하였다. 초기조건은 수조의 운전압력을  $10^5 \text{ Pa}$ 로 설정하고, 물의 수위 이상 및 이하의 격자에 대해서 물의 체적분율을 각각 0과 1로 설정하였다. 물의 밀도는  $1000 \text{ kg/m}^3$ , 증기의 밀도는  $10 \text{ kg/m}^3$ 로 설정하였다. 제 1상의 유체를 공기로 결정하였고, 공기에 대해서는 이상기체방정식에 의해 압력에 따른 밀도변화가 가능하도록 하였다.

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 2는 다공성 매질 영역의 변수를 나타낸다. 다공성매질 영역을 통과하는 공기의 임계 유속은 sparger head 및 bottom의 실제 면적을 해석격자 면적으로 나눈 값에 실제 공기 임계 유속(본 계산에서는  $370 \text{ m/s}$  사용)을 곱하여 산정하였다. 유동이 임계조건에 도달하게 되면 산정된 임계유속으로 고정(fixed velocity)된다. 다공성매질 영역에서의 운동량 변화는 관성저항계수를 사용하여 나타내었다. 다공성매질 영역인 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. Kim 등<sup>3)</sup>의 해석결과 Nilsson<sup>2)</sup>에 나타난 ABB-Atom의 측정값을 가장 근접하게 모사하는 LRR, sparger head 및 sparger bottom에서의 K 값은 각각 5.2, 7.8, 7.8 이었다. LRR이 있는 해석결과와의 비교를 위해, 본 연구에서는 LRR은 막고 sparger head 및 sparger bottom에서의 K 값은 각각 7.8과 7.8을 사용하였다.

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

Table 2 Parameter at porous media region

	Real area (m <sup>2</sup> )	Grid area (m <sup>2</sup> )
Real area (m <sup>2</sup> )	0.01131	0.00049
Grid area (m <sup>2</sup> )	0.25133	0.04524
Grid length (m)	0.04	0.2
Fixed velocity (m/s)	16.65	4.02
K value	7.8	7.8
Inertial resistance factor (m <sup>-1</sup> )	96291	331089

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 sparger head와 bottom으로 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 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 sparger head를 완전히 통과하면 sparger head의 porous 셀은 wall로 변경되고, 아울러 전 배관 내부도 wall로 변경되어 증기의 수조 유입을 차단시킨다.

#### 4. 결과 및 토의

##### 4-1. LRR이 벽면 압력진동에 미치는 영향

ABB-Atom에서 수행하였던 run 186 실험(최적 sparger인 M150 부착)에서 배관 내부에 차 있는 공기량은 약 0.4046kg으로 계산되었으므로 본 해석에서도 동일한 양의 공기가 수조로 방출되어 진동하는 현상을 모의하여 LRR이 있는 경우<sup>3)</sup>와 비교하였다.

Table 3은 inlet 1에 증기가 들어오기 시작하는 시간, 공기 방출이 완료되어 LRR 및 전 배관을 blocking한 시간 등을 나타낸 것이다. LRR이 없는 경우 물과 공기가 빠져나가는 출구가 적게 되므로 inlet 1에 증기가 들어오는 시간 및 전 배관을 blocking한 시간이 길어짐을 알 수 있다.

Table 3 Time at the specific events

	With LRR <sup>3)</sup>	Without LRR
Steam at inlet 1 (s)	0.192	0.203
LRR blocking (s)	0.361	N/A
All pipings blocking (s)	0.439	0.496

Table 4는 벽면(Fig. 1의 P10)에서의 최대동압과 주파수를 나타낸 것이다. LRR이 없는 경우 벽면에서의 동압(특히 양의 동압)이 LRR이 있는 경우보다 크게 나타나고 있어, LRR이 벽면의 압력진동을 줄이는 역할을 하고 있음을 알 수 있다. LRR이 있는 경우 LRR과 sparger head에 형성된 두 개의 공기 기포가 서로 다른 위상을 가지고 진동하므로 상호 작용에 의해 압력이 작아지지만<sup>3)</sup> LRR이 없는 경우 sparger head에서 커다란 한 개의 공기 기포만 형성되므로 벽면의 동압이 크게된다. 주파수의 경우 LRR이 없는 경우가 약간 작아지는데, 이는 두 개의 공기 기포가 형성되는 LRR이 있는 경우보다 상대적으로 큰 한 개의 공기 기포가 형성되기 때문이다. 일반적으로 대형 기포의 경우 주파수는 기포 반경이 클수록 작아지는 경향<sup>5)</sup>을 보인다.

