2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

수직 원관의 상향 및 하향 기포유동에 대한 수치해석

Numerical Analysis of Upward and Downward Bubbly Flows in a Vertical Pipe

인왕기, 오동석, 전태현
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구는 2-유체 모델을 이용하여 수직 원관에서 상향 및 하향 공기/물의 기포유동에 대한 수치해석을 수행하였다. 액체유동에 대한 난류모델은 표준 $k-e$ 모델을 사용하였으며 기포에 의한 부가적인 난류효과는 액체 난류효과와 선형적으로 중첩되었다. 축방향 대칭유동 조건을 이용하여 계산을 수행하였으며 실험결과와 비교하였다. 기공률(void fraction)이 낮은 상향유동의 경우(<0.1) 예측된 기공률 분포와 속도분포 등은 측정결과와 잘 일치하였으나 기공률이 증가할수록 측정결과와 다소 큰 차이를 나타냈다. 한편 상향 기포유동의 경우 벽 근처에서 기공률이 최대가 되고 ("wall peaking of void") 하향 유동의 경우에는 원관 중심부에서 기공률이 크게 나타나는 ("void coring") 현상이 잘 예측되었다.

Abstract

This study performed a numerical analysis of upward and downward air/water bubbly flow in a vertical pipe using the two-fluid model. The standard $k-e$ model was used to simulate the shear-induced turbulence of liquid flow and the effect of bubbles on the turbulent field was linearly superimposed. An axisymmetric flow simulation was conducted in this study for the comparison with the experimental results. The predicted radial distributions of void fraction and liquid velocity, etc. for upward flow showed an excellent agreement with the measurements at low void fraction (<0.1) and somewhat larger difference at higher void fraction. This numerical simulation clearly indicated a distinct void peak near the wall for upflows and a migration of the air bubble toward the center of the pipe causing "void coring" for downflows.

1. 개 요

2상유동에 대한 실험 및 해석적인 연구가 지금까지 많이 수행되었으나 아직도 2-유체의 횡방향 분포 기구에 대한 이해가 부족한 실정이다. 이는 2상유동이 다차원의 복잡한 특성을 지니고 있으며 특히 2-유체 경계면에서의 상호작용 및 난류구조에 대한 이해가 충분하지 못하기 때문이다. 수직 원관에서의 기체/액체 2상유동은 축방향 대칭 유동이므로 이에 대한 연구가 활발하게

이루어졌다. 완전발달 난류 기포유동에 대한 실험적인 연구가 Serizawa 등[1], Wang 등[2] 및 Nakoryakov 등[3]에 의해 광범위하게 수행되었다. 이들의 연구결과 상향 기포유동의 경우 벽면 근처에서 최대 기공률이 발생하고 하향 유동의 경우에는 중심부의 기공률이 증가하는 것으로 나타났다. Liu 와 Bankoff[4,5]는 수직 원관 2 상유동의 난류구조에 대한 연구를 통해 기체유량의 상대적 증가는 액체유동의 난류를 증가시키지만 액체유량의 상대적 증가는 액체유동의 난류를 감소시키는 것으로 보고하였다. 이들은 기포에 의해 발생된 난류강도도 액체유동의 난류강도와 동일한 변화를 나타내는 것을 발견하였다. 한편 2 상유동의 해석모델에 대한 연구도 많이 이루어졌으나 지나치게 단순화된 해석모델을 이용한 유동분석은 실제 현상을 잘 예측하지 못하고 있다. 현재 주로 사용되는 2 상유동 해석모델은 Ishii[6]의 3 차원 시간평균 2 상유동 보존방정식을 이용한 Lahey 와 Drew[7]의 2-유체 모델이다. 2-유체 모델은 난류 레이놀즈 응력과 더불어 기체-액체 경계면에 작용하는 힘을 포함하고 있다. 즉 수치해석을 위해서는 레이놀즈 응력과 경계면에 작용하는 힘에 대한 구성 관계식이 필요하다. 2 상유동에 대한 난류모델은 Bertodano 등[8]이 표준 $k-e$ 모델을 개량한 형태로, Sato 등[9]이 제안한 액체유동의 난류성분과 기포에 의한 부가적인 난류성분을 선형적으로 중첩한 모델이다.

이 연구는 난류 2 상유동 수치해석을 위한 범용 전산유체역학(CFD) 코드인 CFX4 의 적용 가능성을 평가하고 2 상 난류유동의 해석모델을 고찰하기 위해 수행되었다. 수직 원관에서의 상향 및 하향 기포유동에 대한 2-유체의 횡방향 분포, 속도와 난류에너지 분포 등의 CFX4 계산결과를 Wang 등[2]의 실험결과와 비교하였다.

