

회리식기포발생기의 출구흐름에서 미세기포의 분렬과 응집에 대한 수치모의

강충일, 윤순철

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《현시대는 과학과 기술의 시대이며 과학과 기술이 류레없이 빠른 속도로 발전하는것은 현대과학기술발전의 중요한 특징입니다.》(《김정일선집》 증보판 제15권 485페이지)

회리식기포발생장치는 수산업과 농업, 화학공업, 경공업 등 여러 분야에서 제품의 보관과 처리에 광범히 리용되고있으며 그 성능을 높이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

선행연구[1]에서는 회리식기포발생장치의 내부흐름특성변화에 따르는 노즐출구에서 기포평균직경에 대한 연구를 진행하였다. 선행연구[2]에서는 기체주입량을 조절하면서 액체흐름량과 노즐직경에 따르는 회리식미세기포발생장치의 분사특성에 대한 실험적연구를 진행하고 기포직경분포에 미치는 파라미터들의 영향을 평가하였다. 선행연구[3]에서는 기포들의 분렬과 응집과정을 고려한 액체-기체혼합흐름을 모의하기 위한 수치모의방법의 하나로서 PBM(Population Balance Model)방법에 대하여 구체적으로 서술하였다. 또한 표준 $k-\varepsilon$ 혼합란류모형에 기초한 CFD-PBM방법을 리용하여 원기둥액체기둥속에서 부력에 의하여 상승하는 기포들의 분렬과 응집과정에 대한 수치모의를 진행하였다.

본문에서는 RNG $k-\varepsilon$ 혼합란류모형에 기초한 CFD-PBM방법을 리용하여 회리식기포발생장치의 출구에서 기포의 분렬과 응집과정을 수치모의하고 기포직경변화특성에 미치는 파라미터들의 영향을 정량적으로 평가하였다.

1. 문 제 설 정

회리식기포발생장치의 출구에서는 액체-기포2상흐름이 꼬임줄기를 형성하면서 기포의 분렬 및 응집과정이 진행된다.(그림 1) 여기서 기포들의 분렬 및 응집과정은 2차원축대칭문제로 고찰되었다. 그림에서 D 는 노즐직경, L_1 은 노즐의 길이, L_2 는 대칭회전축의 길이, h_1 과 h_2 는 각각 입구부분과 출구부분에서 계산구역의 높이이다.

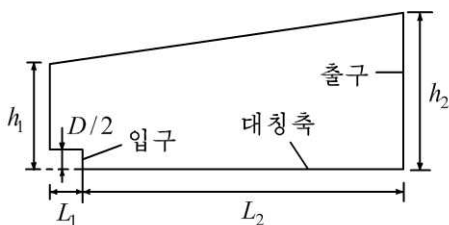


그림 1. 계산모형

액체-기체2상흐름을 모의하기 위하여 오일러-오일러방법을 리용하였으며 류체흐름구역에서 회리흐름이 지배적인것을 고려하여 RNG $k-\varepsilon$ 혼합란류모형을 리용한다.

PBM방법은 균형방정식에 기초하여 기포핵의 성장과 기포의 분렬과 분산, 확산, 응집과정을 정량적으로 평가할수 있게 한다. PBM방법에서 균형방정식은 다음과 같다.[3]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}[n(V, t)] + \nabla[\bar{u}n(V, t)] + \nabla_v[G_v n(V, t)] = & \frac{1}{2} \int_0^V a(V-V', V') n(V-V', t) n(V', t) dV' - \\ & - \int_0^\infty a(V, V') n(V, t) n(V', t) dV' + \int_{\Omega_V} p g(V') \beta(V|V') n(V', t) dV' - g(V) n(V, t) \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 왼변의 세번째 항은 기포체적의 증가량을 나타내고 오른변의 첫번째 항과 두번째 항은 각각 기포들의 응집으로 인한 생성과 사멸항을, 세번째 항과 네번째 항은 각각 기포들의 분렬로 인한 생성 및 사멸항을 나타낸다. 여기서 V 는 기포의 초기체적, V' 는 초기기포로부터 산생된 기포체적, G_v 는 기포체적성장률, $g(V')$ 는 기포분렬빈도수, $\beta(V|V')$ 는 확률밀도함수, $a(V, V')$ 는 기포응집률, $n(V, t)$ 는 기포개수밀도함수이다.

