2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

비격자 입자법을 이용한 비등의 수치해석

Numerical simulation of boiling using gridless particle method

허선, 정해용, 하귀석, 장원표, 이용범, 한도희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

MPS-MAFL method는 이동경계면을 갖는 경우에 있어서 Navier-Stock 방정식을 풀기 위하여 개발된 수치해석방법이다. 이것은, Lagangian 계산을 위한 입자법의 하나인 MPS(Moving Particle Semi-implicit) method와, 격자를 사용하지 않는 대류계산방법인 MAFL(Meshless Advection using Flow-directional Local-grid) method로 구성되어 있으며, 이 두 방식을 조합함으로써, ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 계산이 가능한 수치해석방법이다.

MPS-MAFL method를 이용하여 급격한 과도조건하에서의 핵비등을 해석하여, 기포의 형태변화 및 온도분포 등을 계산하였다. 또한, 상변화를 포함한, 밀도차가 큰 이상류를 해석하기 위한 해석방법 및 모델를 개발하였으며, 이를 이용하여 막비등 현상을 해석하고 증기막의 형태변화 등을 조사하였다. 이 결과, 증기막의 얇은 부분에서 열전달 및 기화가 가장 활발하게 나타나는 것을 확인하였으며, 전체적인 열전달률을 계산하였다. 계산된 열전달률은 Berenson 등의 상관식 결과와는 차이가 있었으나, 이상류에 대한 입자법의 적용가능성은 확인할 수 있었다.

Abstract

Moving Particle Semi-implicit (MPS) method is a particle method where thermal hydraulic problems are solved by particle interactions without the aid of grids. Convection terms are not necessary to calculate because of fully Lagrangian description. The Meshless Advection using Flow-directional Local-grid (MAFL) method is a gridless method developed for the calculation of convection. By combining this MAFL method into MPS, Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) calculations became possible.

In this study, the phenomena of nucleate boiling under rapid transient condition is calculated using MPS-MAFL method. New models have been developed for applying MPS-MAFL method to simulate the film boiling of the water at atmospheric pressure, where the density ratio is very high. The film boiling phenomena of water was calculated using these models. The shape change of vapor film and the temperature distribution are investigated. Higher heat transfer and evaporation are observed in the region where the vapor film is most thin. The heat fluxes are compared with those of Berenson’s equation for several cases of heater wall temperatures. It is certain that the MPS-MAFL method is applicable to two-phase problem involving a large density difference and transition.

1. 서론

이상류 및 비등현상의 수치해석은, 원자로의 안전에 중요한 요소이다. 그동안 이상류에서의 비등현상을 해석하기 위하여 많은 노력들이 있었으나, 이상류에서는 경계면의 형태가 복잡하고, 급격하게 변화하며, 또한 대기압하의 물과 같이 액체상과 기체상 간의 밀도차가 아주 큰 경우에는, 경계면에서의 수치계산적인 불안정성이 생기기 쉽다. 이러한 이유에 의해, 현재까지는 이상류 및 비등현상의 수치해석에 많은 어려움이 있었다.

본 연구의 목표는 (1) MPS-MAFL method 를 이용하여 급격한 과도조건하에서의 핵비등을 해석하고, (2) 상변화를 포함한, 밀도차가 큰 이상류를 해석하기 위한 해석방법을 제시하며, (3) 이를 이용하여 막비등 현상을 해석하는 것이다.

2. 수치해석방법

2.1 지배방정식

연속방정식, Navier-Stokes 방정식, 에너지보존식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{u} = 0 \tag{1}$$

$$\rho\left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} - \vec{u}^c) \cdot \nabla \vec{u}\right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \sigma \vec{\kappa} \cdot \vec{n} + \rho \vec{g} \tag{2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{u} - \vec{u}^c) \cdot \nabla T = \alpha \nabla^2 T \tag{3}$$

2.2 계산알고리즘

MPS-MAFL method는 Lagrangian phase 및 re-configuration phase, convection(Eulerian) phase 로구성되어 있다. 먼저, Lagrangian phase 에서는、압력항을 제외한 Navier-Stokes 방정식을 explicit로 계산하며, 임시속도와 임시계산점 위치를 얻게된다. 그뒤, Poisson 방정식을 이용하여, 압력장을 implicit 방법으로 계산하며, 여기서 얻은 압력분포로부터 임시의 속도와 취리를 갱신하여, Lagrangian phase 에서의 속도와 계산점위치를 구하게 된다. 또한, 에너지보존방정식을 explicit 방식으로 계산하여 각 계산점에서의 온도를 구하게 된다. 여기에서 각 지배방정식에 들어가 있는 미분연산자는 뒤에서 설명하게 될 입자간 상호작용 모델을 통하여 계산된다.

다음으로, re-configuration phase 에서는, 계산점의 재배치가 이루어지게 된다. 이때, MPS-MAFL method 에서는 비균일적인 입자배치가 가능하기 때문에, 계산점을 자유롭게 배치할 수 있다. 본 계산에서는, 계산의 정밀도를 향상시키기 위해, 경계면의 형태와 온도분포를 고려하여, 계산점을 배치하고 있다. 계산점이 재배치된 후에는, 계산전의 속도 $\vec{u}^{c}$ 와 임의의 대류속도 $\vec{u}^{a}$ 가 결정된다. 여기에서의 각 속도와 위치들간의 관계를 그림 1 에 표시하고 있다.