2. 2 상 난류유동 해석모델

2.1 2-유체 모델

2 상유동의 수치해석을 위해서 가장 널리 이용되는 해석모델은 균질유동 모델과 2-유체 모델이다. 이 연구에서 이용한 공기와 물의 단열 기포유동에 대한 2-유체 모델의 질량과 에너지 보존방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(a_k r_k\right)+\nabla \bullet\left(a_k r_k \vec{U}_k\right)=0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(a_k r_k \vec{U}_k\right)+\nabla \bullet\left(a_k r_k \vec{U}_k \vec{U}_k\right)=\nabla \bullet\left[a_k m_k^e\left(\nabla \vec{U}_k+\left(\nabla \vec{U}_k\right)^T\right)\right]-a_k \nabla p_k+a_k r_k g+M_{ki} \qquad (2)$$

여기서 a_k, r_k, p_k 와 $\vec{U}_k$ 는 각각 유체 k 의 체적비율, 밀도, 압력과 속도를 나타내며 M_{ki} 는 2 상 경계면에서의 단위체적당 운동량 전달률을 나타내고 m_k^e 는 유체 k 의 유효 점성계수를 의미한다.

2 상 경계면에서의 운동량 전달 항 M_{ki} 는 여러가지 물리적인 역학관계를 나타내는 항들의 중첩으로 아래와 같이 표현된다.

$$M_{ki}=M_{ki}^d+M_{ki}^{vm}+M_{ki}^L+M_{ki}^{LW}+M_{ki}^{TD} \qquad (3)$$

식(3)의 오른쪽 항들은 각각 drag force, virtual mass force, lift force, lubrication force

와 turbulent dispersion force를 나타낸다. 먼저 drag force는 Ishii와 Mishima[10]가 제시한 다음의 관계식을 이용한다.

$$M_{Li}^{d} = -M_{Gi}^{d} = \frac{3}{4}\frac{C_D}{d_b}a_G r_L \left|\vec{U}_G - \vec{U}_L\right|\left(\vec{U}_G - \vec{U}_L\right) \tag{4}$$

여기서 C_D는 항력계수로써 점성유동 영역에서는 일반적으로 Ishii와 Zuber[11]의 관계식을 이용한다. 2-유체 사이의 가속도 차이로 인한 virtual mass force는 Drew와 Lahey[12]의 관계식을 이용한다.

$$M_{Li}^{vm} = -M_{Gi}^{vm} = C_{vm}a_G r_L \left(\frac{D\vec{U}_G}{Dt} - \frac{D\vec{U}_L}{Dt}\right) \tag{5}$$

기포에 작용하는 양력(lift force)은 Zun[13]과 Drew와 Lahey[12]가 제안한 관계식이 사용된다.

$$M_{Li}^{L} = -M_{Gi}^{L} = C_L a_G r_L \left(\vec{U}_G - \vec{U}_L\right) \times \left(\nabla \times \vec{U}_L\right) \tag{6}$$

여기서 항력계수 C_L은 0.01과 0.5 사이의 값을 갖는 것으로 알려져 있다. 양력은 액체속도 기울기로 인한 기포 주위의 액체의 순환(circulation)에 의한 횡방향의 힘을 의미한다. 또한 Antal 등[14]은 벽과 기포 사이에서의 윤할 효과에 의한 횡방향의 힘(lubrication force)에 대한 아래와 같은 관계식을 제안하였다. 이 힘은 벽면으로부터 기포를 밀어내는 역할을 한다.

$$M_{Li}^{LW} = -M_{Gi}^{LW} = \frac{a_G r_L \left(\vec{U}_G - \vec{U}_L\right)^2}{d_b} \cdot Max\left(C_1 + C_2\frac{d_b}{y_w}, 0\right)\vec{n} \tag{7}$$

식(7)에서 y_w는 기포와 벽 사이의 거리이며 $\vec{n}$는 벽면으로부터 수직한 벡터를 나타낸다. C_1과 C_2는 실험상수로 Antal 등에 의하면 2차원 비점성 층류 기포유동의 경우에는 약 –0.2와 0.147의 값을 갖지만 대부분의 경우에는 실험결과에 맞게 조정된다. 마지막으로 Lahey 등[15]은 난류확산에 의한 횡방향의 기체 분포에 영향을 미치는 힘(turbulent dispersion force)을 다음과 같이 제안하였다.

$$M_{Li}^{TD} = -M_{Gi}^{TD} = C_{TD} r_L k_L \nabla a_G \tag{8}$$

실험상수 C_{TD}는 0.1이 주로 사용된다.

