

Sparger를 통해 수조로 방출되는 공기방울  
거동 수치해석

Numerical Analysis on the Behavior of Air Bubble  
Discharging into a Water Pool through a Sparger

KAERI

한국원자력연구소

# 제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 2002년도 “차세대원자로 계통해석 및 평가기술 개발” 과제의 기술보고서로 제출합니다.

2002. 7.

과 제 명 : 차세대원자로 계통해석 및 평가기술 개발

주 저 자 : 김 환 열

공 저 자 : 배 윤 영

## 요 약 문

한국형차세대원자로 APR-1400의 안전감압배기시스템이 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. 따라서 sparger와 침수 구조물 설계시 고려해야할 공기 기포군의 진동 하중을 예측하는 수치해석 모델을 개발하는 것은 의미있는 일이다. 본 보고서에서는 sparger를 통해 수조 내로 방출되는 공기 기포군의 거동에 대한 수치해석을 상용 열수력 해석 코드인 FLUENT Version 4.5를 사용하여 수행하였다. 다상유동 해석모델중 대형 기포군의 거동 모의에 적합하고 아울러 제 1상인 공기에 대한 압축성 모델 적용이 가능한 VOF(Volume Of Fluid) 모델을 사용하여 물, 공기 및 증기 등의 다상유동을 모의하였다. 해석결과를 BWR sparger 개발을 위해 ABB-Atom이 수행하였던 실험결과와 비교하여 만족할만한 결과를 얻었다. 아울러 배관내 공기량 및 배관 입구조건 변화가 공기 기포군의 거동에 미치는 영향도 알아보았으며, LRR과 sparger head에 형성되는 2개의 대형 기포군의 진동 위상이 수조내 압력장에 많은 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

## SUMMARY

If the safety depressurization and vent system of APR-1400, the Korean next generation reactor, is in operation, water, air and steam are successively discharging into an in-containment refueling water storage tank through a sparger. 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. Thus, it is valuable to develop a computational model on the air bubble cloud oscillation, whose loads should be considered in the design of sparger and submerged structures. This report 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, since the VOF model, which treats a first phase fluid, air, as a compressible fluid, is proper for the simulation of large air bubble cloud. A satisfactory result was obtained comparing the analysis results with the ABB-Atom test results which had been performed for the development of a BWR sparger. In addition, effects of air mass and inlet condition of the pipe on the behavior of air bubble cloud were included. It was found that the oscillation phases of two air bubble clouds formed at the LRR and sparger head have an impact on the pressure field in the pool.

# 목 차

제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구배경 .....	1
제 2 절 목적 및 범위 .....	3
제 2 장 수학적 모델 .....	4
제 1 절 VOF 모델 .....	4
제 2 절 다공성매질(porous media) 모델 .....	6
제 3 절 압축성 모델 .....	7
제 4 절 난류 모델 .....	8
제 3 장 해석방법 .....	9
제 1 절 해석대상 및 격자 .....	9
제 2 절 해석 입력자료 및 절차 .....	14
제 4 장 결과 및 토의 .....	18
제 1 절 손실계수(K) 변화에 따른 해석 .....	18
제 2 절 공기량 변화에 따른 해석 .....	31
제 3 절 배관 입구조건 변화에 따른 해석 .....	44
제 5 장 결 론 .....	57
제 6 장 참고문헌 .....	58

## 표 목 차

Table 3-1 Boundary condition at inlet 1 .....	14
Table 3-2 Parameter at porous media region .....	15
Table 3-3 K value and inertial resistance factor .....	16
Table 4-1 Time at the specific event for case 1 ~ case 5 .....	18
Table 4-2 Max. negative and positive pressures for case 1 ~ case 5 .....	21
Table 4-3 Time at the specific event for the case of air mass change .....	31
Table 4-4 Max. negative and positive pressures for the case of air mass change .....	32
Table 4-5 Boundary condition at inlet 1 ( $P_{\text{inlet}}=P_{\text{test}}+0.3\text{MPa}$ ) .....	44
Table 4-6 Boundary condition at inlet 1 ( $P_{\text{inlet}}=P_{\text{test}}-0.3\text{MPa}$ ) .....	44
Table 4-7 Time at the specific event for the case of inlet condition change .....	45
Table 4-8 Max. negative and positive pressures for the case of inlet condition change .....	46

## 그 립 목 차

Fig. 1-1 Schematic of safety depressurization system for APR-1400 .....	1
Fig. 3-1 Schematic of ABB-Atom unit cell test facility .....	9
Fig. 3-2 Configuration of a sparger for APR-1400 .....	10
Fig. 3-3 Location of sparger and pressure sensor .....	11
Fig. 3-4 Pressure measurement for ABB-Atom test run 186 .....	12
Fig. 3-5 Configuration of grid .....	13
Fig. 4-1 Velocity and density of air at (12, 4) for case 1 .....	19
Fig. 4-2 Pressure measurement at P10 for ABB-Atom test .....	20
Fig. 4-3 Wall dynamic pressure with various loss coefficients (I) .....	22
Fig. 4-4 Wall dynamic pressure with various loss coefficients (II) .....	23
Fig. 4-5 Comparison of ABB-Atom test and simulation results .....	24
Fig. 4-6 Configuration of bubble cloud with time (case 5) .....	27
Fig. 4-7 Pressure distribution in the pool (case 5) .....	28
Fig. 4-8 Temperature distribution in the pool (case 5) .....	29
Fig. 4-9 Wall dynamic pressure vs. distance from inlet pipe (case 5) .....	30
Fig. 4-10 Wall dynamic pressure with the change of air mass .....	32
Fig. 4-11 Configuration of bubble cloud with time (m=0.2697 kg) .....	36
Fig. 4-12 Pressure distribution in the pool (m=0.2697 kg) .....	37
Fig. 4-13 Temperature distribution in the pool (m=0.2697 kg) .....	38
Fig. 4-14 Wall dynamic pressure vs. distance from inlet pipe (m=0.2697 kg) .....	39
Fig. 4-15 Configuration of bubble cloud with time (m=0.1349 kg) .....	40
Fig. 4-16 Pressure distribution in the pool (m=0.1349 kg) .....	41
Fig. 4-17 Temperature distribution in the pool (m=0.1349 kg) .....	42
Fig. 4-18 Wall dynamic pressure vs. distance from inlet pipe (m=0.1349 kg) .....	43
Fig. 4-19 Wall dynamic pressure with the change of inlet pressure .....	46
Fig. 4-20 Configuration of bubble cloud with time ( $P_{inlet}=P_{test}+0.3MPa$ ) .....	49

Fig. 4-21 Pressure distribution in the pool ( $P_{\text{inlet}}=P_{\text{test}}+0.3\text{MPa}$ ) .....	50
Fig. 4-22 Temperature distribution in the pool ( $P_{\text{inlet}}=P_{\text{test}}+0.3\text{MPa}$ ) .....	51
Fig. 4-23 Wall dynamic pressure vs. distance from inlet pipe ( $P_{\text{inlet}}=P_{\text{test}}+0.3\text{MPa}$ ) .....	52
Fig. 4-24 Configuration of bubble cloud with time ( $P_{\text{inlet}}=P_{\text{test}}-0.3\text{MPa}$ ) ...	53
Fig. 4-25 Pressure distribution in the pool ( $P_{\text{inlet}}=P_{\text{test}}-0.3\text{MPa}$ ) .....	54
Fig. 4-26 Temperature distribution in the pool ( $P_{\text{inlet}}=P_{\text{test}}-0.3\text{MPa}$ ) .....	55
Fig. 4-27 Wall dynamic pressure vs. distance from inlet pipe ( $P_{\text{inlet}}=P_{\text{test}}-0.3\text{MPa}$ ) .....	56

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구배경

설계기준초과 사고시 가압기로부터 방출되는 물/공기/증기에 의해 배관 내부 및 격납건물내 핵연료재장전수조 (IRWST : in-containment refueling water storage tank)가 받는 하중을 작게 하고 수조 내부로 방출되는 증기를 효율적으로 응축시키기 위해 Fig. 1-1과 같이 총 12개의 sparger가 안전감압 배기계통 배관 끝에 설치되어 있다.

원자로냉각재계통의 과압에 의해 안전밸브가 열려 안전감압계통 배관을 통하여 고온 고압의 증기가 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, 이후 증기가 방출되면서 응축(condensation) 된다.

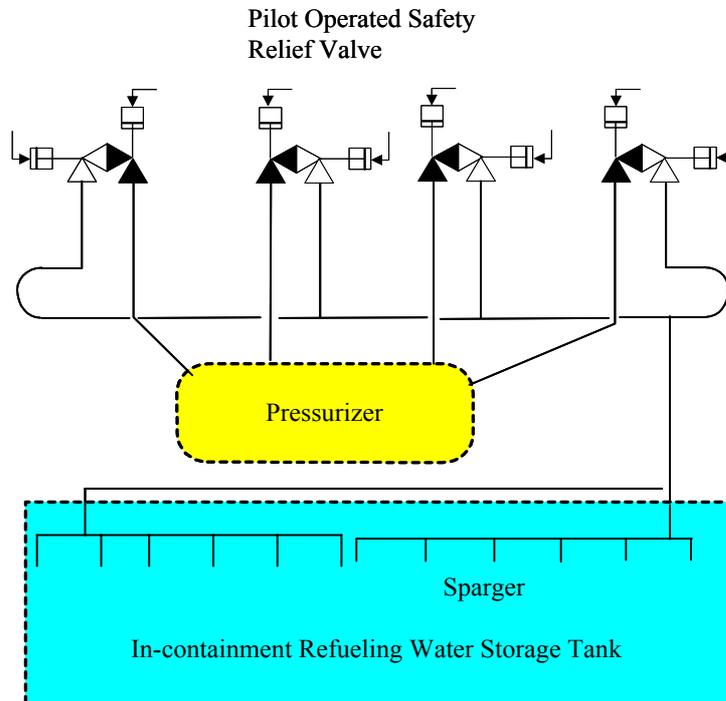


Fig. 1-1 Schematic of safety depressurization system for APR-1400

이러한 방출 과정에 발생하는 현상들은 물 방출시의 water jet, 공기 방출시의 기포군(bubble cloud)에 의한 압력변동, 증기방출시의 증기의 응축 현상 등이다. 이중에서 물과 증기가 방출되는 과정중에 발생하는 하중은 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<sup>[1, 2, 3]</sup>. 고온, 고압의 공기가 수조 내부로 방출되면 초기에 응축되지 않은 공기는 주위를 둘러싸고 있는 물과의 압력 차이 때문에 팽창하게 되고, 따라서 주위 물은 공기 기포를 중심으로 바깥쪽으로 이동하게 된다. 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 주위로의 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 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.

Sparger를 통해 뿜려있는 많은 구멍을 통해 상호 작용을 하면서 고온, 고압의 물/공기/증기가 방출되기 때문에 수조내의 기포진동 하중 분석은 주로 실험에 의존해 왔다. 그러나 실험에 의한 방법은 비용 및 시간 측면에서 많은 불리한 점이 있기 때문에 현상 자체가 난해하지만 기포진동 하중을 예측

할 수 있는 단순화한 해석모델을 개발하는 것이 추후 sparger 개발을 위한 바람직한 도구를 제공하리라고 판단된다.

## 제 2 절 목적 및 범위

본 연구에서는 방출 배관 내부 및 IRWST 내에서의 물/공기/증기의 수력학적 거동을 해석할 수 있는 전산유체역학(CFD) 해석모델을 개발하였다. Sparger 개발을 위해 우선적으로 요구되는 것이 공기 방출시에 형성되는 수력학적 부하이므로, 본 연구에서는 공기 방출시 기포의 형성에 따른 압력형성 및 변동에 초점을 맞추어 배관 및 수조 내에서 발생하는 수력학적 현상을 CFD 코드를 이용하여 해석하였으며 증기 응축시의 거동은 분석범위에서 제외하였다. Sparger 개발을 위해 ABB-Atom이 수행하였던 실험자료<sup>[2]</sup> 중에서 최적 sparger 하중실험 데이터를 이용하여 해석모델을 검증하였다.

해석 CFD 코드는 범용 열수력 해석 코드인 FLUENT version 4.5를 사용하였으며, 내재된 다상유동 해석모델중 대형 기포군 모사에 적합하고 제 1상인 공기를 압축성 유체로 취급할 수 있는 VOF(Volume Of Fluid) 모델을 사용하여 물/공기/증기 등의 다상유동을 모의하였다. 해석결과에 영향을 영향을 크게 미치지 않는 실험설비의 일부를 단순화하여 해석을 수행하고, 실험결과를 해석결과와 비교 분석하여 전산코드 및 해석모델의 적용 가능성을 평가하였다. 아울러 배관 내부에 존재하는 공기량 및 배관 입구조건에 따른 기포거동 변화를 분석하였다.

## 제 2 장 수학적 모델

### 제 1 절 VOF 모델

FLUENT 코드에 내재된 다상유동 해석 모델<sup>[4]</sup> 중에서 기포군의 거동을 유사하게 해석할 수 있는 모델에는 VOF 모델과 Eulerian multiphase 모델이 있다. 기포 하나 하나의 거동을 모사하기에는 Eulerian multiphase 모델이 적합하지만, Eulerian multiphase 모델에는 공기방울 입자 상호간에 형성되는 인력을 모의할 수 있는 모델이 추가되지 않아 Eulerian multiphase 모델로는 공기방울이 방출되어 서로 혼합되면서 대형기포를 형성하는 것을 모의할 수는 없다. 반면 VOF 모델은 자유표면 또는 대형 기포의 거동을 해석하기 위해 개발된 모델이므로 공기방울 입자군에 의해 형성된 기포군을 모의하기에는 VOF 모델이 적절하다. 아울러 VOF 모델은 제 1상(여기에서는 공기)에 한해 압축성(compressible) 유동을 모의할 수 있다. 따라서 기포군의 거동과 제 1상에 대해 압축성 유동을 동시에 모의할 수 있는 VOF 모델을 해석 모델로 선정되었다.

VOF 모델은 유체-유체 혼합물이 서로 혼합되지 않고 거동할 때 이들의 거동과 경계면(interface)의 위치를 예측하기 위한 모델로서, 일반적으로 jet break-up의 예측, 액체 속에서의 대형 기포의 움직임, 댐 붕괴 후 유체의 거동, 액체와 가스 경계면의 추적 등에 적용할 수 있다.

VOF 모델에서 체적분율이라는 개념을 사용하여 각 상을 구분한다. 만약 다상유동 시스템에서  $k$ 번째 유체의 체적분율을  $\epsilon_k$ 라 표시하면  $\epsilon_k$ 에 따라 다음과 같은 관계가 성립한다.

$\epsilon_k=0$  : 제어체적에  $k$ 번째 유체가 전혀 없음.

$\epsilon_k=1$  : 제어체적이  $k$ 번째 유체로 전부 채워져 있음.

$0 < \epsilon_k < 1$  : 제어체적이 다상유동의 경계면에 위치함.

각 제어체적에서는 체적분율  $\epsilon_k$  값을 기초로 하여 적절한 변수값 및 물성치들이 할당되게 된다. 각 상이 이루는 경계면은 체적분율에 대한 연속방정식

을 계산하여 추적 계산한다.  $k$ 번째 상에 대한 연속방정식은 다음과 같은 형태로 표현될 수 있다.

$k$  번째 상에 대한 연속방정식

$$\frac{\partial \varepsilon_k}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon_k}{\partial x_j} = S_{\varepsilon k} \quad (2-1)$$

밀도, 점성계수 및 열전도도

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

여기서  $\phi$  는 밀도  $\rho$ , 점성계수  $\mu$ , 또는 열전도도  $k$  등을 나타낸다.

비열

$$C_p = \frac{\sum \varepsilon_k \rho_k C_{pk}}{\sum \varepsilon_k \rho_k} \quad (2-3)$$

엔탈피

$$h_p = \frac{\sum \varepsilon_k \rho_k h_k}{\sum \varepsilon_k \rho_k} \quad (2-4)$$

VOF 모델의 운동량 및 에너지 보존방정식은 전 계산영역에서 모든 상에 대하여 단일 보존방정식이 적용된다.

운동량보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_j + F_j \quad (2-5)$$

에너지보존 방정식

$$-\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} k \left( \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_h \quad (2-6)$$

## 제 2 절 다공성매질(porous media) 모델

해의 수렴성을 향상시키기 위하여 sparger의 하중저감링(Load Reduction Ring), sparger 옆면(head)의 작은 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 실제로 유체저항계수 값의 지배를 받는 영역은 매우 작고 대부분 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 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 고정되게(fixed velocity) 된다.

FLUENT 코드의 다공성매질에서의 운동량방정식은 다음과 같은 운동량 소멸항을 추가하여 계산된다<sup>[4]</sup>.

$$\frac{\mu}{\alpha} v + C_2 \left( \frac{1}{2} \rho v |V| \right) \quad (2-7)$$

여기서  $\alpha$  와  $C_2$  는 각각 사용자가 제공해야할 실험 값이며,  $\alpha$  는 각 구성 성분 방향의 침투성(permeability:  $m^2$ )을 나타내고,  $C_2$  는 관성저항계수

(inertial resistance factor:  $m^{-1}$ )를 나타낸다.

본 해석에서는 식(2-7)에서 첫째항을 없애고, 둘째항 만을 사용하여 압력 손실은 다음과 같이 단순화하였다.

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = C_{2,i} \left( \frac{1}{2} \rho u_i |u_i| \right) \quad (2-8)$$

이를 격자의  $i, j, k$  각 방향에 대하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta p_i &\approx C_{2,i} \Delta n_i \left( \frac{1}{2} \rho v_i |v_i| \right) \\ \Delta p_j &\approx C_{2,j} \Delta n_j \left( \frac{1}{2} \rho v_j |v_j| \right) \\ \Delta p_k &\approx C_{2,k} \Delta n_k \left( \frac{1}{2} \rho v_k |v_k| \right) \end{aligned} \quad (2-9)$$

### 제 3 절 압축성 모델

FLUENT 코드에서 이상기체법칙(ideal gas law)을 선택하여 밀도를 계산할 경우에 밀도는 다음과 같이 계산된다<sup>[4]</sup>.

$$\rho = \frac{P_{op} + P'}{RT \sum_i \frac{m_i}{M_i}} \quad (3.2.54)$$

여기서 R은 기체상수(universal gas constant),  $m_i$ 는 구성성분  $i$ 의 질량분율(mass fraction),  $M_i$ 는 구성성분  $i$ 의 분자량(molecular weight),  $P_{op}$ 는 사용자가 정의하는 운전압력(operating pressure),  $P'$ 는 국부압력(local pressure)을 각각 나타낸다. 본 해석에서는 제 1상인 공기에 대해서만 압축성 모델이 적용되어 계산이 수행되었다.