Convection phase 에서는, 재배치된 계산점에서의 물리량을 결정하기 위해여 대류계산을 수행하게 된다. 본 계산에서는 MAFL method를 이용하였다.

$$f\left(\vec{r}^{\,n+1}\right)= f\left(\vec{r}^{\,L} - \Delta t\vec{u}^{a}\right) \tag{4}$$

2.3 LAGRANGIAN PHASE

앞에서 말한 바와 같이, MPS method 에서는 입자간 상호작용모델을 이용하여, 지배방정식의 미분연산자를 이산화하고 있다. 이 모델에 의해, 각 입자는 가중치함수에 의해 계산된 가중치를 가지고 주위의 입자와 상호작용을 하게 되며, 이 계산에서 사용된 가중치함수는 다음과 같다.

$$w(r, r_e) = \begin{cases} -(2r/r_e)^2 + 2 & (0 \le r < 0.5r_e) \\ (2r/r_e - 2)^2 & (0.5r_e \le r < r_e) \\ 0 & (r \ge r_e) \end{cases} \tag{5}$$

가중치함수의 유효반지름 r_e 을 유한하게 함으로써, 계산에 포함되는 입자가 주위의 입자만으로 제한되도록 하여, 큰 규모의 계산에서도 계산시간을 단축할 수 있도록 하였다. 또한, MAFL method 와 같이, 계산점을 비균일하게 배치하는 방식에서는, 유효반지름내에 같은 수의 계산점이 들어가도록, 각 계산점마다 서로 다른 유효반지름 사용한다.

다음은 각 미분연산자을 이산화하는 방법에 대하여 설명하도록 한다. 먼저, Navier-Stokes 방정식 안의 압력항에서의 gradient 연산자는, 각 입자의 물리량과 가중치함수에 의해 식(6)으로 표현된다.

$$\left\langle \nabla\phi \right\rangle_i = \frac{d}{n_i}\sum_{j\neq i}\left[\frac{\phi_j-\phi_i}{|\vec{r}_j-\vec{r}_i|^2}\left(\vec{r}_j-\vec{r}_i\right)\ w\left(|\vec{r}_j-\vec{r}_i|, r_{e,ij}\right)\right] \tag{6}$$

여기에서, normalization factor 는

$$n_i \equiv \sum_{j\neq i} w\left(|\vec{r}_j-\vec{r}_i|, r_{e,ij}\right) \tag{7}$$

으로 정의된다. 또한, 유효반지름을 $r_{e.ij} = (r_{e,i}+r_{e,j})/2$ 이며, 이는 각 계산점의 유효반지름이 다른 경우를 고려한 것이다. 또한 d 는 공간의 차수로서, 본 계산관 같은 2 차원 계산의 경우, d =2 이다.

Divergence 연산자도 Gradient 연산자와 같은 방식으로 이산화된다. 벡터 $\vec{\varphi}$ 의 Divergence 는, $\vec{\varphi}_j-\vec{\varphi}_i$ 와 $\vec{r}_j-\vec{r}_i$ 의 내적을 이용하여, 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\left\langle \nabla\cdot\vec{\varphi} \right\rangle_i = \frac{d}{n_i}\sum_{j\neq i}\left[\frac{(\vec{\varphi}_j-\vec{\varphi}_i)\cdot(\vec{r}_j-\vec{r}_i)}{|\vec{r}_j-\vec{r}_i|^2}\ w\left(|\vec{r}_j-\vec{r}_i|, r_{e,ij}\right)\right] \tag{8}$$

Divergence 어떤 입자 i 의 물리량 ϕ_i 를 주위의 입자 j 에게 분배하는 것으로 표현된다.

$$\left\langle \nabla^2\phi \right\rangle_i = \frac{2d}{\lambda\, n_i}\sum_{j\neq i}\left[\left(\phi_j-\phi_i\right)\ w\left(|\vec{r}_j-\vec{r}_i|, r_{e,ij}\right)\right] \tag{9}$$

중심극한정리에 의해, 위 식이 성립하기 위해서는, 시간 Δt 동안 어떤 입자에서 주위입자로의 물리량의 분배의 총합이 $2d\nu/\Delta t$ 과 일치할 필요가 있으며, λ 는

$$\lambda = \sum_{j\neq i}\left[|\vec{r}_j-\vec{r}_i|^2\ w\left(|\vec{r}_j-\vec{r}_i|, r_{e,ij}\right)\right] \tag{10}$$

이 된다.

2.4 RE-CONFIGURATION PHASE

이 단계에서는, 기체-액체경계면 및 경계조건등을 고려하여, 계산점을 재배치하게 된다. 이상류의 경계면에 항상 계산점이 위치하도록 배치하기 때문에, 기포표면의 운동을 직접적으로 추적할 수가 있게 된다. 또한, 계산점을 비균일하게 배치할 수 있으므로, 온도/속도경계층안에 계산점을 집중적으로 배치하여, 보다 정밀한 온도 및 속도분포를 얻을 수 있다. 계산점의 구체

적인 배치방법은 문제에 따라 다르므로, 각 해석의 조건과 함께 뒤에서 설명하도록 한다.

