



KR9900092

KAERI/TR-1158/98

수조내의 기포거동 분석

An Analysis of the Bubble Behavior
in the Water Pool

1998. 10.

한국원자력연구소

Korea Atomic Energy Research Institute

30-46

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 차세대원자로기술개발(II) 유체계통개발과제의 “수조내의 기포 거동 분석”에 대한 기술보고서로 제출합니다.

1998. 10. 31

과 제 명 : 차세대원자로 유체계통개발

주 저 자 : 황영동

공 동 저 자 : 김영인, 김환열, 배운영, 박종균

책임감수위원 : 서인석

감 수 위 원 : 정법동

요 약 문

공기가 Sparger를 통하여 수조내로 방출될 때의 기포형상 및 거동에 대한 물리적 특성을 파악하고, 이를 근거로 수조내의 기포거동을 모의할 수 있는 단순화 모델을 도출하였다. 또한 이 모델을 이용하여 수조내에 형성된 기포의 거동과 기포 거동에 의하여 수조내에 형성된 압력장(pressure field)이 수조벽면에 미치는 하중의 영향을 해석하기 위한 전산프로그램을 개발하였다. 전산프로그램의 예측능력 평가를 목적으로 ABB-Atom의 응축 실험을 참조하여 기준조건을 설정하고 기포의 거동 및 수조벽면의 압력특성을 해석하였으며 수조내의 압력변동 특성에 영향을 미치는 주요 인자들에 대한 영향을 평가하였다. 해석결과 기포의 압력진동의 변동폭은 단순모델에 의하여 비교적 정확한 예측이 가능한 것으로 평가되었으나, 압력변동의 정확한 주파수를 예측하기 위해서는 bubble cluster의 기공율에 대한 정확한 자료와 기포 내에 포함되어 있는 증기와 물의 영향 등에 대한 상세한 연구가 필요한 것으로 평가되었다.

또한 수조내 기포의 거동 및 압력진동 특성 해석에 대한 FLUENT 코드의 적용성 평가를 목적으로 FLUENT 코드의 압축성(compressible) VOF(Volume Of Fluid) 모델을 이용하여 ABB-Atom의 응축 실험 데이터를 모의 해석하였다. 해석결과 FLUENT 코드는 압력변동 주파수는 실험결과를 매우 유사하게 계산하고 있으나, 최대압력은 실험결과와 차이를 보이고 있다. 실험결과에 비하여 해석결과의 초기 공기방출이 매우 빠르게 진행되었다. 실험조건에서는 공기와 증기가 혼합되어 방출되므로 상대적으로 공기의 평균 방출양이 감소되며, 또한 기포율(voil fraction)에 따라서도 임계유속이 크게 변화한다. 그러나 측정의 어려움 때문에 공기방출시의 방출속도와 증기와 공기의 구성비에 대하여 실험에서 계측된 자료가 없어 공기의 등가임계유속을 보수인 범위에서 변화시켜 최대압력의 변화를 계산하였다. 공기의 등가임계유속이 낮아짐에 따라 초기공기 방출 과정에 형성되는 압력펄스와 최대압력이 점차 실험값과 근접하였다. 분석결과 FLUENT V4.5는 KNGR sparger의 정성적인 성능해석에는 이용 가능할 것으로 판단된다. 그러나 FLUENT 코드를 이와 같이 복잡한 유동의 정량적 해석에 적용하기 위해서는 실험자료에 근거한 등가임계유속의 산정이 필요하다.

SUMMARY

An analytical study was performed to investigate the physical phenomena on the bubble behavior when the air discharges into the water pool through the sparger. The simplified numerical model was identified and the computer program was developed using simplified model to simulate the bubble behavior and the wall response induced by the pressure field. In order to evaluate the predictability of the developed computer program, one case of the ABB-Atom's blowdown test was simulated with the condition established based on the test data. The bubble behavior and the pressure response on the wall were analyzed and the major parameters influencing the bubble behavior and the pressure response were evaluated. The analysis results show that the computer program with simplified model could calculate the pressure amplitude of the bubble in good agreement with the test data. However, the detailed study on the void fraction of the bubble cluster and the influence of the steam and water of the bubble cluster on pressure response need to be performed for more accurate prediction of the pressure oscillation frequency.

A numerical study also was performed using preleased FLUENT V4.5 to investigate the applicability of the CFD model for IRWST hydrodynamic analysis during the sparger air venting. Transient calculations were performed with the compressible VOF model on the selected ABB-Atom Unit Cell Test data. This study was focused on the simulation of the bubble formation process in the water pool and time varying pressure history during the air venting from the sparger. The main frequency is in good agreement with the simulated data, but the simulated peak pressure was over-predicted. There was a significant difference between the calculated data and the test data at the speed of the air venting in early stage. The equivalent choking velocity which is used for air discharge into the water pool effects the air venting process directly and thus the peak pressure. The peak pressure similar to the test results was obtained by reducing air discharge velocity in the conservative range. This indicates that the proper estimations of the air venting velocity consistent with the sparger design and operating conditions is essential for the application of FLUENT V4.5 to the sparger performance analysis of KNGR.

제 목 차 례

요 약 문	iii
SUMMARY	iv
제 1 장 개 요	1
제 2 장 Rayleigh bubble 모델을 이용한 기포거동 해석	2
1. 기포거동의 물리적 특성	2
가. 비응축성 기체의 주입에 의한 기포의 생성 및 성장	2
나. 기포의 분열 및 Bubble Cluster의 형성	3
다. Bubble Cluster 상승속도	4
2. 기포의 진동 및 감쇄 기구	5
가. Rayleigh Bubble Equation	5
나. 기포진동의 감쇄기구	6
다. 고압기체의 주입에 의하여 생성된 대형기포의 거동	9
3. 수조내의 기포거동 및 압력특성 분석 모델	10
가. 기포거동 모델	10
나. 수조내의 압력 및 수조벽면의 응답 특성	11
다. 수조 벽면의 압력 변화	11
라. 전산해석 프로그램	13
마. 수조내의 기포거동 및 벽면의 압력 변화 특성 분석	14
(1) 분석 조건	14
(2) 해석결과 및 고찰	14
제 3 장 FLUENT코드의 VOF 모델을 이용한 증기응축 실험 모의해석	29
1. 개요	29
2. 해석모델	31
가. 관련모델 검토	31
(1) 다상유동 모델	31
(가) Euler-Lagrange 모델	32
(나) Euler-Euler 모델	32
1) Eulerian multiphase 모델	34

가) 유체-유체 다상유동	34
나) 과립상(Granular) 다상유동	35
2) VOF 모델	36
(2) 난류 모델	38
(3) 다공성 매질(porous media) 모델	38
(4) 압축성모델	40
나. 해석모델 선정	41
3. 해석방법	43
가. 해석격자	43
나. 초기 및 경계조건 설정	44
다. 해석절차	46
4. 해석결과 및 고찰	48
제 4 장 결 론 및 향후 연구계획	69
참고문헌	71

표 차례

표 3-1. 경계조건	52
표 3-2. Porous Media 모델링 관련 인자	52
표 3-3. 임계유속	52

그림 차례

그림 2-1. 대형기포의 detachment 크기	16
그림 2-2. 대형기포의 분열모형 개념도	16
그림 2-3. 기포의 초기 직경 및 Bubble Cluster의 직경	17
그림 2-4. 기포의 상승속도	17
그림 2-5. Idiabatic Bubble의 거동	18
그림 2-6. Isothermal Bubble의 거동	18
그림 2-7. 최대열전달율을 가진 기포의 진동	19
그림 2-8. 공기기포의 진동에 의한 압력 비교[2]	19
그림 2-9. 중첩법에 의한 기포 및 벽면모의	20
그림 2-10. 중첩법에 의한 2, 3-sided Corners 모의	21
그림 2-11. 중첩법에 의한 평행벽면의 모의	22
그림 2-12. 기준조건에서의 기포반경의 변화	23
그림 2-13. 기준조건에서의 기포경계면의 속도	23
그림 2-14. 기준조건에서의 압력 거동	24
그림 2-15. 열전달계수(H)의 변화에 따른 반경변화	24
그림 2-16. 열전달계수(H)의 변화에 따른 기포의 압력 거동	25
그림 2-17. 열전달계수(H)의 변화에 따른 수조벽면의 압력 변화	25
그림 2-18. 잠김깊이에 따른 기포의 반경 변화	26
그림 2-19. 잠김깊이에 따른 기포의 압력 변화	26
그림 2-20. 잠김깊이에 따른 수조벽면의 압력 변화	27
그림 2-21. 주입공기의 온도 차이에 의한 기포압력 거동	27
그림 2-22. 주입공기의 기공율 차이에 의한 기포압력 거동(0.25~1.0)	28
그림 3-1. 실험설비	53
그림 3-2. 해석격자	54
그림 3-3. 방출배관 압력변화(실험결과: run 186)	55
그림 3-4. 수조 압력변화(실험결과: run 186)	56
그림 3-5. 수조 압력변화(Case A)	56
그림 3-6. 수조 압력변화(Case B)	56

그림 3-7. 수조 압력변화(Case C)	56
그림 3-8. 기포의 형상변화(Case A)	57
그림 3-9. 기포의 형상변화(Case B)	58
그림 3-10. 기포의 형상변화(Case C)	59
그림 3-11. 수조의 압력분포(Case A : 1/4)	60
그림 3-12. 수조벽면의 압력분포(Case A)	64
그림 3-13. 수조의 속도벡터 및 기포형상(Case A : 1/4)	65

제 1 장 개 요

현재 국내에서 개발중인 차세대원전(Korean Next Generation Reactor: KNGR)에는 예상되는 사고시 원자로냉각재계통(Reactor Coolant System: RCS)으로부터 가압기를 통하여 격납용기내재장전수조(In containment Refueling Water Storage Tank: IRWST)로 방출되는 증기를 효과적으로 응축시키고, 고압의 증기 방출에 따른 부하를 경감시키기 위하여 sparger가 도입되었다.

증기분사기가 작동하면 수조내에 잠겨있던 배관속의 물이 방출되고 이어서 배관속의 기체 그리고 RCS의 증기 또는 증기와 물이 혼합된 이상유체(two phase fluid)가 방출된다. 초기에 방출되는 물의 jet에 의한 하중은 sparger에 인접한 일부 구조물에 영향을 미치지만 그 영향은 기체방출에 의하여 형성된 기포의 거동에 의한 하중에 비하여 매우 작다. 또한 RCS(Reactor Coolant System)의 증기 방출시에는 수조내에서 증기의 응축이 비교적 안정적으로 이루어지므로 수조내에 큰 하중을 발생시키지 않는다. 그러나 배관내의 기체가 수조내로 분출되는 경우에는 기포의 분열 및 인접기포간의 결합 등에 의하여 대형의 기포군(bubble cluster)을 형성하게 된다. 이들 기포군은 시간경과에 따라 표면으로 상승하게되며 이때 대형기포군의 수축 및 팽창에 의한 압력상승과 낮은 진동주기의 영향으로 수조내의 구조물에 공진에 의한 큰 수력하중을 발생시킬 가능성이 있다. 따라서 수조내의 비응축성 기체에 의하여 형성된 기포의 거동에 대한 이해는 수조내 구조물과 수조벽면에 작용하는 하중을 이해하고 분석하는데 중요하다.

본 연구에서는 문헌조사를 통하여 sparger를 통하여 비응축성 기체를 수조내로 방출할 때 형성되는 기포형상 및 기포거동에 대한 물리적 특성을 파악하고, 이를 근거로 수조내의 기포거동을 모의할 수 있는 단순화 모델을 도출하였다. 또한 이 모델을 이용하여 수조내에 형성된 기포의 거동과 기포거동에 의하여 수조내에 형성된 압력장(pressure field)이 수조벽면에 미치는 하중의 영향을 평가하기 위한 해석 방법을 개발하였다. 또한 ABB-Atom이 수행한 증기응축에 대한 실험[7]을 FLUENT 코드의 압축성 VOF 모델을 이용하여 초기에 수조내로 방출되는 물과 공기에 의하여 형성되는 유동장에 대한 해석을 수행, 코드의 적용성을 평가하였다.

제 2 장 Rayleigh bubble 모델을 이용한 기포거동 해석

1. 기포거동의 물리적 특성

Sparger로부터 방출되는 공기에 의하여 형성되는 기포는 그 크기가 안정된 기포 크기의 한계를 초과하여 대형기포로 성장하면 여러 개의 작은 기포로 분열되어 기포덩어리(Bubble Cluster)를 형성한다. 이 기포덩어리는 중심의 수직방향으로 상승하고 경계면 인접영역에서는 하강하는 자연순환유동을 형성한다. Bubble cluster는 내부순환유동을 계속하면서 기포 내부와 외부의 열역학적 상태의 불평형과 주변 유동장의 영향으로 압축과 팽창과정을 반복하면서 부력에 의하여 수조 표면으로 상승하게 된다. 따라서 sparger를 통하여 주입된 기체의 주입으로 수조내에 형성된 기포의 거동을 이해하기 위해서는 기포의 형성 및 성장, 기포의 분열에 의한 대형 기포군의 형성 및 대형기포군의 상승과정에서의 물리적 특성에 대한 이해가 필요하다. 본 절에서는 문헌조사를 통하여 파악한 이들 각 과정에서의 물리적 특성 및 이들의 영향을 기술하였다.

가. 비응축성 기체의 주입에 의한 기포의 생성 및 성장

Sparger와 같이 여러 개의 작은 구멍을 통하여 수조내로 공기와 같은 비응축성 기체가 방출하는 경우 수조내에는 구형의 기포가 생성되고, 분열 및 주변 기포와의 결합에 의하여 기포군(bubble cluster)을 형성한다. 특히 기체의 방출율이 큰 경우에는(higher discharge rate)에는 대형기포의 분열이 촉진되어 다수의 소형기포들의 집합체인 기포군을 형성한다. 가스 jet에 의하여 형성되는 초기기포의 크기는 조건에 따라 다르지만 대략 orifice 직경의 2배 정도의 크기를 가진다. 소형 orifice 또는 tube를 통하여 기체가 주입되어 구형(spherical shape)의 단일 기포가 생성되는 경우 기포가 성장하여 orifice 또는 tube로부터 분리되는 크기는 다음 식으로 주어진다[5].

$$\frac{D_d}{D_0} = 1.3 \left(\frac{Q}{\sqrt{gD_0^5}} \right)^{2/5} \quad (1)$$

여기서 Q 는 주입되는 기체유량, D_0 는 orifice 또는 tube의 직경, g 는 중력가속도를 나타낸다. 분리된 기포의 반경이 stable range를 초과하면 안정된 크기에 도달할 때까지 분열을 계속한다. 한편 고압의 기체가 수조내로 주입되면 비교적 대형의 기포

가 형성되며 상당기간동안 안정된 경계면을 유지한다[2]. 이러한 이유는 기포벽면의 가속도와 관계가 있으며 이는 가속도가 진동사이클의 대부분 기간 동안 안정적인 방향, 즉 기체방향으로 향하고 있기 때문이다.

나. 기포의 분열 및 Bubble Cluster의 형성

Sparger로부터 방출되는 공기에 의하여 생성된 대형기포는 그 크기가 안정된 기포 크기에 도달할 때까지 작은 기포로 분열을 계속한다. 초기단계에서의 기포의 성장, tube 또는 orifice로부터의 분리(detachment) 및 소형기포로의 분열은 Froude Law 즉 중력과 관성력의 비에 의하여 지배된다. 그러나 더 이상의 분열이 진행되지 않는 안정된 기포의 크기는 아래의 식에서와 같이 유체의 표면장력에 지배적인 영향을 받는다[5].

$$\pi\left(\frac{\sigma}{g\rho_L}\right)^{1/2} \leq D \leq \pi\left(\frac{3\sigma}{g\rho_L}\right) \quad (2)$$

이 식에서 σ 는 물의 표면장력, ρ_L 은 물의 밀도를 나타낸다. 식(2)로부터 물속의 공기기포에 대한 등가 반경(equivalent spherical diameter) D 를 계산하면 $0.8\text{cm} \leq D \leq 1.4\text{cm}$ 가 된다. Weber 등의 연구결과에 의하면 등가직경이 0.5cm를 초과하는 경우 기포는 편평(flattening)한 형상으로 변형하며, 대형기포가 분열할 때에는 안정된 spherical capped bubble이 발생하는 경우도 관찰되었다[5].

그림 2-2는 고속카메라를 이용하여 추적한 기포분열과정을 보여주고 있다. 대형기포는 기포의 bottom surface가 top surface에 충돌하면서 분열한다. 이는 기포의 하단과 상단사이의 물에 의한 수압의 차이가 $\Delta P = \rho_L g D_d$ 인 반면, 기포내부의 공기압력은 일정하기 때문에 발생한다. 즉 기포의 상단과 하단에 Bernoulli 방정식을 적용하면 기포의 하단면은 $V = \sqrt{2\Delta P/\rho} = \sqrt{2gD_d}$ 의 속도로 기포의 상단을 향하여 덮치게(overtaking) 된다. 이때 기포의 분열이 일어나는 overtaking에 걸리는 시간은 약 $\sqrt{D_d/2g}$ 가 된다.

대형기포의 연속적인 분열(continued breakup)은 기체와 액체 경계면의 불안정한 성장, 즉 Taylor and Helmholtz instability와 깊은 관계가 있다. 기체-액체 경계면에서의 파동(wave)의 성장과 Taylor instability에 의한 기포의 분열시간은 대략적으로 $\sqrt{D/2g}$ 에 값에 접근한다[5]. 여기서 D 는 각 분열단계에서의 평균기포반경으로

정의된다.

또한 대부분의 기포분열은 $Y/D_d < 0.5$ 에서 이루어진다[5]. 여기서 Y 는 기포상승 거리를 나타낸다.

다. Bubble Cluster 상승속도

대형기포는 지속적인 분열 및 인접기포와의 결합에 의하여 대형의 기포덩어리 (bubble cluster)를 형성한다. Bubble cluster는 구형(spherical shape)에 가까운 형상을 가지며 bubble cluster내의 소형기포들은 기포의 수직 중심축에 인접한 영역에서는 수직방향으로 상승하고 경계면 인접영역에서는 하강하는 내부 자연순환유동을 계속하면서 부력에 의하여 수조 표면으로 상승한다.

W. J. Marble 등의 slow motion 실험결과에 의하면 bubble cluster의 기공율 (void fraction)은 약 0.5정도의 값을 가진다[5]. 이는 sinusoidal interface wave의 성장에 의한 이상적인 기포분열에 의하여 형성된 기공율에 보다 근사한 값이다. 한편 초기기포의 translational virtual mass에 상당하는 부피의 물, 즉 $2\pi R_0^3/3$ 의 부피에 상당하는 물을 기포내부에 포함하고 있는 것으로 가정하여 bubble cluster내의 기공율을 계산하면 $\alpha=2/3$ 가 된다. 이 값은 Taylor instability에 의한 실제 경계면의 분열에 의한 기공율에 가까운 값으로 sinusoidal interface wave의 성장에 의해 생성되는 bubble cluster보다 액체(물)의 entrainment가 작게된다. 그림 2-3은 Moody[5]의 실험결과로 직경 15cm의 horizontal vent를 통해 방출된 공기에 의하여 생성된 기포와 기포분열에 의하여 형성된 bubble cluster의 직경변화를 보여주고 있다. 이 그림에서 기공율 $\alpha=1/2, 2/3$ 을 사용하여 계산한 cluster의 직경은 실험데이터를 bounding하고 있음을 보여주고 있다.

Moody 등은 기포의 breakup distance $Y=D_d/2$ 를 가정하여 기공율 $\alpha=1/2, 2/3$ 에 대한 기포의 상승속도를 다음의 식으로 제안하였다.

$$\frac{v_c}{\sqrt{gD_d}} = \begin{pmatrix} 0.68, & \alpha=1/2 \\ 0.97, & \alpha=2/3 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Wallis는 대형의 구형기포의 상승속도를 $0.707\sqrt{gD_d}$ 로 제안하고 있다. 그림 2-4는 실험데이터와 식(3)으로 계산한 bubble cluster의 상승속도를 비교한 결과를 보여주고 있다.

2. 기포의 진동 및 감쇄 기구

가. Rayleigh Bubble Equation

수조에 잠겨있는 구형기포의 거동은 submerged explosion, 기체의 discharge, 증기 기포의 붕괴 현상 등의 고전적인 해석에 많이 사용되어온 Rayleigh Equation으로 나타낼 수 있다[2]. 반경 $R(t)$, 압력 $P_b(t)$ 인 기포가 압력 P_∞ 밀도 ρ_L 인 물속에 잠겨있는 경우를 가정하면 기포주위의 유체의 응답특성은 point source를 가진 기포의 wall velocity를 모의하여 구할 수 있다. 즉 point source의 속도 포텐셜 함수는

$$\phi = -R^2 \frac{dR}{dt} \frac{1}{r} \quad (4)$$

로 정의되므로, 기포의 벽속도 dR/dt 는 다음의 식으로 주어진다.

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{r=R} = \frac{2}{4\pi} \frac{1}{R^2} \quad (5)$$

한편 속도포텐셜이 존재하는 이상유체의 비정상 유동에 대한 Bernoulli Equation은

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{V^2}{2} + \frac{P}{\rho} + gy = f(t) \quad (6)$$

와 같다. 식(4), (5)에서 $r \rightarrow \infty$ 일 때 $\partial \phi / \partial t$ 와 속도 V 는 모두 영이 되고, 중력을 무시하면 $f(t) = P_\infty / \rho$ 이 되므로 식(4), (5)를 식(6)에 대입하여 정리하면 기포내부의 압력 분포에 대한 다음의 식이 유도된다.

$$P(r, t) - P_\infty = \rho \left[\frac{R^2}{r} \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{2R}{r} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 - \frac{1}{2} \frac{R^4}{r^4} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \right] \quad (7)$$

기포의 벽면($r=R$)에서의 압력 $P(R, t) = P_b(t)$ 이므로 이를 식(7)에 대입하여 정리하면 기포반경에 대한 Rayleigh 방정식이 유도된다.

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{P_b(t) - P_\infty}{\rho_L} \quad (8)$$

P_∞ 는 평형상태에서의 압력으로 기포 내부의 압력과 온도가 기포주위의 액체와 평형 상태, 즉 $R=R_\infty$, $P=P_\infty$, $T=T_\infty$ 에 도달하였을 때를 나타낸다. 이때 기포반경을 변화시키면, 기체의 체적, 압력 및 온도가 동시에 변하게 된다. 만일 기포의 압력과 온도가 평형상태로부터 이탈하게 되면, 즉 $P \neq P_\infty$, $T \neq T_\infty$ 이면 기포의 반경이 방정

식(8)에 따라 변하는 압축과 팽창의 과정을 반복하는 진동을 계속하게 된다.

나. 기포진동의 감쇄기구

수조안에서 압축 및 팽창에 의한 진동을 계속하는 기포의 진동감쇄기구(dissipation mechanism of bubble motion)는 기포로부터 주변유체로의 열전달과 직접적인 관계가 있다. 기포의 압축 및 팽창과정에서 발생하는 열전달에 의한 영향을 평가하기 위하여 기포와 주위 유체와의 열전달이 대류(convection)에 의하여 이루어진다고 가정하면 열전달 q 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$q = HA(T - T_{\infty}) \quad (9)$$

이 식에서 H 는 대류 열전달계수, A 는 기포의 표면적을 나타낸다. 기포의 경계면을 통한 질량의 유입이 없는 것을 가정하면 열역학 제 1법칙으로부터 기포에 대한 다음의 에너지 방정식이 유도된다.

$$P_s \frac{d\mathcal{E}}{dt} + q + \frac{dU}{dt} = 0 \quad (10)$$

여기서 \mathcal{E} 는 기포의 체적을, U 는 기포내 기체의 내부에너지(internal energy)를 나타낸다. 기포내부의 기체거동을 이상기체(ideal gas)로 가정하면 이상기체의 상태 방정식으로부터 $U = PV/(k-1)$, $PV = MR_g T$ 이 되며 구형기포(spherical bubble)의 경우 기포의 체적 $V = (4/3)\pi R^3$, 표면적 $A = 4\pi R^2$ 이 된다. 이를 기포의 에너지 방정식(10)에 대입하고 정리하면 아래의 방정식이 된다.

$$P \frac{dR}{dt} + \frac{1}{3k} R \frac{dP}{dt} + \frac{4\pi H(k-1)}{3M R_g k} (PR^3 - P_{\infty} R_{\infty}^3) = 0 \quad (11)$$

방정식 (8), (11)을 $R(t) = R_{\infty} + \epsilon R_1(t)$, $P(t) = P_{\infty} + \epsilon P_1(t)$ 관계를 이용 선형화하고 $R_1(t)$ 에 대해 정리하면 다음과 같은 3차 상미분 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d^3 R_1}{dt^3} + a \frac{d^2 R_1}{dt^2} + b \frac{dR_1}{dt} + c R_1 = 0 \quad (12)$$

방정식 (12)의 초기조건 및 계수 a, b, c 는 다음과 같다.

$$t=0, \quad R_1=0, \quad \frac{dR_1}{dt}=0, \quad \frac{d^2 R_1}{dt^2} = -\frac{3P_{\infty}}{\rho_L R_{\infty}} \quad (13)$$

$$a = \frac{4\pi(k-1) R_\infty^2 H}{3M R_g}, \quad b = \frac{3kP_\infty}{\rho_L R_\infty^2}$$

$$c = \frac{12\pi H(k-1) P_\infty^2}{3M R_g \rho_L} = a \left(\frac{3P_\infty}{\rho_L R_\infty^2} \right) \quad (14)$$

기포 벽면에서의 열전달이 없는($q=0$) 단열(adiabatic) 기포는 기포 벽면을 통한 열전달이 없으므로 (열전달 계수 $H=0$), 식 (12), (13), (14)로부터 단열기포의 거동은 다음의 식으로 표시된다.

$$R_1(t) = \frac{1}{k} \cos \left(\sqrt{\frac{3kP_\infty}{\rho_L R_\infty^2}} t \right) + \frac{k-1}{k} \quad (15a)$$

그림 2-5는 식(15a)으로 표시되는 단열기포의 거동으로써 x 축은 Non-dimensional time $t/R_\infty \sqrt{\rho/P_\infty}$ 을 y 축은 $(R(t)-R_\infty)/(R(0)-R_\infty)$ 을 나타낸다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 기포의 단열 거동은 시간의 경과에도 기포반경의 변화폭이 감소하지 않는 자유진동 즉 undamped oscillating 거동을 나타낸다.