Table 4 Comparison of the cases with and without LRR

	With LRR <sup>3)</sup>	Without LRR
Net negative pressure (Pa)	-50800	-61800
Net positive pressure (Pa)	82700	174200
Frequency (Hz)	4.37	4.10

Fig. 3은 벽면(Fig. 1의 P10)에서의 동압을 나타낸 것이다. LRR 유, 무에 따라 진동이 시작하는 시점, 진폭 및 주파수가 상이함을 알 수 있다.

Fig. 4는 시간에 따른 수조내의 기포 거동을 나타낸 것이다. 여기에서 0.203 sec는 배관입구에 증기가 형성되는 시점이다. 0.600 sec는 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점을 0.733 sec는 벽면에 최대 양압이 형성되는 시점을 나타내며 그 외의 시간은 계산 과정 중의 임의의 시간을 나타낸다. 시간이 경과함에 따라 sparger head 부분에 커다란 한 개의 기포군이 형성되어 점차 찌그러들어 부력에 의해 수면 위로 상승함을 알 수 있다. 또한, 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.600 sec에 기포의 총 부피는 대략 최대가 되며 최대 양압이 형성되는 시점인 0.733 sec에 기포의 총 부피는 대략 최소가 됨을 알 수 있다.



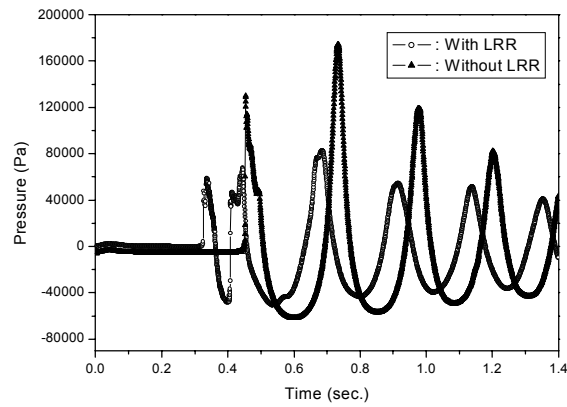


Fig. 3 Comparison of wall dynamic pressure (P10 of Fig. 1)