2.5 CONVECTION PHASE

유체의 물리량은 유동과 함께 대류하기 때문에, 유동에 따라 계산격자를 배치하게 되면, 다차원의 대류문제도 1 차원적인 계산으로 풀 수 있게 된다. MAFL method 에서는, 각 계산점마다 그 계산점에서의 속도벡터 방향으로 국부적인 1 차원격자를 생성하게 된다. 그리하여, 그 격자위에 임시의 계산점을 배치하고, 그 임시계산점에서의 물리량을 주위의 각 계산점의 물리량으로부터 내적으로 구하고, 다시 여기에서 구한 값으로부터 1 차원 differential scheme 을 이용하여 원래의 계산점에서의 물리량을 구하게 된다. 본 계산에서는 differential scheme 으로써 식(11)의 upwind scheme 를 이용하였다.

$$f_i^{n+1} = f_i^L - q\left(f_i^L - \langle f \rangle_{-1}\right) \tag{11}$$

여기에서 $q = |\vec{u}^a| \Delta t / \Delta r$ 이며, Δr 는 임시의 계산점간의 거리이다. MAFL method 의 개념는 그림 2 에 나와있다.

2.6 압축성모델

연속방정식에 압축항을 도입하면, 기체의 압축성의 효과도 근사적으로 계산할 수 있다. Navier-Stokes 방정식의 압력분배항에 등엔트로피 변화식과 연속방정식을 대입하며, 압력포아송방정식을 얻을 수 있다. 본 계산에는, 액체상에서는 비압축성유체 계산식(식 12)을, 그리고 기체상에서는 압축성유체의 계산식(식 13)을 사용한다.

$$\left\langle \nabla^2 P \right\rangle_i^{n+1} = \frac{\rho}{\Delta t} \nabla \cdot \vec{u}^* \tag{12}$$

$$\left\langle \nabla^2 P \right\rangle_i^{n+1} = \frac{\rho}{\Delta t} \nabla \cdot \vec{u}^* + \frac{P^{n+1} - P^n}{c^2 \Delta t} \tag{13}$$

2.7 표면장력모델

액체-기체경계면에 어떤 입자에 가해지는 체적력 F_s 는 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$F_s = \sigma \kappa \cdot \vec{n} \tag{14}$$

여기에서, σ 는 표면장력계수, κ 는 곡률, $\vec{n}$ 는 단위수직벡터이다. 표면의 곡률반경은 3 개의 점을 지나는 원의 반지름이며, 단위수직벡터는 표면에서 중심으로 향하는 벡터의 단위벡터이

다.

3. 핵비등해석

3.1 과도상태에서의 핵비등

경수로에서의 반응도 사고와 같이, 높은 과냉각도의 액체속에서 급격한 출력상승 의해 비등이 일어나는 경우에는, 지금까지의 상관식으로는 void fraction 등의 예측이 힘들었으며, 이처럼 고열유속, 고냉각상태에서의 과도비등현상에 대해서 자료가 부족하였으므로, 현재의 원자로 안전해석에서는 void 의 발생을 무시하고 있다. 여기서는, MPS-MAFL method 를 이용하여, 고열유속, 고냉각 조건에서의 과도비등시의 기포의 발생과 성장과정에 대한 2 차원 수히해석을 수행하였다.

3.2 해석조건

본 해석에서의 해석조건을 표 1 에 정리하였다. 이 해석조건은 저온반응도사고를 가정한 Yamada et al 의 실험을 기준으로 결정되었다. 또한, 초기상태에서의 기포의 형태는 원형이며, 기포의 표면과 가열면 사이의 접촉각은 45° 도이다. 얇은 온도경계층을 보다 정밀하게 해석하기 위해, 액체-기체 경계면의 형태와 온도경계층을 고려하여, 계산계를 4 개의 영역으로 나눠, 기포주위에 더 많은 수의 계산점이 배치되도록 하였다.

기포 안에서의 물리량은 균일하다고 가정하였으며, 기포속에는 계산점을 배치하지 않았다. 또한, 증발과 응축에 의한 기체질량의 변화와 경계면의 운동에 의한 부피의 변화에 의해, 기체압력이 변화되게 된다. 기체의 온도는 포화온도로 가정되어 있으며, 경계면위에 위치한 계산점의 온도 및 압력도 기체와 같다고 가정하였다. 압력계산에서는 표면장력의 영향이 고려된다. 열전도계산 뒤에, 경계면에 위치한 계산점의 온도가 포화온도와 다를 경우에는, 그 차이만큼의 에너지가 전부 액체의 증발 혹은 기체의 응축에 의한 잠열로 소비되는 것을 가정하였다. 그러나, 온도경계층이 아직 발달하지 않은 초기상태에서는, 경계면의 이동이나 응축은 계산하지 않았다. 아랫면과 측면에서는 non-slip 경계조건이 사용되었으며, 계산계의 아래에 있는 가열면에서는 일정한 열유속으로 열을 공급하기 위한 온도분포를 계산하게 된다.