#### 제 4 절 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  $k-\epsilon$  모델<sup>[4]</sup>을 사용하였다.

### 제 3 장 해석방법

#### 제 1 절 해석대상 및 격자

비등경수로(boiling water reactor) sparger 개발을 위해 수행되었던 ABB-Atom의 unit cell 실험<sup>[2]</sup>을 해석대상으로 하였다. Unit cell 실험은 1974년과 1975년에 걸쳐 ABB-Atom에서 실 규모 (full scale)로 수행되었으며 주로 방출초기과정에서의 동적하중을 최소화하는 sparger 사양을 결정하는데 주안점을 두었다. 이밖에 증기방출밸브가 닫힐 때 배관 주위의 물이 배관 내부로 빨려 들어가는 것을 방지하기 위한 진공밸브(vacuum valve) 선정에 관한 실험과 수조온도와 증기유량이 변화할 때의 압력하중 측정에 관한 실험 등이 수행되었다.

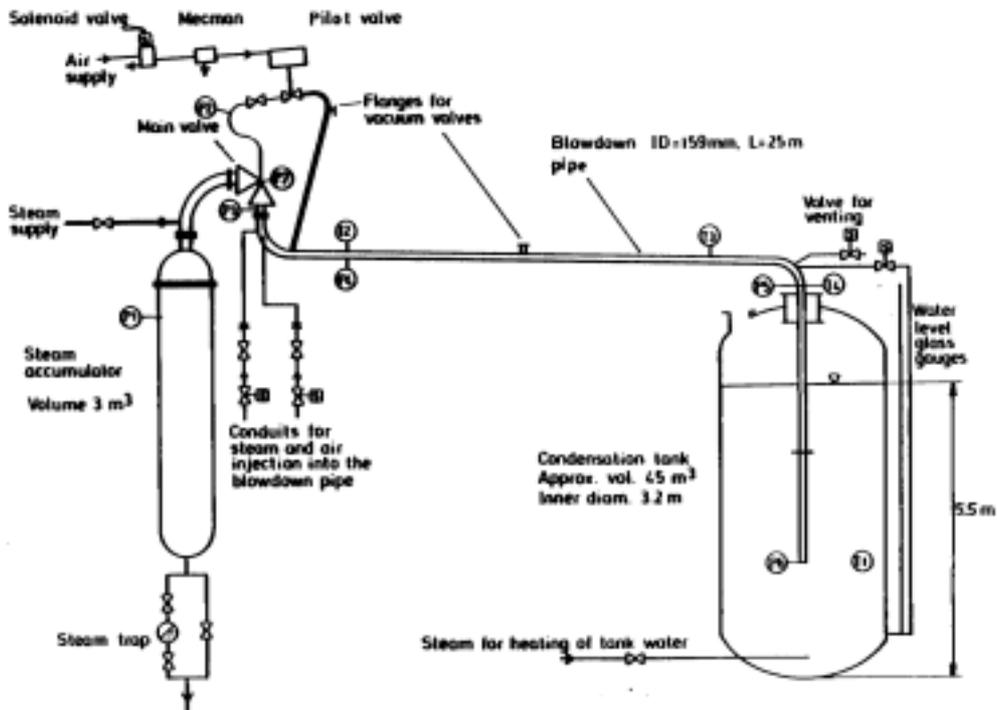


Fig. 3-1 Schematic of ABB-Atom unit cell test facility

실험은 49회의 예비실험, 95회의 천이상태의 배관 및 수조의 동적하중 측정실험, 23회의 진공밸브성능실험, 15회의 수조온도증가에 따른 동적하중 변화실험, 7회의 증기유량증가에 따른 동적하중 변화실험 등 총 182회가 수행되었다. 실험장치 개략도는 Fig. 3-1에 나타나 있다.

Unit cell 실험에서 여러 가지 형태의 sparger를 가지고 증기방출 배관과 응축탱크에서의 동적압력하중을 측정한 결과 압력하중을 최소화하는 최적 sparger는 M150으로 결정되었다. M150 sparger의 하중저감링(Load Reduction Ring)은 8쌍의 직사각형으로 방출배관 외부에서 탱크 바닥방향으로 방출될 수 있게 홈이 파여 있다. 각 홈은 높이  $10.95\text{mm}$ , 외경  $195\text{mm}$ , 넓이  $17.5\text{mm}$ 로 홈의 각 쌍은  $45^\circ$ 의 간격을 두고 설치되어 있다. Sparger head는 높이 방향으로 9줄, 반경방향으로  $22.5^\circ$  간격으로 16줄로 직경  $10\text{mm}$ 의 hole이 144개 설치되어 있으며, sparger bottom의 바닥에는  $25\text{mm}$ 의 hole이 수조바닥방향으로 한 개 설치되어 있다. M150 sparger의 형상은 Fig. 3-2에 나타나 있다.

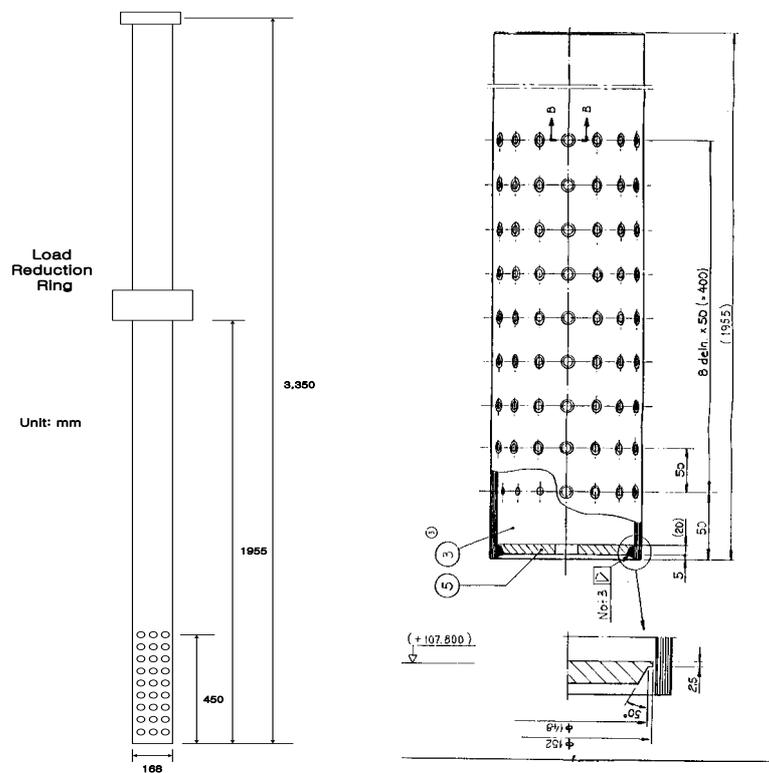


Fig. 3-2 Configuration of a sparger for APR-1400

본 해석대상으로 사용된 ABB-Atom 실험은 최적 sparger로 선정된 M150 sparger를 사용하여 수행된 run 186으로 Fig. 3-3에 나타난 바와 같이 탱크는 반경 1.6m 높이 6.6m 인 바닥이 둥근 형태를 갖는 실린더 형으로서 탱크 바닥으로부터 약 5.5m까지 물이 채워져 있다. 또한, sparger는 방출 배관 끝에 부착되어 있으며 sparger bottom은 탱크 바닥면으로부터 약 0.5m 떨어져 있다. 본 해석에서는 경계조건으로 sparger bottom으로부터 5.5m 떨어진 배관에서 측정된 압력(P5)을 사용하였고 탱크 바닥으로부터 1.5m 떨어진 탱크 옆면에서 측정된 동압(P10)을 해석결과와 비교하였다. Run 186 실험에서 측정된 압력은 Fig. 3-4에서 보여지는 바와 같이 P3(SRV 하단), P4(밸브 중간), P5(탱크 상단입구), P6(sparger head 하단) 위치에서 방출배관 내의 시간에 따른 압력변화와 탱크 바닥면과 옆면에서의 동압 등이다.

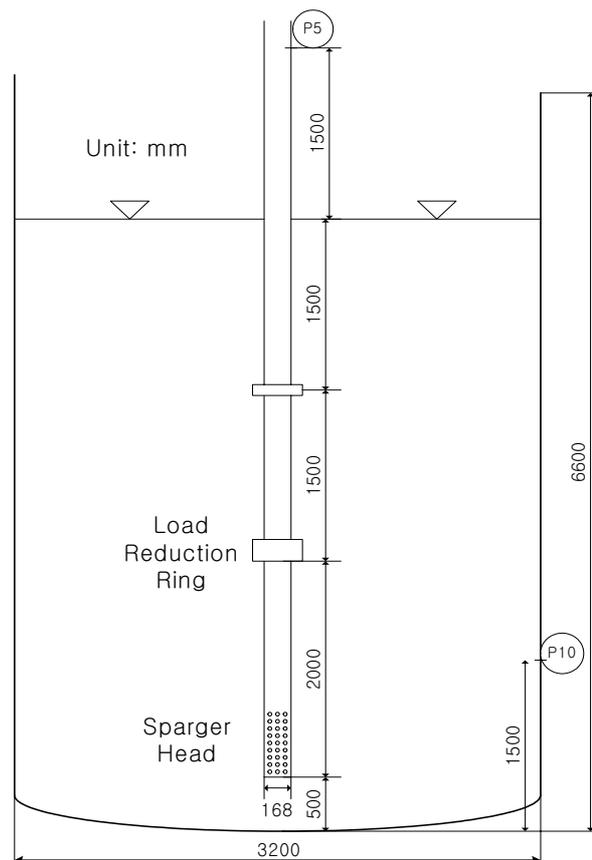


Fig. 3-3 Location of sparger and pressure sensor

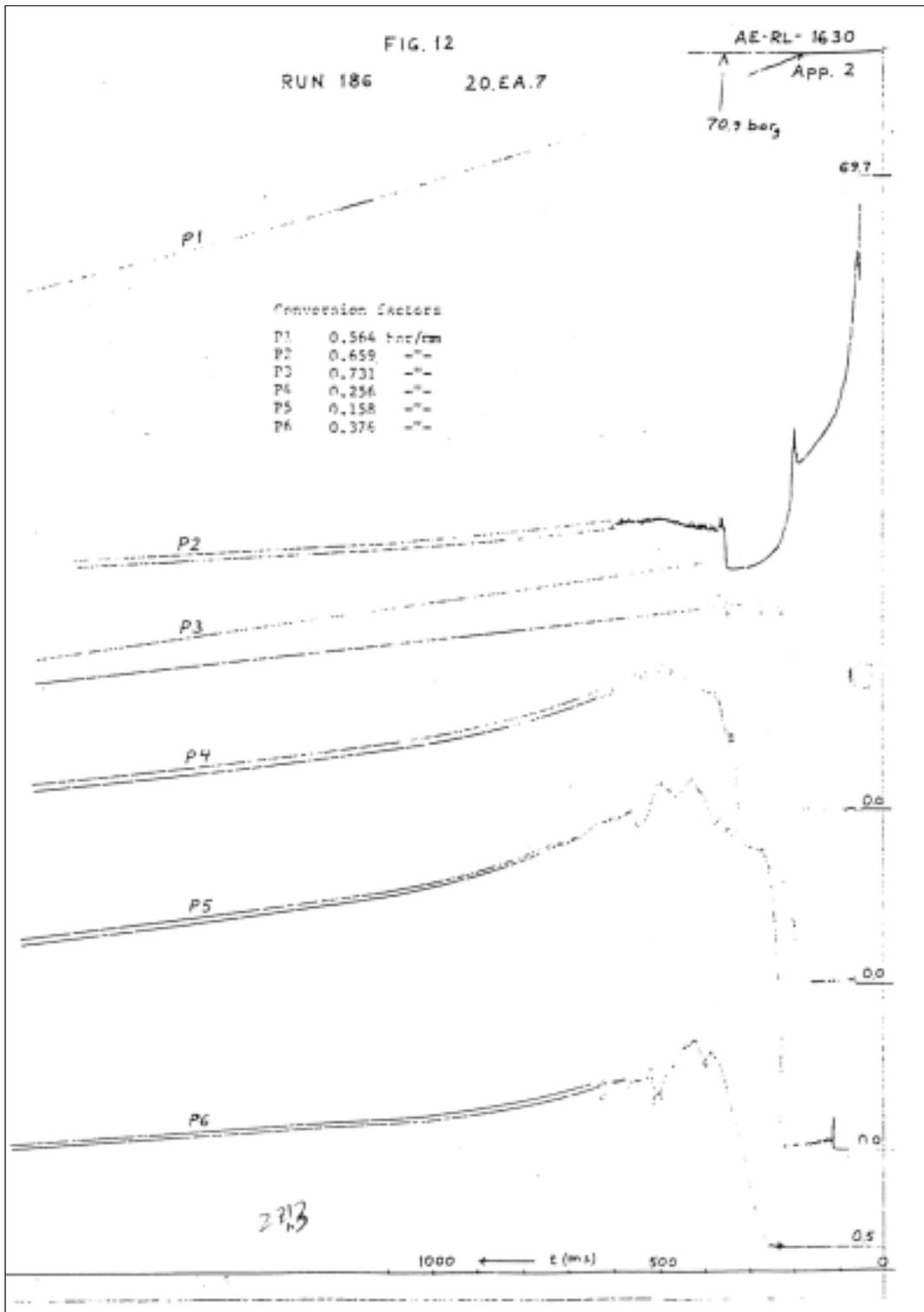


Fig. 3-4 Pressure measurement for ABB-Atom test run 186

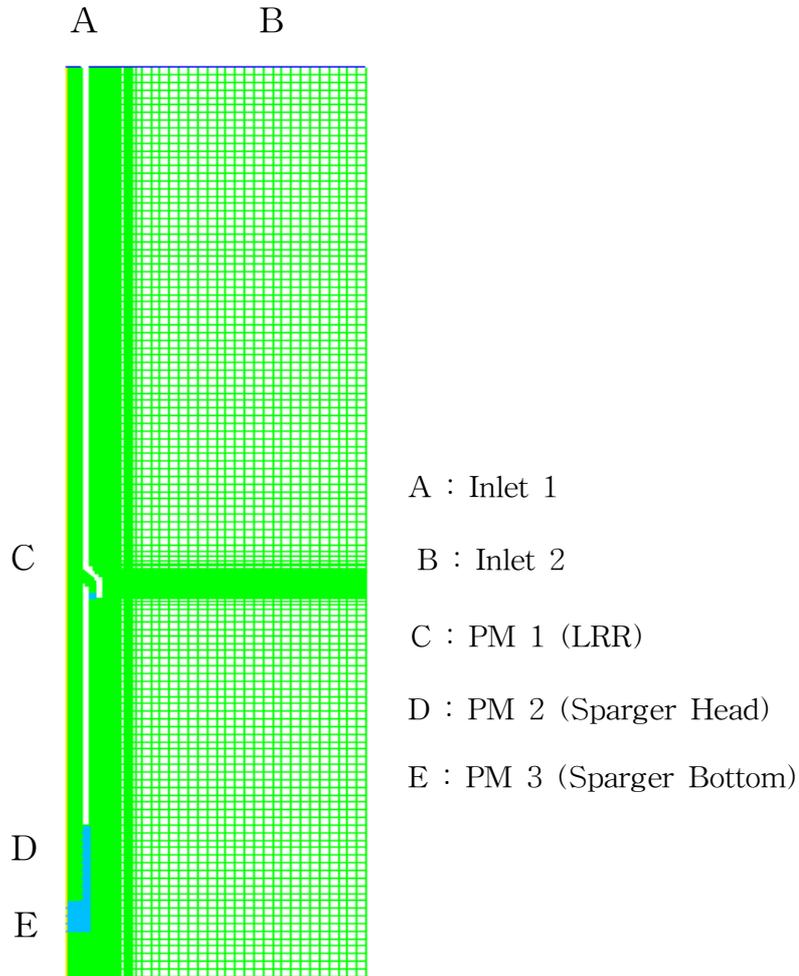


Fig. 3-5 Configuration of grid

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. 3-5에 보여지는 해석격자의 A면(격자의 좌측 상단)을 물, 공기 및 증기가 유입되는 입구(inlet①)로, B면(격자의 우측 상단)을 외부 대기로 개방되어 있는 출구로 모델링하였다. FLUENT에서는 압력-압력의 경계조건인 경우에는 inletA-inletB으로 나타나게 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.

## 제 2 절 해석 입력자료 및 절차

공기와 증기가 들어오는 inlet①의 압력 및 온도 조건은 ABB-Atom unit cell 실험의 run 186<sup>[2]</sup>에 나타난 측정값을 근거로 산정하였다. FLUENT 코드 해석의 입력값으로 사용되는 압력과 온도는 정체압력(stagnation pressure)와 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 사용하였다.

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (3-1)$$

Table 3-1 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 3-1은 해석시 사용된 물, 공기 및 증기가 유입되는 입구(inlet①)에서의 시간에 따른 압력 및 온도이다. 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 이하의 격자에 대해서 물의 체적분율을 1, 물의 수위 이상의 격자에 대해서는 물의 체적분율을 0으로 설정하였다. 물의 밀도는  $1000 kg/m^3$ , 증기의 밀도는  $10 kg/m^3$ 로 설정하였다. 본 해석이 과냉각수로 방출되는 대형 기포의 압력 변동을 계산하는 것이므로 제 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 해석에서는  $370 m/s$  사용)을 곱하여 산정하였다. 다공성매질 영역에서 유동이 임계조건에 도달하게 되면 산정된 임계유속으로 고정(fix velocity)된다. 다공성매질 영역으로 표시되는 부분의 실제면적, 그리드 면적 및 유동방향의 그리드 길이, 산정된 임계 유속을 Table 3-2 에 나타내었다.

Table 3-2 Parameter at porous media region

	Real Area ( $m^2$ )	Grid Area ( $m^2$ )	Grid Length (m)	Fix 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

Table 3-3 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

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

본 해석에 사용된 VOF 모델에서 최대 Courant Number ( $= \frac{\Delta t}{\Delta x_{cell} / v_{fluid}}$ ) 값을 0.25로 하였기 때문에, 계산 과정중 시간 간격은 격자간격 및 유속 등을 고려하여  $2.5 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3}$ 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.

공기의 주입에 이어 주입되는 증기는 본 연구에서 수행하는 연구범위를

벗어나므로, 여기서는 일정한 양의 공기가 수조 내로 유입될 수 있도록 방출 배관까지는 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.

해석 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 실제면적과 격자면적을 고려하여 환산된 임계유속(fix velocity)으로 고정된다. 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 임계유속(fix velocity)으로 고정된다. Sparger head의 여러 셀은 속도가 고정되는 시점이 다를 수 있으므로 이를 고려하여 셀 속도를 고정시킨다.
- 공기가 LRR 부분을 완전히 통과하면 LRR의 다공성매질 영역의 셀은 wall로 변경되어 더 이상의 증기가 수조 내로 유입되지 못하도록 한다.
- 공기가 sparger head를 완전히 통과하면 sparger head의 다공성매질 영역의 셀은 wall로 변경되고, 아울러 전 배관 내부도 wall로 변경되어 증기의 수조 유입을 차단시킨다.