압축과 팽창의 과정에서 기포의 경계면이 등온을 유지하는 경우 기포는 경계면에서 주변유체와 순간적인 열교환이 이루어지는 것으로 가정할 수 있다. 즉 등온 기포의 경우 ($T=T_\infty$), 열전달계수 $H \rightarrow \infty$ 이 되므로 방정식(12)의 해는 다음의 식과 같이 되며 그림 2-6에서와 같은 undamped oscillatory 거동을 나타낸다.

$$R_1(t) = \cos \left(\sqrt{\frac{3P_\infty}{\rho_L R_\infty^2}} t \right) \quad (15b)$$

그림 2-5, 6에서 볼 수 있는 것과 같이 단열과 등온의 기포거동은 각기 주파수가 다른 undamped oscillation을 계속함을 알 수 있다.

그러나 열전달 계수 H 가 일정한 값(finite value)을 가지는 일반적인 경우는 기포로부터 주변유체로의 열전달에 의하여 기포의 진동은 감쇄하게 된다. 방정식 (12), (13), (14)로부터 기포진동이 가장 빠른 속도로 감소하는 최대 열전달 계수는 아래의 식과 같다[2].

$$H = \frac{2}{3(k-1)T_\infty} \sqrt{\frac{P_\infty^3}{\rho}} \quad (16)$$

그림 2-7은 기포진동의 감쇄가 최대의 속도로 이루어지는 경우에 대한 기포반경의

변화를 보여주고 있다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 열전달에 의해 감쇄하는 기포의 진동은 마찰에 의해 진동이 감쇄하는 기계적 시스템의 진동과 유사한 거동을 하는 것을 보여주고 있다. 그러나 이들 식으로 표시된 기포의 거동에는 마찰에 의한 에너지 확산이 없으며, 기포와 주변유체로 구성된 bubble-liquid 시스템으로부터의 손실 에너지도 없는 것으로 가정하였다. 따라서 열전달 계수가 일정한 값을 가지는 ($0 < H < \infty$) 경우의 기포진동의 감쇄는 비가역성(irreversibility rate)에 의한 유용에너지(available energy or power) 손실에 의한 것임을 보여주고 있다.

기포진동의 각 주기당 감쇄의 양은 available power 손실로부터 계산할 수 있다. 기포와 주변 유체를 포함하는 고립계(isolated system)를 생각하면 이 고립계에 대해서 비가역을 \dot{I} 는

$$\dot{I} = \frac{dS}{dt} \quad (17)$$

로 정의된다. 여기서 S는 고립계의 엔트로피로 이를 기포와 액체의 엔트로피 합으로 나타내면 비가역율은 다음의 식과 같이 된다.

$$\dot{I} = \frac{dS}{dt} = \frac{dS_b}{dt} + \frac{dS_\infty}{dt} \quad (18)$$

기포와 액체의 온도가 균일하다고 가정하면 $dS_b \geq -q/T$, $dS_\infty/dt \geq q/T_\infty$ 이 되므로 방정식(9)로부터 비가역율 \dot{I} 는 아래의 식이 된다.

$$\dot{I} = \frac{HA(T - T_\infty)^2}{T_\infty T} \quad (19)$$

Available power loss는 시스템의 최저온도에 의하여 결정되며, available power loss는 식(19)로부터 다음의 식으로 주어진다.

$$Power_{loss} = T_\infty \dot{I} = \frac{HAT_\infty (T/T_\infty - 1)^2}{T/T_\infty} \quad (20)$$

이상기체의 경우 $T/T_\infty = (P/P_\infty)(R/R_\infty)^3$ 이 되므로 T/T_∞ 를 R_1 의 항으로 나타내면 이상기체의 available power loss는 다음의 식이 된다.

$$Power_{loss} = HAT_\infty \epsilon^2 \left(\frac{P_1}{P_\infty} + 3 \frac{R_1}{R_\infty} \right)^2 \quad (21)$$

최초 bubble/water system이 가지고 있는 에너지는 기포의 반경이 평형상태인 R_∞ 에서 $R_\infty + d\epsilon$ 으로 변화하면서 행한 일(work)로 $dE = (P - P_\infty)dV$ 에 해당한다. 따라서 기포의 압축 및 팽창과정에서 같은 양의 일을 주변유체(surrounding)에 돌려주는데 이용 가능한 에너지가 된다. 예로써 Bubble/water system에서 $P - P_\infty = \epsilon P_\infty$, $dV = 4\pi R_\infty^2 \epsilon dR$ 로 가정하면 available energy의 변화 dE/dt 는 식(20)의 $Power_{loss}$ 만큼 감소하게되어 기포의 진동은 점진적으로 감쇄하게 된다.

다. 고압기체의 주입에 의하여 생성된 대형기포의 거동

고압의 기포가 수조내로 방출되면 형성된 고압기포는 기포 경계면의 가속도가 진동사이클의 대부분 기간 동안 안정적인 방향, 즉 기체방향으로 향하고 있기 때문에 기포는 비교적 안정된 경계면을 유지하면서 진동한다[2].

진동하는 기포의 압력장(pressure field)은 식(7)로 표시되며, 진동의 극대점(최대 또는 최소점)에서 반경변화율 $dR/dt = 0$ 이 되므로 기포의 최대압력 $P_{b,max}$ 와 최소압력 $P_{b,min}$ 은 다음의 식으로부터 구한다.

$$P(r, t) - P_\infty = \frac{R}{r} (P_b - P_\infty) \quad (22)$$

위 식에서 최대압력 P_{max} 는 최소반경 R_{min} , 최소압력 P_{min} 은 최대반경 R_{max} 에서의 발생한다. 그림 2-8에서는 relief valve의 개방에 의하여 방출된 $1.3m^3$ 의 공기기포에 의해 형성된 압력을 측정된 실험데이터로써 식(22)로부터 계산한 최대압력과 최소압력은 실험데이터를 비교적 정확한 값으로 bounding 하고 있음을 보여주고 있다.

한편 기포진동시 극대/극소점에서의 경계면의 유속 $V=0$ 이 되므로 비점성유동에 대한 Bernoulli 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 \phi + \frac{1}{\rho} \nabla^2 P = 0 \quad (23)$$

그러나 이상유체유동은 $\nabla^2 \phi = 0$ 이므로 식(23)으로부터 유속 $V=0$ 인 경우에 대한 압력방정식은 다음과 같이 된다.

$$\nabla^2 P = 0 \quad (\text{if } V = 0) \quad (24)$$

이 식으로부터 압력장이 Laplace 방정식을 만족하므로 유동장의 압력은 경계면에서의 최대압력을 초과할 수 없음을 알 수 있다.

3. 수조내의 기포거동 및 압력특성 분석 모델

가. 기포거동 모델

고압의 기포가 수조내로 주입되면 대형기포가 형성되고 지속적인 분열 및 인접 기포와의 결합에 의하여 구형(spherical shape)에 가까운 형상의 bubble cluster를 형성하며 부력에 의하여 수면으로 상승한다. 한편 고압의 기포는 경계면의 가속도가 진동사이클의 대부분 기간 동안 기체방향으로 향하고 있기 때문에 고압의 비교적 안정된 경계면을 유지한 상태로 상당 기간동안 진동을 계속한다. 또한 앞절에 기술한 것과 같이 속도 포텐셜 함수와 Bernoulli 방정식으로부터 구한 기포의 최대/최소 압력은 대부분의 실험데이터를 bounding 하므로 고압의 기체가 수조내로 주입되어 형성되는 대형기포 또는 bubble cluster의 거동은 구형의 단일기포로 단순화하여 식(18)의 Rayleigh 기포방정식 또는 이에 유체의 점성 및 표면장력효과가 추가된 Rayleigh-Plesset equation을 이용한 근사적인 해석이 가능하다. Rayleigh-Plesset 기포 거동방정식은 다음의 식과 같다[3].

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4\nu_L}{R} \frac{dR}{dt} + \frac{2S}{\rho_L R} = \frac{P_b(t) - P_\infty}{\rho_L} \quad (25)$$

이 식에서 ρ_L 은 액체의 밀도로 비압축성 유체로 가정하였으며 동점성 계수(dynamic viscosity) ν_L 은 수조내 전 영역에서 항상 일정한 값으로 가정하였다. P_∞ 는 평형상태에서의 압력으로 기포 내부의 압력과 온도가 기포주위의 액체와 평형상태, 즉 $R=R_\infty$, $P=P_\infty$, $T=T_\infty$ 에 도달하였을 때를 나타낸다. 만일 기포의 압력과 온도가 평형상태로부터 이탈하게 되면 기포는 방정식(25)에 따라 압축과 팽창을 반복한다. 기포의 압축과 팽창에 의한 기포진동은 인접하고 있는 주변 유체로의 열전달을 통한 available energy의 감소로 진동이 감쇄하게 되므로, 주변유체와의 열전달이 대류(convection)에 의하여 이루어진다고 가정하면 열전달 q 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$q = HA(T - T_\infty) \quad (26)$$

식(26)에서 H 는 대류 열전달계수, A 는 기포의 표면적을 나타낸다. 식(10)에 기포의 경계면을 통한 공기의 유입 또는 유출을 가정하면 기포의 에너지 방정식은 다음의 식이 된다.

$$P_s \frac{dV}{dt} + q + \frac{dU}{dt} = \dot{m}_i h_i \quad (27)$$

여기서 V 는 기포의 체적을, U 는 기포내 기체의 내부에너지(internal energy)를, \dot{m}_i 는 기포내로 주입되는 기체의 질량을, h_i 는 주입되는 기체의 엔탈피 나타낸다.

나. 수조내의 압력 및 수조벽면의 응답 특성

수조내에 형성된 기포의 팽창 및 압축에 의한 진동은 수조내에 과도적인 압력장을 형성하여 수조내의 전영역으로 전파하게 된다. 이때 수조내의 압력장은 bubble cluster의 거동에 따르므로 실제현상은 상당히 복잡하다. 현실적인 해석방법으로 bubble cluster를 구형의 단일 기포로 단순화하고 수조내의 유동장을 bulk flow의 potential flow로 가정한 근사해석 방법에 의하여 모의할 수 있다[1,2].

다. 수조 벽면의 압력 변화

유동장의 크기가 교란(disturbance)의 전파속도에 비하여 작으면 교란이 전 유동장에 즉시 전파됨으로 수조내의 유동장은 교란의 전파 효과를 무시할 수 있는 bulk flow로 가정할 수 있다. 따라서 기포의 진동에 의하여 생성되는 수조내의 유동장은 bulk flow로 가정할 수 있으며, 또한 유체의 점성효과를 무시할 수 있으므로 비점성, 비압축성 유체의 포텐셜 유동으로 모의할 수 있다.

포텐셜 유동은 Laplace 방정식을 만족하므로 기포가 여러 개 존재하는 경우 유동장은 각각의 기포에 의하여 형성되는 속도 포텐셜(velocity potential)을 중첩(superposition)시킨 포텐셜 함수로 나타낼 수 있다[1, 2]. 그림 2-9, 10, 11과 같이 여러 가지 형태를 가진 수조벽면 (flat wall, two or three sided corner, parallel wall)에 인접한 기포의 압력 및 속도장은 실제기포에 가상기포를 중첩하여 모의할 수 있다. 실제기포와 가상기포의 중첩에 의한 속도 포텐셜 함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi = \sum_i \sum_j \phi_{ij} \quad (28)$$

여기서 ϕ_{ij} 는 단일 기포 ij 에 의한 potential function이며 다음의 식으로 주어진다.

$$\phi_{ij} = -R_i^2 \frac{dR_i}{dt} \frac{1}{r_{ij}} \quad (29)$$

하첨자 ij 중 i 는 실제 기포를 j 는 실제기포와 mirror image에 의한 기포를 구별하기 위한 index이다.

그림 2-9와 같이 수조내에 잠겨있는 수직평판 또는 수조의 벽면을 모의하기 위하여 $x=0$ 인 지점에서 yz 평면에 일치시키면 기포 ij 와 계산지점 (x,y,z) 사이의 거리 r_{ij} 는 아래의 식으로 표시된다.

$$r_{ij} = [(x-X_{ij})^2 + (y-Y_i)^2 + (z-Z_i)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

$x=0$ 인 지점은 실제기포와 mirror image의 중간에 위치하므로 중첩에 의한 combined velocity potential ϕ 로 부터 $u = \partial\phi/\partial x = 0$ 이 되므로 yz 평면은 수직평면 (rigid flat wall)을 대체할 수 있다. 수조벽면과 기포와의 거리 $X_{ij}=D_i$ 라 하면 가상 기포와 벽면과의 거리는 $-D_i$ 가되므로 기포와 벽면과의 거리는 다음의 식(31)과 같이 된다.

$$r_1 = r_2 = [(D_i)^2 + (y-Y_i)^2 + (z-Z_i)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (31)$$

포텐셜 유동에서 유동장의 속도 성분은 속도 포텐셜 함수의 공간좌표 x, y, z 에 대한 미분값으로 주어지므로 유속 V 는 식(31)을 속도포텐셜 식(29)에 대입하고 실제기포와 mirror image 기포의 combined velocity potential을 x,y,z 로 미분하면 공간좌표에 대한 각각의 속도성분을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} V^2 &= u^2 + v^2 + w^2 \\ &= \sum_{i=1}^n R_i^4 \left(\frac{dR_i}{dt} \right)^2 \frac{4}{r_i^6} [(y-Y_i)^2 + (z-Z_i)^2] + 2 \sum_i \sum_{j=i+1}^n R_i^2 \frac{dR_i}{dt} \frac{4}{r_i^3} \\ &\quad \cdot R_j^2 \frac{dR_j}{dt} \frac{1}{R_j^3} \{ (y-Y_i)^2 + (y-Y_j)^2 + [(z-Z_i)^2 + (z-Z_j)^2] \} \end{aligned} \quad (32)$$

식(6)의 Bernoulli 방정식에서 중력항을 무시하면 $f(t)=P_\infty/\rho$ 이 되므로 식(32)를 식 (6)에 대입하여 정리하면 다음의 식이 된다.

$$\begin{aligned} P(r, t) - P_\infty &= \rho \sum_{i=1}^n \frac{2}{r_i} \left\{ \left[2R_i \left(\frac{dR_i}{dt} \right)^2 + r_i^2 \frac{d^2 R_i}{dt^2} \right] - \frac{\rho}{2} \sum_1^n R_i^4 \left(\frac{dR_i}{dt} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. \cdot \frac{4}{r_i^6} [(y-Y_i)^2 + (z-Z_i)^2] + 2 \sum_i \sum_{j=i+1}^n R_i^2 \frac{dR_i}{dt} \frac{4}{r_i^3} R_j^2 \right. \end{aligned}$$

$$\cdot \frac{dR_j}{dt} \frac{1}{R_j^3} [(y-Y_i)^2 + (y-Y_j)^2 + (z-Z_i)^2 + (z-Z_j)^2] \} \quad (33)$$

위 식에 Rayleigh 기포방정식 (식 8)을 대입하여 정리하면 기포의 진동에 의한 수조내의 구조물 또는 벽면에서의 압력거동에 대한 방정식이 된다.

$$\begin{aligned} P(r, t) - P_\infty = & \rho \left[\sum_{i=1}^n \frac{R_i}{r_i} \left[\frac{2}{\rho} (P_{bi} - P_\infty) \right. \right. \\ & \left. \left. + \left(\frac{dR_i}{dt} \right)^2 \left\{ 1 - \frac{2}{r_i^3} R_i^3 \cdot [(y-Y_i)^2 + (z-Z_i)^2] \right\} \right] \right. \\ & \left. - \sum_{j=i+1}^n R_i^2 R_j^2 \frac{dR_i}{dt} \frac{1}{r_i^3} \frac{1}{r_j^3} \cdot \{(y-Y_i)(y-Y_j) + (z-Z_i)(z-Z_j)\} \right] \quad (34) \end{aligned}$$

수조의 압력장은 진동하고 있는 기포의 표면의 속도가 영일 때 식 (24)에서와 같이 Laplace equation을 만족하므로 벽면에서의 압력은 기포 경계면의 최대 압력을 초과할 수 없다. 그러나 식(34)에 의하면 source 즉 실제기포와 mirror image 기포 사이의 간섭에 의하여 벽면에 작용하는 압력이 기포의 압력보다 커질 수 있다. 기포간의 간섭효과는 기포와 벽면사이에 충분한 거리가 유지되는 경우에 무시할 수 있으므로 식(34)의 적용은 $dR/dt=0$ 에서 벽면의 최대압력 $P_w(t) \leq P_b$ 인 조건으로부터 기포중심과 벽면과의 거리가 다음의 식(35)의 조건을 만족하는 경우로 제한된다.

$$\sum_{i=0}^n \frac{R_i}{r_i^2} = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{D_i} \leq 1 \quad (35)$$

라. 전산해석 프로그램

수조내 공기의 주입으로 인하여 생성된 bubble cluster를 구형의 단일기포로 가정하고 공기주입으로 인한 기포의 성장, 압축 및 팽창과정에서의 열전달 효과, 유체의 점성 및 표면장력 효과 및 표면으로의 상승속도 등의 영향을 고려할 수 있도록 프로그램을 작성하였다. 기포내로 주입되는 공기는 경계조건으로 입력하도록 하였으며 유체의 점성 및 표면장력 효과는 식 (25), 즉 Rayleigh의 기포거동 방정식에 점성 및 표면장력 효과가 고려된 Rayleigh-Plesset equation을 사용하였다. 기포의 상승속도는 입력 또는 식(3)을 선택적으로 사용할 수 있도록 하였다.

전산해석 프로그램은 N개로 구성된 비선형 상미분방정식 계를 해석할 수 있도록

Runge-Kutta method를 이용하여 작성하였다.

기포의 진동으로 인한 수조벽면의 압력진동의 응답특성은 식(34)를 이용하여 다양한 기하학적 형태로 구성된 수조벽면의 응답특성의 해석이 가능하도록 하였다.

마. 수조내의 기포거동 및 벽면의 압력 변화 특성 분석

(1) 분석 조건

ABB-Atom의 Condensation Tank 실험을 참조하여 기준분석을 위한 초기 및 경계조건을 설정하고 기포의 압축 및 팽창 과정에서의 열전달의 영향, 주입기포의 질량 및 온도의 영향, 배관의 잠김 깊이의 영향 등을 분석하였다. 기준해석(Base case)조건으로 배관내의 공기주입시간을 0.15초로 설정하고 주입유량을 2차식 형태로 가정하였다. Bubble cluster는 0.5~0.7 사이의 void fraction을 가지는 것으로 알려져 있으므로 void fraction을 0.5로 가정하였으며 배관의 잠김깊이는 5m, 열전달 계수는 1000W/m^2 , 수조내 물의 온도는 30°C , 그리고 Sparger 배관내 공기의 온도는 50°C 를 가정하였다.

(2) 해석결과 및 고찰

그림 2-12~14에 기준조건에서의 기포거동 및 수조벽면의 압력거동에 대한 해석 결과를 제시하였다. 수조내에는 초기에 배관속에 갇혀 있던 공기의 주입으로 대형의 기포가 형성되며 이후 기포내의 공기와 주변유체(물)와의 열적 불평형에 의하여 기포는 압축과 팽창을 반복하면서 진동하고 있음을 보여주고 있다. 또한 진동이 계속되면서 주변 유체로의 열전달에 의한 영향으로 진동의 변동폭이 감소하고 있다. 한편 수조벽면의 압력은 기포의 압력변동폭에 비하여 감소된 크기의 변동폭을 가진 같은 주파수의 거동을 나타내고 있다. 기준조건에서 기포거동의 진동 주파수는 약 8 Hertz로 ABB-Atom의 실험 결과보다(약 5 Hertz) 높게 계산되었다.

그림 2-15~17은 열전달 계수의 변화에 따른 기포거동 및 수조벽면의 압력특성을 보여 주고 있다. 그림 2-16는 반경변화로서 열전달계수가 증가함에 따라서 평균반경이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 진동 주파수 f 는

$$f = \frac{1}{2\pi R_\infty} \sqrt{\frac{3kP_\infty}{\rho}} \quad (36)$$

주어지므로 열전달 계수가 증가함에 따른 반경의 증가로 주파수가 감소됨을 알 수

있다. 그림 2-15는 열전달 계수의 변화에 따른 기포의 압력거동을, 그림 2-17은 수조 벽면의 압력변화로써 기포의 진동은 열전달계수에 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 즉 열전달 계수가 증가함에 따라서 기포의 peak pressure 가 감소하며 진동의 감쇄율이 증가하고 진동수는 감소한다. ABB-Atom의 실험은 최대압력이 약 0.5 bar(50,000 Pa) 정도로 그림 2-16의 열전달 계수 $H=1000$ 의 경우와 비교적 근사한 값을 가진다. 그러나 주파수는 약 8 Hertz 정도로 ABB-Atom의 실험결과의 진동 주파수 약 5 Hertz에 비하여 큰 값으로 나타났다.

그림 2-18~20는 잠김깊이의 변화에 따른 기포거동 및 수조벽면에서의 압력변동 특성을 보여주고 있다. 잠김깊이에 따라 기포의 압축 및 팽창에 의한 진동이 개시되는 초기압력이 변하기 때문에 기포의 반경 및 압력 변동폭과 주파수가 변하고 있다. 즉 잠김깊이가 클수록 압력변동폭이 크고 평균반경은 감소하며 주파수가 증가하는 것으로 나타났다.

그림 2-21 는 기포에 주입되는 공기의 온도변화에 따른 압력변화로써 기포압력의 변동폭은 주입공기의 온도가 높을수록 증가하고 있다. 그러나 실제로는 주입공기의 온도 변화폭이 크지 않고 기포와 공기의 열전달율이 크기 때문에 실제 기포의 거동에서는 큰 영향은 없을 것으로 판단된다.

Sparger를 통하여 수조 안으로 공기를 방출할 때 형성되는 기포덩어리(bubble cluster)는 앞 절에 기술한 바와 같이 기공율이 0.5~0.7 사이의 값을 가지므로 기포 내부에 상당량의 물을 포함하고 있다. 따라서 기포내부 포함되어 있는 액체상태의 물의 영향을 고려하여 기공율에 따라서 기포의 체적을 증가시켜 분석을 수행하였다. 그림 2-22는 기공율 0.25~1.0 사이의 값에 대한 기포의 압력변화로써 기공율이 작을수록 즉 기포내에 포함되어있는 물의 양이 증가할수록 기포의 부피가 증가하기 때문에 압력의 변동폭과 주파수가 감소하였다.

또한 같은 양의 공기에 대하여 주입속도가 커질수록 압력 변동폭이 증가하는 것으로 나타났으며 유체의 점성에 의한 효과는 미소하였으며, 기포의 크기가 작은 경우 기포의 동적거동에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려진 표면장력의 효과는 본 연구에서 사용한 해석모델이 수많은 기포가 모여서 형성된 기포덩어리를 구형의 단일 기포로 단순화하였기 때문에 그 영향은 미소한 것으로 나타났다.