3.3 해석결과

초기반지름이 $50\text{x}10^{-6}$ m 인 경우의 기포의 형태와 반지름의 변화를 그림 3 에 표시하였다. 기

포는 0.0162 초부터 성장을 시작하여, 0.1363 초에 가열면으로부터 이탈하였다. 그뒤, 가열면으로부터의 유입되는 열이 적어지고, 높은 과냉각도를 가진 액체에 의한 냉각으로 급격하게 응축하게 된다.

기포의 부피의 변화(식 4)에 의하면, 기포의 초기반지름이 작을수록 성장을 시작하는 순간이 이르다는 것을 알 수 있다. 이는, 과도비등에서는 가열면 부근의 온도가 국소적으로 상승하기 때문에 작은 기포핵이 보다 먼저 성장개시 조건을 만족하기 때문에 나타나는 현상으로, 정상비등에서는 기포핵의 초기반지름이 클수록 낮은 열유속에서 성장이 시작하는 것과는 대조적인 결과이다. 하지만, 기포가 성장하는데 걸리는 시간과 초기반지름 사이에서는 큰 연관관계를 찾아볼 수 없다. 기포가 가열면에서의 이탈할 때의 부피도 거의 비슷하였다.

Yamade et al 의 실험에서는 0.08~0.1 초에서 void fraction 의 급격한 상승이 관찰되어있으며, 이 해석결과에서의 기포 성장 시점과 거의 일치하였다.(식 5) 여기에서는, 발포점밀도를 4x10^5 /m^2 로 가정하여 정량적인 기포율을 가정하고 있으나, 현재로는 과도비등시의 발포점밀도의 정확한 예측이 불가능하기 때문에, void fraction 의 정량적인 비교는 어렵다.

4. 밀도차가 큰 이상류에서의 막비등해석

4.1 막비등해석

원자로에서는, 사고시 노심출력의 증가 및 노심냉각의 악화에 의해, 노심내에서 막비등이 발생할 가능성이 있다. 또한, 막비등현상을 이해하고, 여러 조건하에서의 막비등시의 열유속 등을 예측하는 것은, 원라로 안전에 있어서 중요한 문제중 하나이다. 그러나, 막비등은 핵비등과는 달리 액체는 물론 기체의 온도분포와 유동을 해석할 필요가 있으며, 여기에 수반되는 여러 모델이 개발되었다.

4.2 해석조건

막비등 수치해석에 사용된 계산조건을 표 2 에 정리하였다. 이 예산에서는, 계산계 윗부분의 기압을 1 기압으로 유지하였으며, 아랫부분에 있는 가열면의 가열도는 200 ~ 400℃이다. 또한 경계면의 초기위치는 식(15)로 결정된다.

$$y_s = y_c + \varepsilon\left[\cos\left(\frac{2\pi nx}{L}\right) + \sin\left(\frac{\pi nx}{L}\right)\right] \tag{15}$$

여기에서 y_c 는 경계면 평균위치이며, ε 는 변위이다.

4.3 막비등 해석결과

계산결과중에서, 가열면의 온도가 500°인 경우의 증기막안의 온도분포를 그림 6 에 나타내었다. 그림 6(a)는 유체의 초기상태로, 위로부터 액체, 증기막, 가열면 순으로 되어있다. 가열초기에서는 유체의 대류가 거의 없기 때문에, 열은 대부분 전도를 통해 전달되며, 가열면 부근만이 가열되고 있다. 그뒤, 증발에 의해 증발량이 증가하게 되면, 증기막의 평균두께도 증가하며, 불안전성에 의해 증기막이 얇아지는 부분이 생겨나게 된다. 그렇게 되면, 이 얇은 부분을 통하여 더 많은 열이 전달되게 되며, 증기막 속에 대류도 생겨내게 된다. 또한, 증기의 대류가 발달하게 되면, 증기막 상부에 있는 저온의 증기가 가열면으로 공급되게 되며, 이 증기순환에 의해 가열면부근의 증기의 평균온도는 반대로 낮아지게 되며, 이또한 열전달을 증가시키기게 된다.

가열면에서의 평균열전달률의 변화를 그림 7 에 표시하였다. 또한, 각 조건에서의 평균열유속을 표 3 에 정리하였다. 이 표에서 MPS-MAFL 계산결과와 Berenson 식에서의 열유속을 비교했을 때, 이 계산에서의 값이 Berenson 식의 약 40~60%정도로 더 낮을 것을 알 수 있다. 또한, 평균증기막 두께 및 계산점간 최소거리가 작은 경우에 열유속이 더 낮을 것을 알 수 있다. 이 계산에서는 Berenson 식에서 가정한 증기막 두께보다 더 두꺼웠기 때문에, 열유속이 더 낮게 나온 것으로 보여진다.