2.2 기포유동 난류모델

표준 $k-e$ 모델을 기본으로 Bertodano 등[8]이 개발한 2상 기포유동의 난류모델은 액체의 전단유동에 의한 난류성분과 기포에 의한 난류성분의 연관성이 매우 적다는 가정 하에 Sato 등[9]이 제안한 다음과 같은 선형적 중첩모델을 이용한다.

$$m_L^t = m_L^{t(SI)} + m_L^{t(BI)} \tag{9}$$

여기서 전단유동에 의한(shear-induced) 난류 에디 점성계수는 단상유동의 표준 $k-e$ 모델을 사용하고 기포에 의한(bubble-induced) 부가적인 난류 에디 점성계수는 Sato 등의 혼합거리 개념을 이용한 다음의 모델을 이용한다.

$$m_L^{t(SI)} = r_L C_m \frac{k_{L(SI)}^2}{e_L} \tag{10}$$

$$m_L^{t(BI)} = r_L C_{mb} \frac{d_b}{2} a_G \left| \overset{\varpi}{U}_R \right| \tag{11}$$

여기서 실험상수 C_m 와 C_{mb} 는 각각 0.09 와 1.2 이다. 결과적으로 운동량 방정식 (2)의 액체유동에 대한 유효 에디 점성계수는 식(9)를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$m_L^e = m_L + m_L^{t(SI)} + m_L^{t(BI)} \tag{12}$$

$$m_G^e = m_L^e \frac{r_G}{r_L} \tag{13}$$

3. 수치해석

2-유체 모델의 타당성과 범용 전산유체역학 코드인 CFX4 의 2 상유동 수치해석 결과를 평가하기 위해 Wang 등[2]의 수직 원관에서의 기포유동 실험을 모사하였다. 원관의 직경(D)은 57.2 ㎜ 이고 길이는 2 m 이다. 계산시간을 줄이기 위해 유동의 대칭성을 이용한 2 차원 축대칭 계산을 수행하여 3 차원 계산결과 및 실험결과와 비교하였다. 원관 입구와 출구에서는 각각 균일유동과 일정 압력 조건을 사용하였으며 중심에서는 대칭유동조건을 사용하였다. 벽면에서는 액체유동의 경우 no slip 조건과 기체유동의 경우에는 free slip 조건을 각각 설정하였다. 2 상 경계면에 작용하는 실험 관계식들(식(5)-식(8)) 중에서 기포의 횡방향 분포에 영향이 적은 virtual mass force 는 이 계산에서 제외하였다. 하향 기포유동의 경우 벽면 근처에서의 기공률이 매우 낮으므로 lubrication force 의 영향을 무시하였다. 이 계산에 사용된 실험 관계식들의 최적 값들은 다음과 같다.

$$C_L = 0.1,\ C_1 = -0.01,\ C_2 = 0.025,\ C_{TD} = 0.1,\ C_{mb} = 1.2 \tag{14}$$

2 차원 축대칭 계산의 경우 축(x-)방향 전산격자 수는 200 이고 반경방향 전산격자 수는 10, 20, 30, 40 으로 변화시켰다. 그림 1 은 각각 기포와 액체속도의 횡방향 분포에 대한 반경방향 전산격자 개수의 변화에 따른 2 차원 축대칭 계산결과를 보여준다. 반경방향 전산격자 수의 증가

에 따라 계산결과의 차이가 감소하여 30 이상에서는 미미한 차이를 나타냄을 알 수 있다. 따라서 계산결과의 정확도와 계산시간 등을 고려한 최적의 전산격자 수는 200x30(x-r 방향)인 것으로 판단된다. 3차원 계산을 위해서 실험에 사용된 원관 전체를 모델링 하였으며 원관 단면에서의 전산격자 수는 1125개이고 축방향으로는 200개를 사용하였다. 그림 2는 2차원 축대칭 계산결과와 3차원 계산결과를 비교한 것으로 거의 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 2차원 축대칭 모델(200x30 cells)을 이용한 계산결과와 실험결과를 비교하였다.