기포체적성장률 $G_v = \partial V / \partial t$ 와 기포직경성장률 $G = \partial d / \partial t$ 사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$G_v = 3k_v d^2 G \quad (2)$$

여기서 $k_v = \pi/6$ 이고 d 는 기포의 직경이다.

기포분렬에 대한 Lehr모형은 다음과 같다.

$$\Omega_{br}(V, V') = k \int_{\xi_{\min}}^1 \frac{(1+\xi)^2}{\xi^n} \exp(-b\xi^m) d\xi \quad (3)$$

여기서 $\xi = \lambda/d$ 이고 λ 는 회리의 크기, $n=13/3$, $m=-2/3$, $k=1.19\varepsilon^{-1/3}d^{-7/3}\sigma\rho^{-1}f^{-1/3}$, $b=2We_{crit}\sigma\rho^{-1}\varepsilon^{-2/3}d^{-5/3}f^{-1/3}$, f 는 동일한 기포들의 체적분률, We_{crit} 는 물인 경우의 림제웨버수로서 0.1이며 σ 는 결면장력결수로서 0.073N/m이고 ε 은 란류산일도이다.

기포응집에 대한 란류모형은 다음과 같다.

$$a(V, V') = \varsigma_T 2^{3/2} \sqrt{\pi} \frac{(d_i + d_j)}{4} \sqrt{(U_i^2 + U_j^2)} \quad (4)$$

여기서 d_i, d_j 는 충돌전 기포들의 직경이고 U_i, U_j 는 충돌전 기포들의 속도이며 ς_T 는 란류충돌효과인자로서 $\varsigma_T = 0.732(5/N_T)^{0.242}$ 으로 표현된다. 여기서 N_T 는 점성힘과 왈츠힘의 비로서 다음과 같다.

$$N_T = \frac{6\pi\mu(d_i + d_j)^3 \dot{\lambda}}{8H} \quad (5)$$

여기서 H 는 해밀톤상수로서 $2.3 \times 10^{-20}(\text{kg} \cdot \text{m}^2)/\text{s}$, 선변형은 $\dot{\lambda} = \left(\frac{4\varepsilon}{15\pi\nu} \right)^{0.5}$ 이고 ν 는 공기의 운동학적점성결수이다.

흐름구역의 입구경계에서 액체-기체혼합매질의 축방향속도와 회전각속도, 체적분률, 기포들의 직경분포를 주고 출구에서 압력은 $p = p_{\text{대}}$, 벽에서는 부착조건($\vec{V}_{\text{벽}} = 0$)을 취하였다. 풀이를 구하기 위하여 편속상에 대한 공간리산화에서는 모든 변수들에 대하여 1차풍상도식을 리용하고 2상비정상란류방정식에 대하여 phase coupled SIMPLE방법을 리용하였으며 잔차항을 10^{-5} 으로 취하였다.

기포거동에 대한 리산(Discrete)방법에서 기포분렬에 대하여서는 Lehr모형을 리용하고 기포응집에 대해서는 란류모형을 리용하였다.

2. 수치모의와 계산결과

수치모의를 위하여 흐름구역을 $L_1 = 50\text{mm}$, $L_2 = 500\text{mm}$, $h_1 = 150\text{mm}$, $h_2 = 200\text{mm}$, $D = 7\text{mm}$ 로 취하였다. 합리적인 계산그물수를 결정하기 위하여 입구에서 기포직경이 $d = 80\mu\text{m}$ 일 때 물주입량 15 L/min , 공기주입량 0.12 L/min ($\alpha = 0.008$) 을 취하고 계산그물수에 따르는 기포평균직경변화를 평가하였다.(그림 2) 그물수가 72 000이상일 때 기포평균직경변화는 1%미만이므로 그물수를 70 000개로 취하였다.