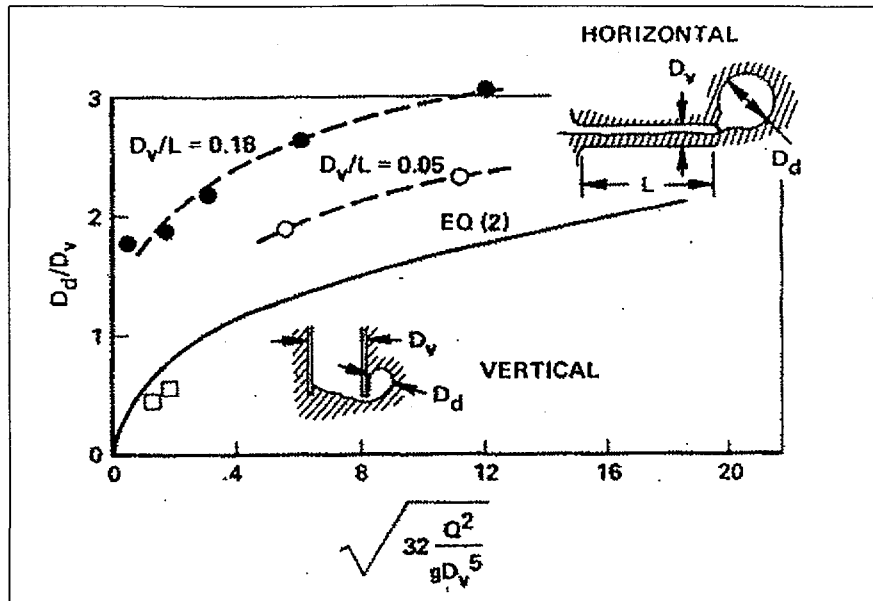


그림 2-1. 대형기포의 detachment 크기

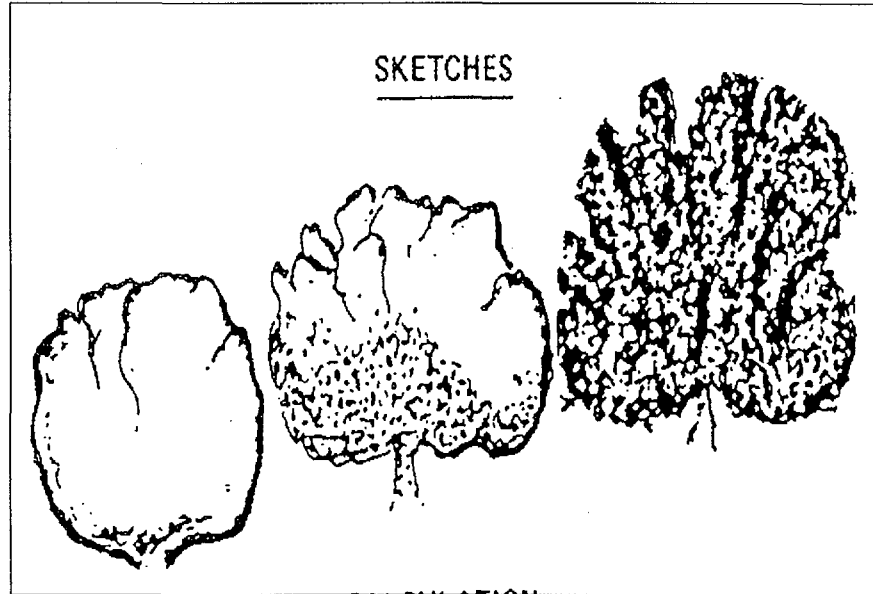


그림 2-2. 대형기포의 분열모형 개념도

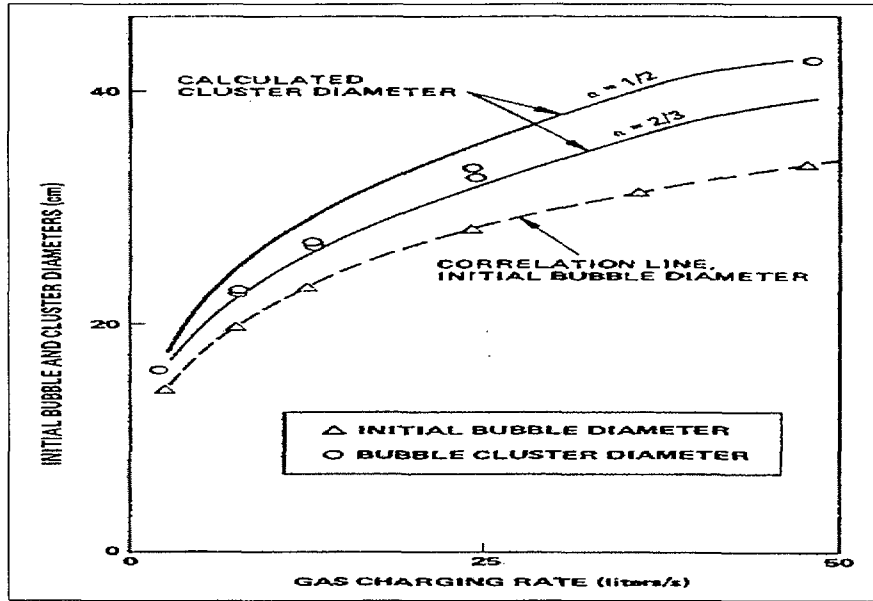


그림 2-3. 기포의 초기 직경 및 Bubble Cluster의 직경

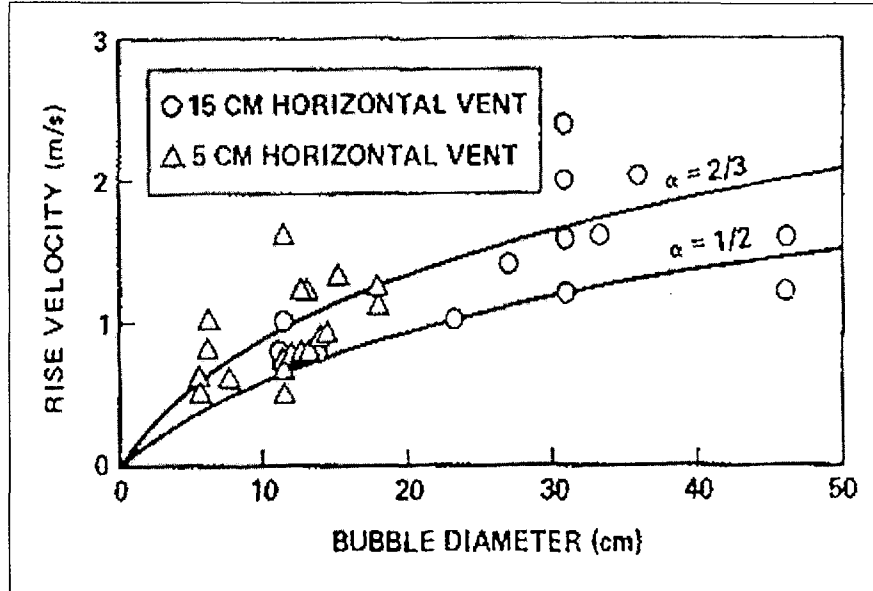


그림 2-4. 기포의 상승속도

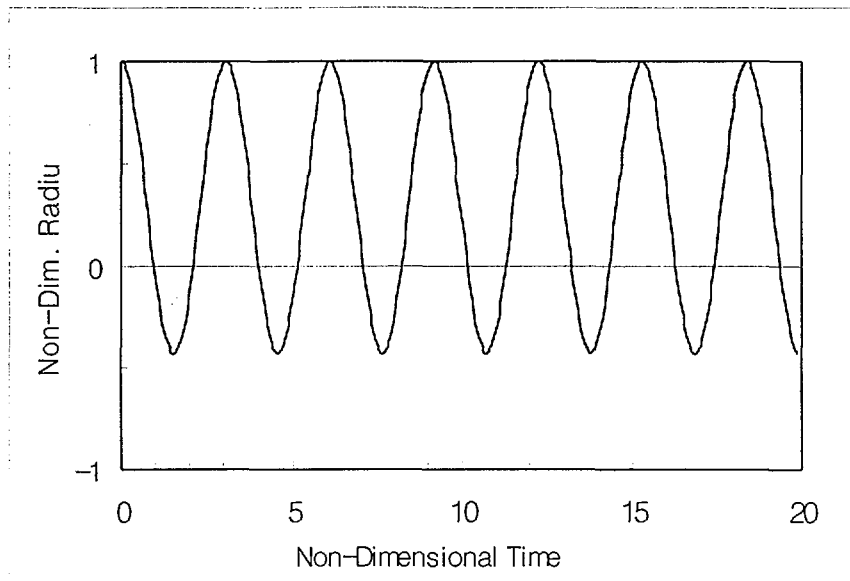


그림 2-5. Idiomatic Bubble의 거동

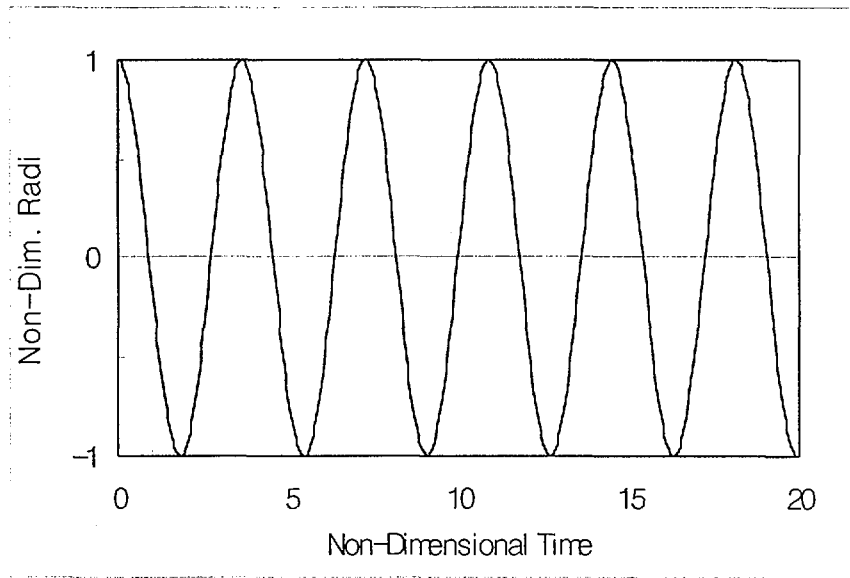


그림 2-6. Isothermal Bubble의 거동

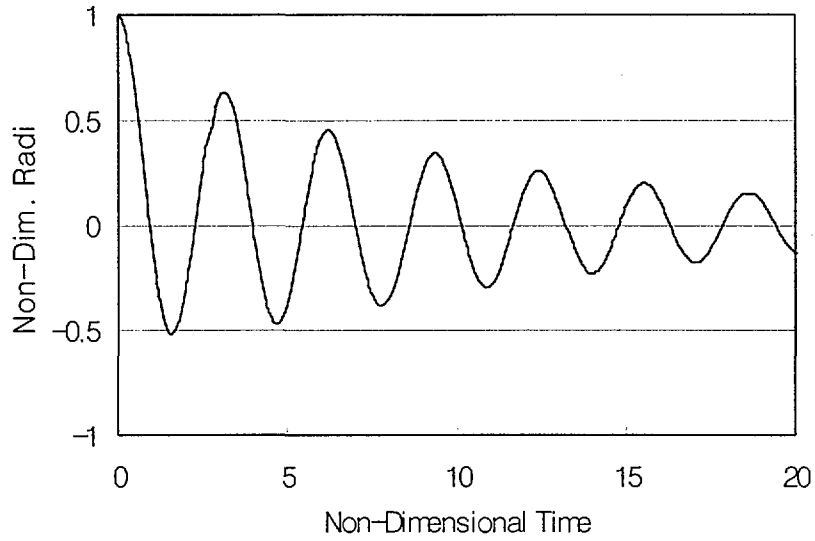


그림 2-7. 최대열전달율을 가진 기포의 진동

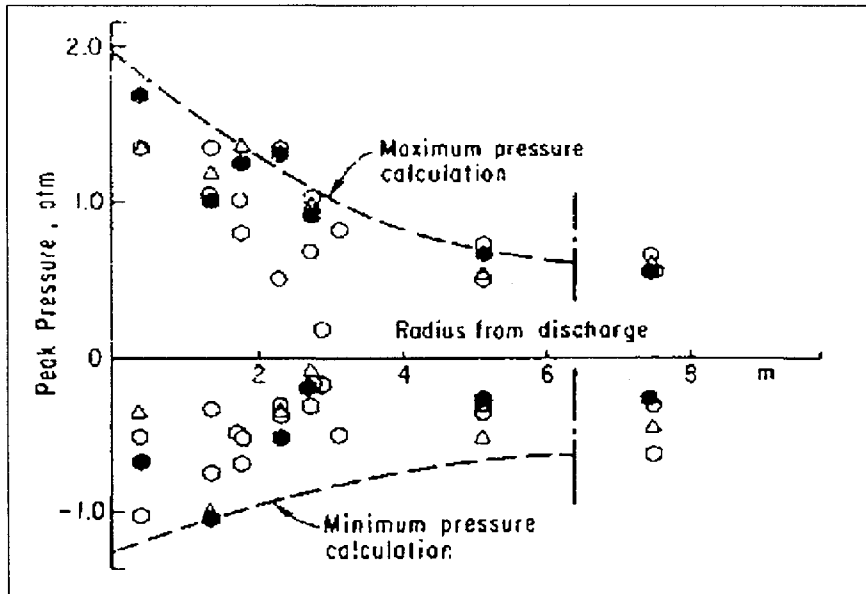


그림 2-8. 공기기포의 진동에 의한 압력 비교[2]