4. 결론

ALE 계산이 가능한 MPS-MAFL method 를 이용하여, 과도비등에서의 기포성장에 대한 수치해석을 수행하였다. 고열유속, 고냉각조건에서는, 작은 기포핵이 큰 기포핵보다 먼저 성장하기 시작한다는 것을 알 수 있었다. 이것으로 과도비등에서는 작은 기포가 대량으로 발생하여 가열면표면을 덮게 된다는 Yamada et al 의 실험결과을 설명할 수 있었다.

또한, MPS-MAFL method 를 이용하여, 밀도차가 큰 이상류를 다룰 수 있는 핵비등해석코드를 개발하였으며, 이를 이용하여, 대기압하에서 물의 막비등해석을 수행하였다. 막비등에서의 증기막내의 유동을 계산할 수 있었으며, 막비등의 열전달과정을 재현할 수가 있었다. 그러나, 열전달률은 Berenson 식보다 낮았으며, 정량적인 비교에는 불충분 했다.

표 1. 핵비등해석조건

유체초기온도	27℃
압력	1 기압
가열면열유속	2 MW/m^2
초기기포반지름	30 ˜ 300 ㎛
접촉각	45 °

표 2. 막비등해석조건

유체	물－기체	
기압	1 기압	
초기 유체 온도	100℃	
가열면온도	200 ~ 400 ℃	
폭과 높이	15.7 x 30 mm	
최소 입자간거리	0.1 mm	0.05 mm
경계면의 초기평균위치, y_c	0.6 mm	0.4 mm
경계면의 초기변위, ε	0.18 mm	0.12 mm

표 3. 막비등해석에서의 열유속

가열면 과열도 [℃]	200	300	400
Berenson 식의 값	40.77	59.04	75.35
MPS-MAFL 계산의 열유속 Δr_{min} =0.1 mm 의 경우	16.93 (41.5%)	22.63 (38.3%)	30.21 (42.7%)
MPS-MAFL 계산의 열유속 Δr_{min} =0.05 mm 의 경우	23.78 (58.3%)	31.07 (52.6%)	38.19 (50.7%)