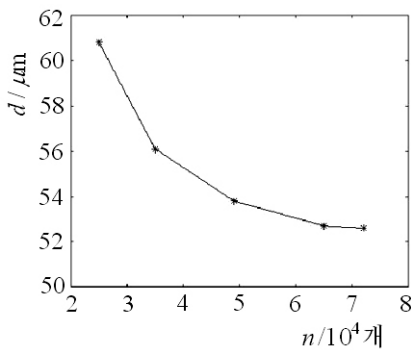


그림 2. 그물수에 따르는
기포의 평균직경변화

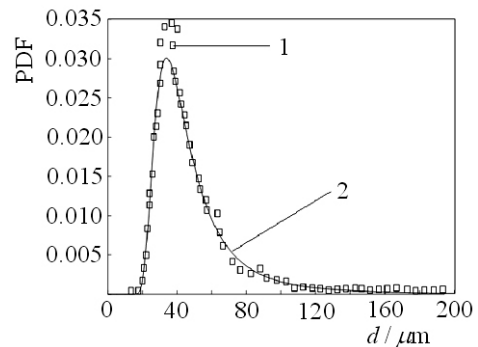


그림 3. 기포직경분포에 대한
계산값과 실험값의 비교
1—실험값, 2—계산값

기포직경분포를 계산한 결과와 선행연구[2]의 실험결과를 비교하였다. 경계조건으로서 축방향속도는 5.88m/s , 회전수는 614r/s , 기체주입량을 $2\text{cm}^3/\text{s}$ 로 취하였으며 초기기포직경은 표에서와 같이 설정하였다. 여기서 경계조건은 선행연구[2]의 실험값들을 리용하여 선행연구[1]의 방법으로 계산하였다.

기포직경분포에 대한 계산값과 실험값을 비교하였다.(그림 3) 여기서 PDF는 각이한 직경을 가진 기포들에 대한 확률밀도함수이다. 기포직경분포에 대한 계산값과 측정값은 비교적 일치하였다.

표. 노즐출구에서 기포의 초기직경분포

No.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
직경 μm	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
체적분률	0	0	0	0	0	0.3	0.3	0.3	0.1	0	0	0

다음으로 회리식기포발생기의 외부흐름구역에서 기포의 평균직경변화특성에 대한 수치모의를 진행하였다.

먼저 축방향속도가 5m/s 이고 회전각속도가 500rad/s , 기체체적분률이 0.1일 때 노즐출구로부터 거리에 따르는 기포직경분포변화를 고찰하였다.(그림 4) 노즐출구로부터 멀어질수록 기포직경은 작아졌다가 커지면서 기포직경범위는 점차 좁아진다. 이 현상은 기포가 노즐출구부분의 강한 회리마당에서 분렬되고 점차 멀어질수록 분렬보다도 응집이 더

많이 일어난다는것을 보여준다.

그림 5는 축방향속도가 5m/s이고 기체의 체적분률이 0.1일 때 노즐출구(0mm)에서 물의 회전각속도에 따르는 기포직경분포변화를 보여준다.

회전각속도가 증가할수록 기포평균직경이 감소하는것은 물의 회전각속도가 증가할수록 노즐출구에서 액체흐름의 자름응력이 커져 기포들의 분렬이 촉진되는것으로 설명할수 있다. 회전각속도가 200~1 000rad/s로 증가할 때 기포평균직경은 $61\mu\text{m}$ 로부터 $52.7\mu\text{m}$ 로 감소하였다.

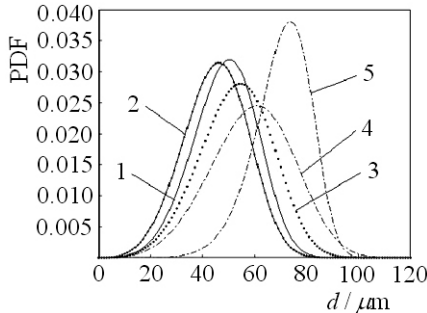


그림 4. 각이한 위치에서의 기포직경분포
1-5는 위치가 각각 0, 30, 150,
300, 450mm인 경우

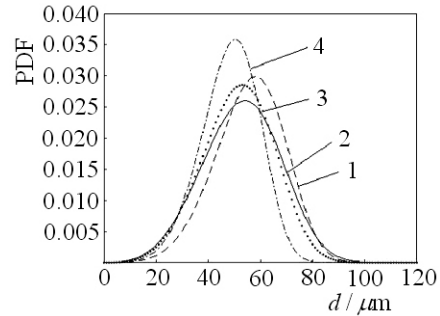


그림 5. 회전각속도에 따르는 기포직경분포
1-4는 회전각속도가 각각 200, 500,
700, 1000rad/s인 경우

그림 6은 축방향속도가 5m/s이고 회전각속도가 500rad/s일 때 기체체적분률에 따르는 기포직경분포변화를 보여주고있다.