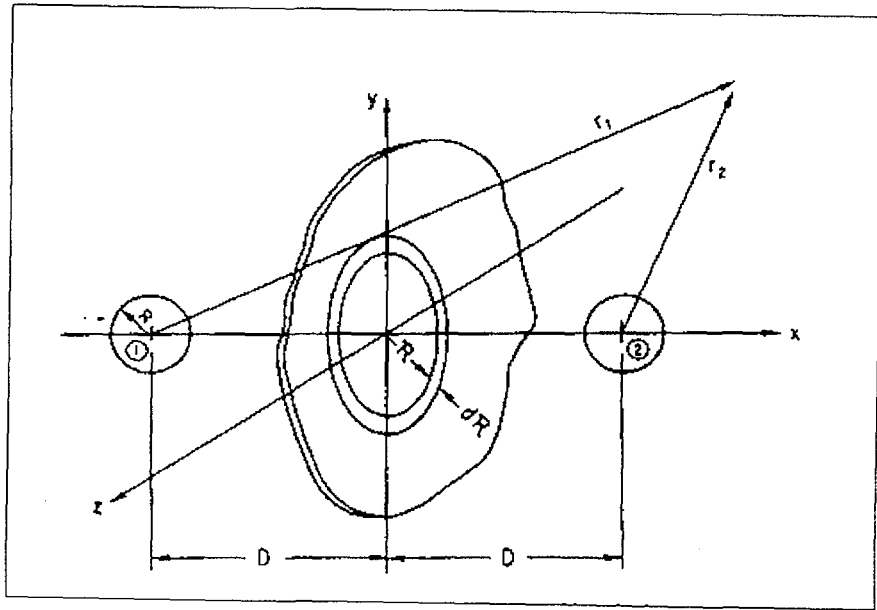


그림 2-9. 중첩법에 의한 기포 및 벽면모의

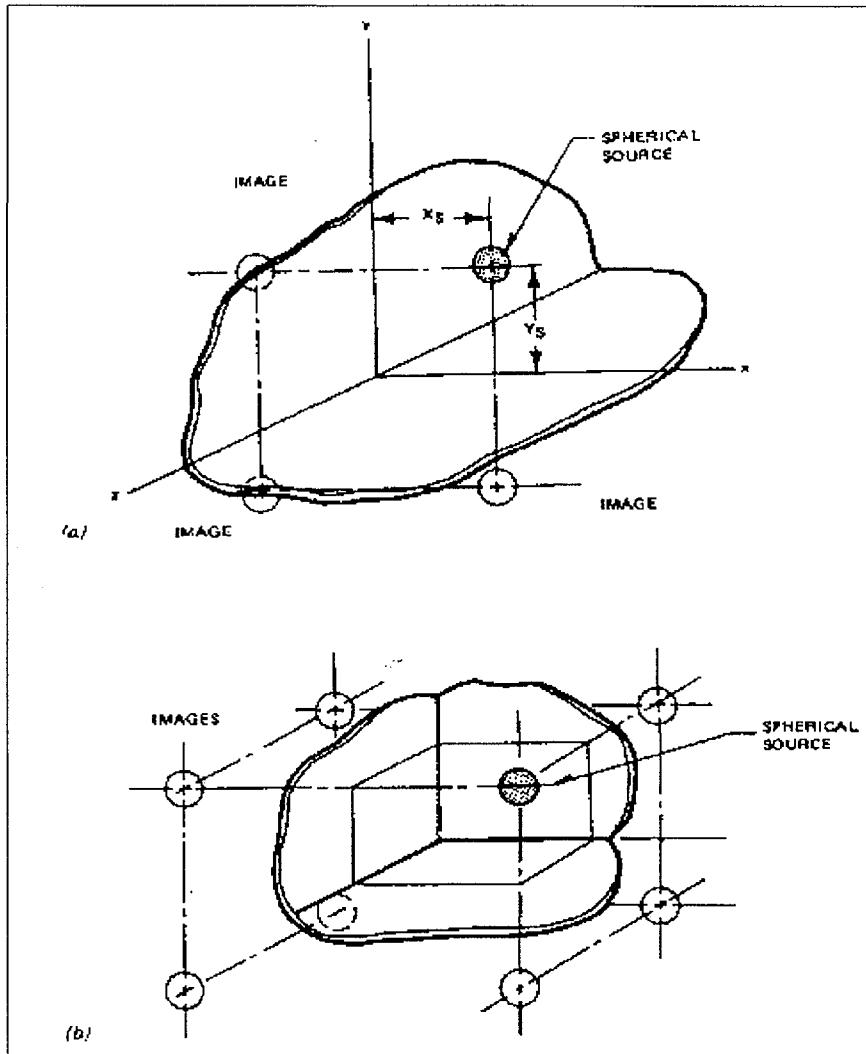


그림 2-10. 중첩법에 의한 2, 3-sided Corners 모의

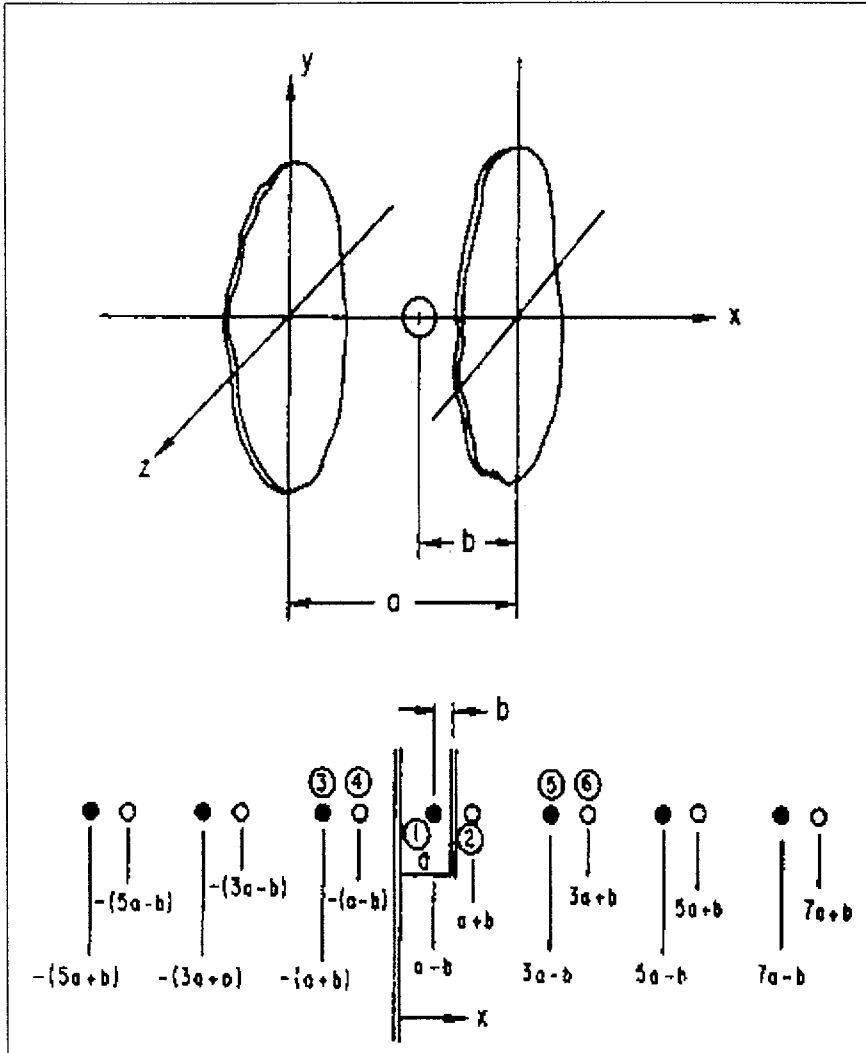


그림 2-11. 중첩법에 의한 평행벽면의 모의

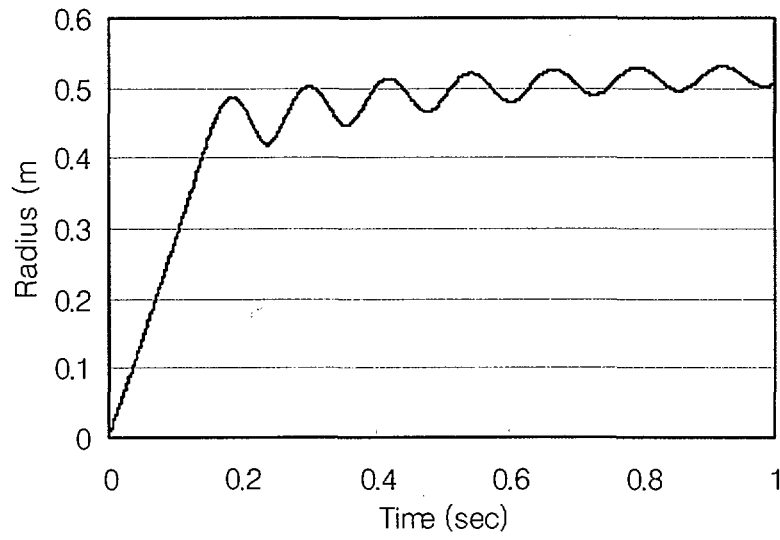


그림 2-12. 기준조건에서의 기포반경의 변화

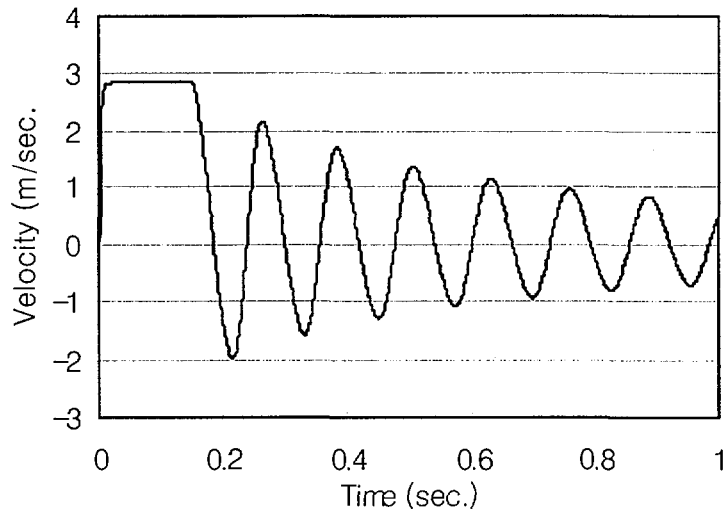


그림 2-13. 기준조건에서의 기포 경계면의 속도

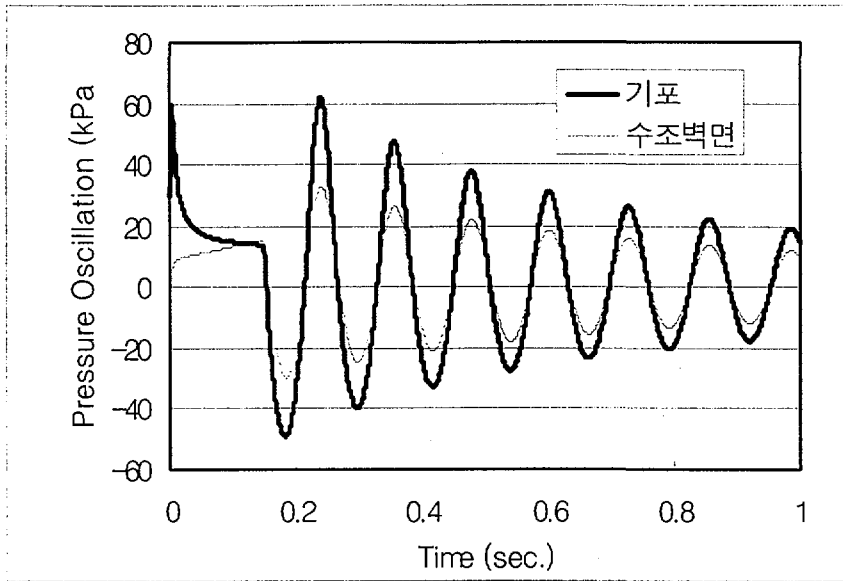


그림 2-14. 기준조건에서의 압력 거동

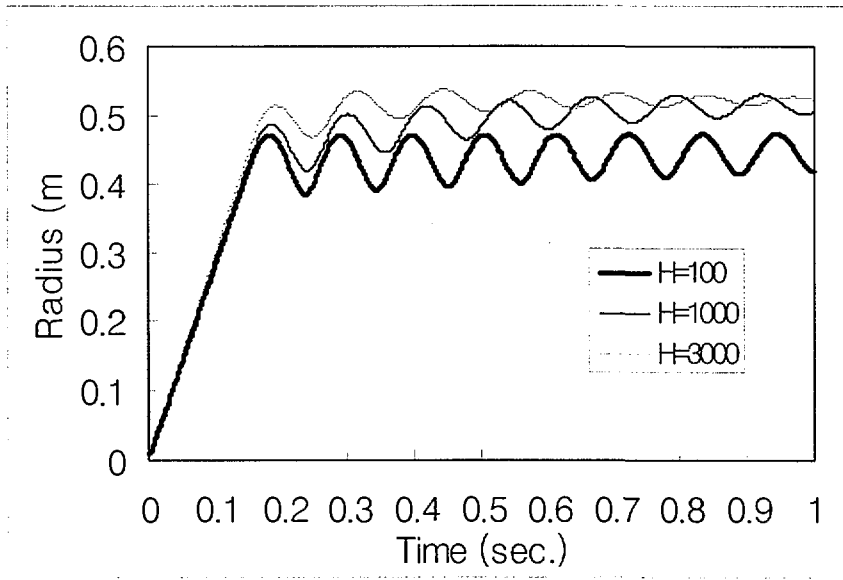


그림 2-15. 열전달계수(H)의 변화에 따른 반경변화

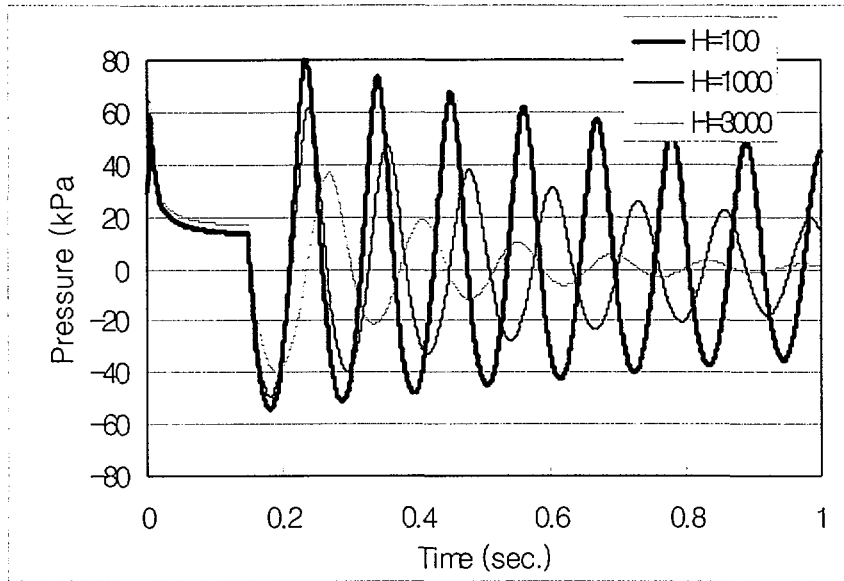


그림 2-16. 열전달계수(H)의 변화에 따른 기포의 압력 거동

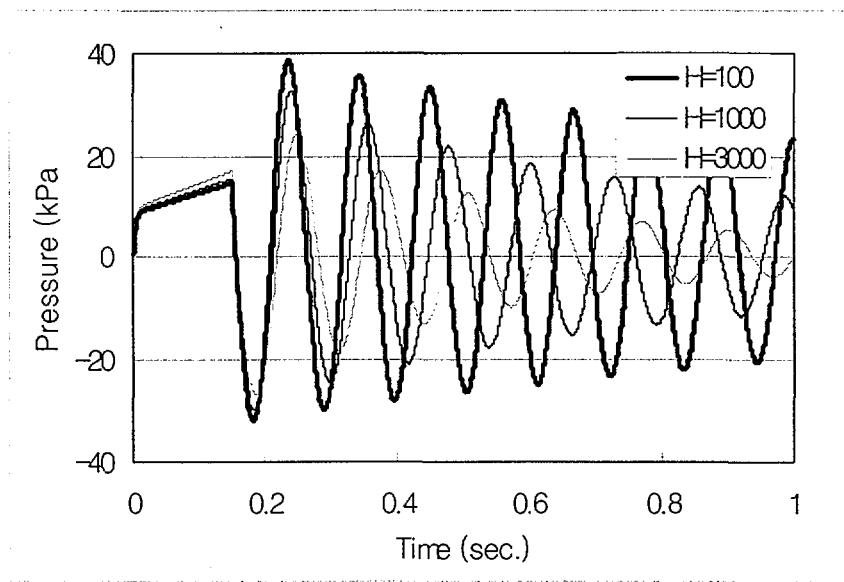


그림 2-17. 열전달계수(H)의 변화에 따른 수조벽면의 압력 변화

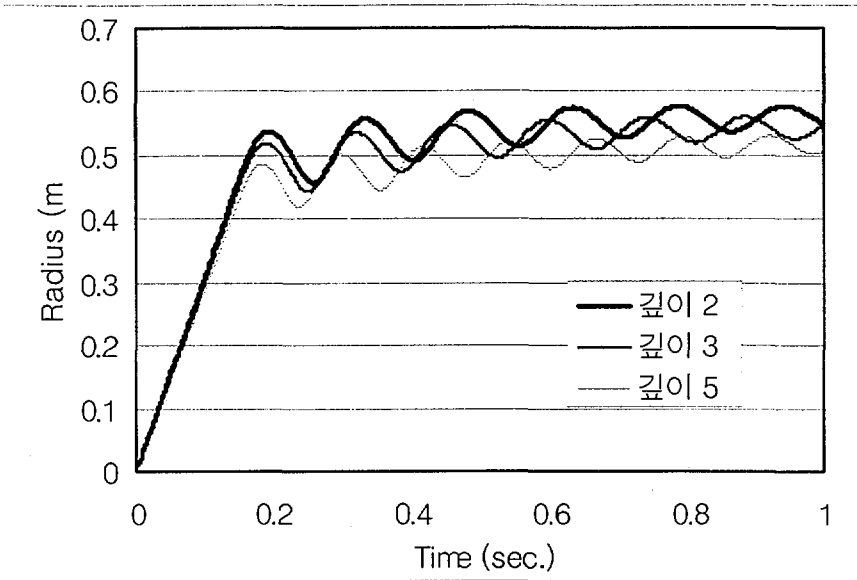


그림 2-18. 잠김깊이에 따른 기포의 반경 변화

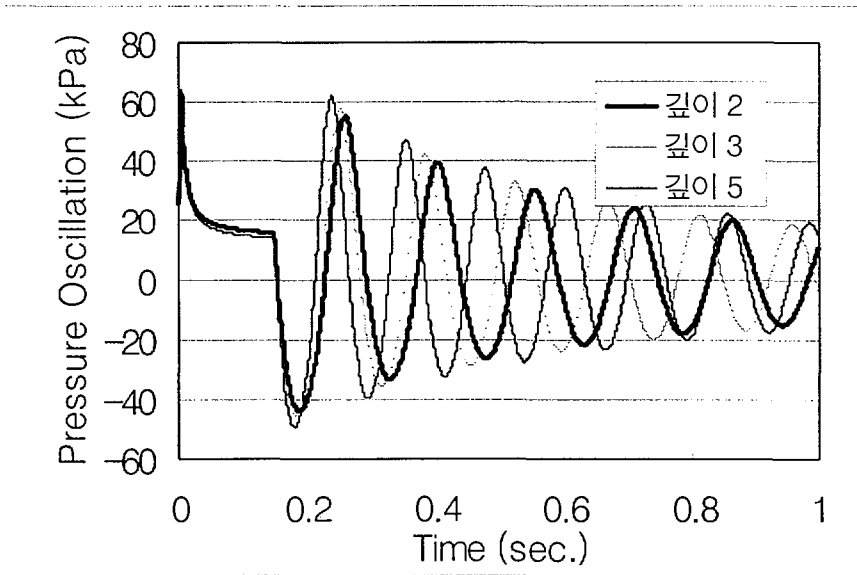


그림 2-19. 잠김깊이에 따른 기포의 압력 변화

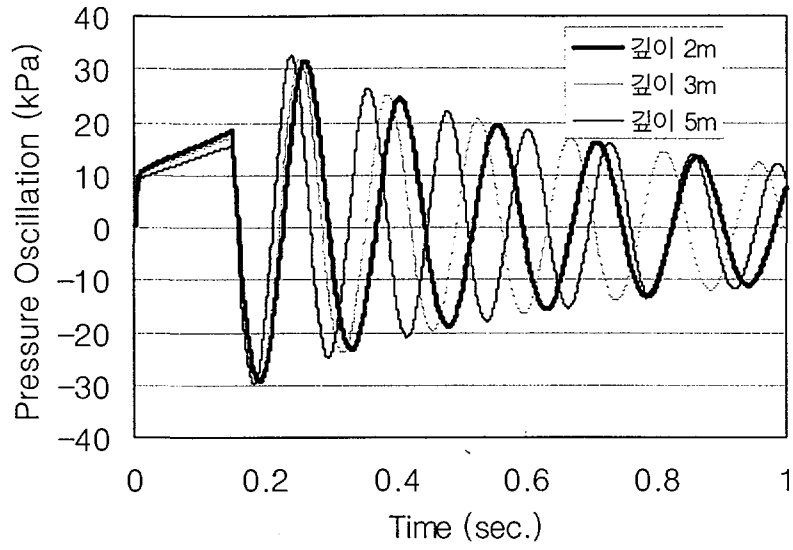


그림 2-20. 잠김깊이에 따른 수조벽면의 압력 변화

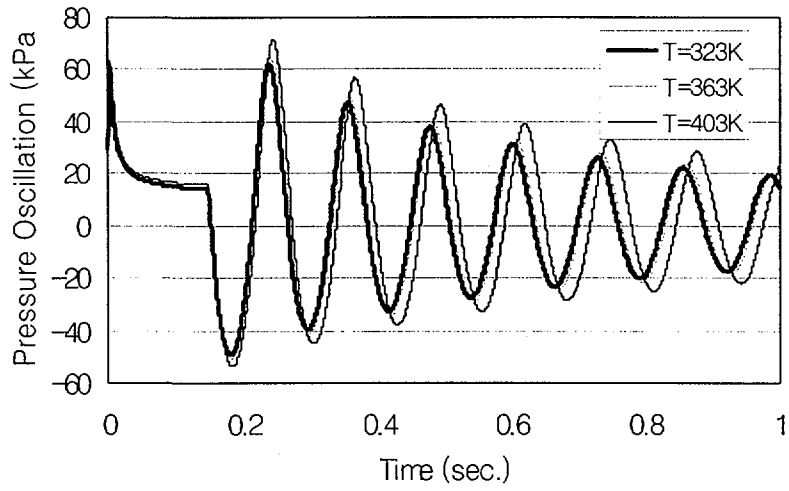


그림 2-21. 주입공기의 온도차이에 의한 기포압력 거동

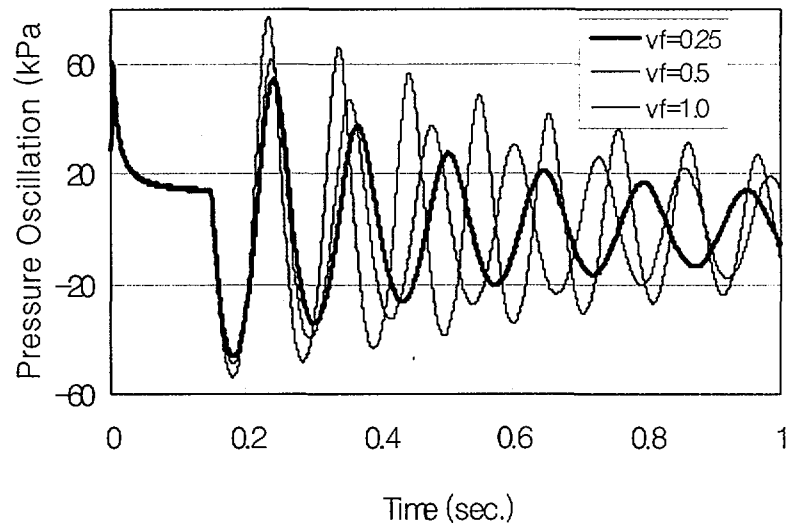


그림 2-22. 주입공기의 기공율 차이에 의한 기포압력 거동(0.25~1.0)

제 3 장 FLUENT코드의 VOF 모델을 이용한 증기응축 실험 모의해석

1. 개요

현재 국내에서 개발중인 차세대원전(KNGR)에는 예상되는 사고시 원자로냉각재 계통(RCS)으로부터 가압기를 통하여 격납용기내재장전수조(IRWST)로 방출되는 증기를 효과적으로 응축시키고, 고압의 증기 방출에 따른 부하를 경감시키기 위하여 sparger가 도입되었다. 가압기상단에 위치하는 안전감압밸브(Safety Relief Valve: SRV)가 개방되면, 원자로냉각재계통으로부터 방출되는 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. 이러한 방출 과정에 발생하는 현상들은 물 방출시의 water jet, 공기 방출시의 기포군(bubble cloud)에 의한 압력변동, 증기방출시의 증기의 응축 현상 등이다. 이러한 복합적인 현상은 IRWST와 IRWST에 설치되어 있는 구조물에 대하여 수력학적인 부하를 증가시키게 된다. 따라서 IRWST에 설치되는 sparger는 물 공기 및 증기의 방출부하를 가능한 한 작게 할 수 있도록 설계되어야 하며, IRWST의 구조물들은 이러한 부하를 고려하여 설계되어야 하며, 이를 위해서는 물, 공기 및 증기가 sparger를 통해 방출과정에서 발생하는 수력학적인 부하를 계산하는 방법을 개발하는 것이 필수적이다.

IRWST 내에서의 수력학적 거동을 해석할 수 있는 전산유체역학(CFD) 해석모델을 개발하기 위하여 ABB-Atom의 증기방출 실험자료[7]를 이용한 수치해석적 연구를 수행하였다. ABB-Atom은 비등경수로(BWR)의 감압밸브 작동시에 suppression pool에 가해지는 압력의 크기를 최소화할 수 있는 sparger를 개발하기 위하여 실험을 수행하였다[7]. 이 실험은 첫째 물, 공기, 증기 방출시의 동적압력부하 측정과, 둘째 안전밸브가 닫혔을 때 발생할 수 있는 방출배관으로 물이 역류(back-suction) 하는 현상에 대한 영향 평가, 셋째 pool의 온도상승이 탱크내의 압력변동에 미치는 영향 평가를 위하여 수행되었다. 실험데이터에 나타난 바와 같이 공기 방출시에 형성되는 수력학적 부하는 물 또는 증기 방출시 형성되는 부하에 비하여 상대적으로 매우 크므로, 본 연구에서는 공기 방출시 기포의 형성에 따른 압력형성 및 변동에

초점을 맞추어, 예상되는 조건(SRV 개방)에서 물과 공기가 유입될 때 수조 내에서 발생하는 수력학적 현상을 CFD 코드를 이용하여 해석하였으며, 증기 응축시의 거동은 분석범위에서 제외하였다. 또한 배관이나 수조의 구조적인 영향[14]에 의하여 발생하는 물리적 현상은 해석 대상에서 고려하지 않았다.

CFD 코드는 열수력 해석에 일반적으로 이용되고 있는 pre-released FLUENT Version 4.5(이하 FLUENT 또는 FLUENT V4.5 라 함)를 이용하였으며, 코드의 해석모델중 압축성 VOF(Volume Of Fluid) 모델을 사용하여 물, 공기, 증기 등의 다상유동을 모의하였다[8]. 코드의 수렴성 향상을 위해 해석결과에 영향을 크게 미치지 않는 실험설비의 일부를 단순화하여 해석을 수행하고, 실험결과를 해석결과와 비교 분석하여 전산코드 및 해석모델의 적용 가능성을 평가하였다.

2. 해석모델

가. 관련모델 검토

(1) 다상유동 모델

다상유동은 크게 상(phase) 변화를 수반하는 유동과 상변화가 없는 유동으로 구분된다. 상변화가 존재하는 다상유동에는 고체-액체, 액체-기체 또는 고체-기체 등이 있다. 이런 유동은 액화 또는 기화, 용해 또는 응고 과정의 엔탈피변화에 따른 경계면과 상변화양을 계산하여 여러 가지 물리적 현상을 해석하는 것이다. 그러나 상변화가 존재하지 않는 다상유동은 시스템의 온도상승 또는 하강에 따른 상변화 과정은 고려하지 않고 유체-유체 또는 유체-고체 시스템에서 일어나는 여러 가지 물리적인 현상을 해석하는 데 주목적이 있는 것이다[8, 13].

상변화가 존재하는 다상유동 중 용해 및 응고 과정을 모델링하는 방법에는 1) 고정격자(fixed grids)를 사용하는 방법과, 2) 변형격자(transformed grids)를 사용하는 방법 두 방법이 있다. 이 두 방법의 가장 큰 차이는 계산 격자의 형성 방법이다. 고정격자를 사용하여 계산하는 방법은 전 계산 과정동안 격자를 고정시켜 놓고 액상과 고상의 경계면은 적절한 물리적 모델에 의하여 계산하는 방법이다. 변형격자를 사용한 계산 방법은 계산과정 동안 액상 또는 고상의 경계면의 움직임에 따라 경계를 추적하면서 격자를 매번 재생성하여 사용하는 방법이다. 액화 또는 기화를 포함하고 있는 다상유동은 온도변화에 따라 상변화를 계산하고 상변화 이후의 상의 형상계산은 다상유동의 해석모델에 따라서 결정된다.

상변화가 존재하지 않는 다상유동은 크게 유체-유체의 다상유동과 유체-고체 다상유동 시스템으로 분류될 수 있다. 유체-유체 다상유동 시스템은 다시 가스-액체, 가스-가스, 액체-액체 혼합물로 이루어진 경우와 액체-가스 bubble, 가스-액체 droplet으로 이루어진 경우로 구분된다. 유체-고체 다상유동 시스템 가스-고체 입자, 액체 고체 입자로 이루어진 경우로 구분된다.

이러한 다상유동을 해석하는 모델에는 크게 Euler-Lagrange 모델과 Euler-Euler 모델 두 가지가 있다. 이 두 모델을 구분하는 방법은 제1상에 분산되어 있는 분산상의 체적분율에 따라 해석방법이 결정된다. 분산상(제N상)의 체적분율이 제1상에 비하여 상대적으로 작은 경우에는 Euler-Lagrange 모델을, 큰 경우에는

Euler-Euler 모델을 이용한다.

Euler-Lagrange (Lagrangian Dispersed Phase Model) 모델은 먼저 분산상이 없는 것을 가정하여 단상의 경우와 같이 제1상의 유동장을 계산하고 이 유동장에 따라 다수의 입자들이 입구에서 경계조건을 가지고 흘러 들어가게 하여 경로, 속도, 온도 및 크기 등을 결정한다. 이렇게 얻어진 분산상의 거동으로부터 상간의 상호작용에 의한 영향을 계산하여 이를 제1상의 계산에 사용한 연속방정식의 생성항에 포함하여 수렴시까지 재계산을 반복하여 계산하는 방법이다. 반면 Euler-Euler 모델은 체적분율이라는 개념을 도입하여 각 상들을 구분하고 각 상들이 경계면을 서로 통과할 수 있는 연속체로 놓고 유동장을 계산하는 방법이다. FLUENT의 Euler-Euler 모델에는 VOF 모델과 Eulerian Multiphase 모델 두 가지가 있다. VOF 모델은 기포 및 자유표면 유동 등 서로 혼합되지 않는 상의 경계면을 해석하는 모델이고, Eulerian Multiphase 모델은 제2상의 체적분율이 무시할 수 없을 정도로 큰 유체-유체, 유체-고체 혼합물에 대한 유동해석에 사용된다.

(가) Euler-Lagrange 모델

Euler-Lagrange 모델은 유체의 제1상을 연속체로 처리하고 분산상은 앞에서 계산된 유동장에 따라 입자들(particles, bubbles, 또는 droplets)을 추적하며 계산한다. 입자의 궤적(trajectories)은 제1상의 유동장 계산과 일정한 시간간격을 두고 각각 독립적으로 계산된다. 이러한 접근방법에 의해 스프레이, 석탄과 액체연료 연소, 소량의 입자들의 유동 등의 해석이 가능하다. Euler-Lagrange 모델은 분산상의 질량분율이 큰 경우에도 사용이 가능하나 체적분율이 제1상의 체적분율에 비하여 무시할 수 없을 정도의 크기를 가진 경우에는 이용이 곤란하다. Euler-Lagrange 모델에 대한 설명은 참고문헌 2, 4에 기술되어 있다.

(나) Euler-Euler 모델

Euler-Euler 모델은 수학적으로 각상들을 서로 통과할 수 있는 연속체로 (interpenetrating continua) 처리한다. 그러나 물리적으로는 각상이 동일 한 공간에 공존할 수 없기 때문에 체적분율이라는 개념이 도입된다. 체적분율은 시간과 공간에 대한 연속함수로 가정된다. 제어체적 내에서 각 상들의 체적분율의 합은 1이다.

Euler-Euler 모델을 사용할 때 사용되는 질량 및 운동량 보존방정식은 다음과 같다.

질량보존 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_q \rho_q) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_q \rho_q u_{q,i}) = \dot{m}_q \quad (1)$$

여기서 ε_q , ρ_q , u_q 는 제 q 상의 체적분율, 밀도, 속도를 각각 나타내고, \dot{m}_q 는 제 q 상의 생성 혹은 소멸을 나타내는 항이다.

$$\sum_{q=1}^N \dot{m}_q = 0 \quad (2)$$

$$V_q = \int \varepsilon_q dV \quad (3)$$

$$\sum_{q=1}^N \varepsilon_q = 1 \quad (4)$$

여기서 N 은 상의 수를 나타낸다.

이러한 체적분율을 사용하여 제 q 상의 유효밀도는 다음과 같이 나타낸다.

$$\overline{\rho}_q = \varepsilon_q \rho_q \quad (5)$$

제 q 상에 대한 운동량보존방정식은 다음과 같이 나타낸다.

운동량보존 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_q \rho_q u_q) + [\nabla \cdot (\varepsilon_q \rho_q u_q) u_q] = \nabla \cdot \overline{S}_q + \varepsilon_q \rho_q F_q + f_q \quad (6)$$

여기서 \overline{S}_q , F_q , f_q 는 각각 제 q 상의 응력텐서(stress tensor), 외부의 체적력, 다른 상과 상호작용하는 상호작용력을 나타낸다. 상호작용력 f_q 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{q=1}^N f_q = 0 \quad (7)$$

$$f_q = \sum_{r=1}^N K_{qr} (u_r - u_q) \quad (8)$$

여기서 K_{qr} 는 제 q 상과 제 q 상 사이의 운동량 교환계수 (momentum exchange coefficient)를 나타낸다.

1) Eulerian multiphase 모델

Eulerian multiphase 모델은 분산상의 체적분율을 무시할 수 없는 유체-유체, 유체-고체 혼합물에 대한 유동해석에 사용된다. Eulerian multiphase 모델은 유체 각각의 유동해석을 위하여 다수의 운동량 방정식을 이용한다. Eulerian multiphase 모델은 slurry를 포함하여, 소형 bubble들로 이루어진 액체-가스 혼합물 또는 액체-액체 혼합물 등의 해석에 적합하다. 대형 bubble과 소형 bubble의 차이점은 일반적으로 제어체적의 크기와 관계된다. Bubble 크기가 제어체적보다 작으면 이러한 bubble들은 Eulerian multiphase 모델을 이용하며, bubble 크기가 제어체적보다 훨씬 크면 이런 bubble은 VOF모델에서 이들의 경계를 추적하여 해석하는 것이 적절하다.

가) 유체-유체 다상유동

유동장을 구성하고 있는 모든 상들이 액체, 가스, 증기 등의 유체로만 구성되어 있을 때에 이 유동장은 유체-유체 다상유동으로 분류된다. 각 상에 대하여 단일의 압력장, 난류장을 계산하고, 운동량과 연속방정식은 각상에 대하여 별도로 계산한다. FLUENT에서는 gas law는 제1상에 대해서만 적용이 가능하며, 온도에 따라 변하는 물성치는 모든 상에 대하여 적용이 가능하다. 항력계수(drag coefficient)는 구형입자, 물방울, 또는 공기방울 등으로부터 얻은 단순한 계수 값을 기본 값으로 사용하고 있으며, 사용자가 사용자 프로그램으로 직접 정의하는 것도 가능하다[8].

앞에서 설명한 일반적인 보존방정식을 N-상의 유체-유체 다상유동에 적용하면 다음과 같다. 식(6)의 운동량 보존방정식은 유체-유체 다상유동에서는 다음과 같이 표현되어진다.

운동량보존 방정식

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\partial}{\partial x_i} \varepsilon_q \mu_q \left(\frac{\partial u_{q,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{q,j}}{\partial x_i} \right) + \varepsilon_q \rho_q g_j + F_{q,j} + \sum_{r=1}^N K_{qr} (u_{r,j} - u_{q,j}) \\
 & \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_q \rho_q u_{q,i}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\varepsilon_q \rho_q u_{q,i} u_{q,i}) = - \varepsilon_q \frac{\partial P}{\partial x_j}
 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $F_{q,j}$ 는 다공성 물질 등을 통한 압력강하 등의 운동량 생성항을 나타낸다. 이때 체적분율은 식(4)의 제약조건을 만족하여야 한다. 각 상의 체적분율은 아래의

연속방정식으로부터 구해진다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_q \rho_q) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\epsilon_q \rho_q u_{q,i}) = \dot{m}_q \quad (10)$$

나) 과립상(Granular) 다상유동

유체가 하나 이상의 고체상을 포함하고 있을 경우 이 유동은 과립상 유동으로 정의되며, 제1상을 제외한 모든 상은 고체상으로 처리된다. 따라서 두 개 이상의 유체를 포함하고 있는 경우에는 과립상 유동으로 해석이 불가능하다. 유체상에서 계산된 압력장을 각상이 공유하며, 고체상의 압력장은 각각의 고체상에 대하여 별도로 계산된다. 난류장 또한 모든 상에 대하여 동일하게 적용되고, 운동량 및 연속방정식은 각상에 대하여 별도로 계산된다. FLUENT에서는 제1상에 대하여만 gas law 적용이 가능하다. 과립상에 대하여서 각상에 대한 온도계산이 가능하며, kinetic theory를 적용하는 것도 가능하다. 항력계수(drag coefficient)는 구형입자, 물방울, 또는 공기방울 등으로부터 얻은 단순한 계수 값을 기본 값으로 사용하고 있으나, 사용자가 사용자 프로그램으로 직접 적용하는 것도 가능하다.

이러한 유체와 입자형태의 과립상에 대한 다상유동 모델의 주 유동인 유체상 f 와 제 l 번째 과립상에 대한 운동량 보존방정식은 다음과 같다.

유체상에 대한 운동량방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_f \rho_f u_{f,i}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\epsilon_f \rho_f u_{f,i} u_{f,i}) = -\epsilon_f \frac{\partial P}{\partial x_j} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_i} \epsilon_f \mu_f \left(\frac{\partial u_{f,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{f,j}}{\partial x_i} \right) + \epsilon_f \rho_f g_j + F_{f,j} + \sum_{r=1}^N K_{fr}(u_{r,i} - u_{f,i}) \end{aligned} \quad (11)$$

과립상에 대한 운동량방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_{sl} \rho_{sl} u_{sl,i}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\epsilon_{sl} \rho_{sl} u_{sl,i} u_{sl,i}) = -\epsilon_{sl} \frac{\partial P}{\partial x_j} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_i} \epsilon_{sl} \mu_{sl} \left(\frac{\partial u_{sl,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{sl,j}}{\partial x_i} \right) + \epsilon_{sl} \rho_{sl} g_j + F_{sl,j} + K_{fl}(u_{f,i} - u_{sl,i}) \\ & + \sum_{m=1}^M K_{slm}(u_{sm,i} - u_{sl,i}) - \frac{\partial P_{sl}}{\partial x_j} + S_{sl,j} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서

P_{sl} : l^{th} -고상 압력

$S_{sl,j}$: l^{th} -고상 응력텐서

K_{fl} : 유체-고체 운동량교환계수

K_{slm} : 고체-고체 운동량교환계수

M : 고체상의 총수

과립상의 온도는 입자들의 random 운동의 운동에너지에 비례하며 이것의 수송방정식은 kinetic theory로부터 유도되며, 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{sm} \varepsilon_{sm} \Theta_{sm}) + \nabla \cdot (\rho_{sm} \varepsilon_{sm} u_{sm} \Theta_{sm}) \right] = \overline{S_{sm}} : \nabla u_{sm} - \nabla \cdot (k_{\theta,m} \nabla \Theta) - \gamma_{\theta} + \phi_{fm} + \phi_{lm} \quad (13)$$

여기서

$\overline{S_{sm}} : \nabla u_{sm}$: 응력텐서에 의한 에너지 생성

$\nabla \cdot (k_{\theta,m} \nabla \Theta)$: 에너지 확산

$K_{\theta,m}$: 확산계수

γ_{θ} : 에너지 충돌 소산

ϕ_{fm} : 유체와 m^{th} 고상 사이의 에너지 교환

ϕ_{lm} : l^{th} 고상과 m^{th} 고상 사이의 에너지 교환

2) VOF 모델

VOF 모델[14~24]은 유체-유체 혼합물이 서로 혼합되지 않고 거동할 때 이들의 거동과 경계면(interface)의 위치를 예측하기 위한 모델로서, jet break-up의 예측, 액체 속에서의 대형 bubble의 움직임, 댐 붕괴 후 유체의 거동, 액체와 가스 경계면의 추적 등에 적용할 수 있다.