## 제 4 장    결과 및 토의

### 제 1 절 손실계수(K) 변화에 따른 해석

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 5가지의 case에 대해 모의하였다. Case 1은 Table 3-3 에서 보여지듯이 LRR, sparger head, 및 sparger bottom의 손실계수를 각각 동일하게 2.6으로 하였을 경우이고, case 2는 각각 동일하게 5.2로 하였을 경우이며 case 3은 각각 동일하게 7.8로 하였을 경우이다. 또한, case 4는 LRR의 손실계수를 5.2로 하고 sparger head와 sparger bottom의 손실계수를 각각 2.6으로 한 경우이고 case 5는 LRR의 손실계수를 5.2로 하고 sparger head와 sparger bottom의 손실계수를 각각 7.8으로 한 경우이다. 현재 ABB-Atom의 I형 sparger에 대한 손실계수를 예측할 수 있는 자료는 없으며 다만 Idelchik<sup>[5]</sup>에서 반구 형태의 sparger에서 손실계수를 1 ~ 11 정도로 추천하고 있는 바, 본 해석 case에서는 이 범위 내에 있는 값을 사용하였다.

Table 4-1 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.

Table 4-1 은 각 해석 case에 따라 배관입구에 증기가 들어오기 시작하는 시간, LRR을 통한 공기 방출이 완료되어 LRR을 blocking한(W3로 처리) 시간, sparger head를 통한 공기 방출이 완료되어 전 배관을 blocking한(W4로 처리) 시간 등을 나타낸 것이다. 배관입구에 증기가 들어오기 시작하는 시간은 배관입구 부근인 격자점(12, 4)에서 시간에 따른 공기 속도와 밀도를 구하고 이를 토대로 계산한 총 공기 주입량이 배관 내부에 차 있는 공기량인 0.4046kg과 같아지는 시간을 계산하여 구하였다.

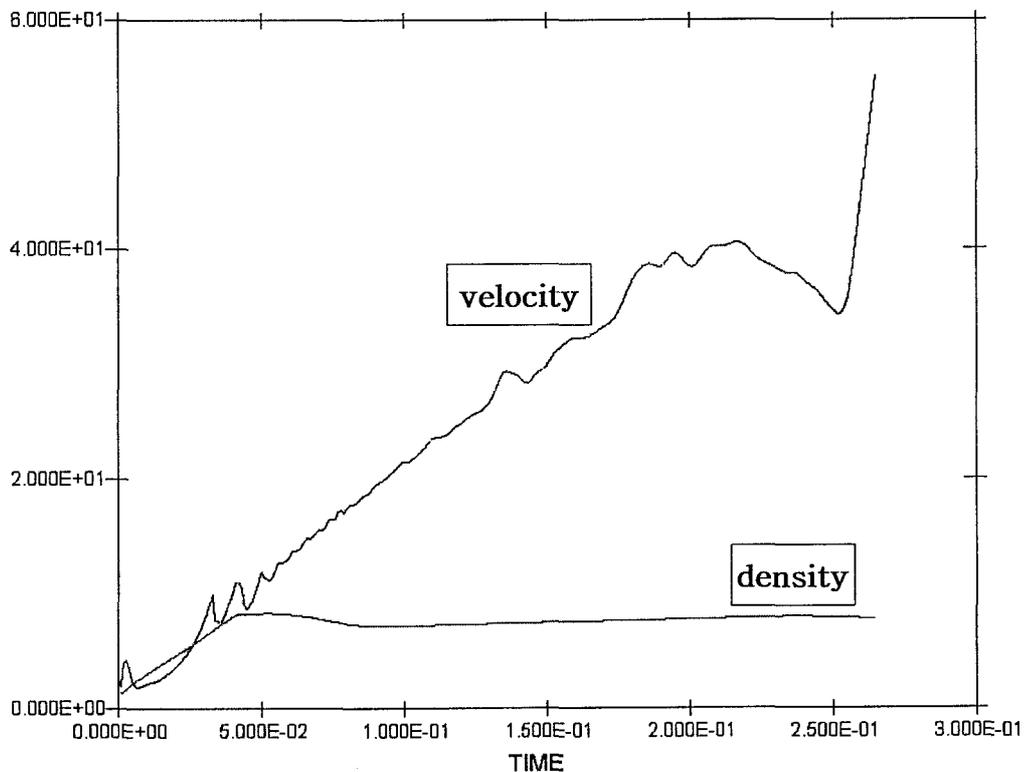


Fig. 4-1 Velocity and density of air at (12, 4) for case 1

Fig. 4-1은 case 1의 경우 격자점(12, 4)에서 시간에 따른 공기 속도와 밀도를 나타낸 것이다. 배관의 넓이( $0.020106\text{ m}^2$ ), 공기 속도 및 밀도를 고려하여 계산한 공기량이 배관 내부에 차 있는 공기량인  $0.4046\text{kg}$ 과 같아지는 시간을 계산한 결과  $0.165\text{ sec}$ 이었다. 나머지 case에서도 이와 같은 방법으로 배관입구에 증기가 들어오기 시작하는 시간을 구하였다. 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.

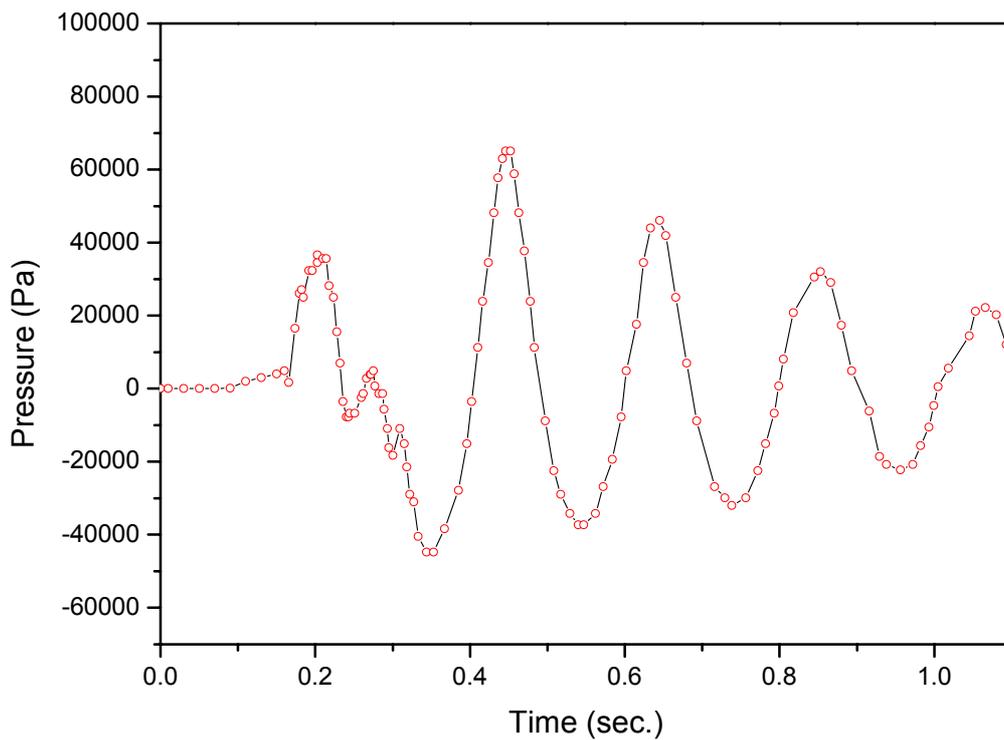


Fig. 4-2 Pressure measurement at P10 for ABB-Atom test

Fig. 4-2는 ABB-Atom 실험의 run 186에서 측정된 벽면(P10)에서의 압력을 나타낸다. 공기기포의 진동에 의한 압력이 발생하는 것을 알 수 있으며 측정된 max. negative pressure는  $-44700 Pa$  이었고 max. positive pressure는  $65100 Pa$  이었다. 주파수(max. positive pressure와 2nd max. positive pressure 사이)는  $5.18 Hz$ 이었고 시간이 경과할수록 주파수는 점점 감소하는 경향을 보이고 있는데 이는 기포군에 상당량의 증기가 유입되어 진동하기 때문인 것으로 추측된다.

Table 4-2는 각각의 case에 대해 격자점(132, 62)이 나타내는 벽면(ABB-Atom 실험의 P10 압력센서가 위치한 지점)에서의 max. negative pressure 및 max. positive pressure가 발생하는 시간과 크기를 나타내었다. ABB-Atom unit cell 실험에서 측정된 max. negative pressure인  $-44700 Pa$  및 max. positive pressure인  $65100 Pa$ 에 비해 상당히 큰 결과를 보여주고 있으며, 이 중 case 5가 max. negative pressure  $-50800 Pa$ , max. positive pressure가  $82700 Pa$ 로서 압력의 측정값에 가장 근접함을 보여준다.

Table 4-2 Max. negative and positive pressures for case 1  
~ case 5

	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

Fig. 4-3은 case 1 ~ case 3에 대해, ABB-Atom 실험의 P10 압력센서 위치에 해당되는 격자점(132, 62)에서의 시간에 따른 압력 변화를 나타낸 것이다. K값이 변함에 따라 기포 진동의 시작점, 진폭, 및 최대압력 등이 변화하는 것을 알 수 있다. 이는 K값에 따라 LRR과 sparger head 에 형성되는 기포군 형성시점 및 크기가 다르고, 해당지점(132, 62)에서의 압력은 각 기포군의 진동이 중첩되어 일어난 결과로 나타나기 때문이다. Case 1 ~ case 3 모두 ABB-Atom 실험의 측정값보다 크게 계산되었으며, 이 중에서 LRR, sparger head, 및 sparger bottom의 손실계수를 각각 동일하게 5.2로 한 case 2가 ABB-Atom 실험의 측정값에 가장 근접한 결과를 보여준다.

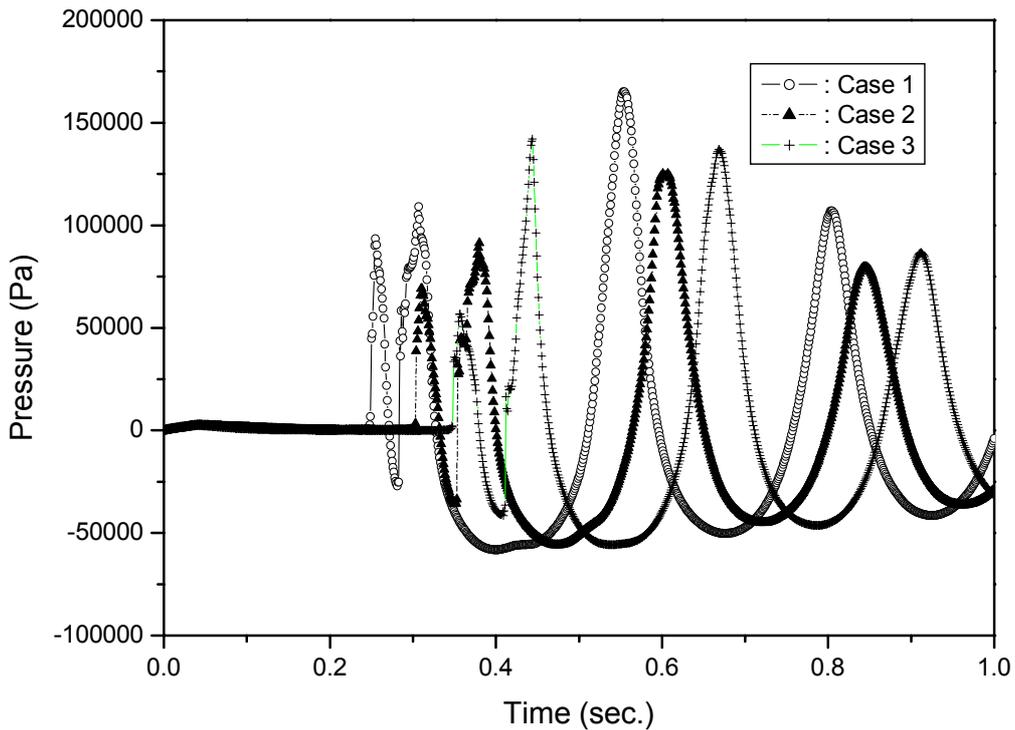


Fig. 4-3 Wall dynamic pressure with various loss coefficients (I)

Case 2가 case 1 ~ case 3중에서 ABB-Atom 측정값에 가장 근접한 결과를 보였기 때문에 LRR의 손실계수를 case 2와 마찬가지로 5.2로 하고 나머지 sparger head와 sparger bottom의 손실계수를 동일하게 2.6으로 한 case 4, LRR의 손실계수를 역시 5.2로 하고 나머지 sparger head와 sparger bottom의 손실계수를 동일하게 7.8로 한 case 5, 및 case 2에 대해 격자점 (132, 62)에서의 압력을 Fig. 4-4에 나타내었다. 이중에서 case 5에서의 압력이 ABB-Atom 실험의 측정값에 가장 근접한 결과를 나타내었다.

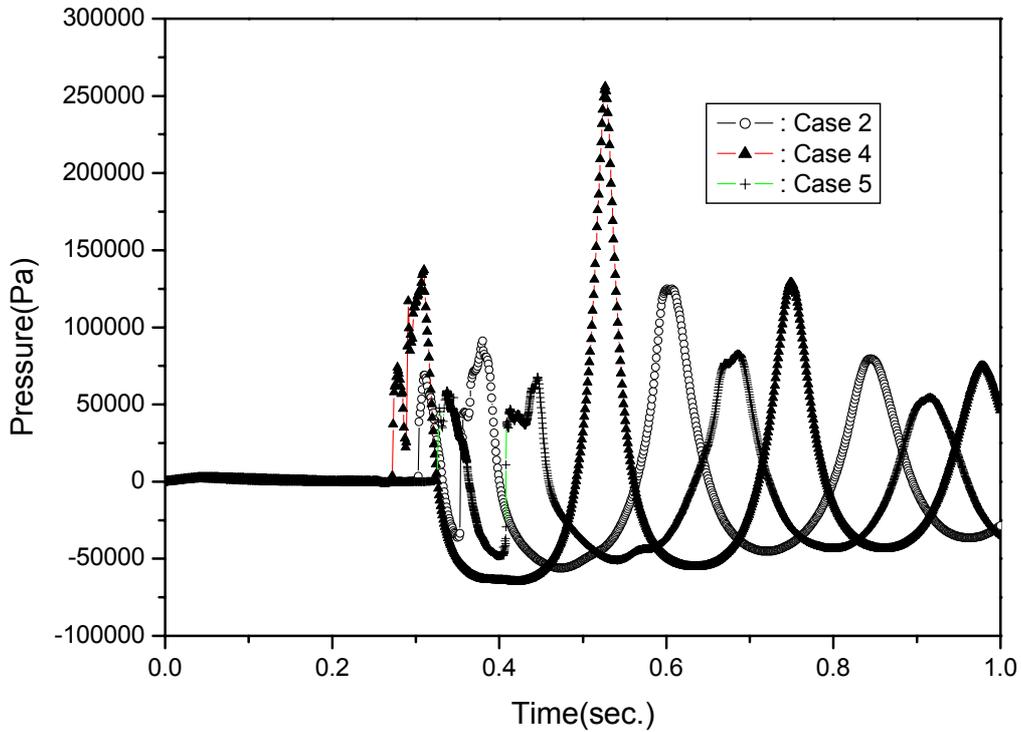


Fig. 4-4 Wall dynamic pressure with various loss coefficients (II)

Case 5와 ABB-Atom과의 비교 결과를 Fig. 4-5에 나타내었다. 여기에서 시간축은 ABB-Atom과의 비교를 위해 실제 계산 시간축에서 약 0.224 sec 이동시킨 것이다. 해석결과 벽면에서 max. negative pressure는  $-50800 Pa$ 로서 ABB-Atom 실험 측정값인  $-44700 Pa$ 보다 약 15% 크게 계산되었으며, max. positive pressure는  $82700 Pa$ 로서 ABB-Atom 실험 측정값인  $65100 Pa$ 보다 약 30% 크게 계산되었다. 주파수는  $4.37 Hz$ 로서 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. 본 해석 모델은 Idelchik<sup>[5]</sup>에서 기술하고 있는 반구 형태 sparger의 손실계수 범위인 1 ~ 11 사이의 손실계수를 사용하여 ABB-Atom 실험 결과를 비교적 잘 예측함을 보여준다.

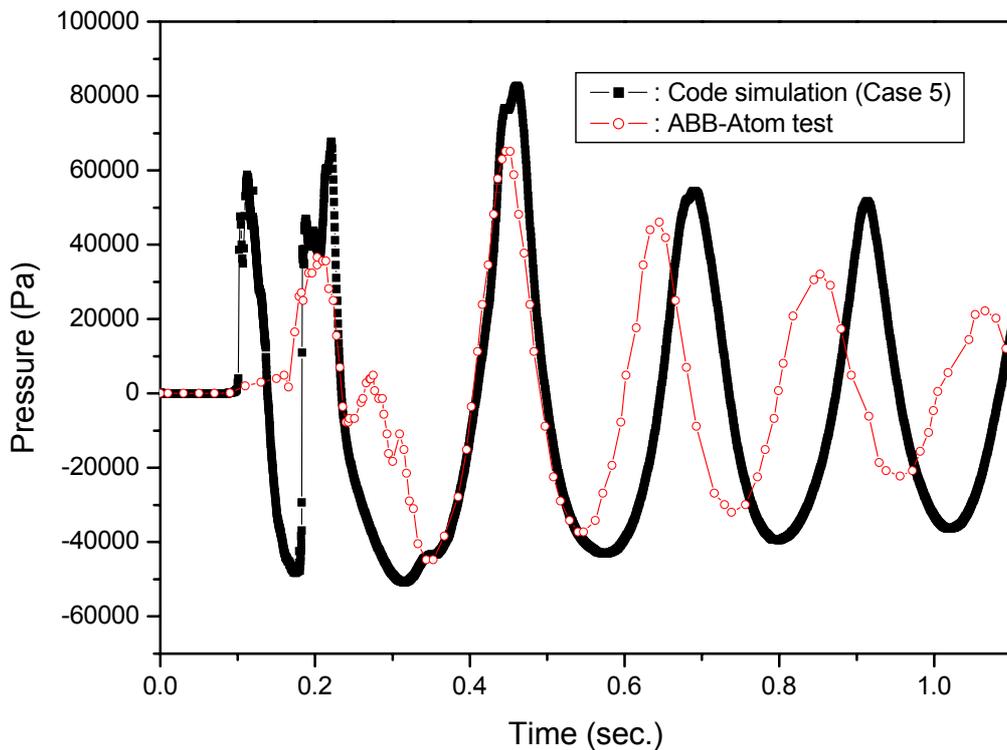


Fig. 4-5 Comparison of ABB-Atom test and simulation results

Fig. 4-6은 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 작아져서 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. 4-7은 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. 4-8은 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. 4-9는 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.