4. 수치해석 결과 및 고찰

수직 원관에서의 상향 및 하향 완전발달 기포유동에 대한 횡(반경)방향의 기공률과 액체속도 및 난류에너지 분포 등의 CFX4 계산결과를 Wang 등의 실험결과와 비교하였다. 그림 3과 그림 4는 액체 겉보기 속도(j_L)가 1.08 m/s이고 기체 겉보기 속도(j_G)가 각각 0.1, 0.4 m/s인 상향 유동에 대한 비교를 보여주고 있다. j_G=0.1 m/s인 경우 횡방향 기공률(α_G) 분포(그림 3)의 계산결과는 측정결과와 잘 일치하는 것으로 나타났으며 기체유속이 증가하여 j_G=0.4 m/s인 경우에는 원관 중심부에서 측정치에 비해 다소 높게 계산되었다. 기공률의 측정오차가 약 20% 정도인 것을 고려하면 계산결과가 적절한 것으로 판단된다. 측정결과와 마찬가지로 계산결과는 벽면으로 갈수록 기공률이 현저히 증가하고 벽면 근처에서는 다시 감소하는 현상(wall peaking of void)을 잘 나타내고 있다. 그림 3의 액체속도(U_L) 분포는 j_G=0.1 m/s인 경우 벽면에 매우 가까운 지점을 제외하고는 계산결과와 측정치가 잘 일치하고 있다. j_G=0.4 m/s인 경우에는 기공률 분포가 크게 예측되어 계산된 액체유동 속도도 측정속도보다 다소 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 한편, 그림 4에 도시한 액체유동의 난류에너지($k_L = \left(u'^2 + v'^2 + w'^2\right)/2$) 분포는 원관 중심부에서 계산결과와 측정결과가 비교적 잘 일치하고 있으나 벽면에 근접할수록 난류에너지가 크게 증가하는 것으로 예측되었다. 이는 사용된 표준 $k-e$ 모델의 부정확성도 있지만 벽면근처에서는 기포가 크게 증가하므로 액체 난류성분과 기포에 의한 난류성분을 선형적으로 중첩하는 Sato 등의 모델이 부적합한 것으로 판단된다.

그림 5는 2상 경계면에 작용하는 힘들의 횡방향 분포를 보여주는 것으로 모두 벽면 근처에서만(r/R>0.75) 그 영향이 나타나는 것을 알 수 있다. 양력(lift force)은 기포를 원관 중심에서 벽쪽으로 밀어내는 힘(+)으로 작용하고 lubrication force는 반대로 기포를 벽면으로부터 안쪽으로 미는 힘(-)으로 작용한다. 또한 turbulent dispersion force는 식(8)과 같이 기공률 분포의 기울기에 따라 기포를 벽면 또는 중심부쪽으로 이동시키는 역할을 한다. 전체적으로 기공률의 횡방향 분포는 이 세가지 힘의 평형에 의해 결정되지만 lift force와 lubrication force의 영향이 큰 것을 알 수 있다. 그림 6은 기공률 분포에 대한 양력과 lubrication force 각각의 영향을 보여주는 것으로 양력이 증가하면 기포는 벽쪽으로 더 많이 이동하게 되고 lubrication force가 없을 경우에는 벽쪽으로 갈수록 기공률이 크게 증가하고 있음을 알 수 있다.

그림 7은 상향 기포유동의 액체유속 변화에 따라 계산된 기공률 분포를 측정분포와 비교한 것이다. 그림 3(j_L=1.08 m/s)과 그림 7(j_L=0.71, 0.94 m/s)에 의하면 기체유속이 일정한 경우 액체유속이 감소함에 따라 평균 기공률이 증가하면서 예측된 기공률은 측정치보다 점점 작아지는 경향을 나타내고 있다. 이는 기공률이 증가하면 기포의 결합과 분열의 발생 가능성이 높기 때문에 다양한 기포 크기를 고려한 모델의 사용이 필요한 것으로 판단된다. 또한 2상 경계면에 작용하는

힘들의 실험상수는 2-유체의 속도에 따라 적절한 조정이 필요하다.

그림 8은 하향 기포유동(j_L=1.08 m/s, j_G=0.1 m/s)에 대한 기공률 및 액체속도 분포를 비교한 것으로 상향유동의 경우(그림3)와는 다른 특성을 보이고 있다. 즉 하향 기포유동의 경우 원관 중심부의 기공률이 증가하고 벽면 근처((r/R>0.75)의 기공률이 급격히 감소하는 현상(void coring)을 예측치와 측정치 모두 잘 나타내고 있다. 그러나 예측된 기공률은 측정치보다 다소 높게 나타났다. 액체속도 분포는 상향유동의 경우와 마찬가지로 전형적인 완전발달 유속분포를 보이고 있으며 예측된 액체속도는 측정속도보다 약간 크게 나타났으며 기공률의 변화가 큰 영역(0.8<r/R=0.9)에서 가장 큰 차이를 보이고 있다. 그림 9는 2상 경계면에 작용하는 힘의 평형상태를 보여주는 것으로 원관 중심부((r/R<0.75)에서 양력(lift force)만이 미약하게 나타나고 벽면 근처에서는 양력과 turbulent dispersion force가 크게 작용하는 것을 알 수 있다. 즉 기포를 벽쪽으로 밀어내는 양력은 매우 작고 반대로 기포를 중심으로 향하게 하는 힘은 큰 것을 의미한다. 그림 10은 난류에너지 분포를 비교한 것으로 측정된 난류에너지는 반경방향으로 변화가 매우 작은 반면에 예측된 난류에너지는 원관 중심부에서 매우 낮고 벽면 근처에서 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 보다 정확한 하향 기포유동의 수치해석을 위해서는 표준 $k-e$ 모델과 Sato 등의 기포난류 중첩모델의 개선이 필요한 것을 의미한다.