VOF 모델은 둘 또는 그 이상의 유체가 서로 섞이지 않는 것을 기본으로 만든 모델이다. 각상을 구분하기 위해 도입된 것이 체적분율이라는 개념이다. 각 지점에서 각상의 체적분율을 알면 체적분율에 따라 한 상에 의해 결정된 값을 갖거나 또는 여러 상의 혼합물에 의해 결정된 값을 갖는다. 다시 말하면, 만약 다상유동 시스

템에서 k 번째 유체의 체적분율을 ε_k 라 표시하면 다음과 같은 조건들이 있을 수 있다.

$\varepsilon_k=0$: 제어체적에 k 번째 유체가 전혀 없음

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

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

각 제어체적에서는 체적분율 ε_k 값을 기초로 하여 적절한 변수값 및 물성치들이 할당되게 된다. 각 상이 이루는 경계면은 체적분율에 대한 연속방정식을 계산하여 추적 계산한다. k 번째 상에 대한 연속방정식은 다음과 같은 형태로 표현될 수 있다.

k 번째 상에 대한 연속방정식

$$\frac{\partial \varepsilon_k}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon_k}{\partial x_j} = S_{\varepsilon k} \quad (14)$$

제 N 상 시스템의 밀도, 점성계수 및 열전도도는 다음과 같이 정의된다.

밀도, 점성계수 및 열전도도

$$\phi = \sum \varepsilon_k \phi_k \quad (15)$$

여기서 ϕ 는 밀도 ρ , 점성계수 μ , 또는 열전도도 k 등을 나타낸다.

제 N 상 시스템의 비열 및 엔탈피는 질량분율의 평균값을 기초로 하여 다음과 같이 정의된다.

비열

$$C_p = \frac{\sum \varepsilon_k \rho_k C_{pk}}{\sum \varepsilon_k \rho_k} \quad (16)$$

엔탈피

$$h_p = \frac{\sum \varepsilon_k \rho_k h_k}{\sum \varepsilon_k \rho_k} \quad (17)$$

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

운동량보존방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial P}{\partial x_j} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_j + F_j \end{aligned} \quad (18)$$

에너지보존 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} k \left(\frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_h \quad (19)$$

(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 $k-\epsilon$ 모델[8]을 사용하였다. 또한 벽면에서 미세 격자를 사용할 경우 많은 계산시간이 요하므로 벽함수(wall function)를 사용하였다[8].

(3) 다공성 매질(porous media) 모델

다공성매질 모델은 비교적 복잡한 형상의 물체를 간편하게 모델링하기 위하여 도입된 모델로서, 필터, 구멍 뚫린 판, 복잡한 유량 조절판 등의 다양한 열유동 문제에 적용될 수 있다.

FLUENT의 다공성매질 모델에서는 단순화된 기법을 사용하여 유체의 저항손실 및 열전달 현상을 나타낸다. 다공성 영역에 실험 값에 의해 결정되는 저항손실계수 값을 적용하게 되어 있는데, 이 개념은 운동량방정식에 단지 운동량의 손실항(momentum sink)을 추가시키는 개념이므로 여러 가지 한계가 있다. 다공성매질 속을 유체가 지나갈 때 유체의 속도는 매질의 형상에 물리적으로 영향을 받지 않으며 또한 가속되지도 않는다. 이는 FLUENT에서 다공성매질을 통과하는 시간이 정확히 해석되지 않는다는 것을 나타내므로 중요한 의미를 갖는다. FLUENT 코드의 다공성매질 모델은 solid medium과 유체의 열적 평형상태를 가정하여 다공성 매질

영역에서는 체적평균값으로 정의되는 열전도도와 열용량을 사용한다. 또한 다공성 매질은 FLUENT의 출구의 경계조건 처리에 방해가 되기 때문에 다공성 매질영역의 셀은 출구 셀(outlet cell)로 지정해서는 안된다.

FLUENT 코드의 다공성매질에서의 운동량방정식은 다음과 같은 운동량 소멸항을 추가하여 계산된다

$$\frac{\mu}{\alpha} v + C_2 \left(\frac{1}{2} \rho v |V| \right) \quad (20)$$

여기서 α 와 C_2 는 각각 사용자가 제공해야할 실험 값이며, α 는 각 구성성분 방향의 침투성(permeability: m^2)을 나타내고, C_2 는 손실계수(inertial resistance factor: m^{-1})를 나타낸다. 식(20)의 운동량 소멸항은 셀에서의 유체 속도의 제곱항에 비례하는 압력손실을 의미한다.

다공성매질을 통과하는 Laminar 유동의 압력손실은 일반적으로 속도에 비례하므로 상수 C_2 는 0으로 볼 수 있다. Convective acceleration과 유체의 점성에 의한 확산을 무시하면 다공성매질 모델은 다음의 Darcy's law를 적용할 수 있다.

$$\nabla P = -\frac{\mu}{\alpha} v \quad (21)$$

다공성매질에서의 압력손실은 i, j, k 의 세 가지 방향에 대하여 이루어진다.

$$\Delta P_i = -\frac{\mu}{\alpha_i} v_i \Delta n_i$$

$$\Delta P_j = -\frac{\mu}{\alpha_j} v_j \Delta n_j$$

$$\Delta P_k = -\frac{\mu}{\alpha_k} v_k \Delta n_k \quad (22)$$

여기서 $\alpha_i, \alpha_j, \alpha_k$ 는 permeability 값이며, v_i, v_j, v_k 는 각 방향의 속도를, $\Delta n_i, \Delta n_j, \Delta n_k$ 는 각 방향의 매질(medium)의 두께, 즉 다공성 영역의 두께를 나타낸다. 따라서 실제 두께와 모델에서의 두께가 차이가 있을 경우에는 변수값 $\alpha_i, \alpha_j, \alpha_k$ 의 환산이 필요하다. 속도(v_i, v_j, v_k)는 FLUENT에서 다공성매질이 100%의 개방된 유동영역으로 가정하여 계산된 면적의 수직방향 속도를 나타낸다.

매우 큰 속도를 갖는 영역에서 식 (20)의 상수 C_2 는 다공성영역에서 손실계수의 보정을 위해 추가된 항이다. 이 상수값은 유체의 유동 방향의 단위 길이당 손실 값을 나타낸다. 따라서 압력손실을 dynamic head의 함수로 나타내는 것이 가능하다. 만일 구멍난 평판이나 tube bank를 모델링할 경우 사용자는 permeability 항을 없애고, 손실계수(inertial loss)항 만을 사용하여 압력손실은 다음과 같이 단순화할 수 있다.

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = C_{2i} \left(\frac{1}{2} \rho u_i |u_i| \right) \quad (23)$$

격자의 i, j, k 각 방향에 대하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta p_i &\approx C_{2i} \Delta n_i \left(\frac{1}{2} \rho v_i |v_i| \right) \\ \Delta p_j &\approx C_{2j} \Delta n_j \left(\frac{1}{2} \rho v_j |v_j| \right) \\ \Delta p_k &\approx C_{2k} \Delta n_k \left(\frac{1}{2} \rho v_k |v_k| \right) \end{aligned} \quad (24)$$

(4) 압축성모델

FLUENT 코드에서 이상기체법칙(ideal gas law)을 선택하여 밀도를 계산할 경우에 밀도는 식(25)와 같이 계산된다.

$$\rho = \frac{P_{op}}{RT \sum_i \frac{m_i}{M_i}} \quad (25)$$

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)을 각각 나타낸다. 단, FLUENT에서 이상기체법칙만을 선택할 경우에는 밀도는 주어진 운전압력에 따라 결정된 일정한(constant) 값을 갖는다. 이러한 경우는 정지압력(static pressure)에 비하여 입출구 압력차가 매우 작은, 즉 비압축성(incompressible gas flow)에 대하여 사용된다.

FLUENT 코드에서 압축성(compressible) 효과를 계산하기 위해서는 이상기체법

칙에 추가적으로 국부적인 상대압력(local relative or gauge pressure)에 따른 밀도 변화를 고려하기 위한 선택사양(density a function of pressure)을 설정해야 한다. 이 경우 밀도는 식(26)에 의하여 환산된다.

$$\rho = \frac{P_{op} + P}{RT \sum_i \frac{m_i}{M_i}} \quad (26)$$

여기서 P 은 FLUENT 코드에서 계산되는 국부 압력(local relative or gauge pressure)를 나타낸다. 등온(isothermal) 유동을 해석할 경우 또는 에너지방정식(energy equation)을 계산하지 않을 경우에 사용자가 정의하지 않는 한 273 °K를 기준으로 밀도가 계산된다.

나. 해석모델 선정

다상유동 해석 모델 중에서 기포군(bubble cloud)의 거동을 유사하게 해석할 수 있는 모델에는 VOF 모델과 Eulerian multiphase 모델이 있다. 이 두 모델 중에서 압축성(compressible) 유동을 모의할 수 있는 모델이 VOF 모델이다. 또한 기포 하나 하나의 거동을 모사하기에는 Eulerian multiphase 모델이 적합하지만, Eulerian multiphase 모델에는 공기방울(particle) 상호간에 형성되는 인력을 모의할 수 있는 모델이 추가되지 않아 Eulerian multiphase 모델로는 공기방울이 방출되어 서로 혼합되면서 대형기포를 형성하는 것을 모의할 수는 없다. VOF 모델은 자유표면 또는 대형 기포의 거동을 해석하기 위해 개발된 모델이므로 기포들에 의해 형성된 기포군(bubble cloud)을 모의하기에는 VOF 모델이 적절하다. 따라서 기포군의 거동과 압축성 유동을 동시에 모의할 수 있는 VOF 모델을 해석 모델로 선정되었다.

Porous 모델은 복잡한 형상을 단순화하여 해의 수렴성을 향상시키기 위하여 도입된 모델이므로, 방출배관의 LRR과 sparger head 작은 hole들이 존재하는 세 영역을 다공성매질(porous media) 영역으로 설정하여 형상을 단순화하였다. 방출배관과 수조사이의 경계면(방출구)의 전단과 후단 압력차가 낮은 영역에서는 방출유량이 유체저항계수 값(K-factor)에 의해 지배되나, 압력차가 크면 임계유속 조건에 의해 지배된다. 방출배관의 유입 압력은 그림 3-3에 나타난 바와 같이 급속하게 상승하므로 실제로 유체저항계수 값의 지배를 받는 영역은 매우 작고 대부분 임계유속에 의해 방출유량이 결정된다.

다공성매질 영역은 2절에 기술된 바와 같이 침투성(permeability)과 손실계수(inertial resistance factor)등에 의하여 운동량의 변화를 나타낼 수 있게 되어 있다. 본 계산에서는 LRR과 sparger head의 유체저항계수 값에 의한 운동량 변화를 모의하기 위한 것이므로 손실계수 만이 사용되며, 손실계수에 의하여 유체의 압력손실과 유량이 계산된다. 임계유속에 도달하게 되면 유체는 유체저항계수 값(K-factor)에 의하여 지배받지 않고 임계유속에 의하여 지배를 받게된다. 따라서 임계조건에 도달하기 전까지는 porous 모델에 의하여 압력과 유속이 계산되고, Porous영역의 격자면적 따라 환산된 임계조건에 도달하게 되면 porous영역을 통과하는 유체의 유속은 환산된 임계유속으로 고정되게(fixed velocity) 된다.

3. 해석방법

가. 해석격자

ABB-Atom의 sparger 성능평가실험에 사용된 실험설비는 그림 3-1에 나타나 있다. 수조는 반경 1.6m 높이 6.6m이며, sparger head로부터 5m 지점까지 총 체적은 42 m³의 물이 채워져 있다. LRR로부터 수위까지의 거리는 3m, LRR부터 sparger head까지의 거리는 2m, 방출배관의 내경은 154.06mm이다. LRR은 8쌍의 직사각형으로 방출배관 외부에서 수조 바닥방향으로 방출될 수 있게 홈이 파여 있다. 각 홈은 높이 10.95mm, 외경 195mm, 넓이 17.5 mm로 홈의 각 쌍은 45°의 간격을 두고 설치되어 있다. Sparger head는 높이 약 0.5 m이며, 높이 방향으로 9줄, 반경방향으로 22.5° 간격으로 16줄로 직경 10mm의 hole이 144개 설치되어 있으며, head의 바닥에는 25mm의 hole이 수조바닥방향으로 한 개 설치되어 있다. 수조와 방출배관의 양단압력은 대기압으로 설정되고 수위는 LRR상부에 작은 hole을 뚫어 방출배관과 수조가 평형상태를 유지하게 하였다. 증기방출량은 70bar의 압력에서 26~34 kg/sec로 설정되어 있다.

실험에서는 그림 3-1(a)의 P3(SRV 하단), P4(밸브 중간), P5(탱크 상단입구), P6(sparger head 하단) 위치에서 방출배관 내의 시간에 따른 압력변화를 측정하였으며, 그림 3-1(b) PT1~6(수조 바닥), PT7, 9, 11(수조 벽면), PT8, 10, 12(방출배관 외벽) 등에서 측정하였다. 현재 이용 가능한 자료는 방출배관 내에서 측정된 자료들과 수조내의 위치 PT8과 PT10에서 측정된 압력 값이다.

ABB-Atom의 실험결과에서 LRR과 sparger head에서 공기가 방출되어 형성되는 대형 기포의 형상은 구와 유사한 형상[7, 10]이므로 이차원 축대칭 격자로 해석이 가능하다. 실험설비와 일치하는 축대칭 이차원 곡면격자(body fitted grid)를 생성 모의 계산을 수행하였으나 수렴해를 얻기 힘들었다. 따라서 해의 수렴성을 향상시키고, 계산시간을 단축시킬 목적으로 수조외곽 하단의 곡면을 직선으로 처리하였다. 방출배관을 통하여 물 또는 공기가 방출될 때 수조내의 주유동은 수조의 중심부근에서 형성되므로 이와 같은 단순화된 격자를 사용할 경우에도 본 연구에서 구하고자 하는 수조내의 압력변화에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 그림 3-2는 해석에서 사용된 직사각형 이차원 축대칭 격자(72 X 42)를 나타낸다.

나. 초기 및 경계조건 설정

그림 3-2 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 inletA-inletB으로 나타나게 되어 있으므로 본 해석에서는 출구를 inlet②로 설정하였다. 또한 그림 3-2의 C, D와 E 부근의 방출배관과 수조를 연결하고 있는 셀을 다공성매질(porous media) 영역; porous 1(LRR), porous 2(sparger head 옆면), porous 3(sparger head 바닥 일부)으로 각각 모델링하였다.

입구의 압력 및 온도 조건은 ABB-Atom의 실험데이터(그림 3-3) 근거로 설정하였으며(표 3-1), 출구 압력은 정압(static pressure) 0 Pa, 체적력(body force)은 9.8m/sec^2 을 사용하였다. 초기조건은 수조의 운전압력을 10^5 Pa로 설정하고, 물의 수위 이하의 격자에 대해서 물의 체적분율을 1, 물의 수위 이상의 격자에 대해서는 물의 체적분율을 0으로 설정하였으며, 물과 공기 경계면의 격자에 대해서는 수렴성을 고려하여 물의 체적분율을 0.5로 설정하였다. 물의 밀도는 1000kg/m^3 , 증기의 밀도는 10kg/m^3 로 설정하고, 제1상 유체(공기)에 대해서는 이상기체방정식에 의해 압력에 따른 밀도변화가 가능하도록 FLUENT 코드의 선택사항을 설정하였다.

다공성매질 영역은 2절에 기술된 바와 같이 침투성(permeability)과 손실계수(inertial resistance factor)등에 의하여 운동량의 변화를 나타낼 수 있게 되어 있다. 이중에 형상에 의한 유체저항계수(K-factor)를 모의하기 위하여 사용되는 것이 손실계수이다. 실험설비로부터 유체저항계수(K-factor)를 구하고 이를 해석격자에 대한 손실계수 값으로 환산하였다[11, 12]. 단, sparger head의 옆면에 대한 유체저항계수는 다음 식(27)에 의하여 산정하였다[12].

$$\begin{aligned} \zeta &= \frac{\Delta P}{\rho v^2 / 2} \\ &= \left[(0.5 + \tau \sqrt{1 - \bar{f}}) \times (1 - \bar{f}) + (1 - \bar{f})^2 + \lambda \frac{l}{dh} \right] \times \frac{1}{\bar{f}^2} \\ &= \left(\zeta_0 + \lambda \frac{l}{dh} \right) \frac{1}{\bar{f}^2} \end{aligned} \quad (27)$$

여기서

ζ : coefficient of fluid resistance (pressure loss coefficient)

$$\tau = f \left(\frac{l}{dh} \right)$$

$$dh = \frac{4f_{or}}{\pi_0}$$

f_{or} : area of one orifice

π_0 : cross-section(wetted) perimeter

$$f_0 = \frac{F_0}{F_1}$$

F_0 = clear area of the grid = $\sum f_{or}$

F_1 = larger cross section

$$\zeta_0 = (0.5 + \tau \sqrt{1 - \bar{f}}) \times (1 - \bar{f}) + (1 - \bar{f})^2$$

λ : friction coefficient [friction resistance of the segment of relative unit length ($l/D_h = 1$)]

유체저항계수(k-factor) 산출에 사용된 LRR, sparger head의 면적은 다음과 같다.

o sparger head의 방출구(hole)의 면적

$$\text{- 옆면 : } A_{hor} = \left(\frac{3.14}{4} \right) \times \left(10 \frac{mm}{1000 \frac{mm}{m}} \right) \times 144 = 0.011304 m^2$$

$$\text{- 밑면 : } A_{ver} = \left(\frac{3.14}{4} \right) \times \left(25 \frac{mm}{1000 \frac{mm}{m}} \right) \times 144 = 0.000491 m^2$$

o LRR의 방출구(hole)의 면적

$$A_{LRR} = A_H \times 8 = 0.00033 m^2 \times 8 = 0.00264 m^2$$

유체저항계수(k-factor)로부터 계산된 각 위치에서 다공성매질의 손실계수(inertial resistance factor)를 표 3-2에 정리하였다.

유체의 임계유속에 따라 몇 가지 case로 구분하여 계산을 수행하였다. LRR과 sparger head에서의 물과 공기의 임계유속을 Case A에서는 330 m/sec로 가정하였고, Case B에서는 100 m/sec로 가정하였다. Case C는 Case B와 동일한 조건에서

sparger head에서의 공기의 임계유속을 50m/sec로 작게 가정한 경우이다. 각 Case 의 임계유속과 격자면적에 따라 환산된 임계유속을 표 3-3에 정리하였다.

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 증기의 유입을 차단하였다.

다. 해석절차

공기와 물의 경계면은 초기조건으로 해석격자 내에 주어진다. 공기와 증기의 경계면은 주입되는 공기의 양을 측정하여 정해진 양(0.51kg)의 공기가 유입되고 나면 증기가 주입될 수 있도록 입구 경계조건을 변경한 후 형성된다. FLUENT 코드에서는 제1상만을 압축성(compressible) 유체로 설정할 수 있다. 따라서 제1상인 공기에 대해서는 압력에 따른 밀도변화가 가능하도록 FLUENT의 압축성유체 선택사항을 설정하고, 제2상인 물과 제3상인 증기에 대해서는 비압축성(incompressible) 유체로 가정하여, 물의 밀도는 1000kg/m^3 증기의 밀도는 압축공기의 평균 밀도와 유사한 밀도를 갖는다고 가정하고 10kg/m^3 으로 설정하였다. 실험결과에서 볼 수 있듯이 증기가 주입될 때에 수조에 추가되는 압력의 변화는 매우 미세하므로, 공기와 증기의 경계면이 LRR 또는 sparger head의 hole을 통과하는 각각의 시간에 맞추어 LRR과 sparger head의 셀을 벽면(wall)으로 처리하여 수조 내로 증기가 주입되지 못하도록 하였다. 다시 말하면, 본 계산에서는 증기 주입시 추가되는 엔탈피와 운동량은 고려하지 않고, 증기는 공기를 압축하여 방출배관에서 수조 내로 밀어내는 단순한 기능으로만 사용되었다. 공기가 방출될 때 LRR과 sparger head에서 방출배관과 수조사이에 형성되는 압력차는 유체의 입계조건을 만족할 정도로 충분한 크기를 갖는다. 따라서 LRR과 sparger head에서 유속이 격자면적에 의해 환산된 임계유속에 도달하게 되면 각 셀에서의 속도는 환산된 임계유속으로 고정되게 된다.

이상에서 볼 수 있듯이 공기의 주입량을 측정하여 경계조건을 변경해야하고, 환산된 임계유속에 따라 각 셀 별로 속도를 고정해야하고, 공기가 수조 내로 모두 주입되고 나면 증기의 유입을 차단해야 하므로, 계산진행에 따라 측정이 필요한 인자들을 측정하여 필요 시점마다 경계조건을 변경하거나 속도를 고정해야 한다. 이러한 계산 절차들은 다음과 같다.

- ① 물의 수위, 압력 등 초기조건과 경계조건을 설정하고 계산을 시작한다. 시간에 따른 공기의 주입량 변화를 측정한다.
- ② 공기주입이 시작되면 방출배관 상단의 공기가 가압되기 시작하고, 공기와 물의 경계면이 하강하면서 LRR과 sparger head로 물이 빠지기 시작한다.
- ③ 주입된 공기의 양이(단, 초기조건으로 주어진 공기의 양도 고려) 실험값과 일치한 시점에서 공기의 주입을 차단하고 증기가 주입될 수 있도록 입구경계조건을 변경한다. 증기와 공기의 경계면이 계산격자 내에 형성되기 시작한다.
- ④ LRR의 압력차가 임계조건에 도달하게 되면 LRR 셀의 속도는 환산된 임계유속으로 고정된다. 단 LRR의 여러 셀은 속도가 고정되는 시점이 다를 수 있다.
- ⑤ Sparger head의 압력차가 임계조건에 도달하게 되면 sparger head 셀의 속도는 환산된 임계유속으로 고정된다. 단 sparger head의 여러 셀은 속도가 고정되는 시점이 다를 수 있다.
- ⑥ 증기는 공기가 LRR을 완전히 통과할 때까지는 수조 내로 유입되는 것이 허락되고, 경계면이 LRR을 완전히 통과하고 나면 LRR의 porous셀은 wall로 변경되어 더 이상의 증기가 수조 내로 유입되지 못하도록 한다.
- ⑦ 증기는 공기가 sparger head를 완전히 통과할 때까지는 수조 내로 유입되는 것이 허락되고, 경계면이 sparger head를 완전히 통과하고 나면 sparger head의 porous셀은 wall로 변경되어 더 이상의 증기가 수조 내로 유입되지 못하도록 한다. 이때 방출배관의 모든 셀도 wall로 변경된다. 증기의 유입차단은 비압축성 증기(FLUENT 코드의 VOF 모델 제한성)에 의한 무의미한 에너지와 운동량의 변화를 차단하기 위한 것이다.

위의 순서는 공기, 증기의 주입속도에 따라 바뀔 수 있다. 각 case 별로 위의 과정을 반복 수행하게 된다.

4. 해석결과 및 고찰

본 연구에서는 ABB-Atom의 실험자료를 기초로 하여 시간에 따른 수조 내 압력의 변화과정을 해석하기 위하여 FLUENT의 압축성 VOF모형을 이용한 과도계산(transient calculation)을 수행하였다. 해석격자는 그림 3-2와 같이 수조를 이차원 축대칭 형태로 단순화한 격자를 사용하였다. 계산시간 간격(time step)은 VOF 모델의 Courant number 제한성을 만족할 수 있도록 유동이 단순하고 느린 구간에서는 5.0×10^{-4} sec를 사용하고, 유동이 빠르고 복잡한 곳에서는 $2.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-4}$ sec를 사용하였다. 수렴조건은 엔탈피에 대해서는 1×10^{-6} 이하로 설정하고, 엔탈피 이외의 압력 및 속도의 등의 모든 변수 값들에 대하여 1×10^{-3} 이하를 설정하였다.

초기조건은 출구압력은 정압이 0 Pa인 상태로 고정되어 있으며, 입구는 입구조건에 따라 시간에 따라 전압력(total pressure)이 1.0×10^6 pa까지 상승하게 설정되어 있다. 초기의 수위는 그림 3-5에서 보는 바와 같이 공기의 자유표면이 입구쪽과 출구쪽에 양쪽으로 나누어져 분포하고 있다. 초기에 입구를 통하여 유입되는 공기는 공기의 대부분은 상단부 공기의 가압에 의해 흡수된다. 방출배관 상단의 공기가 점차 가압되면서 자유표면은 서서히 거동을 시작한다. 공기의 유입유량을 측정하기 위하여 입구에서 공기의 시간에 따른 속도와 밀도변화는 지속적으로 측정하였다. 주입된 공기의 총량은 각 계산간격별로 주입되는 공기의 양(속도 \times 밀도 \times 입구면적 \times time step)을 합하여 구한다.

증기가 유입될 때 수조에 추가되는 압력은 매우 작으므로 증기의 방출은 본 계산에 포함되지 않았다. 즉, 공기가 모두 수조로 주입된 후에는 LRR과 sparger head 그리고 방출배관의 셀을 벽면(wall)으로 처리하여, 물리적으로 의미가 없는 비압축성 증기가 유입되어 압력에 변화를 주는 것을 차단하였다. 실험의 측정위치 그림 3-1(b)의 PT8, PT10과 동일한 위치의 셀에서 시간에 따른 압력변화를 측정하고, 주요시점에서의 기포의 형상변화, 압력 및 속도를 그림 3-4~14에 나타내었다.

실험에서 측정된 압력변화를 그림 3-4에 나타내었고. Case A, B, C에서 계산된 압력변화를 그림 3-5, 6, 7에 각각 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 압력의 진동 주파수는 공기의 주입 양에 의하여 결정되므로, 압력의 진동주파수(main frequency)는 공기의 양이 같은 세 경우 모두 실험값의 5Hertz와 유사한 4Hertz로 계산되었다. 그러나 Case A의 경우 수조내의 최대 압력은 실험값에 비해 매우 높

계 계산되었다. 실험결과와 Case A의 계산결과를 비교해보면, LRR와 sparger head에서의 공기 방출이 실험결과에 비해 계산결과가 매우 빠르게 진행되고 있는 것을 알 수 있다. 공기가 방출되는 속도는 임계유속과 직접적인 관련이 있으므로 계산결과에서 사용된 임계유속이 실험결과에 비하여 크다는 것을 추론할 수 있다. 이러한 임계유속의 차이는 첫째 실험에서는 방출배관에서 공기와 증기가 혼합되어 LRR과 sparger head로 방출될 때 공기와 증기의 혼합물이 방출되므로 상대적으로 공기의 평균 방출유량이 감소하는 차이와 둘째 방출시 국부적인 기포의 구성성분에 따라 형성되는 임계유속의 차이로 인해 발생한다[2]. 그러나 측정의 어려움 때문에 공기 방출시의 LRR과 sparger head에서의 방출속도나 증기와 공기의 혼합비에 대해서 측정된 자료가 없다.