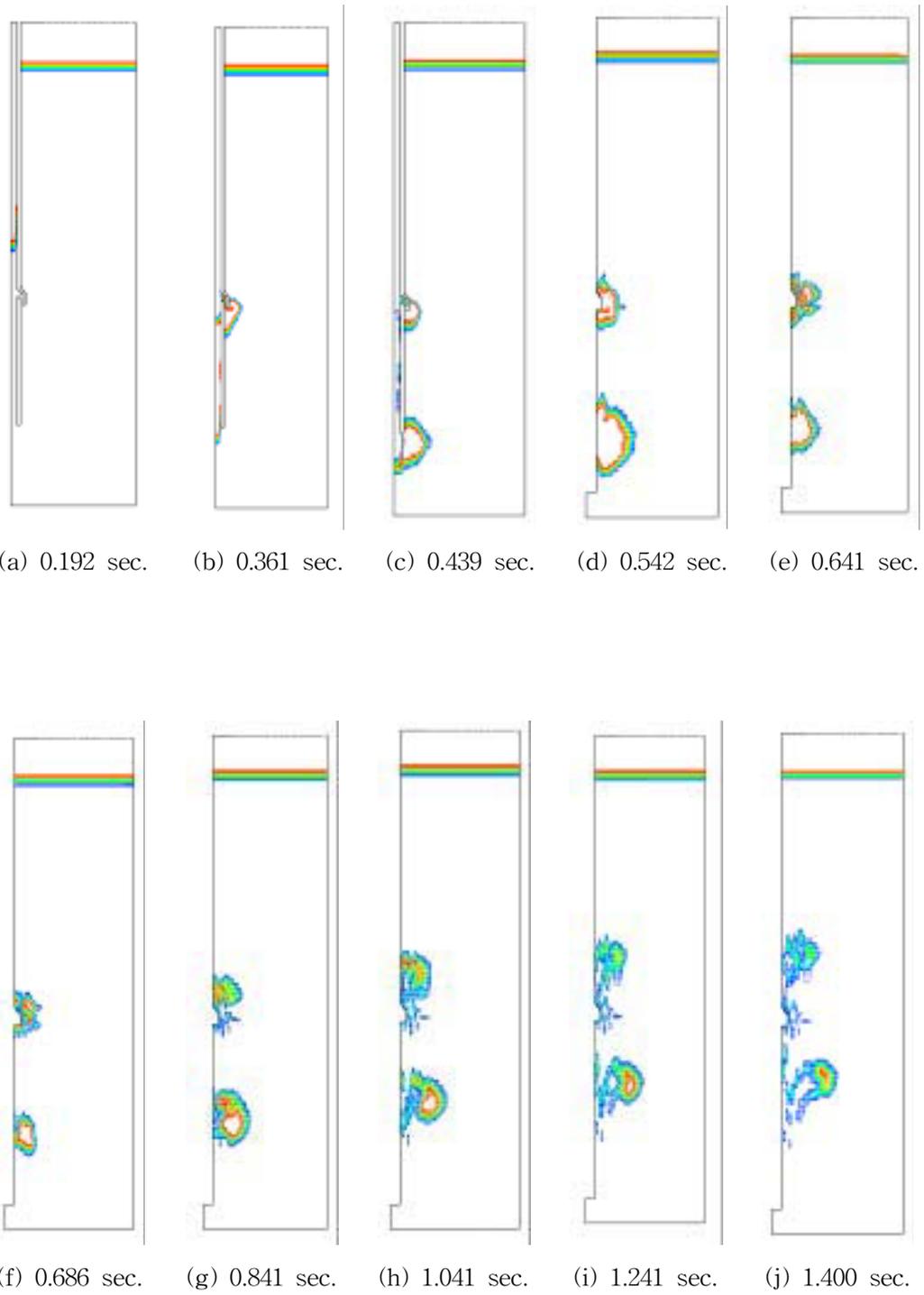


Fig. 4-6 Configuration of bubble cloud with time (case 5)

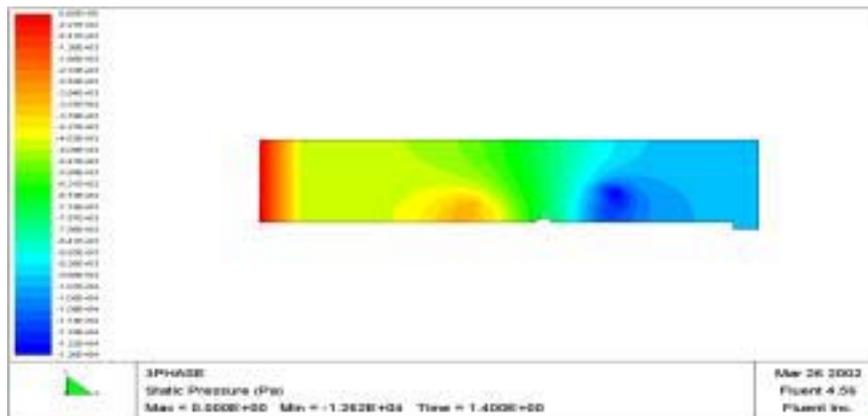
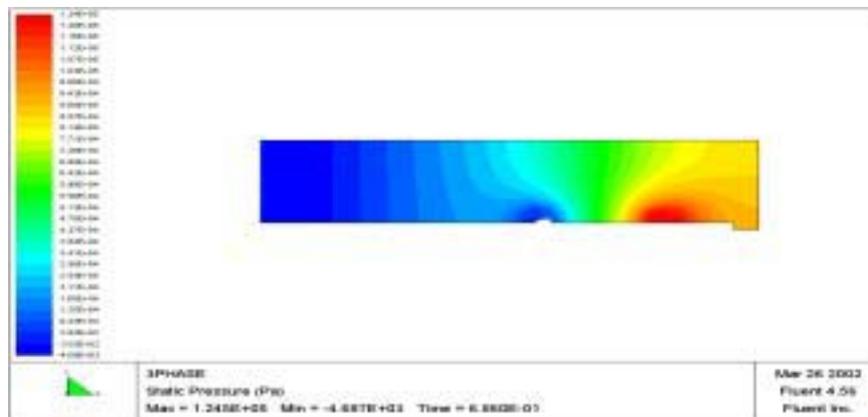
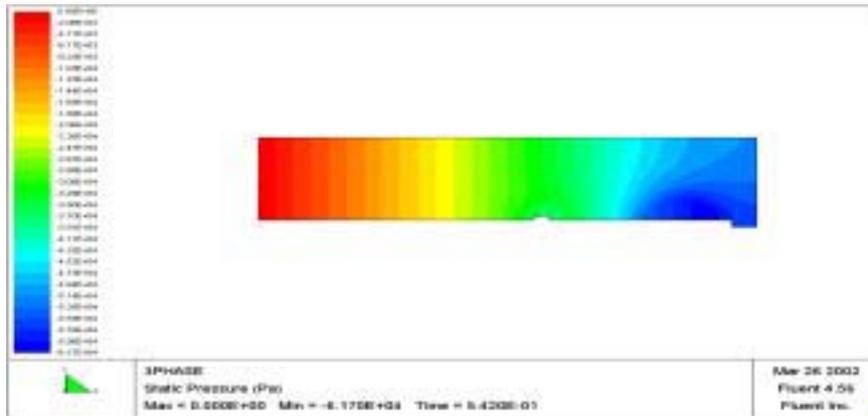


Fig. 4-7 Pressure distribution in the pool (case 5)

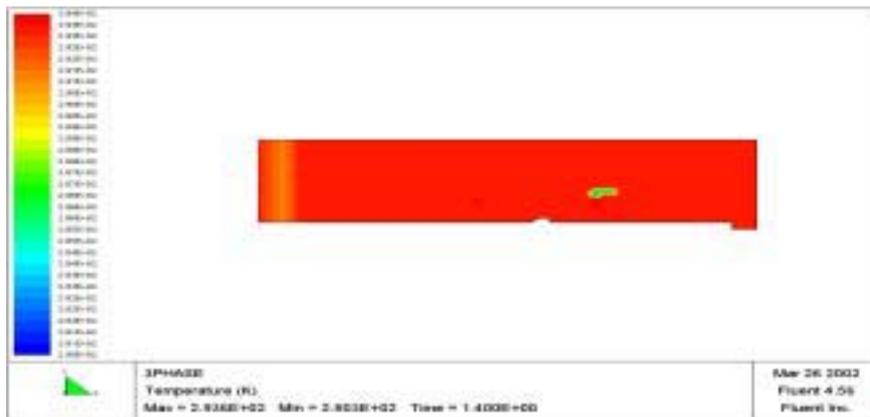
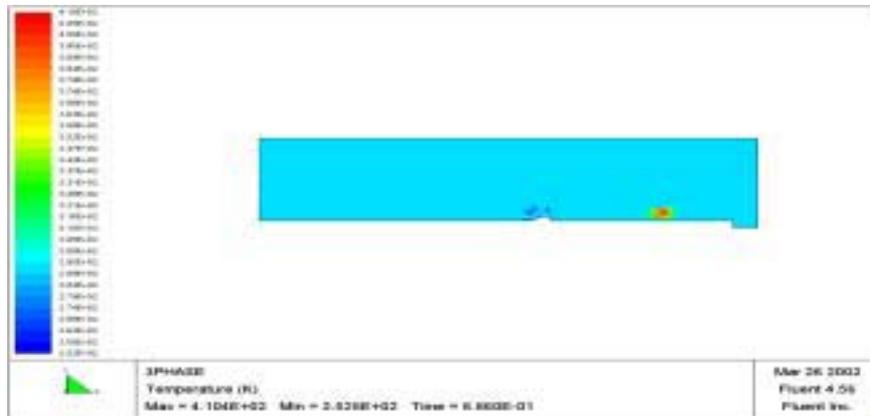
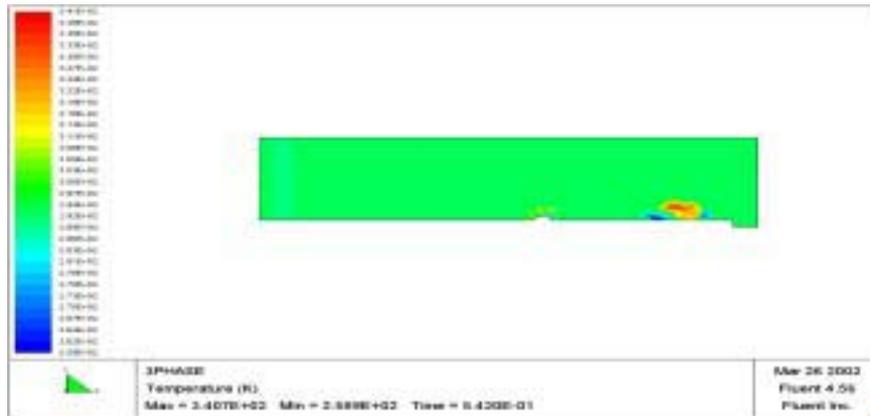


Fig. 4-8 Temperature distribution in the pool (case 5)

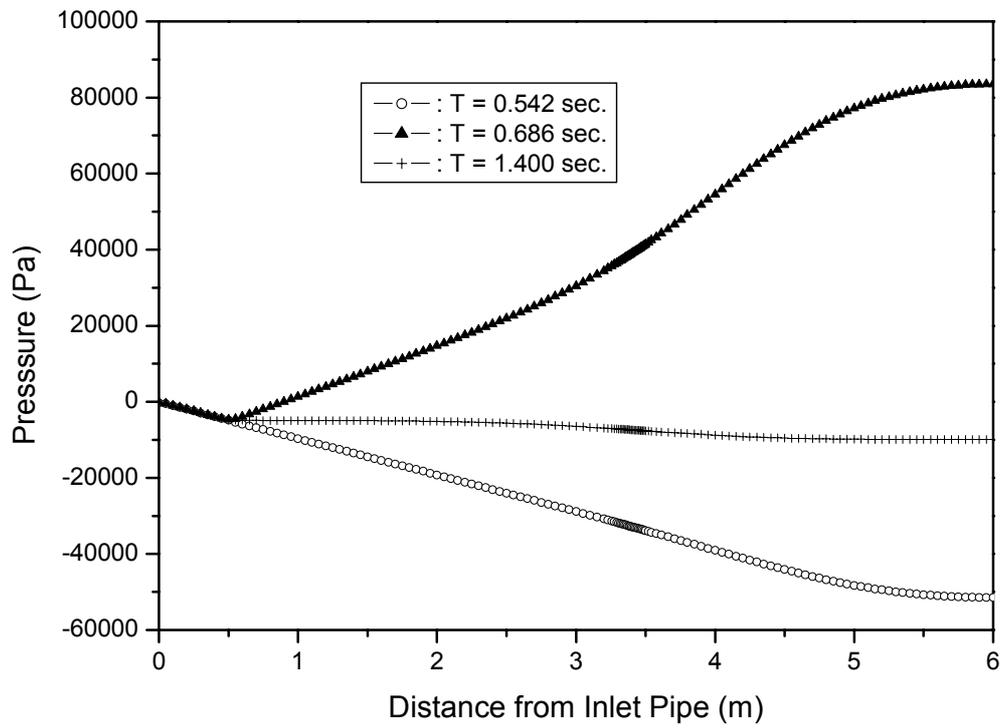


Fig. 4-9 Wall dynamic pressure vs. distance from inlet pipe (case 5)

## 제 2 절 공기량 변화에 따른 해석

경계 및 초기조건 등이 동일할 때 배관내 공기량 변화가 기포의 거동에 미치는 영향을 알아보았다. 모든 계산조건은 case 5와 동일하고 배관 내부의 공기량이 case 5의 공기량인 0.4046 kg의 2/3인 0.2697 kg인 경우와 1/3인 0.1349 kg인 경우에 대한 해석을 수행하였다.

Table 4-3 은 배관입구에 증기가 들어오기 시작하는 시간, LRR을 통한 공기 방출이 완료되어 LRR을 blocking한 시간, sparger head를 통한 공기 방출이 완료되어 전 배관을 blocking한 시간 등을 나타내었다. 배관 내의 공기량이 작을수록 배관입구에 증기가 들어오기 시작하는 시간은 짧아지지만 배관 내의 모든 공기가 수조로 완전히 방출되는 시간은 공기량에 무관하게 거의 같음을 알 수 있다. 이는 증기가 배관입구에 들어오기 시작하여 공기를 밀어내는데 걸리는 시간은 공기량이 작을수록 길어진다는 것을 의미한다.

Table 4-4는 격자점(132, 62)이 나타내는 벽면에서의 max. negative pressure 및 max. positive pressure가 일어나는 시간과 크기를 나타내었다. Max. negative pressure는 공기량이 변해도 그 변화폭이 그리 크지 않지만, max. positive pressure는 공기량에 따라 변화폭이 매우 큼을 알 수 있다. 특이한 점은 공기량이 작을 때가 클 때에 비해 max. positive pressure가 매우 큰 값을 나타내는데, 이는 벽면의 압력이 LRR과 sparger head에 두 개의 기포군의 상호진동에 의해 형성되므로 각 기포군의 진동 위상이 압력장에 중요한 영향을 주기 때문인 것으로 판단된다.

Table 4-3 Time at the specific event for the case of air mass change

	Steam entrance at Inlet 1	LRR blocking (Wall 3)	All pipings blocking (Wall 4)
$m_{air}=0.4046$ kg	0.192 sec.	0.361 sec.	0.439 sec.
$m_{air}=0.2697$ kg	0.148 sec.	0.346 sec.	0.437 sec.
$m_{air}=0.1349$ kg	0.099 sec.	0.334 sec.	0.432 sec.

Table 4-4 Max. negative and positive pressures for the case of air mass change

	Max. negative Time (sec.) / Press. (Pa)	Max. positive Time (sec.) / Press. (Pa)
$m_{\text{air}}=0.4046 \text{ kg}$	0.542 / -50800	0.686 / 82700
$m_{\text{air}}=0.2697 \text{ kg}$	0.535 / -65100	0.662 / 212100
$m_{\text{air}}=0.1349 \text{ kg}$	0.503 / -59800	0.588 / 173300

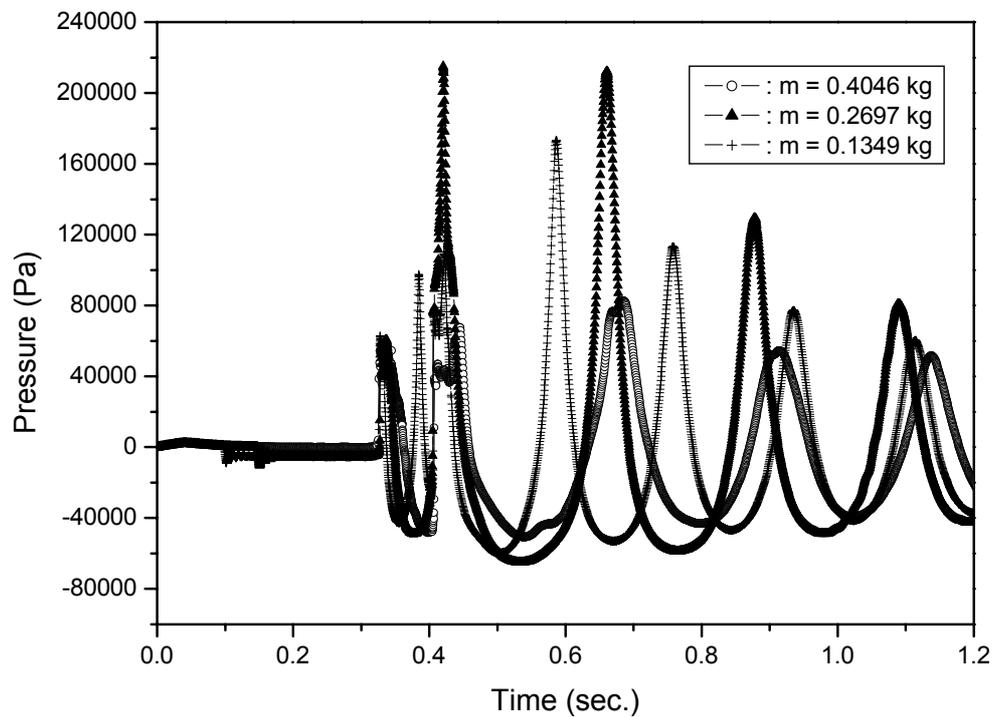


Fig. 4-10 Wall dynamic pressure with the change of air mass

Fig. 4-10은 격자점(132, 62)이 나타내는 벽면에서의 압력을 나타낸 것이다. 배관 내의 공기량이 변함에 따라 기포 진동의 시작점, 진폭, 및 최대압력 등이 변화하는 것을 알 수 있다. 이는 K값이 변할때와 마찬가지로 공기량에 따라 LRR과 sparger head 에 형성되는 기포군 형성시점 및 크기가 다르고, 해당지점(132, 62)에서의 압력은 각 기포군의 진동이 중첩되어 일어난 결과로 나타나기 때문이다.