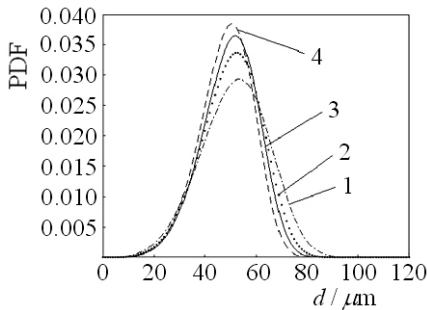


그림 6. 기체체적분률에 따르는
기포직경분포변화

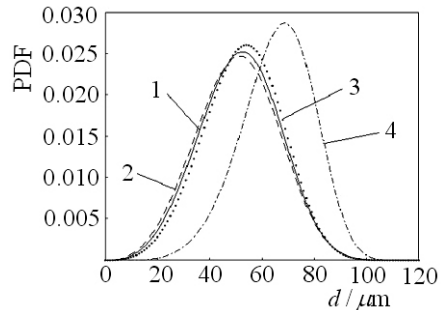


그림 7. 축방향속도에 따르는
기포직경분포변화

1-4는 체적분률이 각각 0.1, 0.3, 0.5, 0.7인 경우 1-4는 축방향속도가 각각 1.5, 3.5, 5, 10m/s인 경우

기체체적분률이 0.01~0.1로 증가할 때 기포직경은 $52.5\mu\text{m}$ 로부터 $58.2\mu\text{m}$ 로 비교적 완만하게 증가하였으나 기체체적분률이 0.2일 때 기포평균직경은 $76.4\mu\text{m}$ 로 증가하였다.

또한 노즐출구의 회전각속도가 500rad/s이고 기체의 체적분률이 0.1일 때 축방향속도에 따르는 기포직경분포변화를 그림 7에 보여주었다. 축방향속도가 1.5m/s일 때 기포평균직경은 $56.3\mu\text{m}$ 이고 10m/s일 때에는 $71.3\mu\text{m}$ 로 증가하였다. 축방향속도의 증가에 따라 기포평균직경이 커지는 현상은 기포들이 노즐출구에서 형성되는 강한 회리흐름영역을 통과하는 시간이 짧아지면서 분렬이 보다 적게 일어나는것으로 설명할수 있다.

맺 는 말

우리는 CFD-PBM방법을 리용하여 회리식기포발생장치의 외부흐름구역에서 미세기포들의 결합과 응집과정을 수치모의하고 기포직경분포에 미치는 류체의 속도와 기체주입량의 영향을 정량적으로 평가하였다. 회리식기포발생장치에서 기포직경을 작게 하기 위하여서는 기체체적분률을 0.01~0.1정도로 보장하면서 노즐출구에서 회전각속도를 크게 하여야 한다.

참 고 문 헌

- [1] 강충일; 기계공학, 3, 1, 주체109(2020).
- [2] K. Tabei; Journal of Environment and Engineering, 2, 172, 2007.
- [3] D. Moutafchieva; Journal of Technology and Metallurgy, 53, 511, 2018.

주체109(2020)년 9월 5일 원고접수

Numerical Simulation for Breakup and Coalescence of Micro Bubbles in Outflow of a Swirl Type Bubble Generator

Kang Chung Il, Yun Sun Chol

In this paper, the process of breakup and coalescence of micro bubbles was simulated in outflow of a swirl type bubble generator by CFD-PBM approach. Besides the influence of velocity of fluid and gas inlet flow rate on the distribution of bubble diameter was quantitatively evaluated.

Keywords: CFD-PBM approach, micro bubble, breakup and coalescence