한편, 그림 11은 하향 기포유동의 액체유속 변화에 따른 기공률 분포를 비교한 것으로 그림 7의 상향유동의 비교결과와는 다른 것을 알 수 있다. 즉 기체유속이 일정한 경우 액체유속이 감소할수록 예측된 기공률은 상향유동의 경우 측정치와 차이가 증가하는 반면에 하향유동의 경우(그림 8과 그림 11)에는 측정치와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 기포유동의 특성을 고려한 새로운 2상유동 해석모델, 특히 2상 경계면에 작용하는 물리적 현상에 기초한 2상유동 모델의 개발이 필요한 것으로 보인다.

5. 결론

수직 원관에서 상향 및 하향 공기/물의 기포유동을 범용 전산유체역학 코드인 CFX4를 이용하여 분석하였다. 수치해석에 사용된 2상유동 모델은 2-유체 모델이며 기포의 난류는 액체유동의 난류와 선형적으로 결합되었다. 예측된 횡방향 기공률과 액체속도 분포는 측정결과와 비교적 잘 일치하였다. 상향 기포유동의 경우 벽면 근처에서 기공률이 급격히 증가하는 현상(wall peaking of void)과 하향류의 경우 기공률이 벽면 근처에서 급격히 작아지고 원관 중심부에서 증가하는 현상(void coring)이 잘 예측되었다. 횡방향 기공률 분포는 상향 기포유동의 경우 양력(lift force)과 lubrication force의 영향을 크게 받으며 하향류인 경우에는 양력과 turbulent dispersion force의 영향을 주로 받는 것으로 나타났다. 이러한 기존의 2상 경계면 인자들은 벽면 근처의 기공률 분포에 큰 영향을 미칠 뿐 중심부에서는 그 영향이 미미하므로 이를 고려한 2-유체 모델의 개선이 요구된다. 아울러 기공률 증가에 따른 기포의 결합과 분열 모델의 응용 및 액체난류와 기포난류의 비선형적 중첩모델의 개발도 필수적인 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 연구개발사업의 일환으로 이루어졌으며 이에 대하여 관

계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

[1] Serizawa, A., Kataoka, I., and Michiyosi, I., 1986, "Phase distribution in bubbly flow," Proc. of the Second Int'l Workshop on Two-Phase Flow Fundamentals, Data Set No. 24.

[2] Wang, S. K., Lee, S. J., Jones, O. C. Jr., and Lahey, R. T. Jr., 1987, "3-D turbulence structure and phase distribution measurements in bubbly two-phase flows," Int. J. Multiphase Flow, Vol. 13, No. 3, pp. 327-343.

[3] Nakoryakov, V. E., Kashinsky, O. N., Randin, V. V., and Timkin, L. S., 1996, "Gas-liquid bubbly flow in vertical pipes," J. Fluids Engineering, Vol. 118, pp. 377-382.

[4] Liu, T. J. and Bankoff, S. G., 1993, "Structure of air-water bubbly flow in a vertical pipe – I," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 6, pp. 1049-1060.

[5] Liu, T. J. and Bankoff, S. G., 1993, "Structure of air-water bubbly flow in a vertical pipe – II," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 6, pp. 1061-1072.

[6] Ishii, M., 1975, Thermo-fluid dynamic theory of two-phase flow, Eyrolles.

[7] Lahey, R. T. Jr., and Drew, D., 1990, The current state-of-the-art in the modeling of vapor/liquid two-phase flow, ASME Reprint, 90-WA/HT-13.

[8] Bertodano, M. L., Lahey, R. T. Jr., and Jones, O. C. Jr., 1994, "Development of a model for bubbly two-phase flow," J. Fluids Engineering, Vol. 116, pp. 128-134.