공기량인 0.4046 kg인 경우의 주파수는 4.37 Hz로 계산되었으며 0.2697 kg인 경우는 4.61 Hz로 0.1349 kg인 경우의 주파수는 5.81 Hz로 계산되었다. 이는 공기 기포의 반경이 작을수록, 즉 공기량이 작을수록 주파수는 증가하는 일반적으로 알려진 경향<sup>[6]</sup>에 잘 일치하고 있음을 보여준다.

Fig. 4-11은 배관 내의 공기량이 0.2697 kg인 경우에 대한 시간에 따른 수조내의 기포 거동을 나타낸 것이다. 여기에서 0.148 sec.는 배관입구에 증기가 형성되는 시점이며, 0.346 sec.는 LRR에 증기가 도달하여 이 부분을 wall로 처리한 시점을 0.437 sec.는 sparger head에 증기가 도달하여 배관 전체를 wall로 처리한 시점을 나타낸다. 또한 0.535 sec.는 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점을 0.662 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 찌그러들어 부력에 의해 수면 위로 상승함을 알 수 있다. 또한, 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.535 sec.에 기포의 총 부피는 대략 최대가 되며 최대 양압이 형성되는 시점인 0.662 sec.에 기포의 총 부피는 대략 최소가 됨을 알 수 있다.

Fig. 4-12는 배관 내의 공기량이 0.2697 kg인 경우에 대해 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.535 sec., 벽면에 최대 양압이 형성되는 시점인 0.662 sec. 및 계산 종료 시점인 1.4 sec.에서 수조내 압력분포를 나타낸 것이고 Fig. 4-13은 각각에 대한 수조의 온도분포를 나타낸 것이다. 앞에서의 case 5와 유사하게, LRR과 sparger head 부분에서 형성된 각각의 기포군을 중심으로 각각 진동하면서 상호 작용에 의해 수조내 압력장을 형성하는 것을 알

수 있으며, 또한 대부분의 기포 온도는 대략 주위 물 온도와 같으므로 미루어 기포 외부와 내부에서 모두 격렬한 난류 현상이 발생되어 순간적으로 기포에서 주위 물로 열전달이 일어나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4-14는 배관 내의 공기량이 0.2697 kg인 경우에 대해 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.535 sec., 벽면에 최대 양압이 형성되는 시점인 0.662 sec. 및 계산 종료 시점인 1.4 sec.에서 깊이에 따른 벽면의 압력분포를 나타낸다. 앞에서의 case 5와 유사하게, 양압과 음압 모두 깊이가 증가할수록 선형적으로 변화하다가 대략 sparger 끝부분에서 수조 바닥까지는 일정하게 되는 경향을 보여준다.

Fig. 4-15는 배관 내의 공기량이 0.1349 kg인 경우에 대한 시간에 따른 수조내의 기포 거동을 나타낸 것이다. 여기에서 0.099 sec.는 배관입구에 증기가 형성되는 시점이며, 0.334 sec.는 LRR에 증기가 도달하여 이 부분을 wall로 처리한 시점을 0.432 sec.는 sparger head에 증기가 도달하여 배관 전체를 wall로 처리한 시점을 나타낸다. 또한 0.503 sec.는 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점을 0.588 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 찌그러들어 부력에 의해 수면 위로 상승함을 알 수 있다. 또한, 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.535 sec.에 기포의 총 부피는 대략 최대가 되며 최대 양압이 형성되는 시점인 0.662 sec.에 기포의 총 부피는 대략 최소가 됨을 알 수 있다.

Fig. 4-16은 배관 내의 공기량이 0.1349 kg인 경우에 대해 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.503 sec., 벽면에 최대 양압이 형성되는 시점인 0.588 sec. 및 계산 종료 시점인 1.4 sec.에서 수조내 압력분포를 나타낸 것이고 Fig. 4-17은 각각에 대한 수조의 온도분포를 나타낸 것이다. 앞에서의와 유사하게, LRR과 sparger head 부분에서 형성된 각각의 기포군을 중심으로 각각 진동하면서 상호 작용에 의해 수조내 압력장을 형성하는 것을 알 수 있으며, 또한 기포 외부와 내부에서 모두 격렬한 난류 현상이 발생되어 순간적으로

기포에서 주위 물로 열전달이 일어나므로 대부분의 기포 온도는 대략 주위 물 온도와 같아짐을 알 수 있다.

Fig. 4-18은 배관 내의 공기량이 0.1349 kg인 경우에 대해 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.503 sec., 벽면에 최대 양압이 형성되는 시점인 0.588 sec. 및 계산 종료 시점인 1.4 sec.에서 깊이에 따른 벽면의 압력분포를 나타낸다. 앞서서와 유사하게, 양압과 음압 모두 깊이가 증가할수록 선형적으로 변화하다가 대략 sparger 끝부분에서 수조 바닥까지는 일정하게 되는 경향을 보여준다.

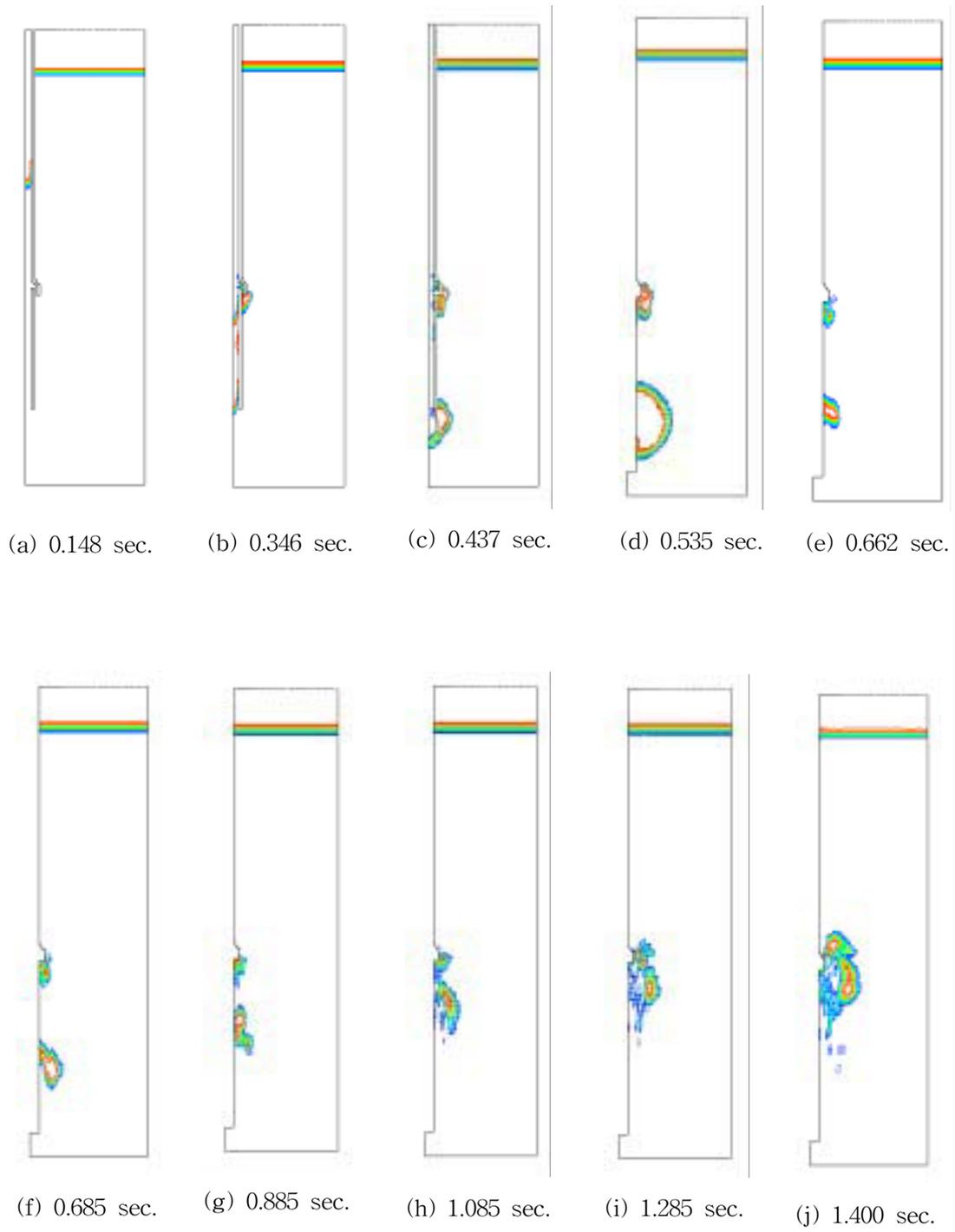


Fig. 4-11 Configuration of bubble cloud with time ( $m=0.2697$  kg)

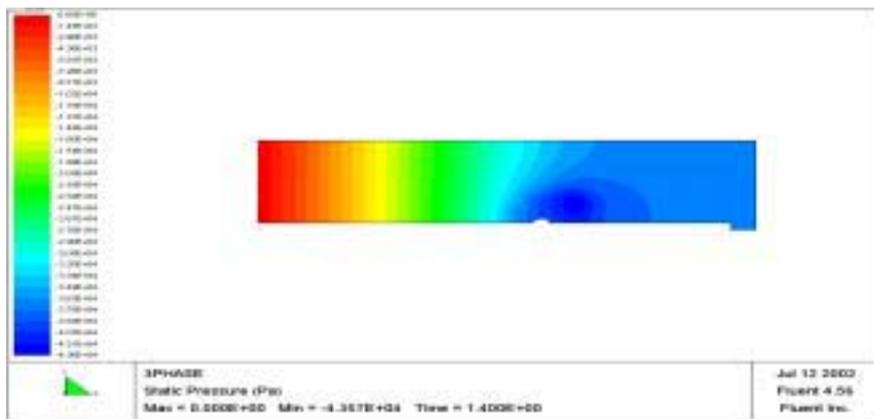
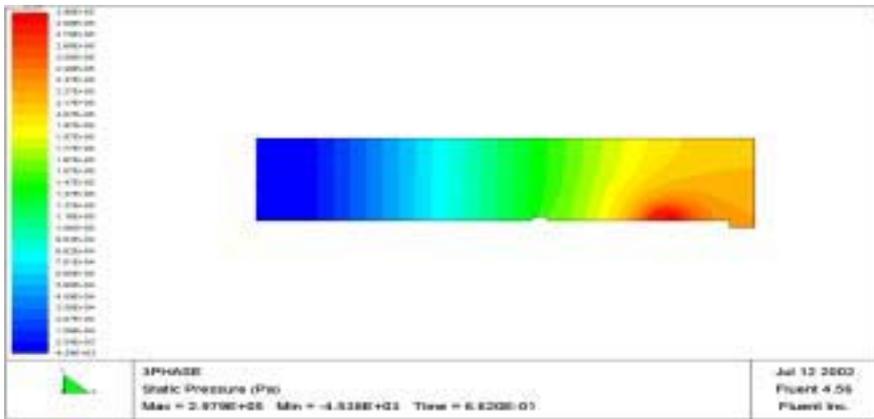
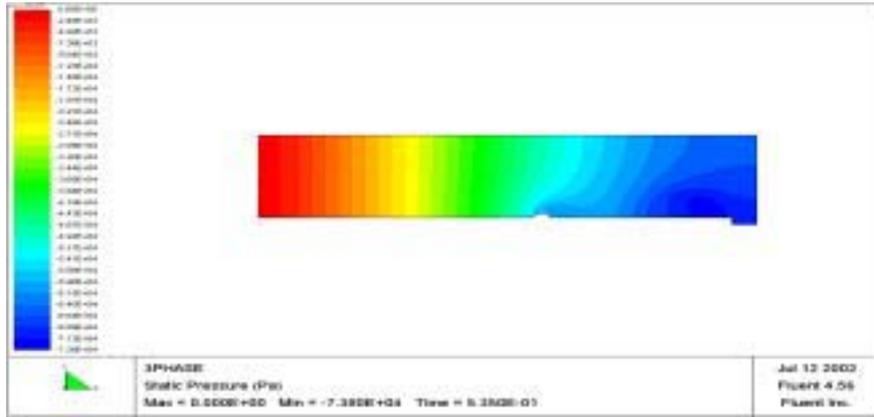


Fig. 4-12 Pressure distribution in the pool ( $m=0.2697$  kg)

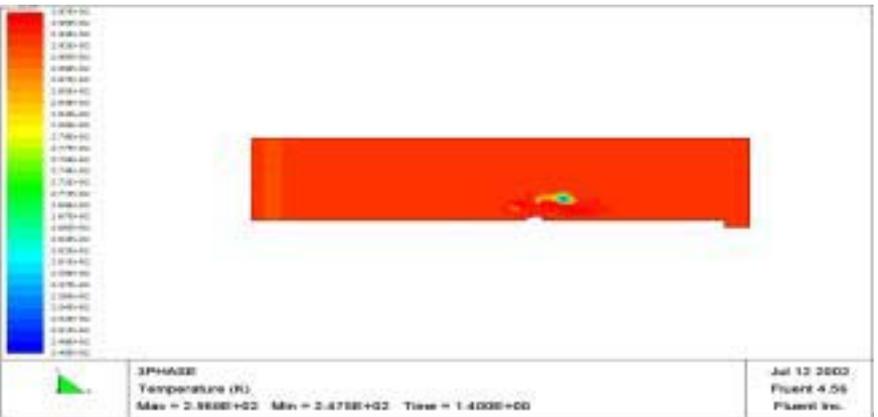
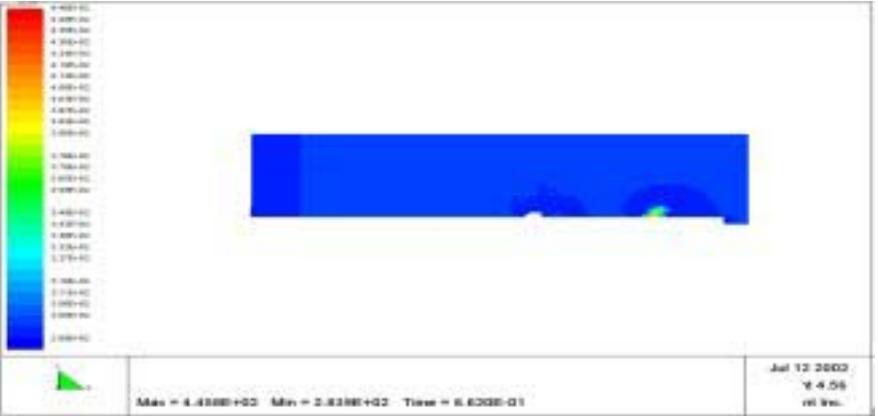
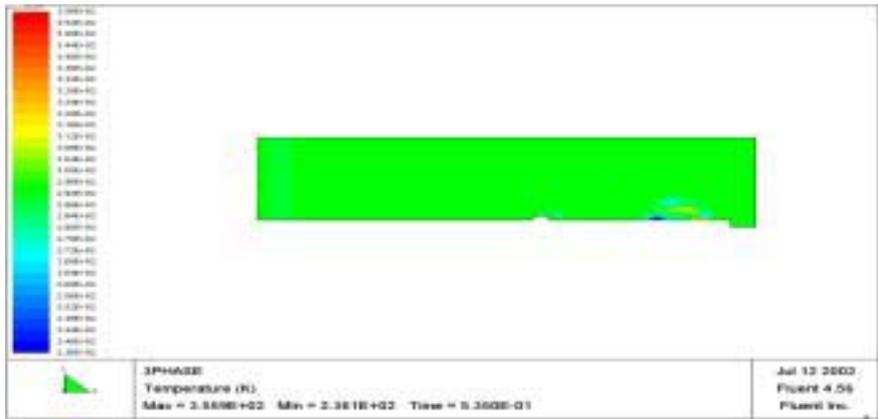


Fig. 4-13 Temperature distribution in the pool (m=0.2697 kg)

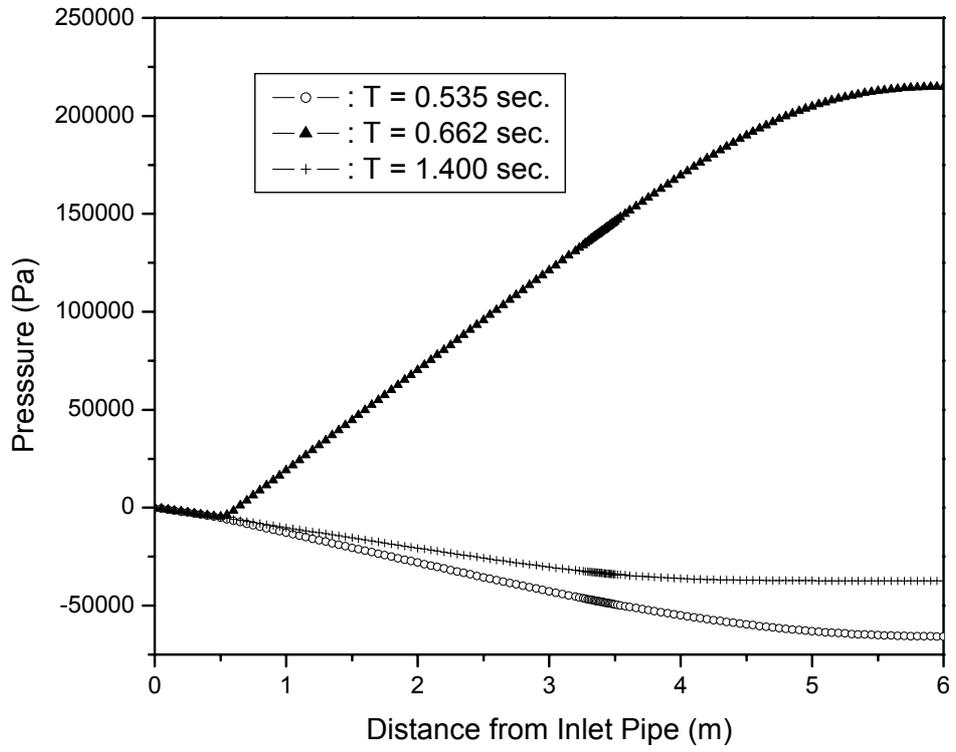


Fig. 4-14 Wall dynamic pressure vs. distance from inlet pipe  
(m=0.2697 kg)