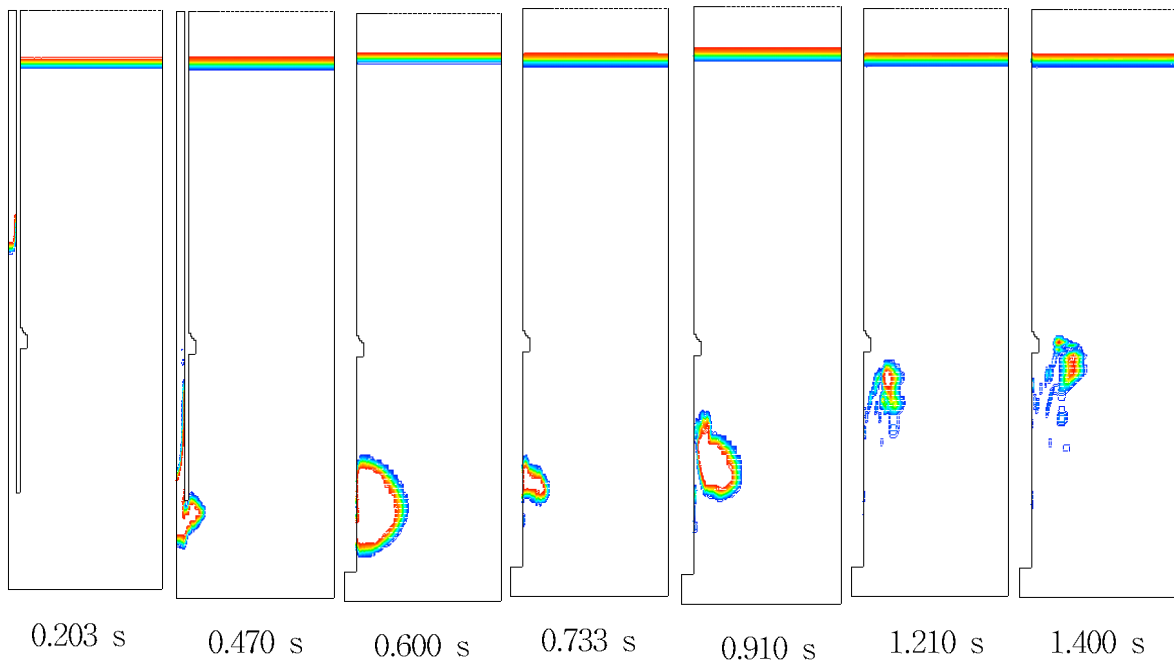


Fig. 4 Configuration of air bubble with time

Fig. 5는 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.600 sec.와 벽면에 최대 양압이 형성되는 시점인 0.733 sec. 에서 수조내 압력분포를 나타낸 것이다. 0.600 sec.에서는 공기 기포 내부의 압력이 압력장 내에서 가장 낮으며, 0.733 sec.에서는 공기 기포 내부의 압력이 압력장 내에서 가장 높은 것을 알 수 있다.