따라서 Case B와 Case C와 같이 LRR과 sparger head에서 방출되는 공기의 임계속도를 보수적인 범위에서 변화시켜 공기의 등가임계유속이 압력에 미치는 영향을 조사하였다. Case B와 Case C의 계산결과에서 볼 수 있듯이 임계유속을 낮출 경우에 실험결과에 근접해 가고, 또한 최대 압력도 공기의 방출속도와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 즉, LRR과 sparger head의 방출 속도를 Case B와 C 같이 낮출 경우 초기 LRR과 sparger head로 공기 방출시 형성되는 압력 펄스의 경향이 점차 실험결과와 유사해지고, 최대압력도 이에 따라 급격히 감소하였다.

FLUENT 코드 계산을 시작 후 초기/경계조건에 따른 유동장 형성 중에 수조 내 압력의 $\pm 5 \times 10^{-3}$ 이하의 미세한 변화가 관찰되었다. 그러나 이 압력변화는 물 또는 공기 주입시에 형성되는 압력에 비해 무시할 수 있는 값이다. 물이 LRR과 sparger head를 통해 수조 내로 유입될 때에 형성되는 압력은 실험값과 같이 공기가 방출될 때의 압력보다 매우 낮은 10^{-4} Pa 내외로 계산되었다. 공기가 방출배관 내로 유입되기 시작한 후 0.15 sec 전후에 총 0.51 kg의 공기가 방출배관에 유입되게 된다. 따라서 이 시간 이후에는 공기의 유입이 차단되고 증기의 유입이 시작된다.

첫 번째 압력변동 주기에 나타나는 작은 압력펄스들은 각 Case별로 공기가 주입되는 시점에 따라 차이를 보이고 있으나 Case C를 예를 들면 다음과 같이 요약될 수 있다. 첫 번째 펄스는 LRR로부터 공기 방출시 형성되는 압력펄스이고, 두 번째 펄스는 sparger head로부터 공기 방출시 형성되는 압력펄스이며, 세 번째 펄스는 LRR로 방출된 기포의 압력거동에 의해 형성된 곡선이다.

LRR 또는 sparger head로 공기가 주입될 때 실험에서는 선형적인 완만한 상승 곡선을 그리며 압력이 상승한다. 그러나 계산결과는 공기 방출시 급격한 압력상승 곡선을 그리고 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 VOF모델은 물과 공기의 경계면을 분명히 구분하여 계산되나, 실험에서는 증기, 공기, 물 등의 불규칙한 유동에 의하여 방출배관의 공기에 물이 일부 혼합되어 있기 때문인 것으로 추론된다. 참고문헌 [2]에 따르면 물과 증기의 혼합성분에 따라 임계유속이 큰 차이를 나타낸다. 실험결과와 해석결과에서 나타나는 공기의 방출속도와 압력거동의 차이 또한 공기의 구성성분의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

세 가지 경우 모두가 최대압력은 공기가 모두 주입된 후인 두 번째 압력변동 주기에서 발생하였다. 이는 실험 데이터와 동일한 것이다. 최대압력이 두 번째 발생하는 이유는 공기가 LRR과 sparger head로 나누어 주입되기 때문이며, 만일 sparger head 만 존재할 경우에는 최대압력은 첫 번째 주기에서 발생하게 된다. 계산된 압력변동 주파수는 실험값과 유사하다. 계산된 최대압력은 약 3.5×10^5 Pa, 2.2×10^5 Pa 그리고 1.4×10^5 Pa로 각각 계산되었다. 그러나 실험값은 $0.5-1.0 \times 10^5$ Pa이다. 최대압력을 크게 예측하는 것은 임계유속에 따른 공기의 방출속도에 직접관련이 있으므로 sparger의 정확한 성능해석을 위해서는 설계조건에 맞는 임계유속의 산정이 필수적일 것으로 판단된다.

그림 3-8~10은 기포의 형성과정과 압력에 의한 수축 팽창시 형상의 변화과정을 다양한 시점에서 나타낸 것이다. 선택된 시점은 (a) LRR로 공기가 방출되고 있는 시점, (b) sparger head로 공기가 방출되고 있는 시점, (c) LRR과 sparger head의 공기방출 방출 진행중인 시점, (d) 공기가 모두 방출되어 최소 압력에 도달한 시점, (e) 최대와 최소의 중간 압력 시점, (f) 최대압력시점과 (g)~(i) 압력거동 중의 최대, 중간 및 최소압력의 시점이다. 그림 3-8~10에서는 LRR와 sparger head의 두 시점에서 기포가 형성되는 과정, 최대압력과 최소압력에서의 체적변화, 기포가 중력에 의하여 상승되고 결합하는 과정들을 볼 수 있다. 또한 최대압력이 큰 경우(Case A)에는 작은 경우(Case C)보다 상대적인 체적변화가 큰 것을 보여 주고 있다.

그림3-11에는 그림은 3-8과 동일한 시점에서 Case A의 압력분포를 나타내었다. 그림 3-11(a)~(c)에서 방출배관의 압력은 수조압력과 상대적인 차이가 커서 그림에서 제외되었다. 공기가 방출되는 초기에는 국부적인 압력차가 발생하나(c) 시간이

진행됨에 따라 국부적인 압력차는 점차 소멸되고 두 개의 기포에 의한 압력과의 상호작용에 의해 하나의 압력장(f)을 형성하게 된다. 수조 내 최소압력 약 -7.9×10^4 Pa로 중심점은 LRR 하단과 sparger head의 부근에 두 지점 위치하며(d), 최소압력의 중심점은 시간이 진행됨에 따라 중력에 의해 점차 상승한다(h)(l). 최대압력이 발생하는 시점에서 최대압력의 중심점은 LRR의 하단부에 존재하며(f) 이 때의 압력은 약 5.2×10^5 Pa이다.

그림3-12에는 그림은 3-8과 동일한 시점에서 Case A의 수조벽면의 압력을 나타내었다. 수조벽면에서의 최대압력은 약 2.5×10^5 Pa로 PT8과 PT10에서 계산된 압력과는 약 1×10^5 Pa의 낮은 것으로 계산되었다. 공기 방출초기에는 수조벽면에서 국부적인 압력차가 다소 발생하나(a) 점진적으로 국부적 압력차는 감소하여 선형적인 압력분포로(b)(c) 변한다.

그림3-13에는 그림은 3-8과 동일한 시점에서 Case A의 속도벡터 분포를 기포의 형상과 함께 나타내었다. 그림 3-13(a)~(c)에서 방출배관의 속도벡터는 수조의 속도벡터와의 상대적인 차이가 커서 그림에서 제외되었다. 속도 벡터의 최대값은 약 92 m/sec로 LRR로부터 공기가 방출될 때(a) 나타난다. 그림에서는 기포형상 변화가 진행되는 방향과 중력의 방향에 따라 속도벡터가 결정됨을 알 수 있다. 최대압력과 최소압력에서의 기포 외부의 속도벡터 분포는(d)(f) 수/팽창이 진행되고 있을 때의 속도 분포보다(e)(g) 상대적으로 작은 값을 갖고 있음을 알 수 있다. 최소압력에서 기포는 최대 팽창된 상태에 있으며 국부적으로 내부로 수축되는 유동이 형성되기 시작한다(d). 반면 최대압력에서는 기포는 최대 압축된 상태에 있으며 국부적으로 외부로 팽창되는 유동이 형성되기 시작한다(f).

표 3-1. 경계조건

PRESSURE BOUNDARY CONDITIONS		TEMPERATURE BOUNDARY CONDITIONS	
ZONE	PRESSURE	ZONE	TEMPERATURE
W1	N/A	W1	HEAT FLUX
I1	FIXED PRESSURE : PROFILE	I1	0.0000E+00/ 3.7300E+02
I2	FIXED PRESSURE : 0.00E+00	T1 =	3.0000E-02/ 4.3800E+02
o PRESSURE PROFILE FOR I1-ZONE		T2 =	2.1000E-01/ 4.5300E+02
	T PRESSURE	T3 =	1.0000E+01/ 4.5300E+02
	-----	I2	2.9300E+02
0.0000E+00	1.0000E+05		
3.0000E-02	7.1000E+05		
2.1000E-01	1.0000E+06		
5.0000E+00	1.0000E+06		
TWO EQUATION($k-\epsilon$) MODEL			
ZONE	TURB. -INTEN.	CHAR. -LENGTH	
W1	SET	SET	
I1	5.000E+00	8.000E-02	
I2	1.000E+00	8.000E-02	

표 3-2. Porous Media 모델링 관련 인자

items	Test Area(m ²)	Grid Area(m ²)	Inertial Resistance Factor (m ⁻¹)
LRR (PM 1)	0.00262	0.06283	water 5.0000E+02
			air & steam 5.0000E+04
Sparger Head (PM 2)	0.01131	0.31416	water 5.8000E+02
			air & steam 5.8000E+04
Bottom Hole (PM 3)	0.00049	0.00126	water 1.3000E+04
			air & steam 1.3000E+06

표 3-3. 임계유속

items	Case A (m/sec)	Case B (m/sec)	Case C (m/sec)
LRR (PM 1)	water & air: 330 (13.8)	water & air: 100 (4.6)	water & air: 100 (4.6)
Sparger Head (PM 2)	water & air: 330 (11.8)	water & air: 100 (3.6)	water: 100 (3.6) air: 50 (1.8)

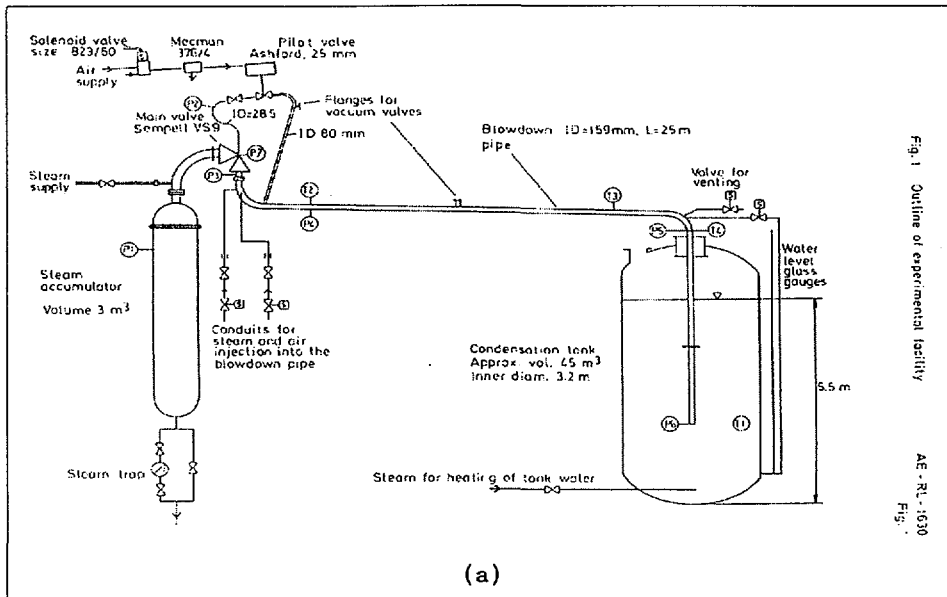


Fig. 1 Outline of experimental facility
AE-RL-1030
Fig. 1

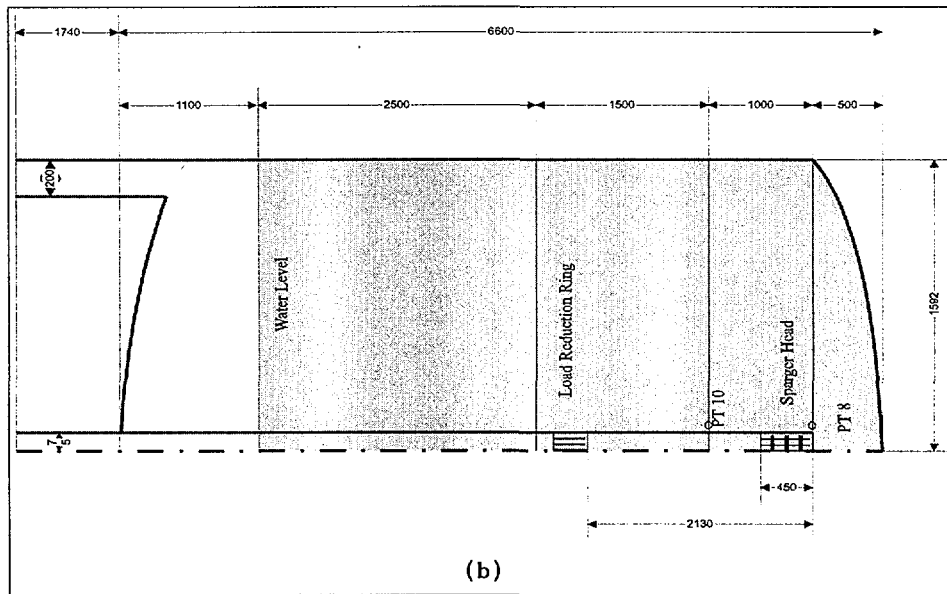


그림 3-1. 실험설비

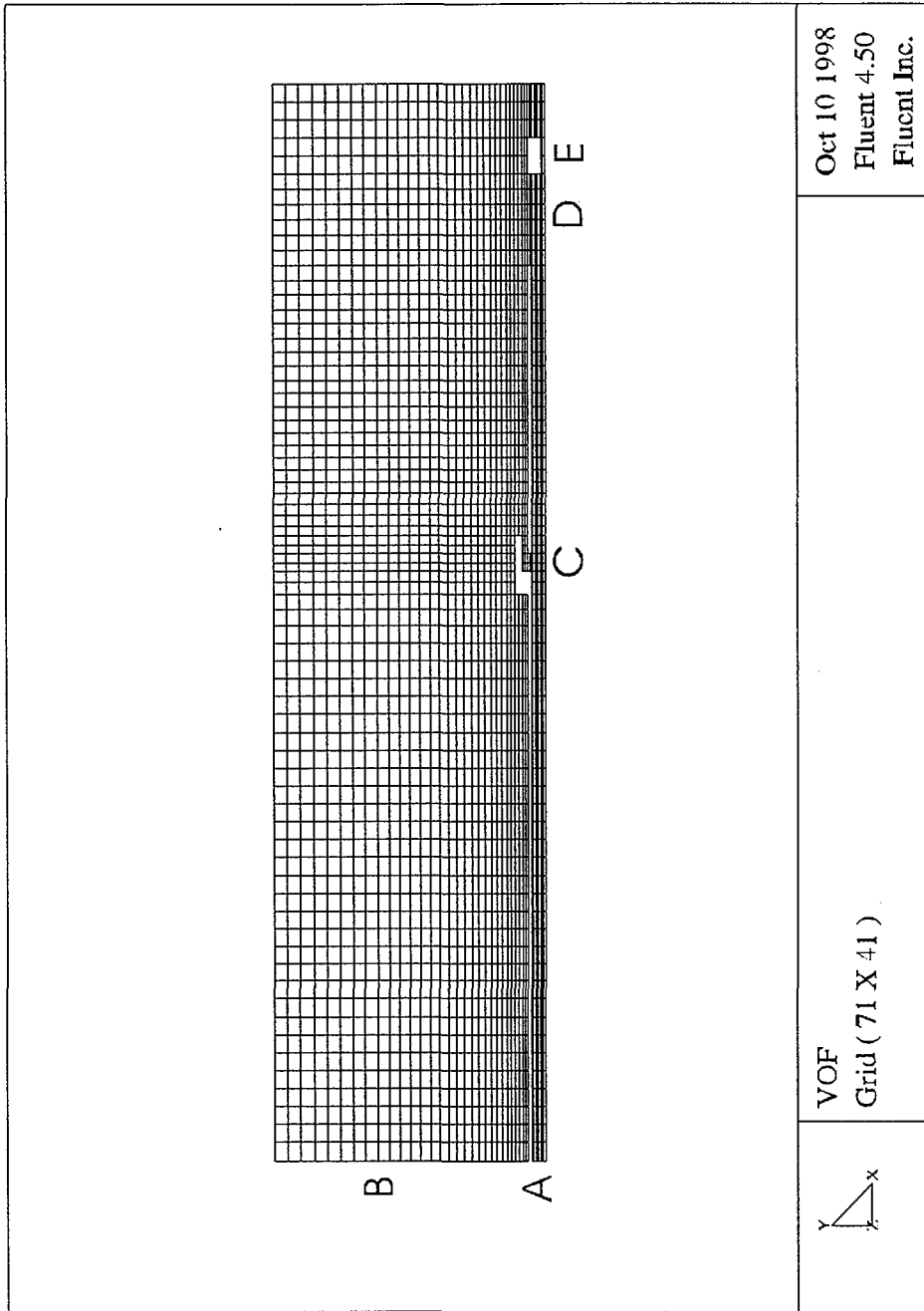


그림 3-2. 해석격자

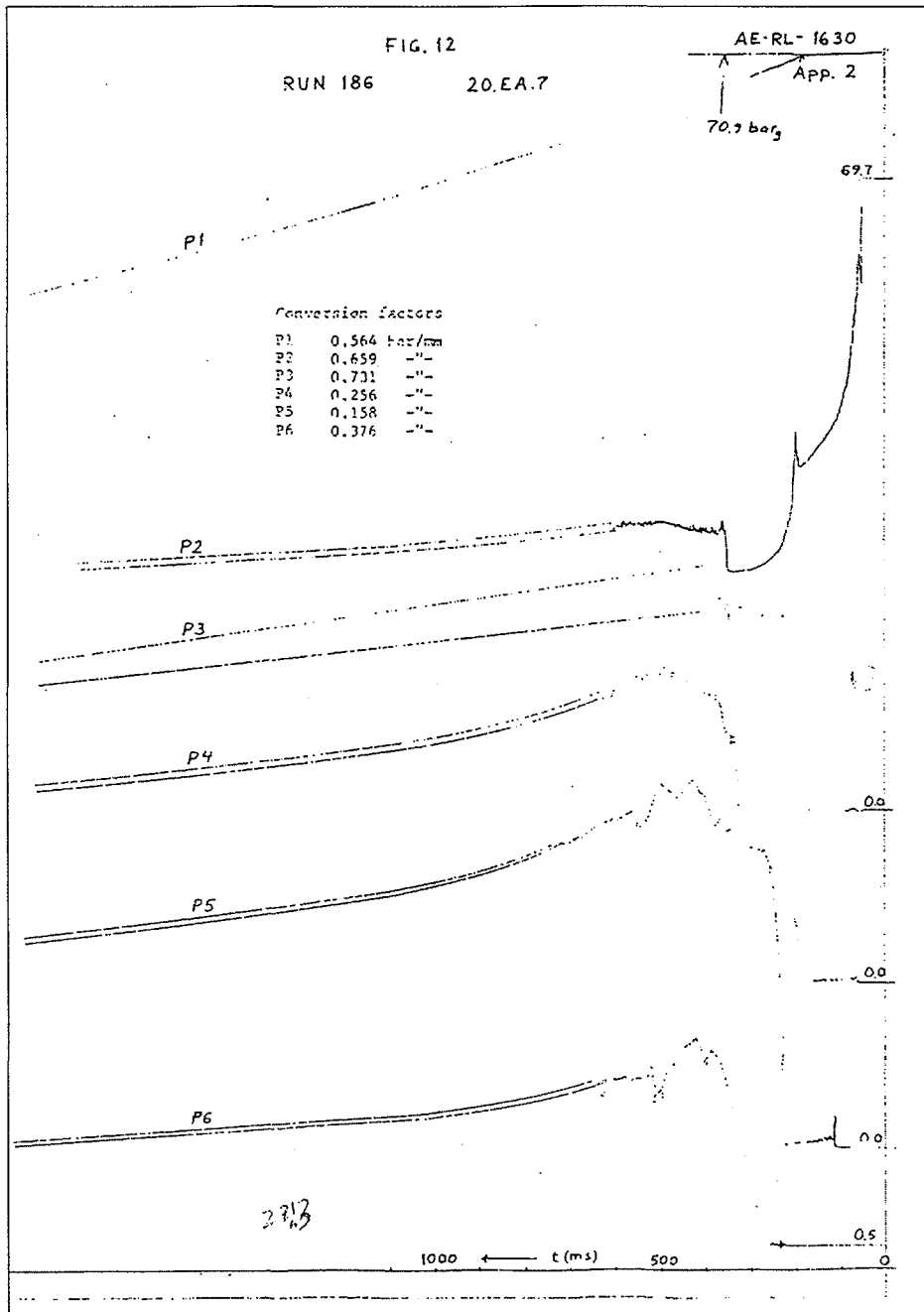


그림 3-3. 방출배관 압력변화(실험결과: run 186)

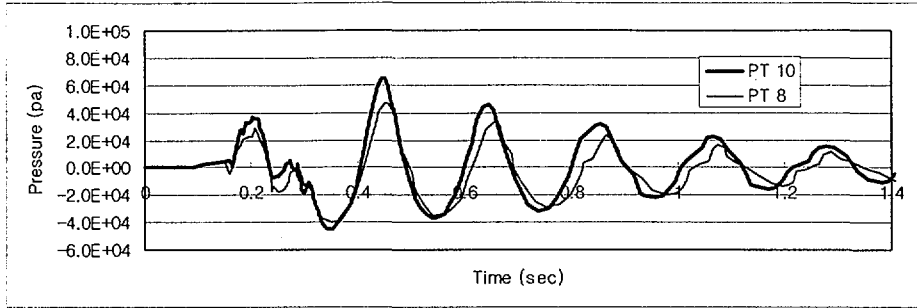


그림 3-4. 수조 압력변화(실험결과: run 186)

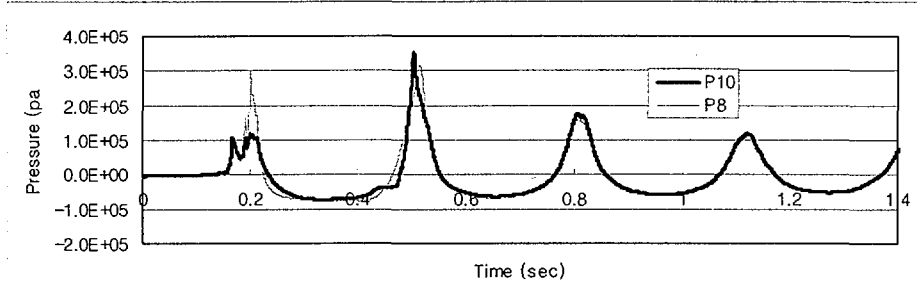


그림 3-5. 수조 압력변화(Case A)

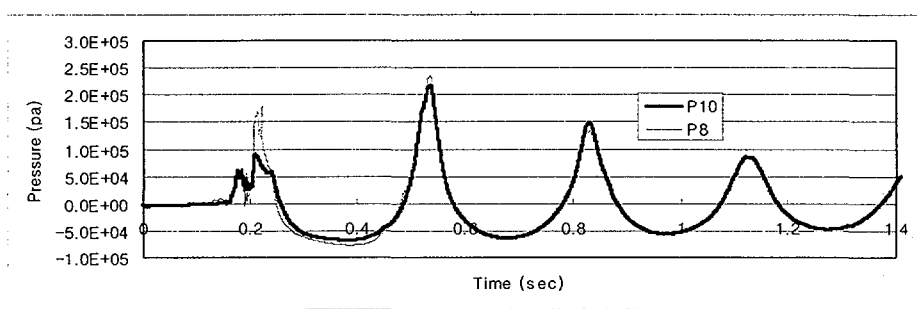


그림 3-6. 수조 압력변화(Case B)

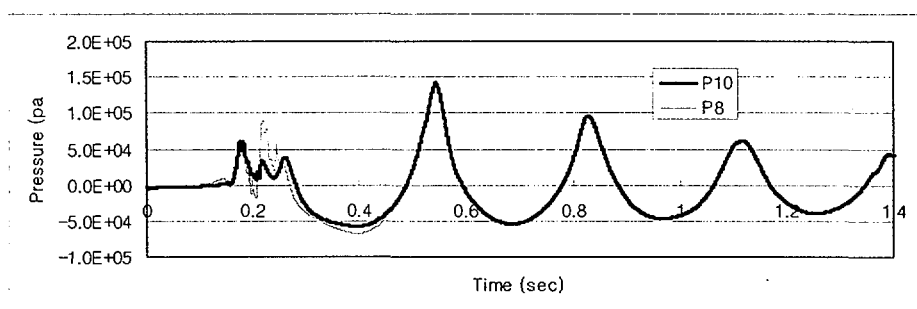
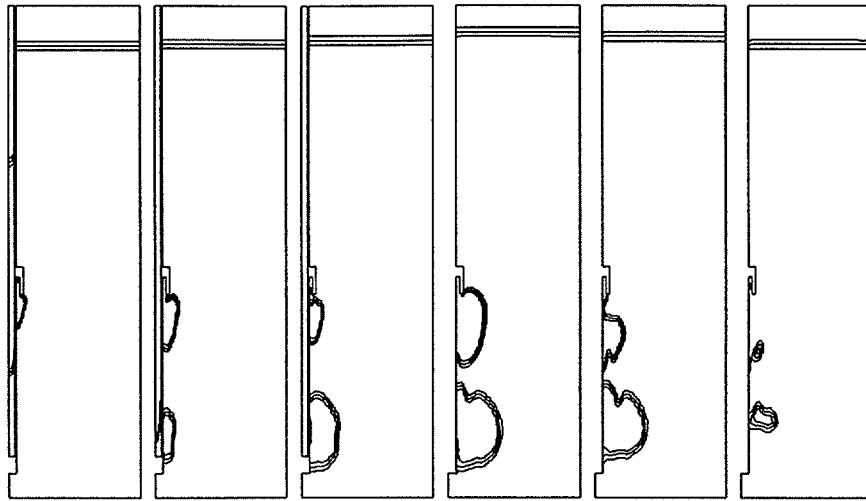
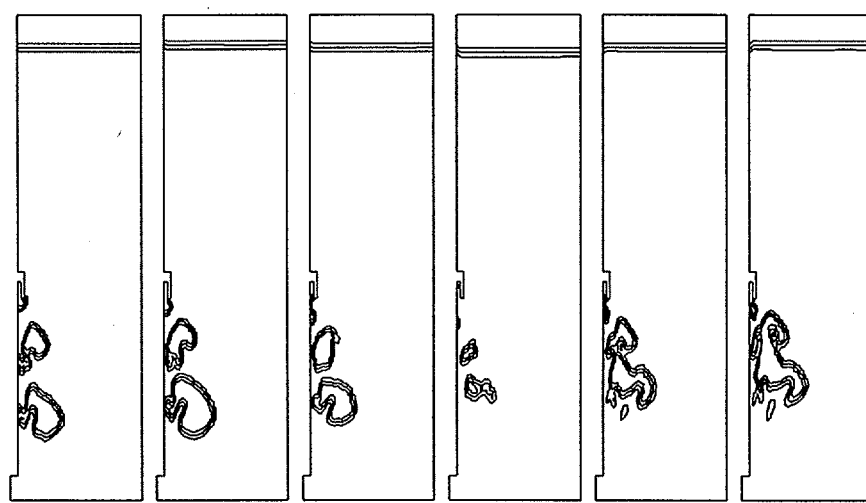