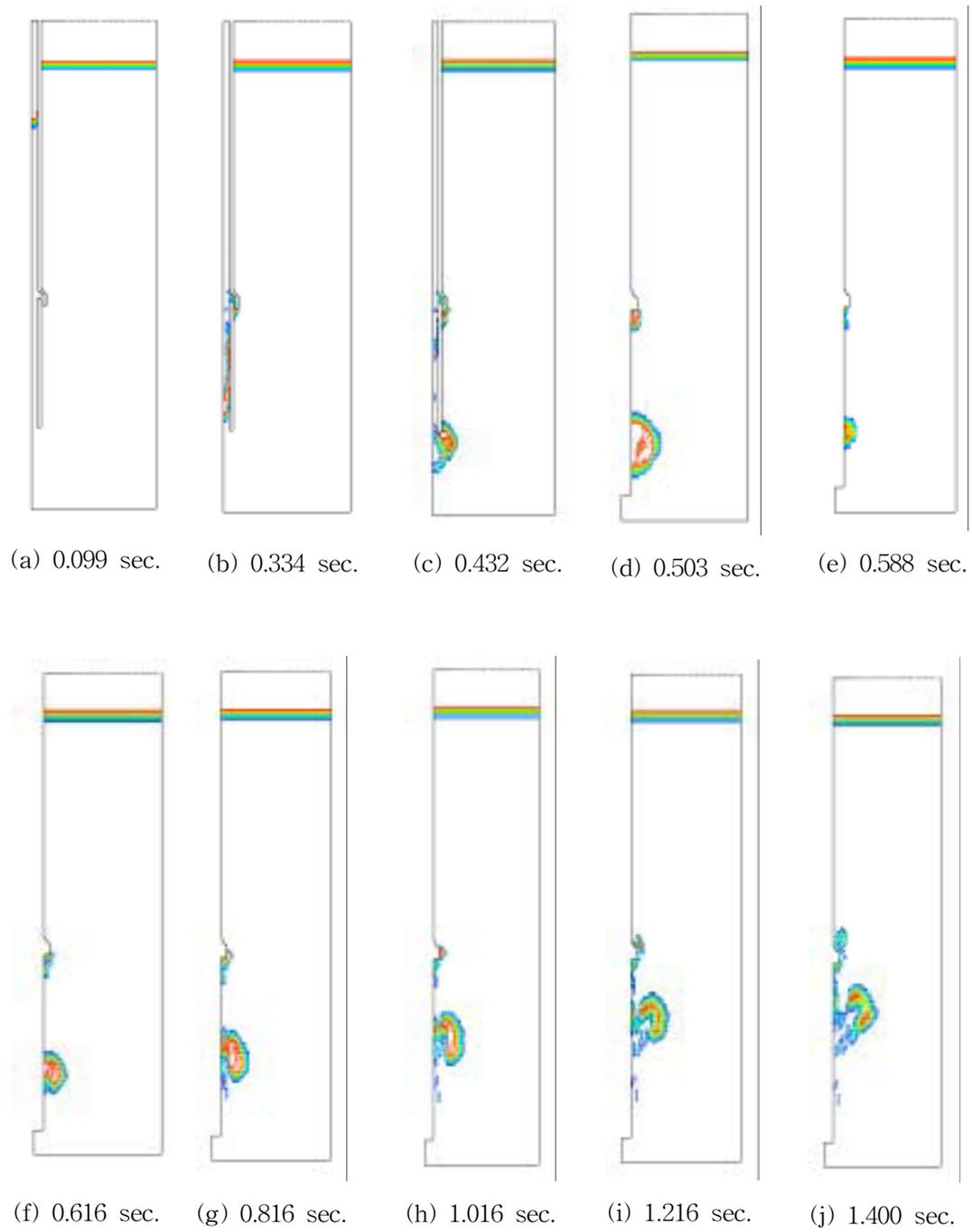


Fig. 4-15 Configuration of bubble cloud with time ( $m=0.1349$  kg)

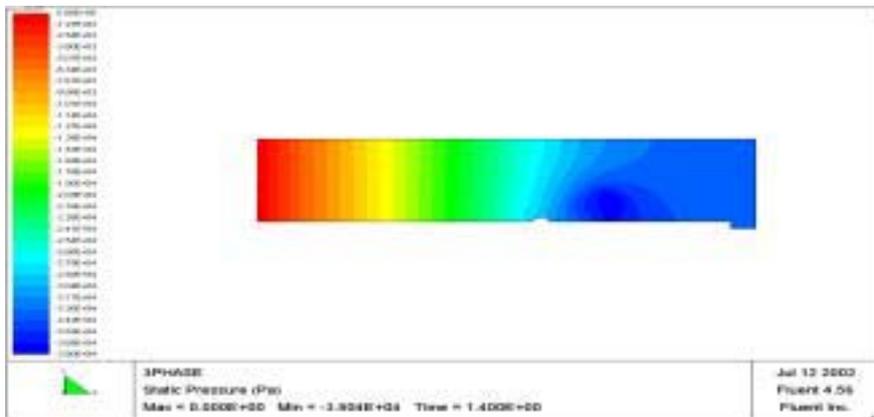
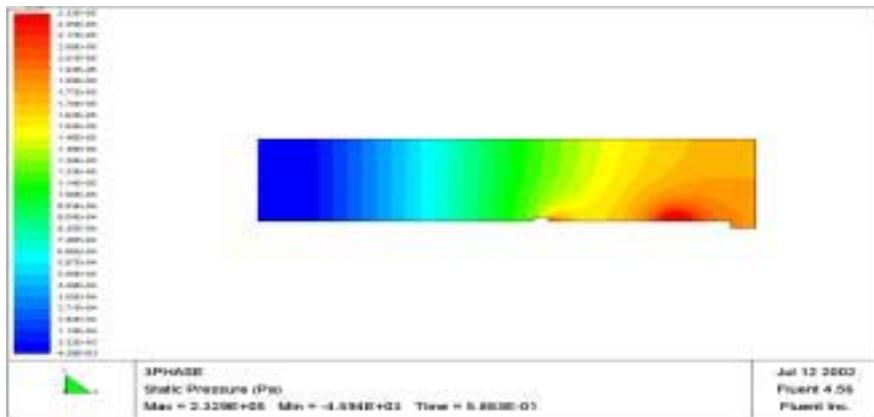
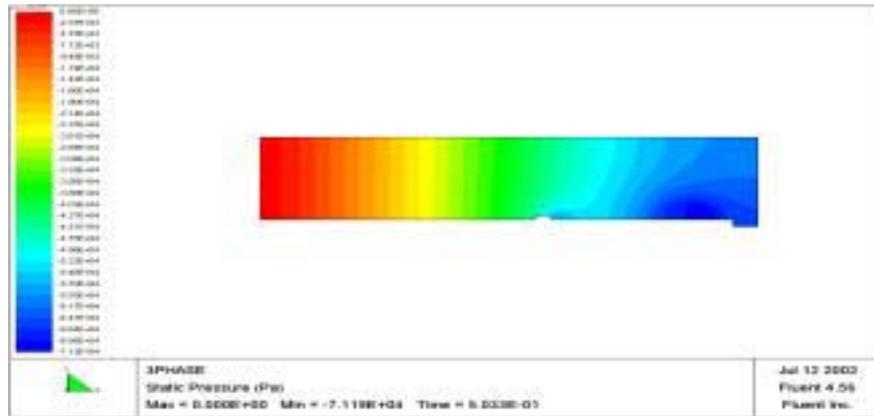


Fig. 4-16 Pressure distribution in the pool ( $m=0.1349$  kg)

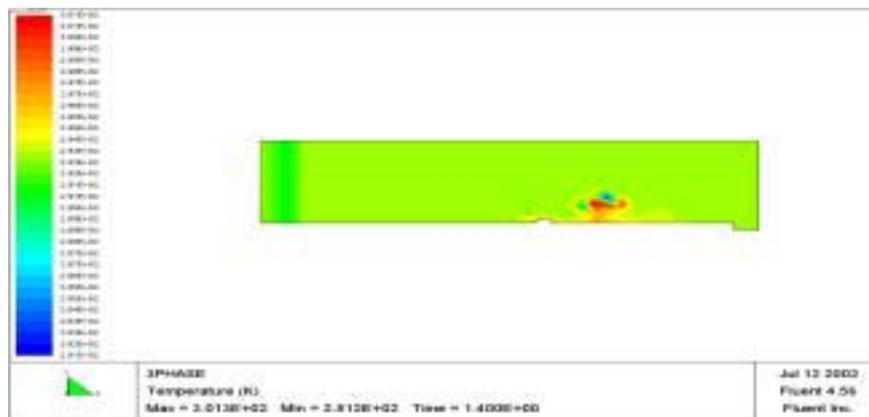
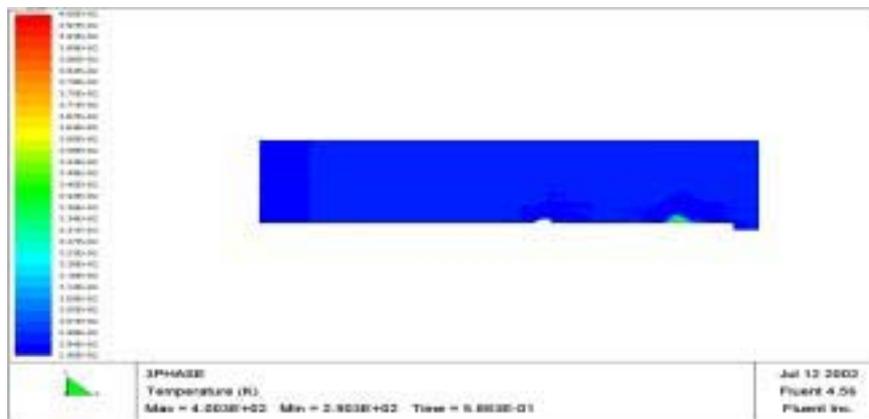
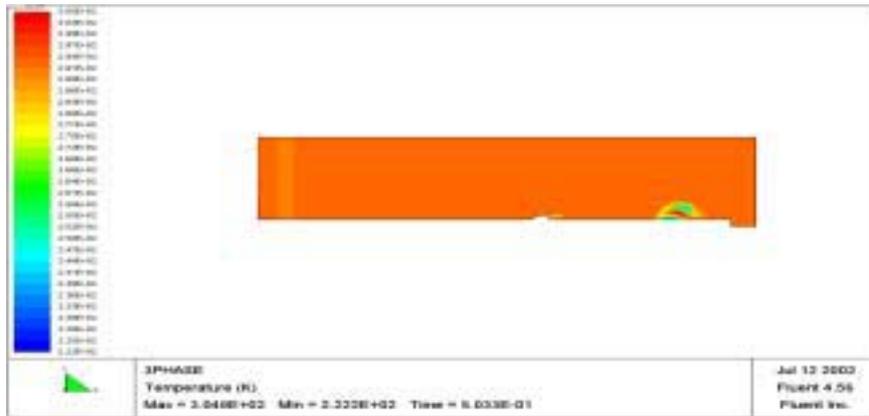


Fig. 4-17 Temperature distribution in the pool ( $m=0.1349$  kg)

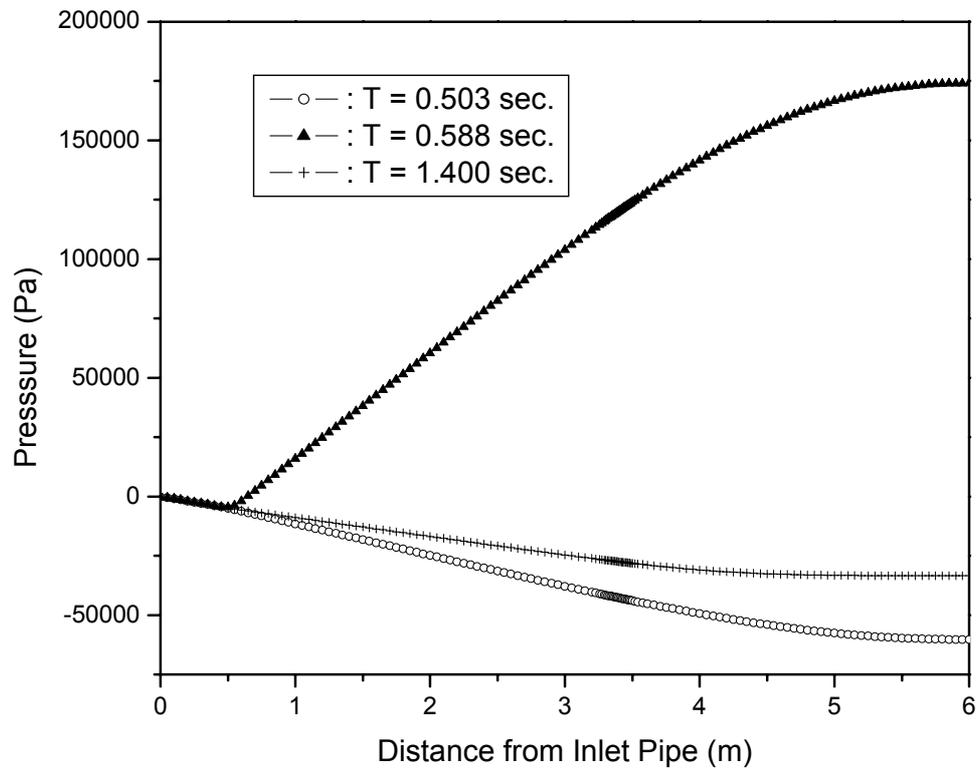


Fig. 4-18 Wall dynamic pressure vs. distance from inlet pipe  
( $m=0.1349$  kg)

### 제 3 절 배관 입구조건 변화에 따른 해석

배관내 공기량이 동일할 때 배관 입구조건의 변화가 기포의 거동에 미치는 영향을 알아보았다. 배관 내부의 공기량이 case 5의 공기량인 0.4046 kg 인 경우, 배관입구의 압력이 ABB-Atom 실험 측정치보다 0.3 MPa 크게 하였을 경우와 0.3 MPa 작게 하였을 경우에 대한 해석을 수행하였다. 입력으로 주는 온도는 식 (3-1)에 따라 계산하였다. 각각의 경우에 대한 배관 입구조건은 Table 4-5 와 Table 4-6 에 나타내었다.

Table 4-5 Boundary condition at inlet 1  
( $P_{inlet}=P_{test}+0.3MPa$ )

Time (s)	Pressure (MPaG)	Temperature (°K)
0	0	293
0.041	1.36	630
0.237	1.63	662
0.463	1.41	636

Table 4-6 Boundary condition at inlet 1  
( $P_{inlet}=P_{test}-0.3MPa$ )

Time (s)	Pressure (MPaG)	Temperature (°K)
0	0	293
0.041	0.76	542
0.237	1.03	586
0.463	0.81	551

Table 4-7은 배관입구에 증기가 들어오기 시작하는 시간, LRR을 통한 공기 방출이 완료되어 LRR을 blocking한(W3로 처리) 시간, sparger head를 통한 공기 방출이 완료되어 전 배관을 blocking한(W4로 처리) 시간 등을 나타내었다. 배관 입구압력이 작을수록 배관입구에 증기가 들어오기 시작하는 시간, LRR을 blocking한 시간, 및 공기 방출이 완료되어 전 배관을 blocking한 시간 등이 길어짐을 알 수 있다.

Table 4-8은 격자점(132, 62)이 나타내는 벽면에서의 max. negative pressure 및 max. positive pressure가 일어나는 시간과 크기를 나타내었다. 배관 입구압력이 가장 클 때가 max. negative pressure 및 max. positive pressure가 커지는 것을 알 수 있다. 특이한 점은 배관 입구압력이 작은 경우의 max. negative pressure 및 max. positive pressure가 ABB-Atom 실험 측정값을 사용했을 경우보다 크게 계산되었는데, 이는 벽면의 압력이 LRR과 sparger head에 두 개의 기포군의 상호진동에 의해 형성되므로 각 기포군의 진동 위상이 압력장에 중요한 영향을 주기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 4-19는 격자점(132, 62)이 나타내는 벽면에서의 압력을 나타낸 것이다. 배관 입구압력이 변함에 따라 기포 진동의 시작점, 진폭, 및 최대압력 등이 변화하는 것을 알 수 있다. 배관 입구압력 변화가 수조 벽면압력에 미치는 뚜렷한 경향은 나타나지 않고 있다.

Table 4-7 Time at the specific event for the case of inlet condition change

	Steam entrance at Inlet 1	LRR blocking (Wall 3)	All pipings blocking (Wall 4)
$P_{inlet}=P_{test}+0.3MPa$	0.144 sec.	0.301 sec.	0.392 sec.
$P_{inlet}=P_{test}$	0.192 sec.	0.361 sec.	0.439 sec.
$P_{inlet}=P_{test}-0.3MPa$	0.222 sec.	0.416 sec.	0.519 sec.

Table 4-8 Max. negative and positive pressures for the case of inlet condition change

	Max. negative Time (sec.) / Press. (Pa)	Max. positive Time (sec.) / Press. (Pa)
$P_{\text{inlet}}=P_{\text{test}}+0.3\text{MPa}$	0.477 / -72400	0.592 / 310400
$P_{\text{inlet}}=P_{\text{test}}$	0.542 / -50800	0.686 / 82700
$P_{\text{inlet}}=P_{\text{test}}-0.3\text{MPa}$	0.629 / -55500	0.751 / 126500

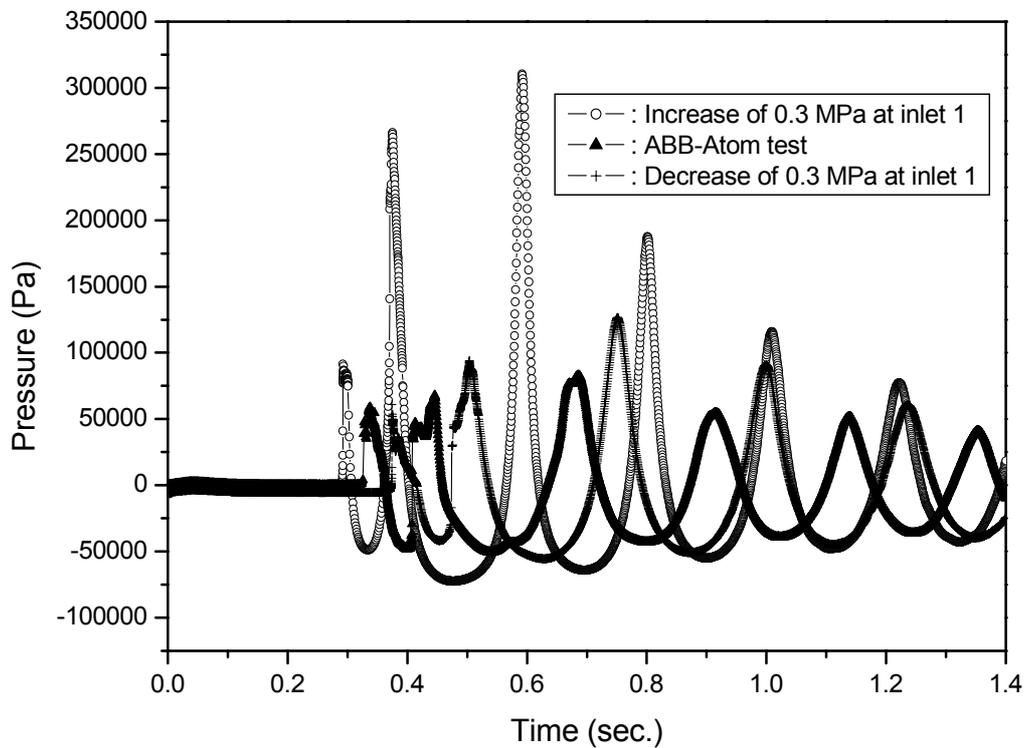


Fig. 4-19 Wall dynamic pressure with the change of inlet pressure

Fig. 4-20은 배관 입구압력이 ABB-Atom 실험 측정치보다 0.3 MPa 큰 경우에 대한 시간에 따른 수조내의 기포 거동을 나타낸 것이다. 여기에서 0.144 sec.는 배관입구에 증기가 형성되는 시점이며, 0.301 sec.는 LRR에 증기가 도달하여 이 부분을 wall로 처리한 시점을 0.392 sec.는 sparger head에 증기가 도달하여 배관 전체를 wall로 처리한 시점을 나타낸다. 또한 0.477 sec.는 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점을 0.592 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 찌그러들어 부력에 의해 수면 위로 상승함을 알 수 있다. 또한, 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.477 sec.에 기포의 총 부피는 대략 최대가 되며 최대 양압이 형성되는 시점인 0.592 sec.에 기포의 총 부피는 대략 최소가 됨을 알 수 있다.