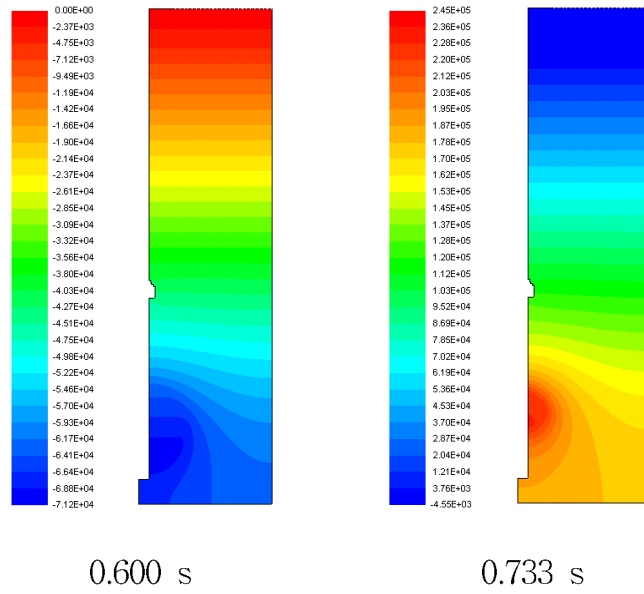


Fig. 5 Pressure distribution in the pool

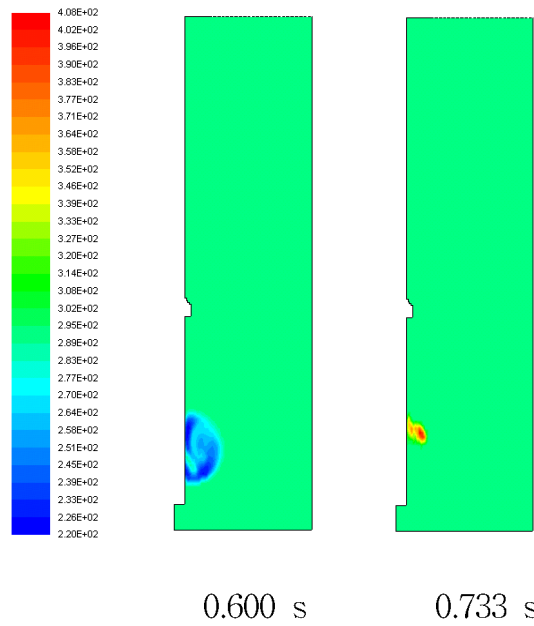


Fig. 6 Temperature distribution in the pool

Fig. 6은 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.600 sec와 벽면에 최대 양압이 형성되는 시점인 0.733 sec. 에서 수조내 온도분포를 나타낸 것이다. 0.600 sec.에서는 공기 기포 내부의 온도가 주위 물 온도보다 낮으며, 0.733 sec.에서는 공기 기포 내부의 온도가 주위 물 온도보다 높은 것을 알 수 있다.

#### 4-2. 배관 내 공기량이 벽면 압력진동에 미치는 영향

배관 내부의 공기량이 벽면 압력진동에 미치는 영향을 알아보기 위해 ABB-Atom 실험 배관의 공기량 0.4046 kg 이외에 공기량을 0.2023 kg과 0.6069 kg으로 변화시켜 계산을 수행하였다. 물, 공기 및 증기가 유입되는 입구(inlet 1) 및 다공성 매질 영역의 변수는 Table 1과 2에 나와있는 수치를 그대로 사용하였다.

Table 5는 벽면(Fig. 1의 P10)에서의 최대동압과 주파수를 나타낸 것이다. 본 계산 영역에서는 공기량이 벽면동압에 미치는 뚜렷한 경향은 나타나지 않았다. 그러나 주파수는 공기량이 증가할수록 작아지는 경향을 보이고 있어 대형 기포의 경우 주파수는 기포 반경에 반비례하는 일반적인 경향<sup>5)</sup>과 잘 일치하였다.

Fig. 7은 벽면(Fig. 1의 P10)에서의 동압을 나타낸 것이다. 배관 내 공기량이 작을수록 공기 배출시간이 짧아지므로 공기 기포가 진동을 시작하는 시점이 빨라지는 경향을 볼 수 있다.

Table 5 Maximum pressures and frequency with the change of air mass

	Air mass (kg)		
	0.2023	0.4046	0.6069
Net negative pressure (Pa)	-61000	-61800	-63000
Net positive pressure (Pa)	196500	174200	187600
Frequency (Hz)	6.02	4.10	3.17

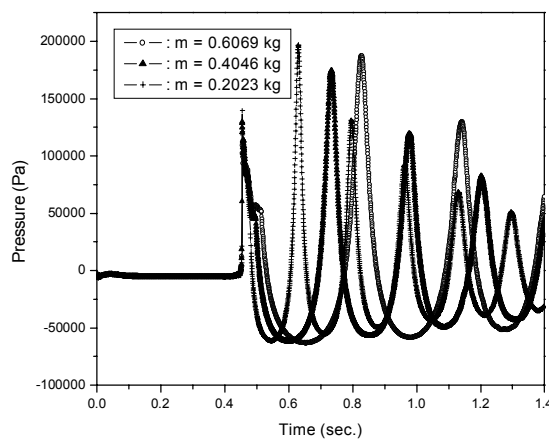


Fig. 7 Wall dynamic pressure with the change of air mass (P10 of Fig. 1)

#### 4-3. 배관 입구조건이 벽면 압력진동에 미치는 영향

배관 입구조건이 벽면 압력진동에 미치는 영향을 알아보기 위해 Table 1에 나와있는 ABB-Atom 실험의 배관 입구조건 이외에 압력을 0.3 MPa 만큼 증가시키는 경우와 0.3 MPa 만큼 감소시키는 경우에 대한 계산을 수행하였다. 배관 내 공기량은 0.4046 kg을 사용하였고 매질 영역의 변수는 Table 2에 나와있는 수치를 그대로 사용하였다. Table 7은 계산에 사용된 배관 입구조건이다.