[9] Sato, Y., Sadatomi, M., and Sekoguchi, K., 1981, "Momentum and heat transfer in two-phase bubbly flow – I," Int. J. Multiphase Flow, Vol. 7, pp. 167-177.

[10] Ishii, M. and Mishima, K., 1984, "Two-fluid modeling and hydrodynamic constitutive relations," Nucl. Engng Design, Vol. 82, 107.

[11] Ishii, M. and Zuber N., 1979, "Drag coefficient and relative velocity in bubbly, droplet or particulate flows," AIChE J., Vol. 25, pp. 843-855.

[12] Drew, D. A., and Lahey, R. T. Jr., 1987, "The virtual mass and lift force on a sphere in rotating and straining inviscid flow," Int. J. Multiphase Flow, Vol. 13, No. 1, pp. 113-121.

[13] Zun, I., 1980, "The transverse migration of bubbles influenced by walls in vertical bubbly flow," Int. J. Multiphase Flow, Vol. 6, No. 6, pp. 583-588.

[14] Antal, S. P., Lahey, R. T. Jr., and Flaherty, J. E., 1991, "Analysis of phase distribution in fully developed laminar bubbly two-phase flow," Int. J. Multiphase Flow, Vol. 17, No. 5, pp. 635-652.

[15] Lahey, R. T. Jr., Bertodano, M. L., and Jones, O. C. Jr., 1993, "Phase distribution in complex geometry conduits," Nucl. Engng Design, Vol. 141, pp. 177-201.