Fig. 4-21은 배관 입구압력이 ABB-Atom 실험 측정치보다 0.3 MPa 큰 경우에 대해 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.477 sec., 벽면에 최대 양압이 형성되는 시점인 0.592 sec. 및 계산 종료 시점인 1.4 sec.에서 수조내 압력분포를 나타낸 것이고 Fig. 4-22는 각각에 대한 수조의 온도분포를 나타낸 것이다. 앞서서와 유사하게, LRR과 sparger head 부분에서 형성된 각각의 기포군을 중심으로 각각 진동하면서 상호 작용에 의해 수조내 압력장을 형성하는 것과 격렬한 난류 현상에 의해 대부분의 기포 온도는 대략 주위 물 온도와 같아짐을 알 수 있다.

Fig. 4-23은 배관 입구압력이 ABB-Atom 실험 측정치보다 0.3 MPa 큰 경우에 대해 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.477 sec., 벽면에 최대 양압이 형성되는 시점인 0.592 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.

Fig. 4-24는 배관 입구압력이 ABB-Atom 실험 측정치보다 0.3 MPa 작은 경우에 대한 시간에 따른 수조내의 기포 거동을 나타낸 것이다. 여기에서

0.222 sec.는 배관입구에 증기가 형성되는 시점이며, 0.416 sec.는 LRR에 증기가 도달하여 이 부분을 wall로 처리한 시점을 0.519 sec.는 sparger head에 증기가 도달하여 배관 전체를 wall로 처리한 시점을 나타낸다. 또한 0.629 sec.는 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점을 0.751 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 찌그러들어 부력에 의해 수면 위로 상승함을 알 수 있다. 또한, 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.629 sec.에 기포의 총 부피는 대략 최대가 되며 최대 양압이 형성되는 시점인 0.751 sec.에 기포의 총 부피는 대략 최소가 됨을 알 수 있다.

Fig. 4-25은 배관 입구압력이 ABB-Atom 실험 측정치보다 0.3 MPa 큰 경우에 대해 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.629 sec., 벽면에 최대 양압이 형성되는 시점인 0.751 sec. 및 계산 종료 시점인 1.4 sec.에서 수조내 압력분포를 나타낸 것이고 Fig. 4-26은 각각에 대한 수조의 온도분포를 나타낸 것이다. 앞에서 설명한 것과 유사한 현상이 일어남을 알 수 있다.

Fig. 4-27은 배관 입구압력이 ABB-Atom 실험 측정치보다 0.3 MPa 큰 경우에 대해 벽면에 최대 음압이 형성되는 시점인 0.629 sec., 벽면에 최대 양압이 형성되는 시점인 0.751 sec. 및 계산 종료 시점인 1.4 sec.에서 깊이에 따른 벽면의 압력분포를 나타낸다. 앞서서와 유사하게, 양압과 음압 모두 깊이가 증가할수록 선형적으로 변화하다가 대략 sparger 끝부분에서 수조 바닥까지는 일정하게 되는 경향을 보여준다.

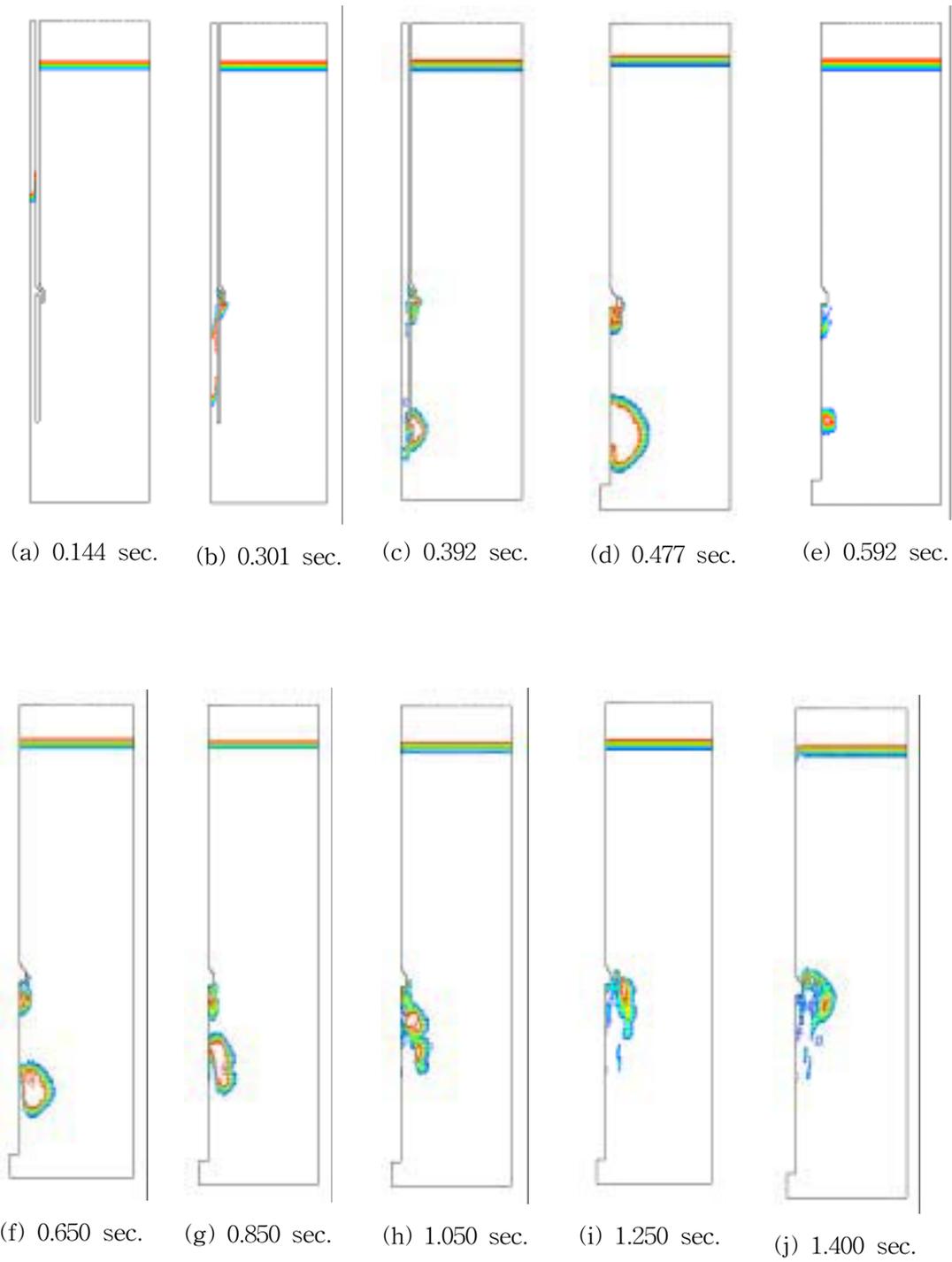


Fig. 4-20 Configuration of bubble cloud with time ( $P_{\text{inlet}}=P_{\text{test}}+0.3\text{MPa}$ )

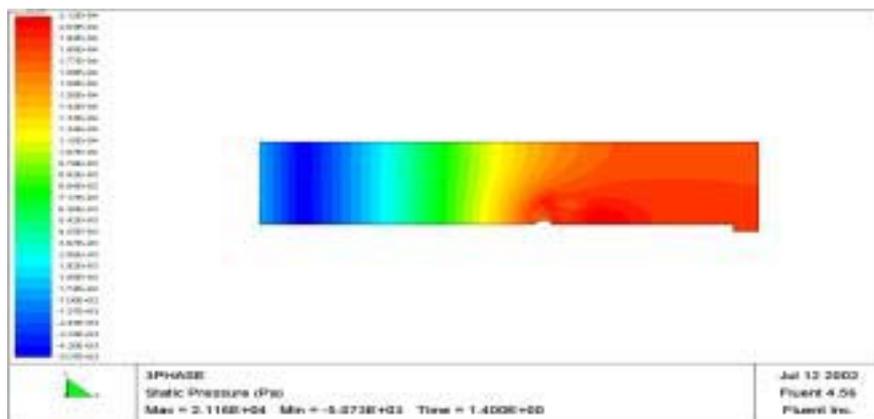
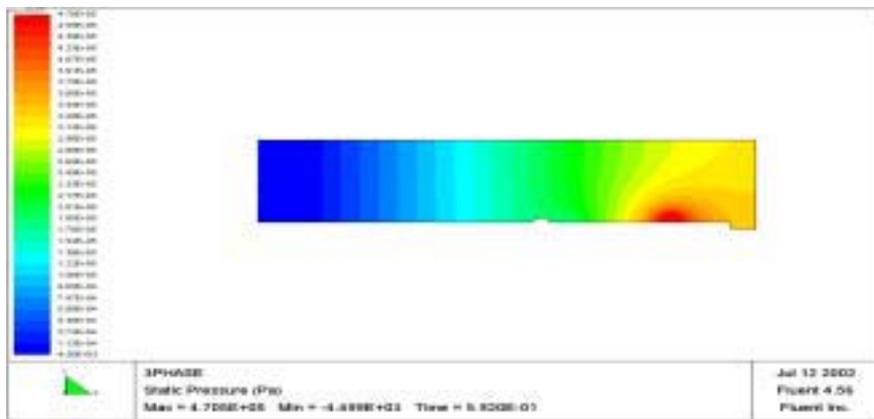
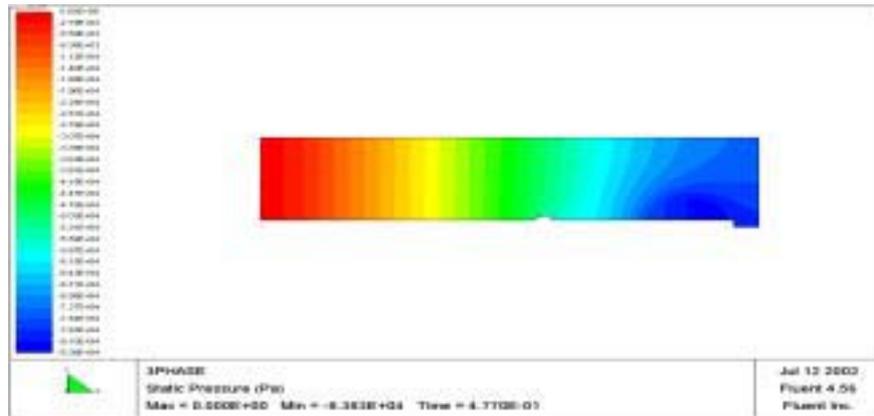


Fig. 4-21 Pressure distribution in the pool ( $P_{inlet}=P_{test}+0.3MPa$ )

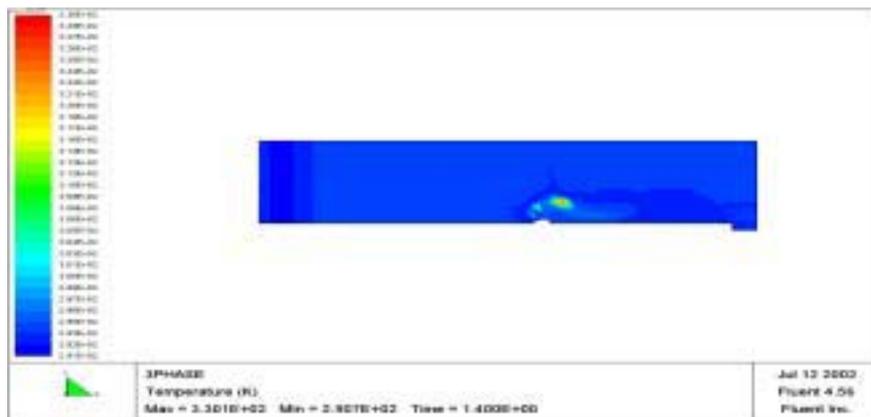
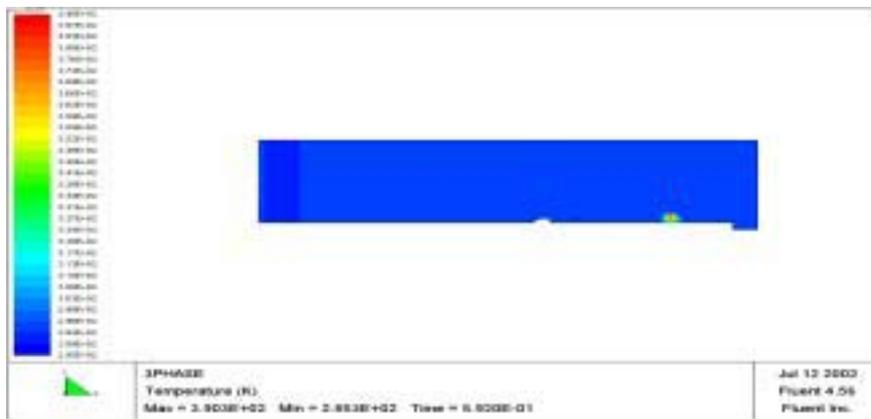
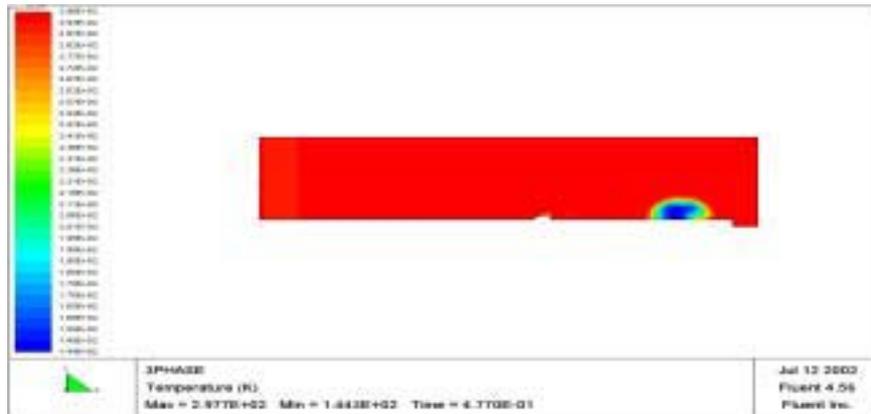


Fig. 4-22 Temperature distribution in the pool ( $P_{inlet}=P_{test}+0.3\text{MPa}$ )

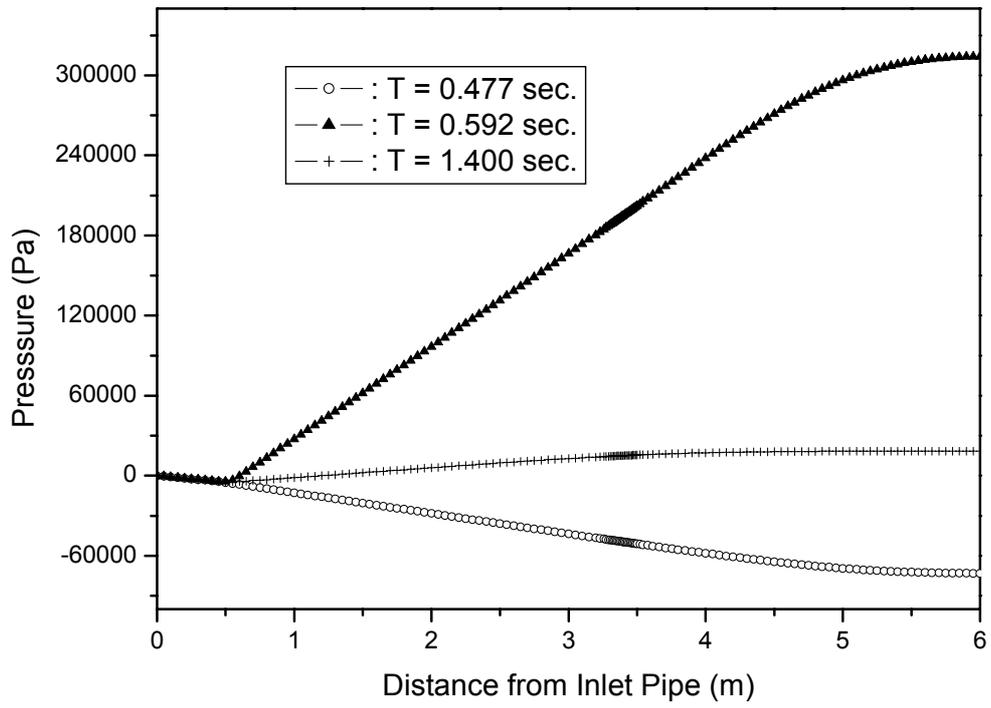


Fig. 4-23 Wall dynamic pressure vs. distance from inlet pipe  
 $(P_{inlet} = P_{test} + 0.3 \text{ MPa})$