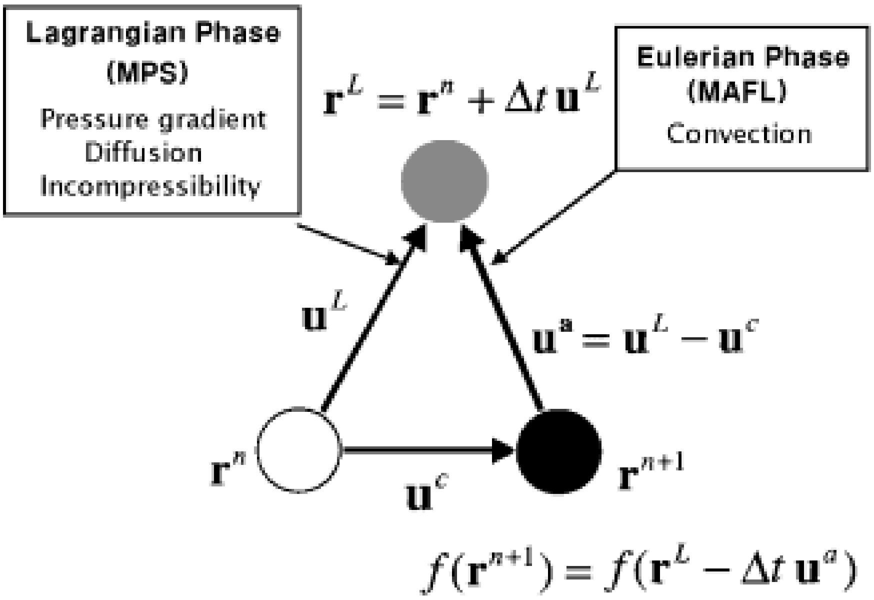


그림 1. 각 위치벡터와 속도의 관계

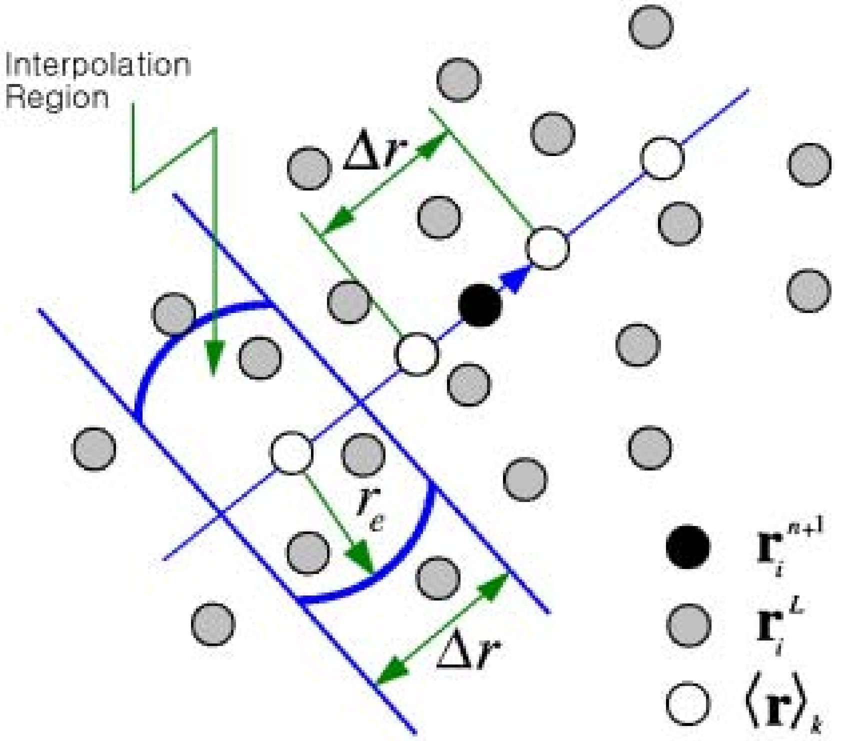
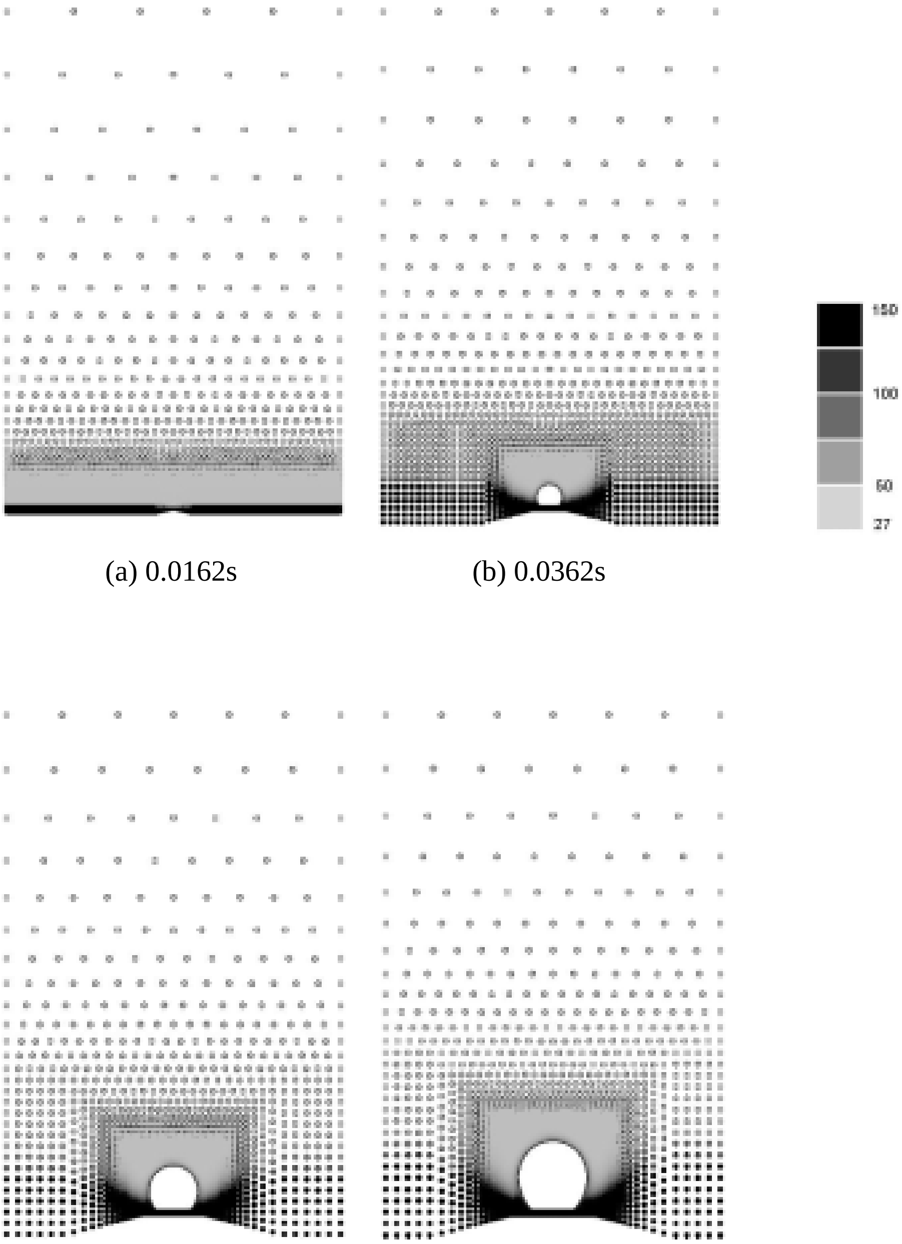