Table 6은 벽면(Fig. 1의 P10)에서의 최대동압과 주파수를 나타낸 것이다. 배관 입구 압력이 증가할수록 주위 물에 더 큰 관성을 주기 때문에 벽면의 최대 양압 및 음압이 증가하는 경향을 보였다. 주파수는 배관 입구 압력이 증가할수록 증가하는 경향을 보이고 있어 잘 알려진 경향<sup>6)</sup>과 일치하였다.

Fig. 8은 벽면(Fig. 1의 P10)에서의 동압을 나타낸 것이다. 배관 입구 압력이 증가할수록 공기 배출시간이 짧아지므로 공기 기포가 진동을 시작하는 시점이 빨라지는 경향을 볼 수 있다.

Table 6 Inlet 1 boundary conditions

Time (s)	Inlet 1 pressure (MPa) / temperature (°K)	
	Case of pressure increase by 0.3 MPa	Case of pressure increase by 0.3 MPa
0	0 / 293	0 / 293
0.041	0.76 / 542	1.36 / 630
0.237	1.03 / 586	1.63 / 662
0.463	1.03 / 586	1.63 / 662

Table 7 Maximum pressures and frequency with the change of inlet 1 boundary condition

	Inlet 1 pressure		
	Decrease by 0.3 MPa	Same as ABB-Atom	Increase by 0.3 MPa
Net negative pressure (Pa)	-57600	-61800	-68220
Net positive pressure (Pa)	140100	174200	234500
Frequency (Hz)	3.60	4.10	4.32

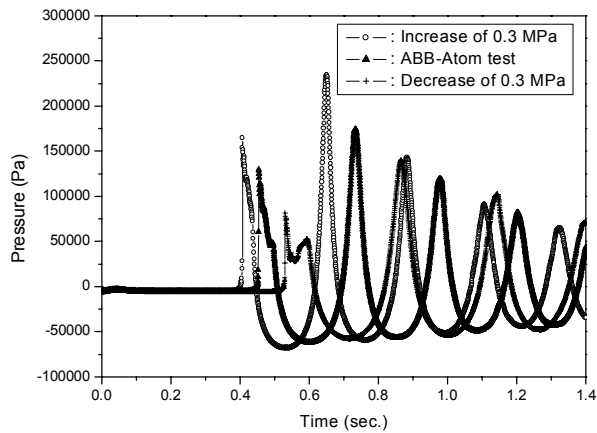


Fig. 8 Wall dynamic pressure with the change of inlet 1 boundary condition (P10 of Fig. 1)

## 5. 결 론

하중저감 링이 없는 sparger를 통해 방출되는 공기 기포군의 진동에 대한 해석을 상용 열수력 해석 코드인 FLUENT Version 4.5를 사용하여 수행하였다. 코드에 내재된 다상 유동 모델 중 VOF(Volume Of Fluid) 모델을 사용하여 물, 공기 및 증기 유동 등을 모의하였다. 커다란 공기 기포군이 sparger head 부근에 한 개가 형성되며 시간이 지남에 따라 점차 찌그러들어 부력에 의해 수면 위로 상승하였다. 하중저감 링이 있는 기존의 해석과 비교한 결과, 벽면 압력 하중은 거의 반으로 감소하였고 주파수는 증가하였다. 배관내의 공기량이 벽면 압력 하중에 미치는 뚜렷한 경향은 나타나지 않았으며 공기량이 증가할수록 주파수는 증가하였다. 배관 입구 압력이 증가할수록 벽면 압력 하중과 주파수는 증가하였다.

## 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] Kim, H. Y. and Bae, Y. Y.: "Numerical Analysis of Flow Field Formed by Air Bubble Discharging through a Sparger", Proc. of KNS meeting, Oct. (2002).
- [4] FLUENT user's guide manual, version 4.3, (1995).
- [5] Moody, F. J., Introduction to Unsteady Thermofluid Mechanics, John Wiley & Sons, Inc., (1990).
- [6] Brennen, C. E., Cavitation and Bubble Dynamics, Oxford Univ. Press, (1995).