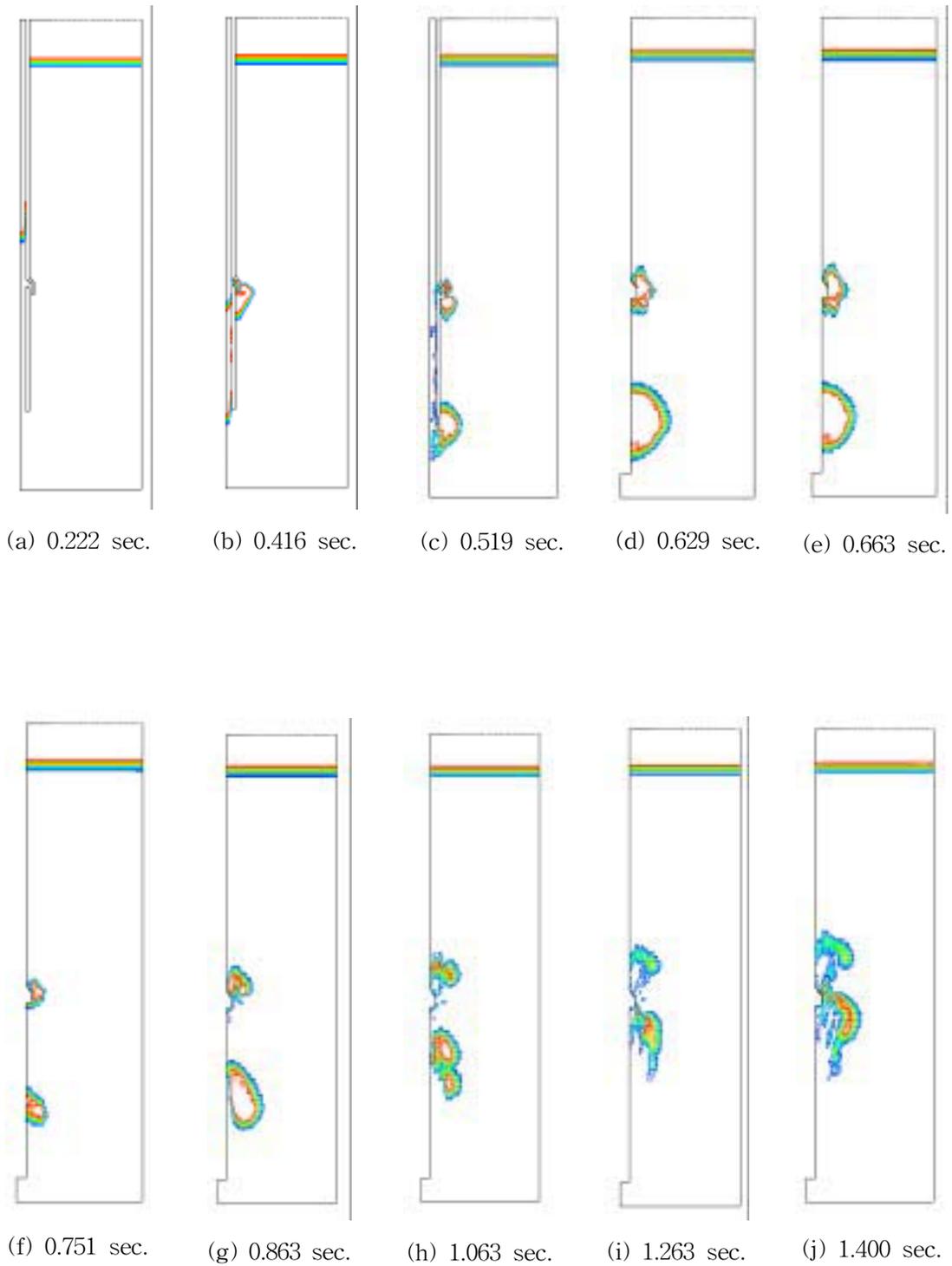


Fig. 4-24 Configuration of bubble cloud with time ( $P_{\text{inlet}}=P_{\text{test}}-0.3\text{MPa}$ )

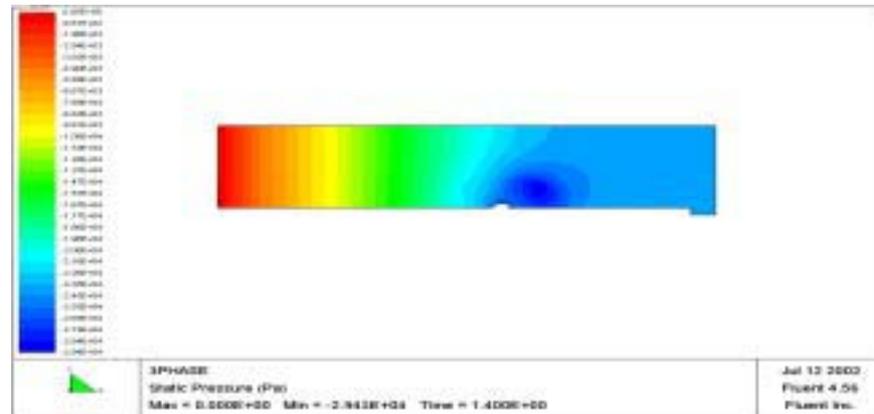
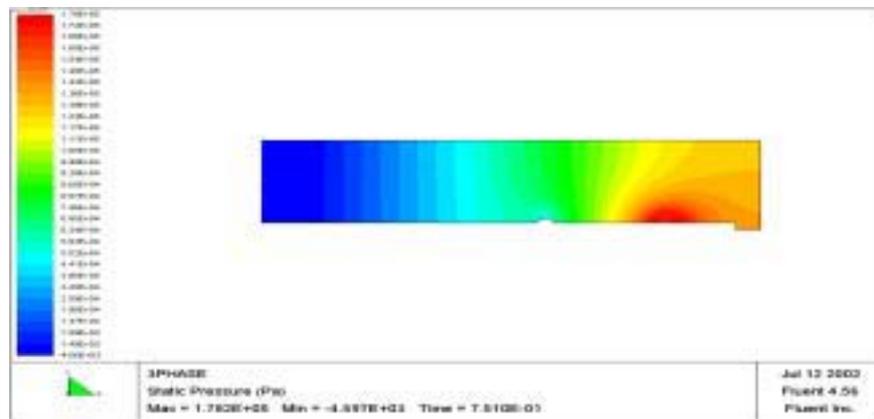
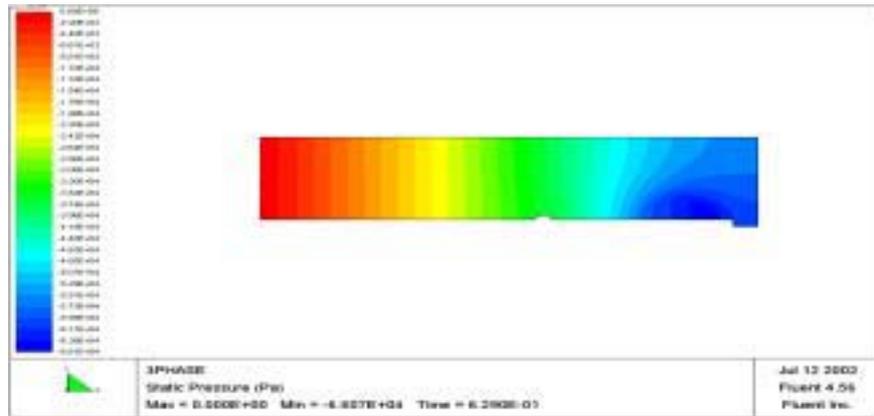


Fig. 4-25 Pressure distribution in the pool ( $P_{inlet}=P_{test}-0.3\text{MPa}$ )

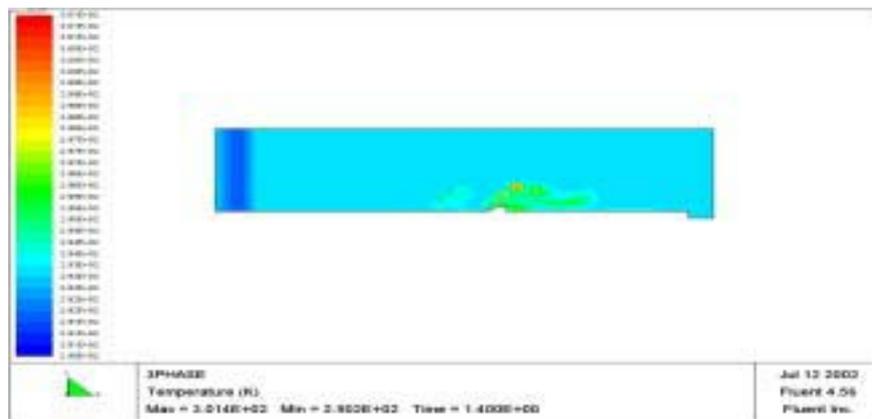
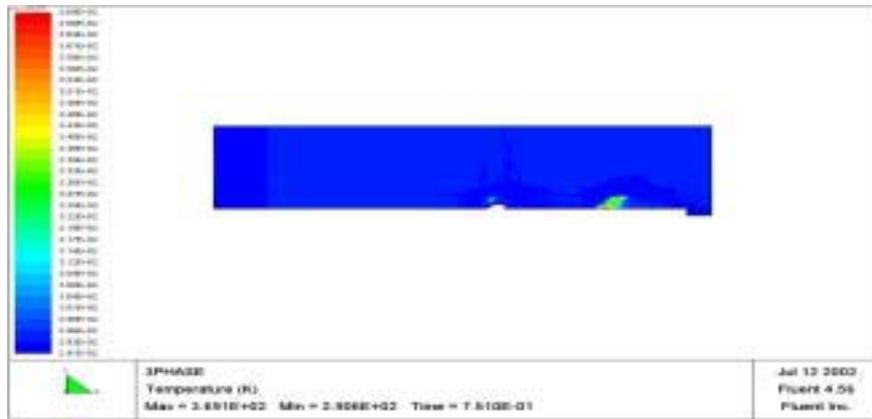
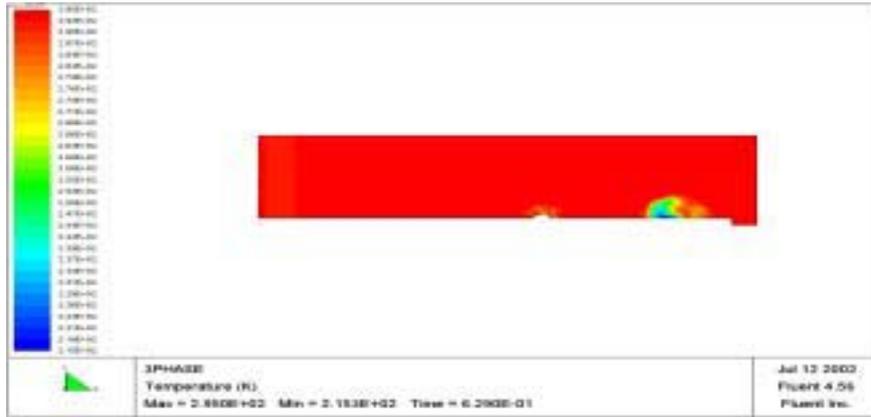


Fig. 4-26 Temperature distribution in the pool ( $P_{inlet}=P_{test}-0.3\text{MPa}$ )

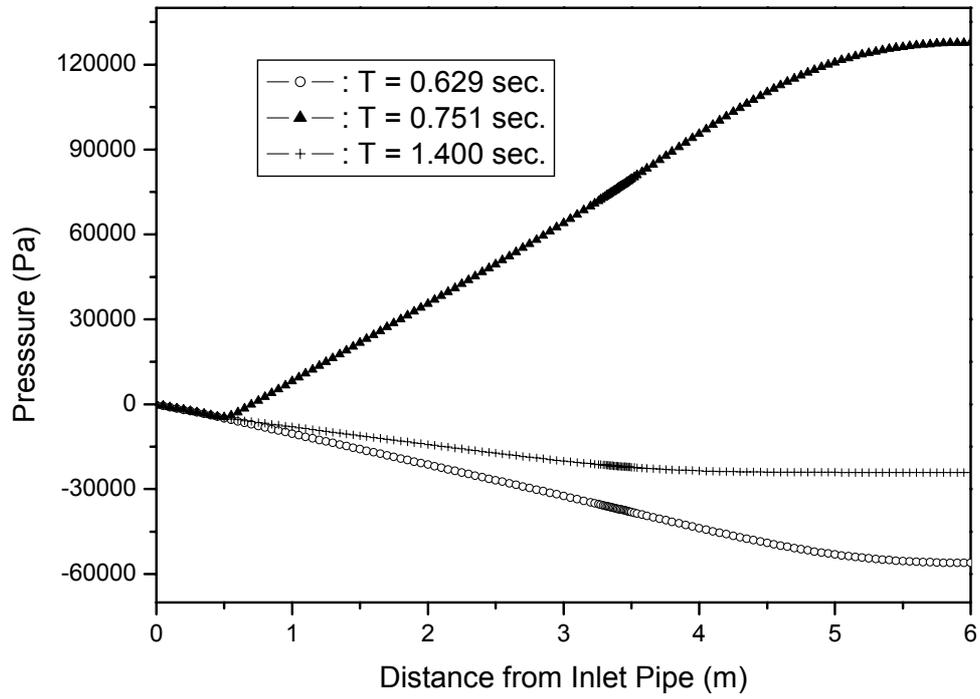


Fig. 4-27 Wall dynamic pressure vs. distance from inlet pipe  
 $(P_{\text{inlet}} = P_{\text{test}} - 0.3 \text{MPa})$

## 제 5 장 결 론

한국형차세대원자로 APR-1400의 안전감압배기계통이 작동하면 물, 공기 및 증기가 sparger를 통해 격납건물내 핵연료재장전 수조로 차례로 방출된다. 방출 과정에 발생하는 현상들은 물 방출시의 water jet, 공기 방출시의 기포군(bubble cloud)에 의한 압력변동, 증기방출시의 증기의 응축 현상 등이며 이중에서 수조 내로 방출된 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. 따라서 sparger와 침수 구조물 설계시 고려해야할 공기 기포군의 진동 하중을 예측하는 수치해석 모델을 개발하는 것은 의미있는 일이다.

본 보고서에서는 sparger를 통해 수조 내로 방출되는 공기 기포군의 거동에 대한 수치해석을 상용 열수력 해석 코드인 FLUENT Version 4.5를 사용하여 수행하였다. 다상유동 해석모델중 기포군의 거동과 제 1상에 대해 압축성 유동을 동시에 모의할 수 있는 VOF(Volume Of Fluid) 모델을 사용하여 물, 공기 및 증기 등의 다상유동을 모의하였다. 해석결과, 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 있었고, sparger 개발을 위해 ABB-Atom이 수행하였던 실험결과와 비교하여 만족할만한 결과를 얻었다. 아울러 배관내 공기량 및 배관 입구조건 변화가 공기 기포군의 거동에 미치는 영향도 알아보았고, LRR과 sparger head에 형성되는 기포군의 진동 위상이 수조내 압력장에 많은 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

## 제 6 장 참 고 문 헌

- [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] Cho, S. et al., "Air Clearing Test to Generate the Forcing Function of APR-1400 Reactor", KAERI/TR-1931/2001(Restricted), Oct. 2001.
- [4] FLUENT user's guide manual, version 4.3, (1995).
- [5] Idelchik, I. E., Handbook of Hydraulic Resistance, 2nd ed., Hemisphere Publishing Corp., (1986).
- [6] Moody, F. J., Introduction to Unsteady Thermofluid Mechanics, John Wiley & Sons, Inc., (1990).
- [7] Moody, F.J., "Dynamics and Thermal Behavior of Hot Gas Bubbles Discharged into Water", Nuclear Engineering and Design, Vol. 95, (1986).
- [8] Fredell, J. and Henriksson, T., "Forsmark 1 - System 314, Safety/Relief Valve Discharge Tests - Final Report", KVB 81-179, ABB-Atom, May 4, (1981).
- [9] Chahine, G .L. and Duraiswami, R., "Dynamical Interactions in a Multi- Bubble Cloud", J. Fluid Engineering, Trans. ASME, Vol. 114, (1992).
- [10] Fredell, J., "System 80+; Steam Relief System, Estimation of IRWST Loads for STS DBE", RVE 92-056, ABB Atom, June 15, (1992).
- [11] 박춘경 등, "Unit Cell Sparger Test Using the B&C Test Facility", B&C-QLR-001, Jul., (2001).

- [12] 라인식, "KNGR IRWST T/H LOADS ANALYSIS REPORT", KOPEC, N-001-END461-201 Rev. A, Oct. 30, (2000).
- [13] 배윤영, "증기분사기 (sparger) 방출 공기의 거동", KAERI/TR-1534/2000, Mar., (2000)
- [14] 황영동 등, "수조내의 기포거동 분석", KAERI/TR-1158/98, Oct., (1998).
- [15] 김환열, "차세대원자로 Sparger 압력함수 개발관련 해외출장보고서", 한국원자력연구소, Sept., (1998).
- [16] 김환열, "APR-1400 forcing function 개발을 위한 Westinghouse Atom 기술자문 귀국보고서", Sept., (2001).

서 지 정 보 양 식

<b>수행기관보고서번호</b>	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/TR-2227/2002			
<b>제목/부제</b>	Sparger를 통해 수조로 방출되는 공기방울 거동 수치해석		
<b>연구책임자 및 부서명 (TR, AR인 경우 주저 자)</b>	김환열		
<b>연구자 및 부서명</b>	배윤영		
<b>출판지</b>	대전	발행기관	한국원자력연구소
		발행년	2002
<b>페이지</b>	59 pg	도 표	있음(√), 없음( )
		크 기	21 cm x 30 cm
<b>참고사항</b>	차세대원자로개발		
<b>비밀여부</b>	공개( √ ), 대외비( ), __ 급비밀	보고서종류	기술보고서
<b>연구위탁기관</b>		계약 번호	
<b>초록 (15-20줄내외)</b>	<p>한국형차세대원자로 APR-1400의 안전감압배기계가통이 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. 따라서 sparger와 침수 구조물 설계시 고려해야할 공기 기포군의 진동 하중을 예측하는 수치해석 모델을 개발하는 것은 의미있는 일이다. 본 보고서에서는 sparger를 통해 수조 내로 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. 아울러 배관내 공기량 및 배관 입구조건 변화가 공기 기포군의 거동에 미치는 영향도 알아보았으며, LRR과 sparger head에 형성되는 2개의 대형 기포군의 진동 위상이 수조내 압력장에 많은 영향을 미치고 있음을 확인하였다.</p>		
<b>주제명키워드 (10단어내외)</b>	APR-1400, 증기분사기, 안전감압배기계가통, 핵연료재장전수 수조, 공기 기포, 수치해석, VOF 모델		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No. INIS Subject Code	
KAERI/TR-2227/2002					
T i t l e / Subtitle		Numerical Analysis on the Behavior of Air Bubble Discharging into a Water Pool through a Sparger			
Project Manager and Department		Hwan Yeol Kim			
Researcher and Department		Yoon Yeong Bae			
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI	Publication Date	2002
Page	59 pg	Ill. & Tab.	Yes(√), No ( )	Size	21 cm x 30 cm
Note	Korean Next Generation Reactor Development				
Classified	Open( √ ), Restricted( ), ___ Class Document		Report Type	Technical Report	
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract (15-20 Lines)					
<p>If the safety depressurization and vent 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 a sparger. 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. Thus, it is valuable to develop a computational model on the air bubble cloud oscillation, whose loads should be considered in the design of sparger and submerged structures. This report 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. In addition, effects of air mass and inlet condition of the pipe on the behavior of air bubble cloud were included. It was found that the oscillation phases of two air bubble clouds formed at the LRR and sparger head have an impact on the pressure field in the pool.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		APR-1400, Sparger, Safety Depressurization and Vent System, In-containment Refueling Water Storage Tank, Air Bubble Cloud, Numerical Analysis, VOF model			