그림 3-7. 수조 압력변화(Case C)

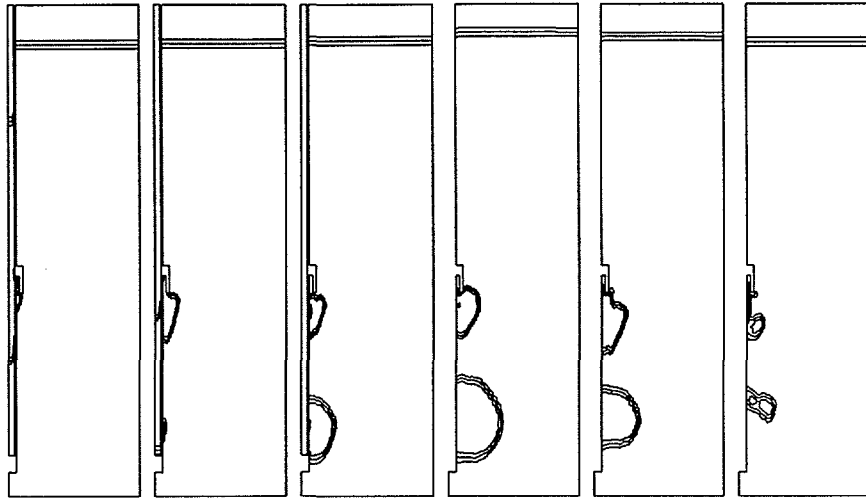


(a) 0.180sec (b) 0.210sec (c) 0.240sec (d) 0.350sec (e) 0.425sec (f) 0.505sec

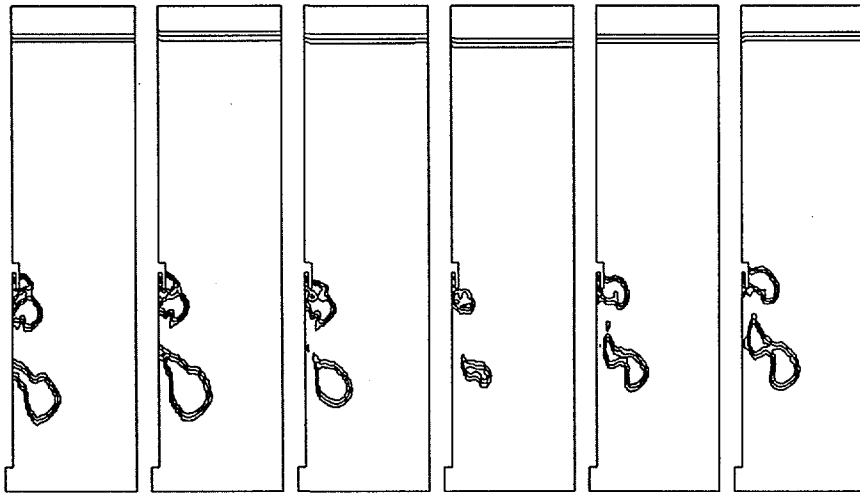


(g) 0.585sec (h) 0.662sec (i) 0.740sec (j) 0.818sec (k) 0.896sec (l) 0.974sec

그림 3-8. 기포의 형상변화(Case A)

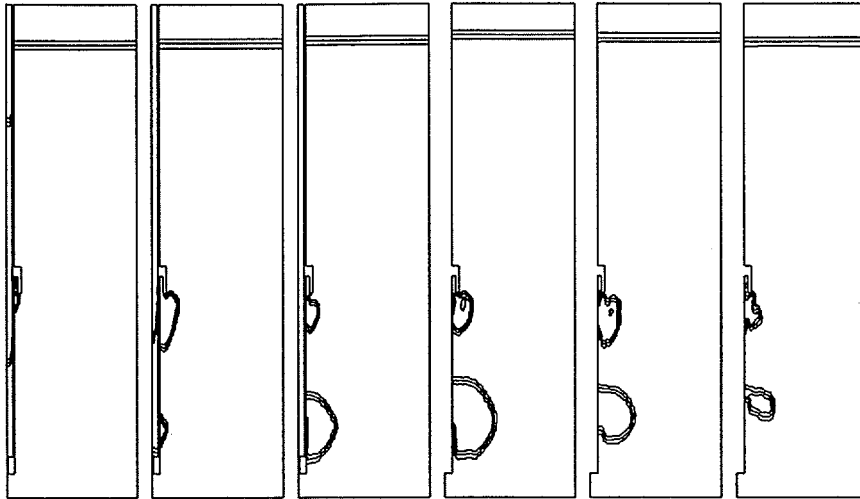


(a) 0.180sec (b) 0.210sec (c) 0.244sec (d) 0.392sec (e) 0.462sec (f) 0.542sec

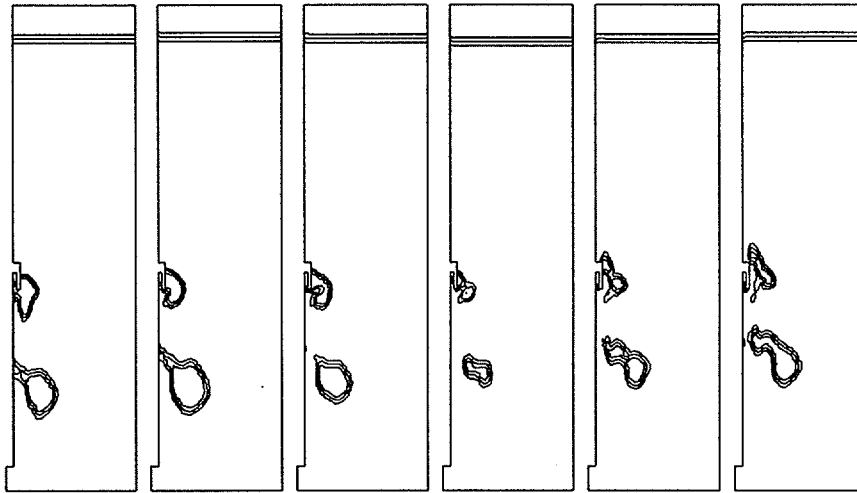


(g) 0.612sec (h) 0.692sec (i) 0.762sec (j) 0.832sec (k) 0.902sec (l) 0.972sec

그림 3-9. 기포의 형상변화(Case B)

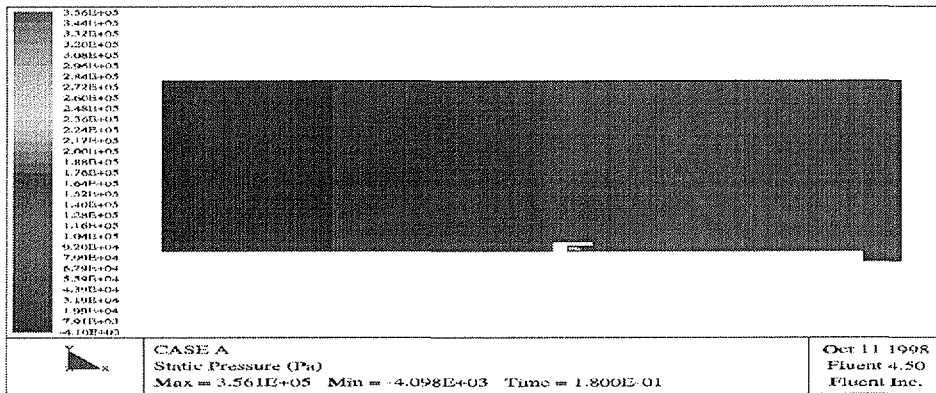


(a) 0.180sec (b) 0.224sec (c) 0.269sec (d) 0.399sec (e) 0.474sec (f) 0.544sec

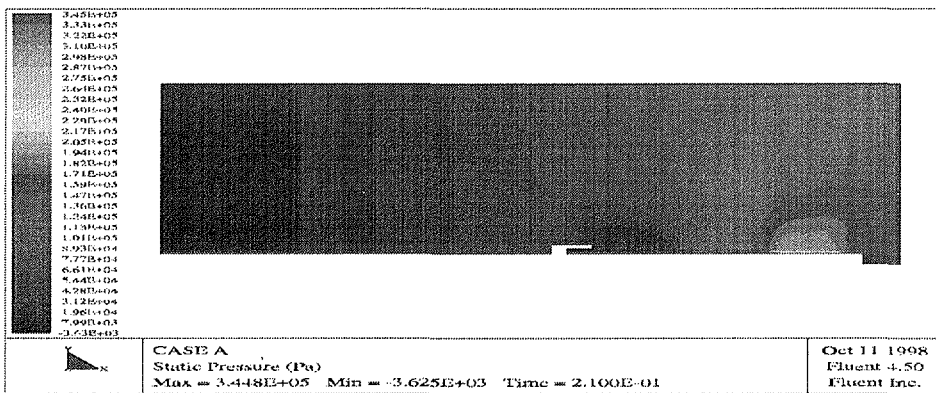


(g) 0.614sec (h) 0.689sec (i) 0.759sec (j) 0.834sec (k) 0.904sec (l) 0.979sec

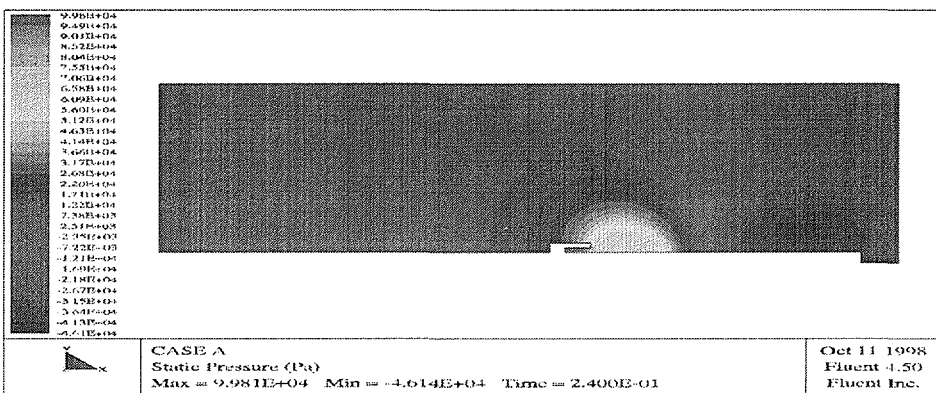
그림 3-10. 기포의 형상변화(Case C)



(a) 0.180 sec

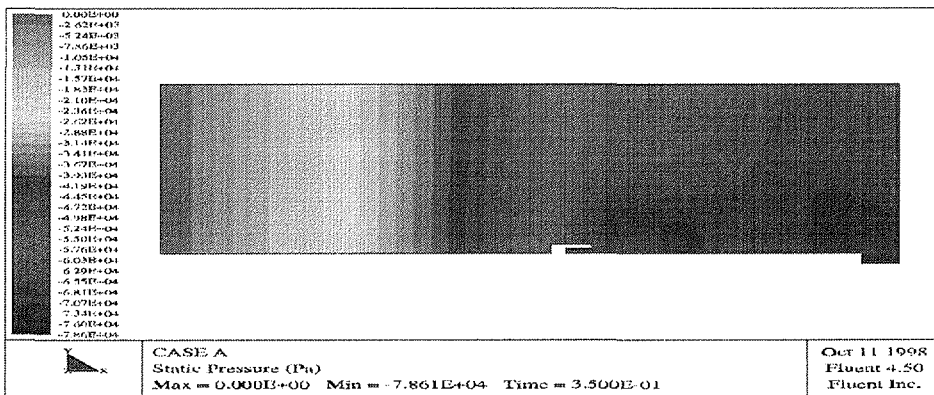


(b) 0.210 sec

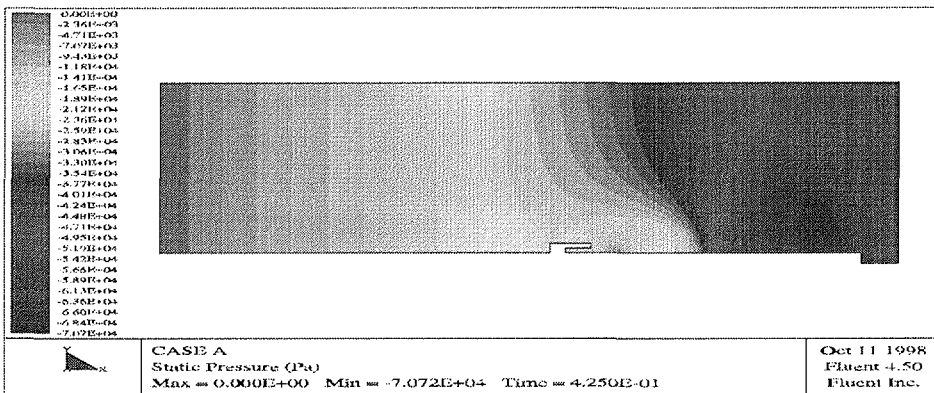


(c) 0.240 sec

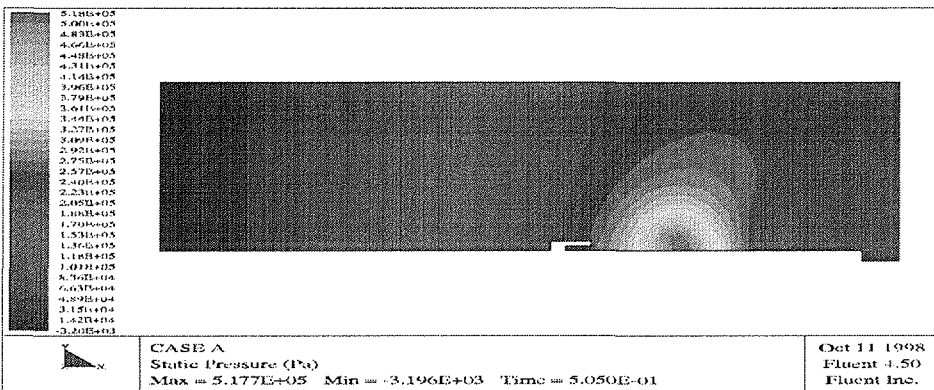
그림 3-11. 수조의 압력분포(Case A : 1/4)



(d) 0.350 sec

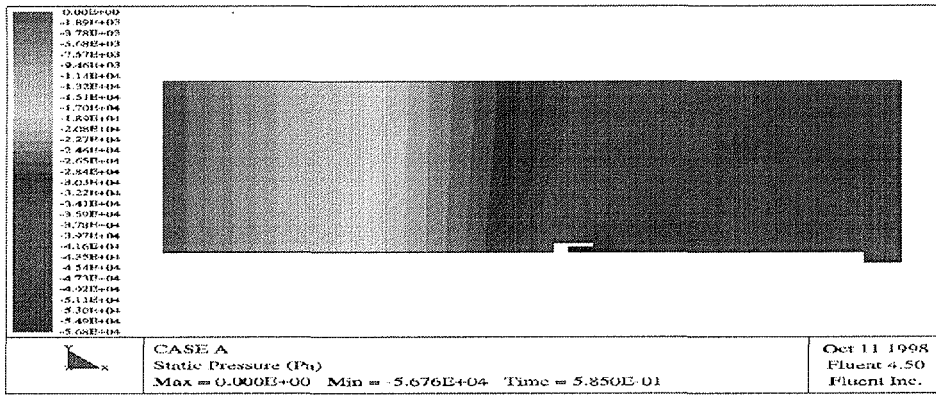


(e) 0.425 sec

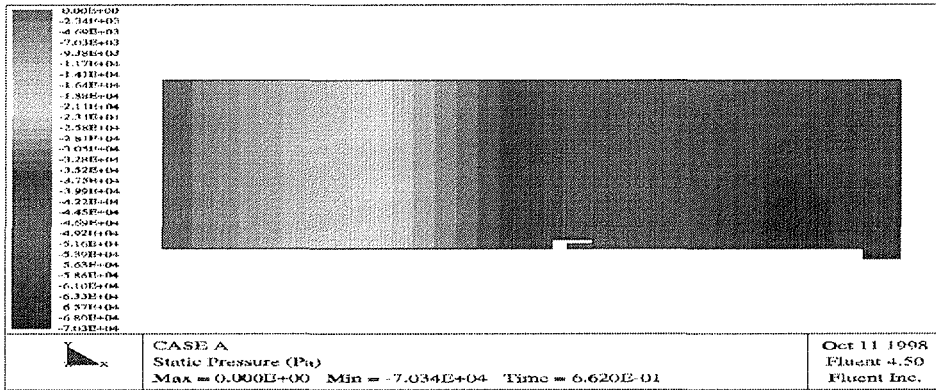


(f) 0.505 sec

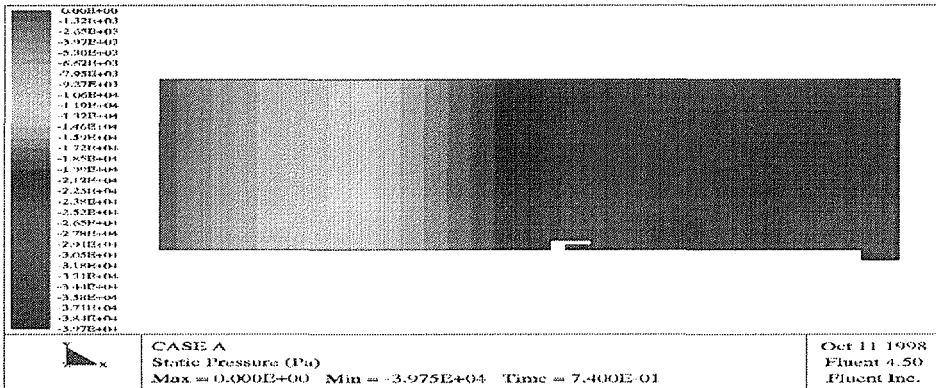
그림 3-11. 수조의 압력분포(Case A : 2/4)



(g) 0.585 sec

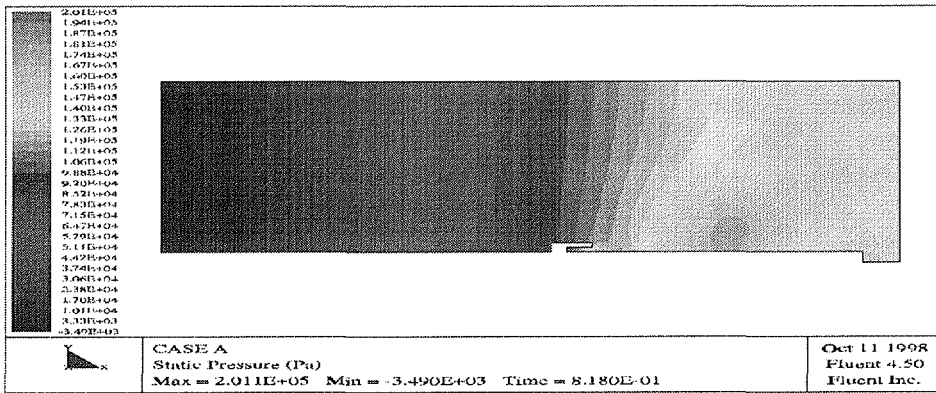


(h) 0.662 sec

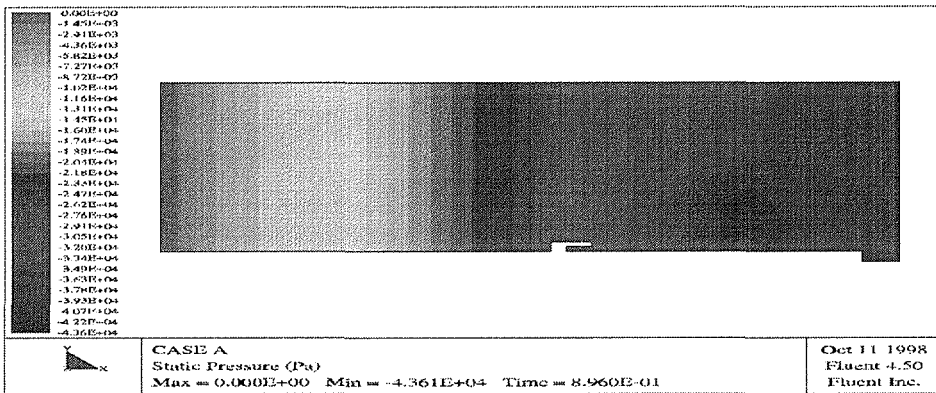


(i) 0.740 sec

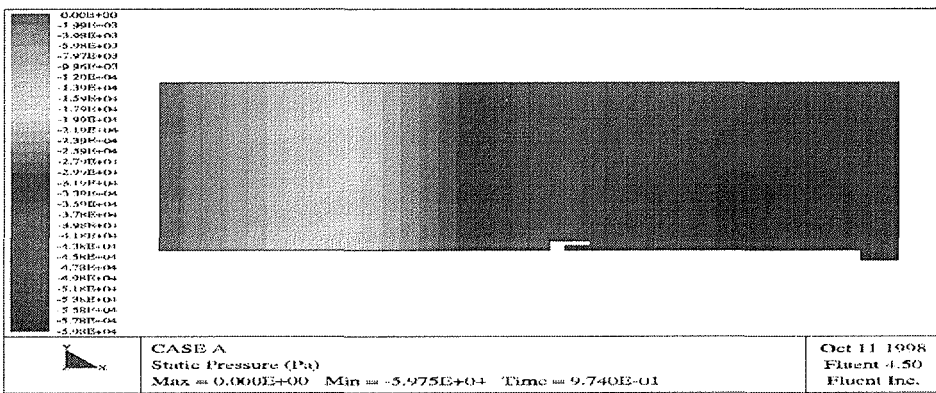
그림 3-11. 수조의 압력분포(Case A : 3/4)



(j) 0.818 sec

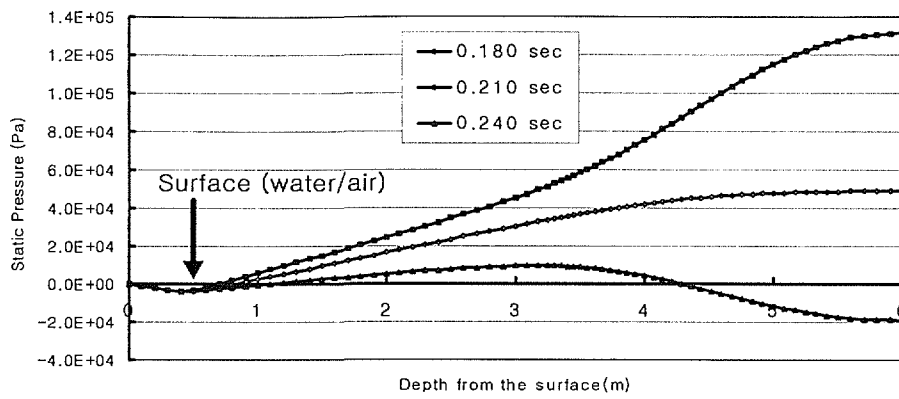


(k) 0.896 sec

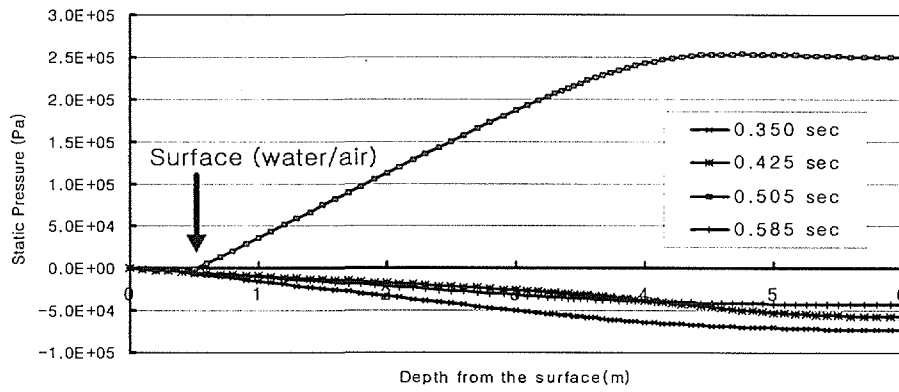


(l) 0.974 sec

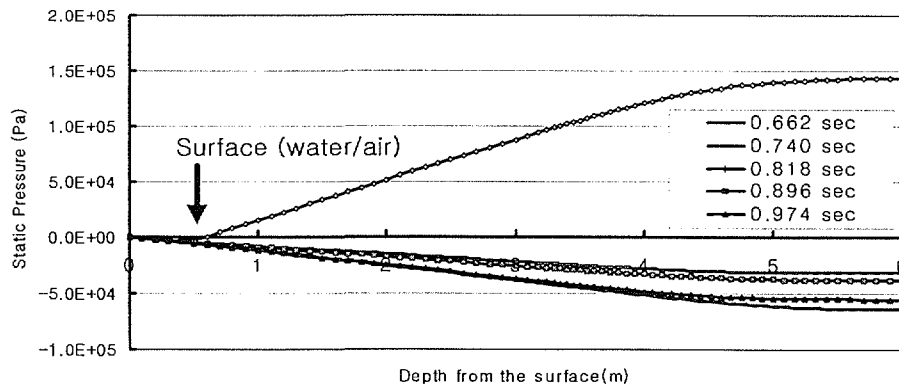
그림 3-11. 수조의 압력분포(Case A : 4/4)