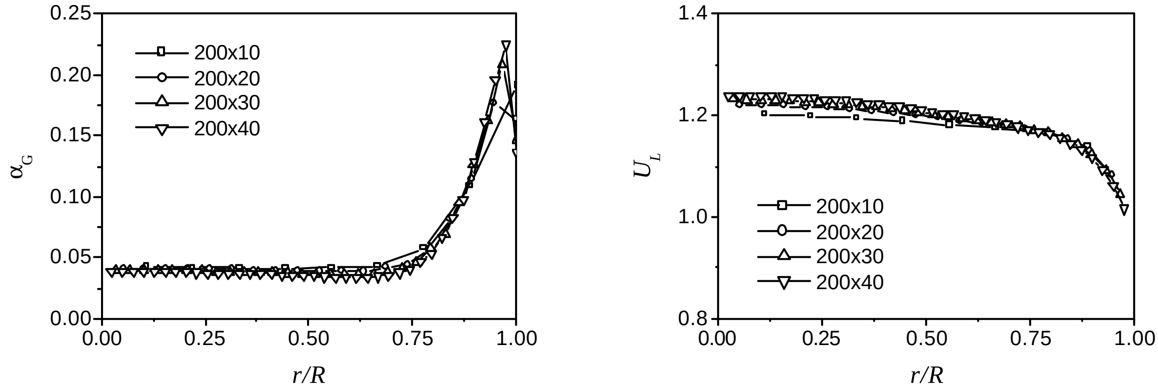

그림 1. 반경방향 전산격자 수에 따른 기공률 및 액체속도 분포 비교

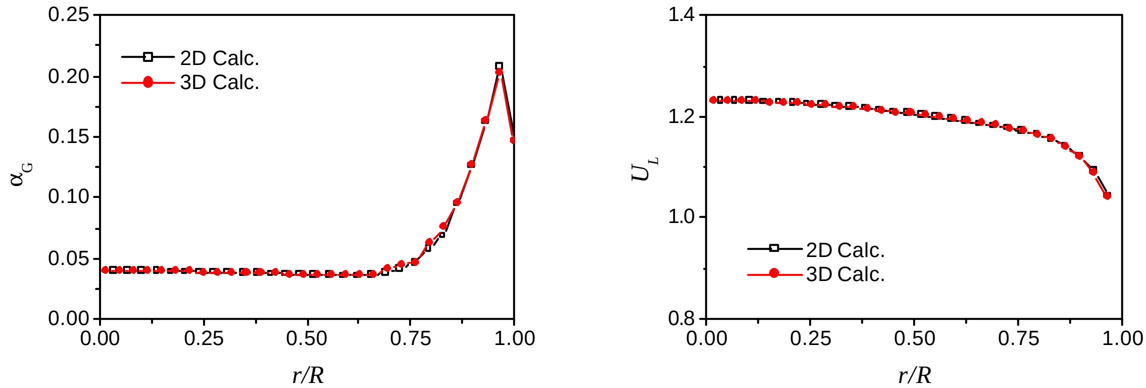

그림 2. 2차원 축대칭 계산 및 3차원 계산결과 비교

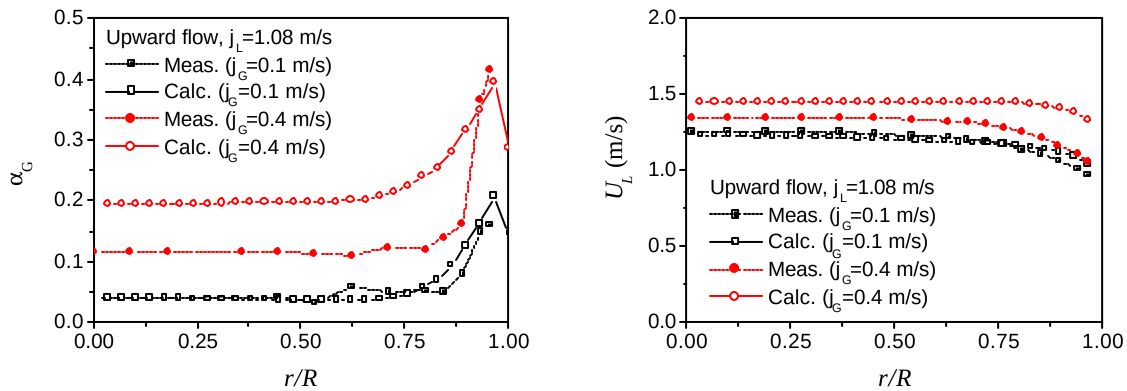

그림 3. 상향 기포유동의 횡방향 기공률 및 액체속도 분포

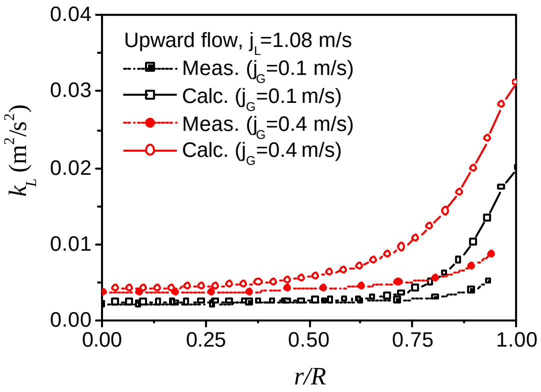

그림 4. 상향 기포유동의 횡방향 난류에너지 분포

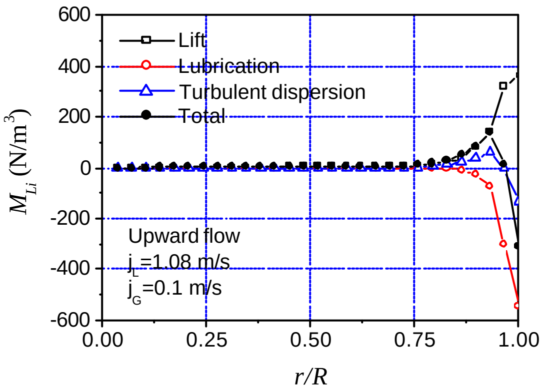

그림 5. 2상 경계면 힘의 평형

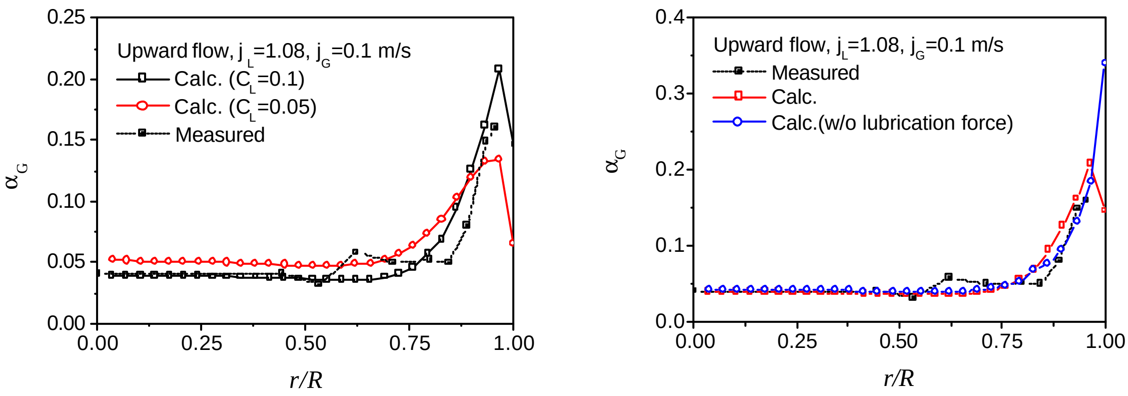