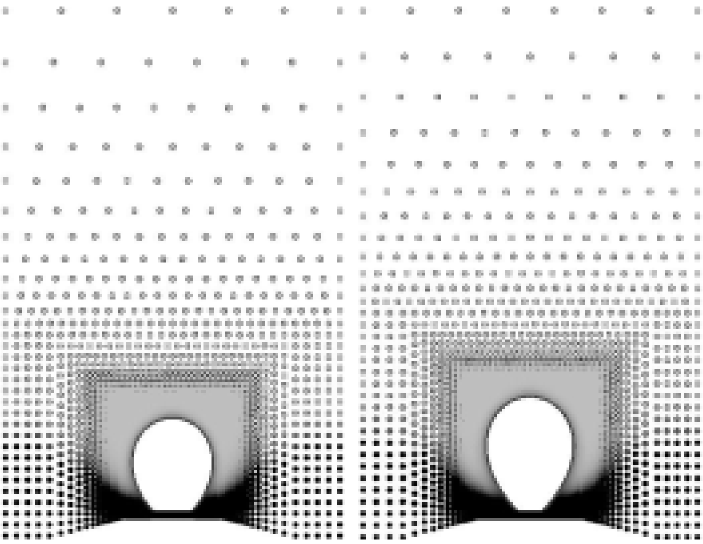
그림 2. MAFL method



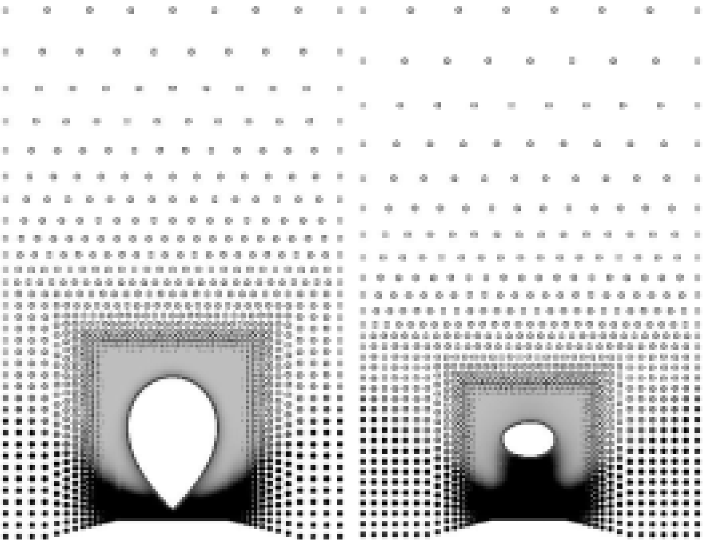
(a) 0.0162s (b) 0.0362s

(c) 0.0562s (d) 0.0762s

그림 3. 핵비등해석결과 (r_{init}=50 ㎛)



(e) 0.0962s　　　　(f) 0.1162s



(g) 0.1363s　　　　(h) 0.1463s

그림 3. 핵비등해석결과 (r_{init}=50 ㎛) (계속)