(a) 0.180~0.240 sec

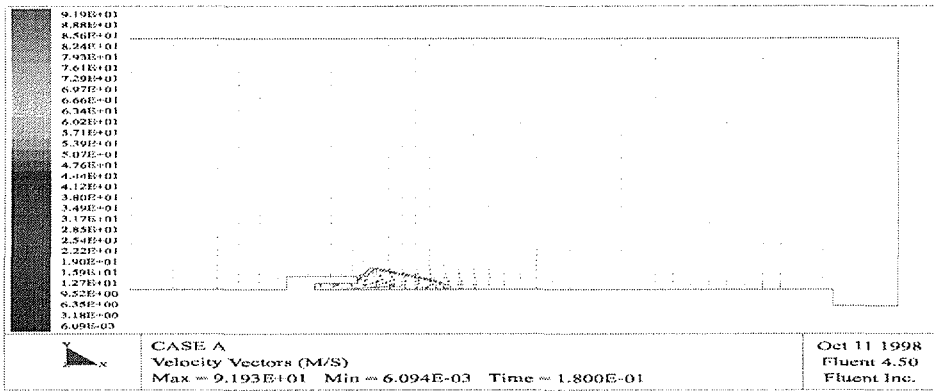


(b) 0.350~0.585 sec

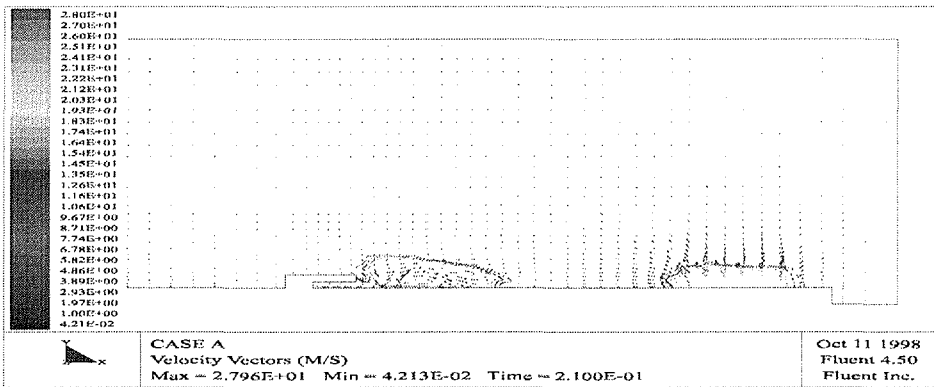


(c) 0.662~0.974 sec

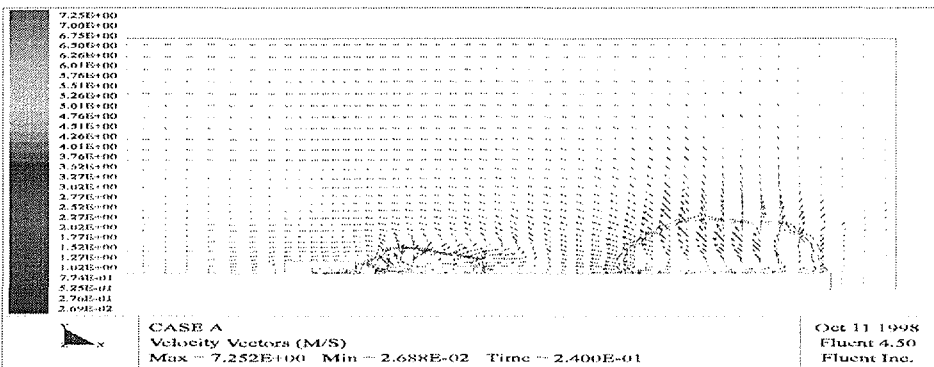
그림 3-12. 수조벽면의 압력분포(Case A)



(a) 0.180 sec

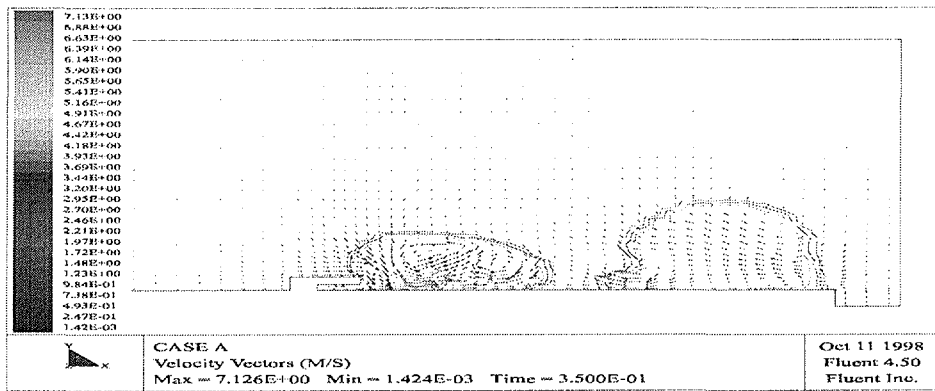


(b) 0.210 sec

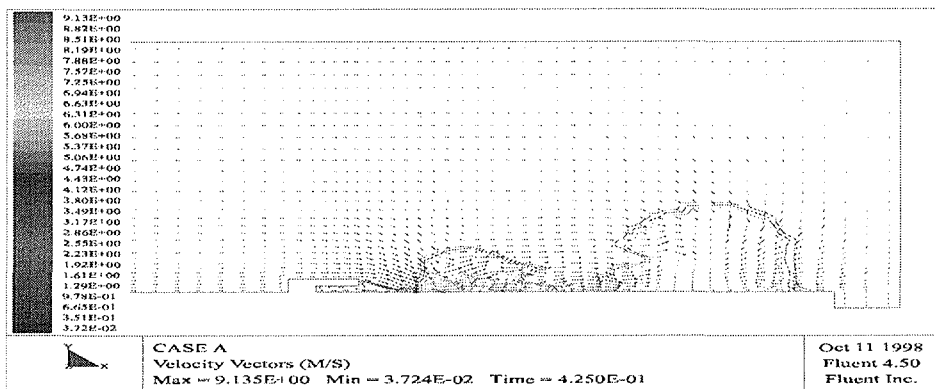


(c) 0.240 sec

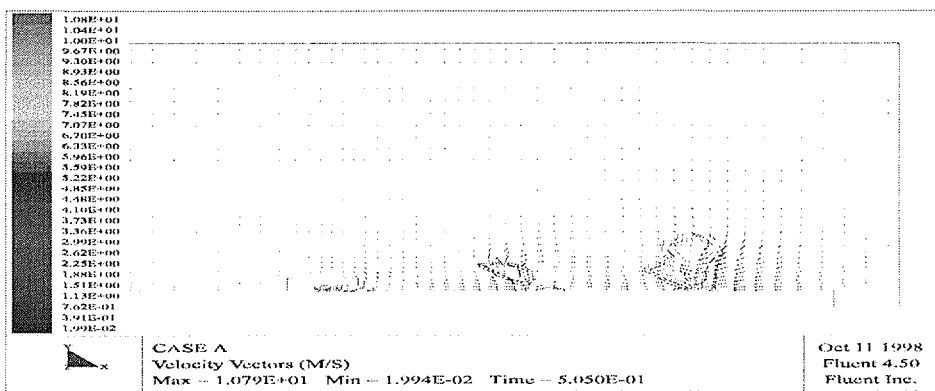
그림 3-13. 수조의 속도벡터 및 기포형상(Case A : 1/4)



(d) 0.350 sec

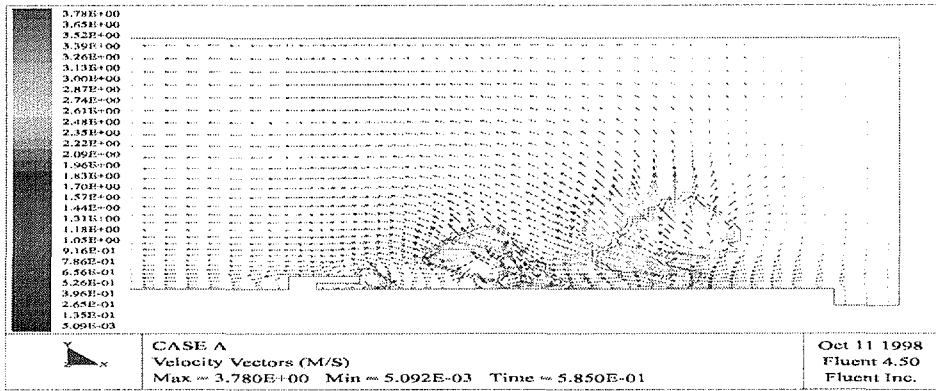


(e) 0.425 sec

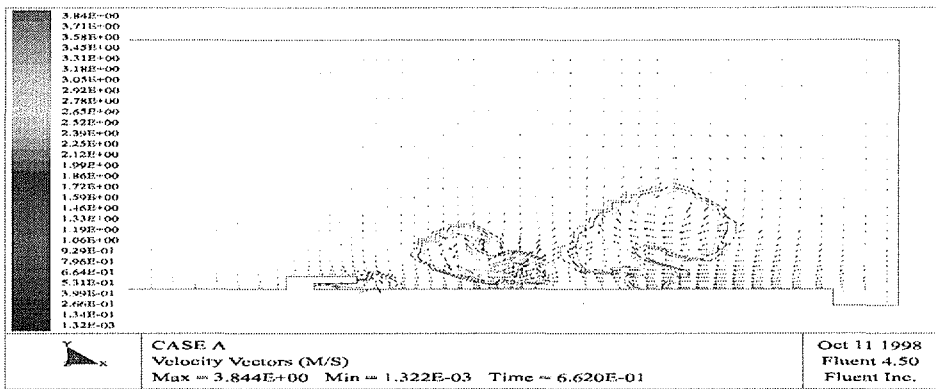


(f) 0.505 sec

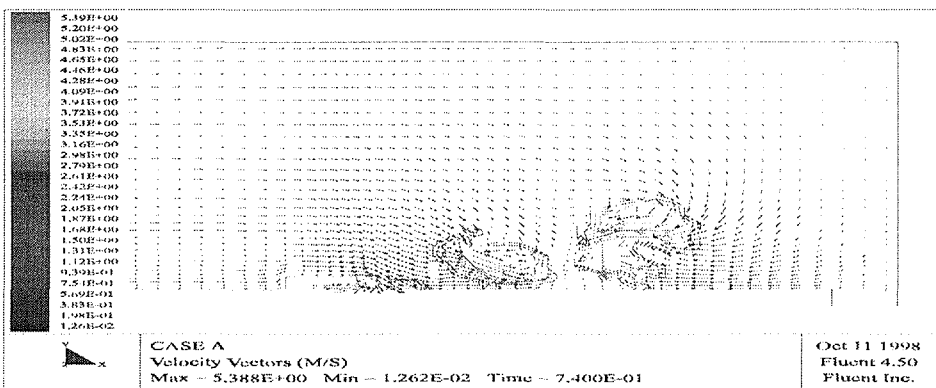
그림 3-13. 수조의 속도벡터 및 기포형상(Case A : 2/4)



(g) 0.585 sec

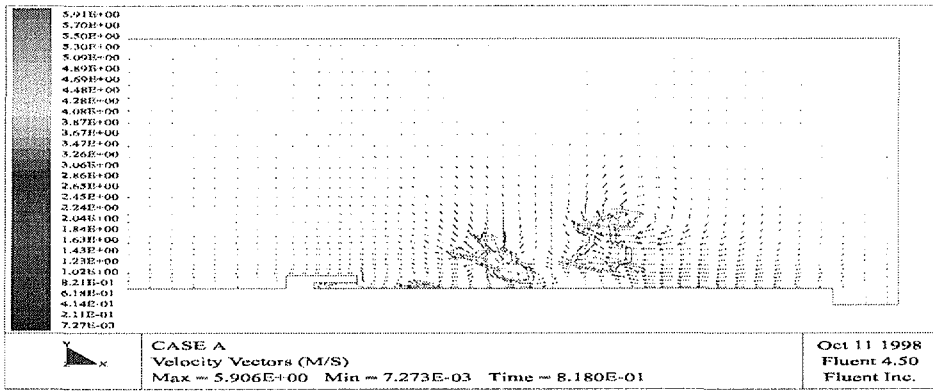


(h) 0.662 sec

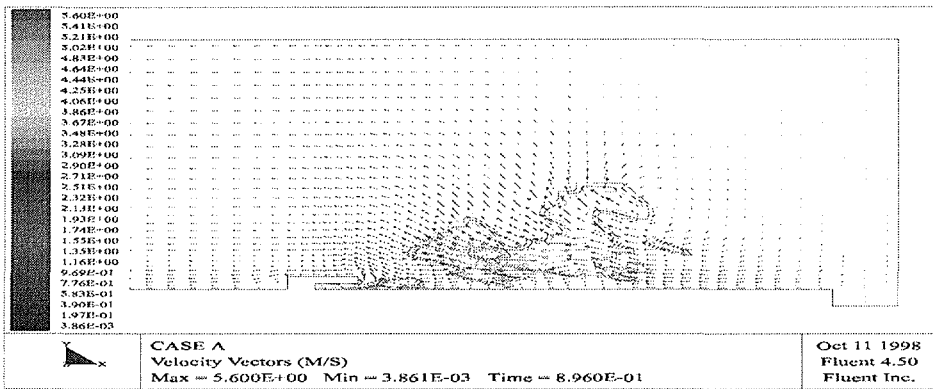


(i) 0.740 sec

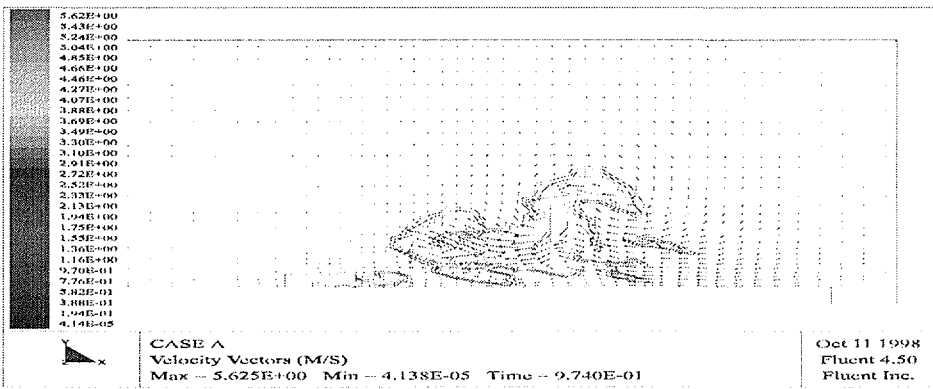
그림 3-13. 수조의 속도벡터 및 기포형상(Case A : 3/4)



(j) 0.818 sec



(k) 0.896 sec



(l) 0.974 sec

그림 3-13. 수조의 속도벡터 및 기포형상(Case A : 4/4)

제 4 장 결론 및 향후 연구계획

Sparger를 통하여 공기가 수조 내로 방출될 때 형성되는 기포형상 및 기포거동에 대한 물리적 특성을 파악하고, 이를 근거로 수조내의 기포거동을 모의할 수 있는 단순화 모델을 도출하였다. 또한 이 모델을 이용하여 수조 내에 형성된 기포의 거동과 기포거동에 의하여 수조 내에 형성된 압력장(pressure field)이 수조벽면에 미치는 하중의 영향을 해석하기 위한 전산프로그램을 개발하였다.

전산프로그램의 예측능력 평가를 목적으로 ABB-Atom의 응축 실험을 참조하여 기준조건을 설정하고 기포의 거동 및 수조벽면의 압력특성에 영향을 미치는 주요 인자들에 대한 영향을 평가하였다. 해석결과 기포의 압력진동의 변동폭은 비교적 정확한 예측이 가능하나 정확한 주파수의 예측을 위해서는 bubble cluster의 기공율에 대한 정확한 자료와 기포 내에 포함되어 있는 물의 영향 등에 대한 상세한 연구가 필요한 것으로 평가되었다.

sparger를 통해 주입되는 공기에 의하여 형성되는 기포거동의 실제현상은 수많은 기포가 공존하는 상태로 이 기포들은 그 크기가 서로 다르므로 서로 다른 주파수로 진동하게 된다. 따라서 수조벽면에는 이러한 기포운동의 복합적인 효과가 작용한 압력변동이 발생하므로 이러한 이상화된 단일기포모형의 타당성에 대한 검토가 필요하다. 또한 Laplace 방정식을 만족하는 압력장은 압력이 극대치(최소압력 및 최대압력)가 되는 시점에서만 해석결과는 타당하므로 실제 벽면 압력진동모드에서 이차적인 진동모드에 의한 효과가 클 경우 이러한 효과를 반영할 수 있는 수학적 모형 개발이 필요한 것으로 판단된다.

또한 Sparger를 통하여 공기가 수조로 방출될 때 형성되는 기포거동해석에 대한 상용 전산유체해석(CFD) 코드의 적용성을 평가하기 위하여, FLUENT V4.5를 이용한 수치 해석적 연구를 수행하였다. ABB-Atom의 증기응축실험을 해석대상으로 선정하고, FLUENT 코드의 해석 모델로는 압축성 VOF 모델을 이용하여 과도해석(transient calculation)을 수행하였다. 본 연구는 sparger로부터 공기가 방출될 때의 기포의 형성 및 변화 과정 그리고 압력의 변화과정에 초점을 맞추었다.

FLUENT 코드를 이용하여 수조내의 압력변동과 기포의 형성과정을 재생산하였다. 압력의 변동주파수는 4 Hertz로 실험값 5 Hertz와 유사하게 계산되었으나, 최대

압력은 매우 높게 계산되었다. 해설결과는 LRR과 sparger head를 통한 초기의 공기방출이 실험결과에 비하여 빠르게 진행되고 있다. 이는 순수한 공기를 가정하여 설정된 임계유속에 의해 설정된 공기의 등가임계유속이 실험결과보다 크다는 것을 의미한다. 실험조건에서는 공기와 증기가 혼합되어 방출되므로 상대적으로 공기의 평균 방출량이 감소되며, 또한 기포율(voil fraction)에 따라서도 임계유속이 크게 변화한다. 그러나 측정의 어려움 때문에 공기방출시의 LRR과 sparger head에서의 방출속도와 증기와 공기의 혼합비에 대해서는 실험에서 계측된 자료가 없다. 따라서 공기의 등가임계유속을 보수인 범위에서 변화시켜 최대압력의 변화를 계산하였다. 공기의 등가임계유속이 낮아짐에 따라 초기공기 방출 과정에 형성되는 압력펄스와 최대압력이 점차 실험값과 근접하였다.

분석결과 FLUENT V4.5는 KNGR sparger의 정성적인 성능해석에는 이용 가능할 것으로 판단된다. 그러나 FLUENT 코드를 이와 같이 복잡한 유동의 정량적 해석에 적용하기 위해서는 실험자료에 근거하여 정확한 등가임계유속을 산정하는 것이 필요하다.

참고문헌

1. 심운섭 등, "증기방출계통의 열수력적 특성연구", KAERI/RR-1440/94, 한국원자력연구소, 1994
2. F.J. Moody, "Introduction to Unsteady Thermofluid Mechanics", John Wiley & Sons, 1990
3. C.E. Brennen, "Cavitation and Bubble Dynamics", Oxford University Press, 1995
4. R.B. Chapman and M.S. Plesset, "Thermal Effects in the Free Oscillation of Gas Bubbles", J. Basic Engineering, Trans. ASME, Sept. 1971
5. F.J. Moody, "Dynamics and Thermal Behavior of Hot Gas Bubbles Discharged into Water", Nuclear Engineering and Design, Vol. 95, 1986
6. G.L. Chahine and R. Duraiswami, "Dynamical Interactions in a Multi-Bubble Cloud", J. Fluid Engineering, Trans. ASME, Vol. 114, 1992
7. Nilsson L., "Experimental investigation of steam vent clearing phenomena at system relief into a condensation pool of water", AE-RL-1630, 1975
8. "FLUENT user's guide version 4.3" 1.1995
9. J. Fredell and Kemppainen, "Experimental investigation of relief valve vent clearing phenomena, KVB 75-643, ABB Atom, November 3, 1975
10. "ABB Atom Studsvik safety relief valve discharge tests(1974-1975)", videotape from high speed film, ABB-Atom, 1975
11. T.S. Kang, "System 80+ SDS flow calculation", SYS80P-FOAKE-FS-C-012, 7.1996
12. I.E. Idelchik, "Handbook of hydraulic resistance", translated by Greta R. Malyavskaya, 1986
13. "산학연 CFD 단기강좌" ATES(주), 5. 1997
14. EPRI NP-824, Electric power research institute, 1978

15. B.D. Nichols & C.W. Hirt, "Numerical Simulation of Boiling Water Reactor", *Nuclear science and engineering*, 9. 1979, vol. 73, pp196~209
16. B.D. Nichols & C.W. Hirt, " SOLA-VOF : A Numerical Solution algorithm for transient fluid flows with multiple free boundaries" LA-8355, 8. 1980
17. C.W. Hirt and B.D. Nichols, 'Volume of Fluid(VOF) methods for the dynamics of free boundaries' *J .of Comput. Phys.* 39, 201-225 (1981).
18. M.D. Torrey, L.D. Cloutman, R.C. Mjolsness & C.W. Hirt, "NASA-VOF2D : A computer program for incompressible flows with free surfaces" LA-10612-MS, 12. 1985.
19. M.D. Torrey, R.C. Mjolsness & C.W. Hirt, " NASA-VOF3D : A three-dimensional computer program for incompressible flows with free surfaces" LA11009-MS, 11. 1989
20. J.R. Grace, "Shape and velocities of bubble rising in infinite liquids", *Trans. Instn chem. engrs*, vol. 51, 1973
21. J.R. Grace, T. Wairegi & T.H. Nguyen, "Shape and velocities of single drops and bubbles moving freely through immiscible liquid", *Trans. Instn chem. engrs*, vol. 54, 1976
22. Akio Tomiyama & Masashi Hirano, "An improvement of the computational efficiency of the SOLA method", *JSME international journal*, series B, Vol. 37, 1994
23. N. Ashgriz and J.Y. Poo, 'FLAIR (Flux Line-Segment Model for Advection and Interface Reconstruction)' *J. of Comput. Phys.* 93, 449-468 (1991).
24. M.Y. Ha, K.S. Kim, K.C. Kim, & S.W. Lee, "Transient analysis of thermo-fluid phenomena in twin-roll continuous casting", *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 37, No. 14, pp 2059-2068, 1994

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호		위탁기관보고서번호		표준보고서번호		INIS 주제코드	
KAERI/TR-1158/98							
제목/부제		수조내의 기포거동 분석					
연구책임자 및 부서명 (AR,TR일 경우 주저자)		황영동(동력로계통기술개발팀)					
연구자 및 부서명		김영인, 김환열, 배운영, 박종균 (동력로계통기술개발팀)					
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소		발행년	1998	
페이지	81p	도표	있음(v), 없음()		크기	26 Cm.	
참고사항							
비밀여부	공개(0), 대외비(), __ 급비밀		보고서종류		기술검토보고서		
연구위탁기관				계약 번호			
<p>초 록</p> <p>Sparger를 통하여 공기가 수조내로 방출될 때 형성되는 기포형상 및 기포거동에 대한 물리적 특성을 파악하고, 이를 근거로 수조내의 기포거동을 모의할 수 있는 단순화 모델을 도출하였다. 또한 이 모델을 이용하여 수조내에 형성된 기포의 거동과 기포거동에 의하여 수조내에 형성된 압력장(pressure field)이 수조벽면에 미치는 하중의 영향을 해석하기 위한 전산프로그램을 개발하였다. 전산프로그램의 예측능력 평가를 목적으로 ABB-ATOM의 응축 실험을 참조하여 기준조건을 설정하고 기포의 거동 및 수조벽면의 압력특성을 해석하였으며 수조내의 압력변동 특성에 영향을 미치는 주요 인자들에 대한 영향을 평가하였다.</p> <p>또한 수조내 기포의 거동 및 압력진동 특성 해석에 대한 CFD 코드의 적용성 평가를 목적으로 FLUENT 코드의 압축성 VOF 모델을 이용하여 ABB-Atom의 방출 실험 데이터를 모의 해석하였다.</p>							
주제명키워드 (10단어내외)		기포, 압력변동, bubble, Sparger, FLUENT, VOF, IRWST					

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/TR-1158/98							
Title/ Subtitle		An Analysis of the Bubble Behavior in the Water Pool					
Project Manager and Department (or Main Author)		Young-Dong. Hwang (Power reactor technology development team)					
Researcher and Department		Young-In. Kim, Hwan-yeol. Kim, Yoon-young. Bae, Jong-Kyun, Park(Power reactor tech. dev. team)					
Publication Place	TAEJON	Publisher	KAERI		Publication Date	1998.10	
Page	81 p.	Ill. & Tab.	Yes(v), No ()		Size	18.2 x 25.7 Cm.	
Note							
Classified	Open(0), Restricted(), ___ Class Document		Report Type				
Sponsoring Org.				Contract No.			
<p>Abstract</p> <p>An analytical study was performed to investigate the physical phenomena on the bubble behavior during the air discharge into the water pool through the sparger. The simplified numerical model was developed to simulate bubble behavior and the wall response induced by the pressure field. One case of the ABB-ATOM's condensation test was simulated with the condition established based on the test data. The bubble behavior and the pressure response on the wall were analyzed and the major parameters influence the bubble behavior and the pressure response were evaluated.</p> <p>Also, the applicability study of FLUENT code on the analysis of the bubble behavior and pressure response was performed. The select case of the ABB-ATOM's test data was simulated with the Volume of Fluid model of the FLUENT code.</p>							
Subject Keywords (About 10 words)		bubble, Sparger, FLUENT, VOF, IRWST					