그림 6. Lift force와 lubrication force의 영향

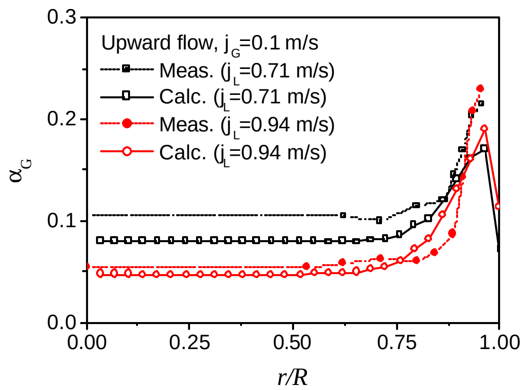

그림 7. 액체유속 변화와 기공률 분포

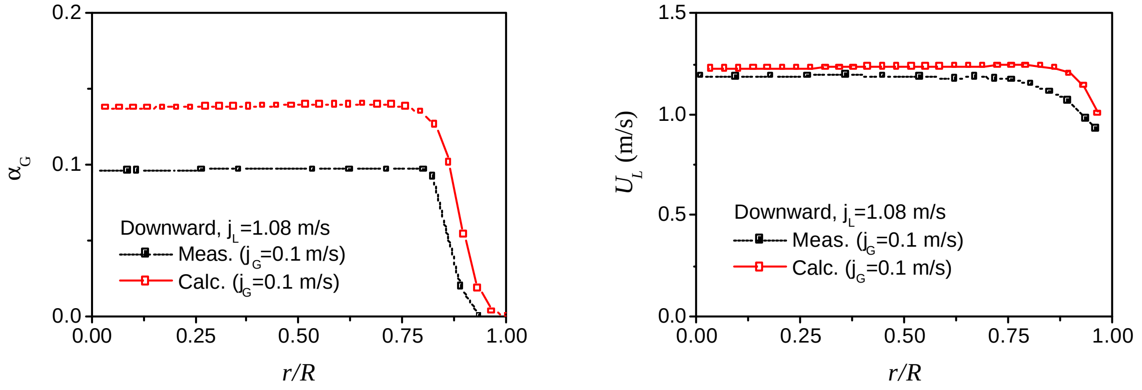

그림 8. 하향 기포유동의 횡방향 기공률 및 액체속도 분포

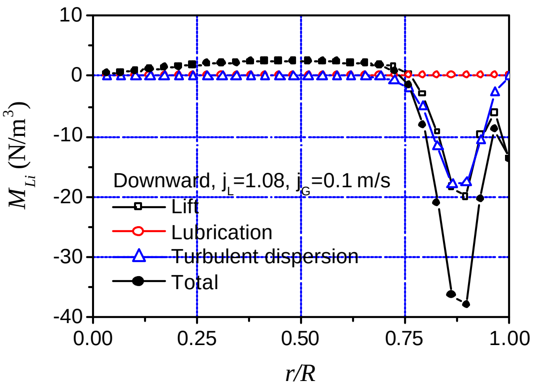

그림 9. 2상 경계면 힘의 평형(하향유동)

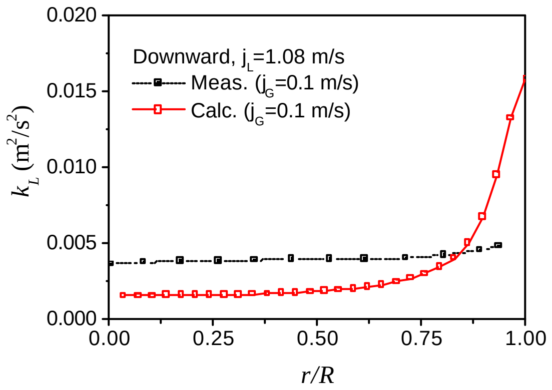

그림 10. 하향 기포유동의 난류에너지 분포

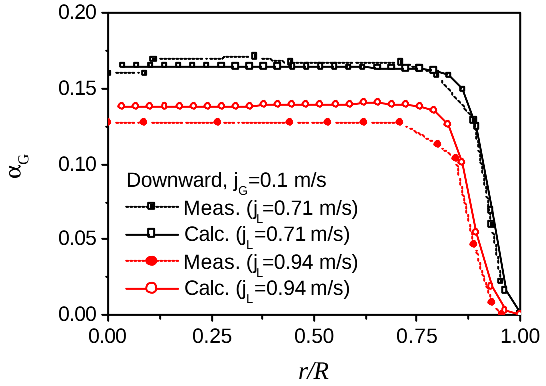

그림 11. 액체유속 변화와 기공률 분포(하향유동)