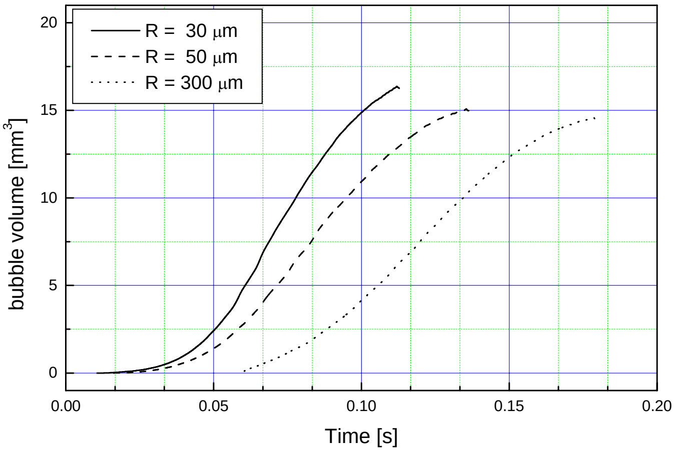


그림 4. 초기 기포 반지름의 영향

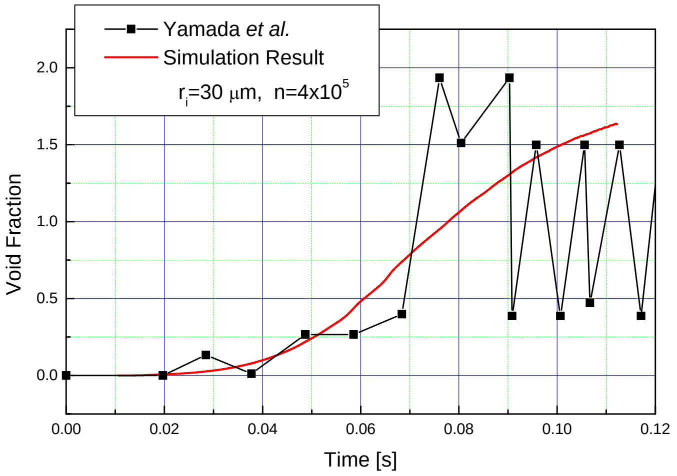
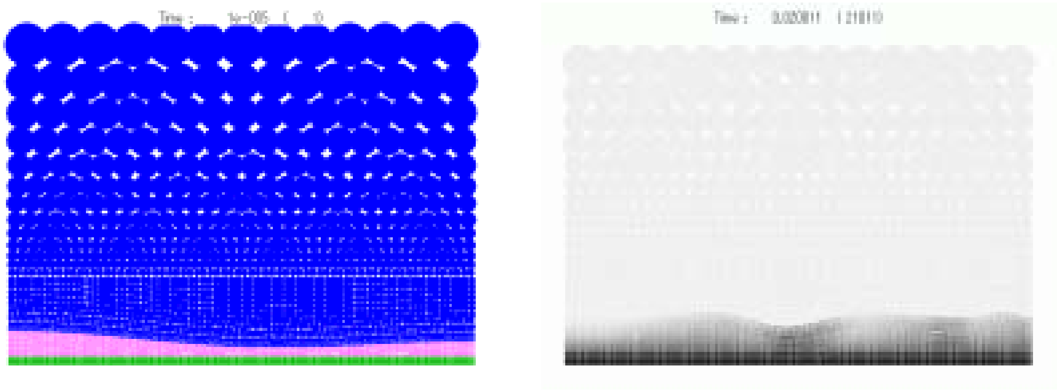
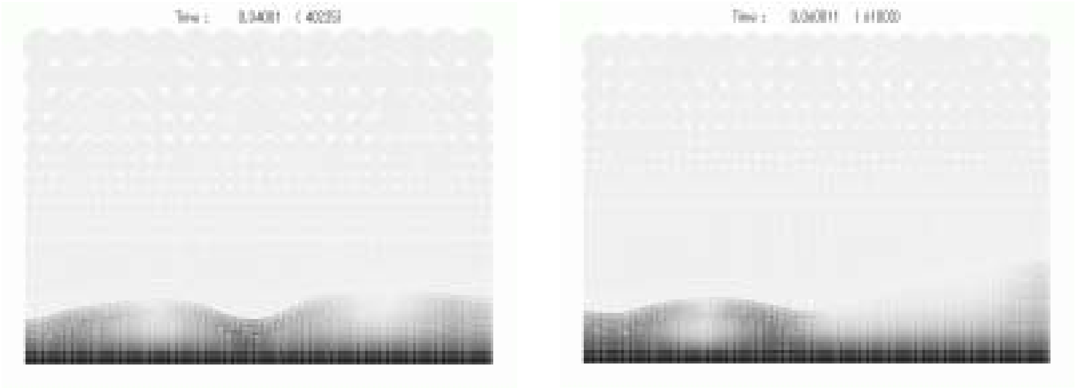


그림 5. Yamada et al 의 실험결과와의 비교



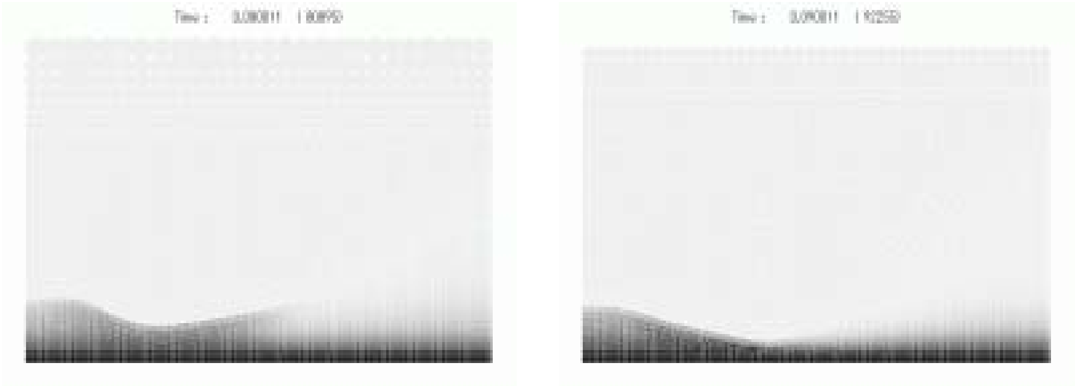
a) initial shape

b) 0.02 sec



c) 0.04 sec

d) 0.06 sec



e) 0.08 sec

f) 0.09 sec

그림 6. 막비등해석결과

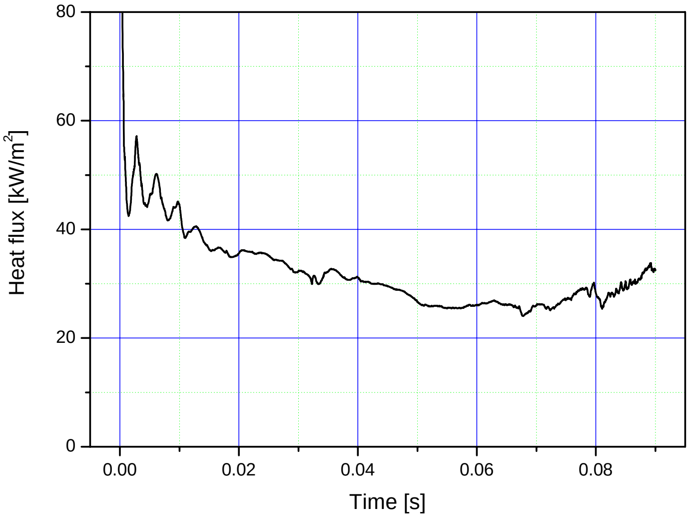


그림 7. 열전달률