

벤츨리관식기포발생기에서 평균기포직경에 미치는 액체입구류량과 기액비의 영향

윤순철, 리위성

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《인민경제의 전면적기술개건사업을 성과적으로 수행하자면 전반적인 과학기술수준을 한계단 높이며 새로운 과학기술분야를 개척하여야 합니다.》(《김정일전집》 제7권 139페이지)

여러가지 형식의 기포발생기는 수산업과 농업, 화학공업, 경공업 등 여러 부문에서 광범히 리용되고있으며 그것의 성능을 높이기 위한 연구[1]가 적극 진행되고있다.

벤츨리관식기포발생기의 기포직경에 미치는 파라메터들의 영향은 주로 실험적으로 평가되였다. 선행연구[2]에서는 한가지 벤츨리관식기포발생기에서 평균기포직경에 미치는 파라메터들의 영향을 실험적으로 고찰하고 합리적인 파라메터들을 결정하였으며 선행연구[3]에서는 공기주입구의 직경과 개수, 벤츨리관의 확대각, 물흐름량과 공기주입량을 변화시키면서 기포직경의 변화특성을 실험적으로 평가하였다. 선행연구[4]에서는 발달된 관로흐름에서 기포를 발생시킬 때 란류산일률과 평균기포직경사이의 관계식을 제기하였다. 그러나 이 관계식을 벤츨리관식기포발생기에 적용할수 있는가는 논의하지 못하였다.

본문에서는 벤츨리관의 액체흐름속에서 기체의 혼합흐름을 2상류체에 대한 VOF모형에 기초하여 수치모의를 진행하고 그 결과를 실험자료와 비교하여 란류산일률과 평균기포직경사이 관계식의 비례계수를 결정하였으며 액체입구류량과 기액비에 따르는 평균기포직경변화를 정량적으로 평가하였다.

1. 문제설정과 풀이방법

벤츨리관식기포발생기에서 입구를 통하여 액체가 흐르면 목부분에 설치된 기체주입관에 부압이 조성되어 흡입된 기체는 액체의 강한 자력에 의하여 분렬되면서 기포가 형성된다.(그림 1)

VOF모형을 리용하여 액체와 기체의 혼합흐름은 계산할수 있지만 기포의 분렬과 응집과정을 정확히 모의할수 없으므로 평균기포직경과 란류산일률사이의 경험관계를 리용하여 평균기포직경을 예측하는것이 필요하다.

액체-기체 2상흐름에 대한 기본방정식은 다음과 같다.

연속방정식:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = 0 \quad (1)$$

여기서 α_q 는 q 상의 체적분률을 의미하고 $\sum_{q=1}^2 \alpha_q = 1$ 이며 전체 밀도는 $\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1$ 로

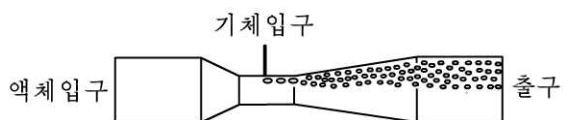


그림 1. 벤츨리관식기포발생기에서
기포의 분렬과정

표시된다.

운동방정식:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla[(\mu + \mu_t)(\nabla \vec{v})] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

류체 흐름구역에서 회리 흐름이 지배적인것을 고려하여 RNG $k-\varepsilon$ 혼합란류모형을 리용한다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (4)$$

RNG $k-\varepsilon$ 혼합란류모형에서 란류점성은 다음과 같이 계산된다.

벽근방의 작은 Re구역에서는

$$d \left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \right) = 1.72 \frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\hat{\nu}^3 - 1 + C_\nu}} d\hat{\nu}, \quad \hat{\nu} = 1 + \frac{\mu_t}{\mu}, \quad C_\nu \approx 100 \quad (5)$$

이고 큰 Re구역에서는

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

이다. 경계조건으로서 액체입구에서 질량흐름조건을 취하고 출구에서는 압력 $p = p_{대}$, 벽에서는 부착조건($\vec{V}_{벽} = 0$), 기체입구에서는 속도를 취하였다.

런속상에 대한 공간리산화에서는 운동량에 대하여 2차풍상도식을 리용하고 풀이방법 으로서는 SIMPLEC알고리즘을 리용하였으며 압력에 대하여서는 PRESTO도식을 리용하였다. 수치모의에서 2상비정상란류흐름방정식을 압력의존음적1차풍상도식을 리용하고 잔차 한계를 10^{-5} 으로 취하였다.

2. 수치모의와 계산결과들

수치모의의 타당성을 평가하기 위하여 실험자료[2]가 주어진 벤츄리관치수를 리용하였다.(그림 2)

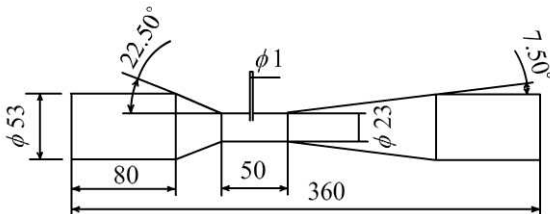


그림 2. 벤츄리관식기포발생기의 치수

그물개수를 약 480 000개로 정하였다.

다음으로 VOF모형을 리용하여 계산한 란류산일률 ε 으로부터 기포의 평균직경을 결정하기 위하여 판로란류[4]에서 성립하는 란류산일률과 평균기포직경사이의 관계식에 결

먼저 계산결과에 미치는 그물수의 영향을 평가하기 위하여 액체류량 $12\text{m}^3/\text{h}$, 기체흡입량 $0.002\text{m}^3/\text{h}$ 인 경우 그물수 80 000개와 800 000개사이에서 변화시키면서 기체흡입구에서의 압력변화를 고찰하였다. 그물수가 480 000일 때부터 차이가 1.3%이하에서 변화되는것을 고려하여 계산

수 K 를 첨부하고 실험자료와 비교하였다. 즉

$$d_m = K \left(\frac{12\sigma}{8\rho} \right)^{0.6} \varepsilon^{-0.4} \quad (7)$$

기액비가 0.002인 경우 액체입구류량을 변화시키면서 출구면의 평균란류산일률을 계산한 다음 식 (7)을 리용한 계산값과 실험값을 비교하여 $K=0.45$ 일 때 근사적으로 일치한다는것을 확인하였다.(그림 3)

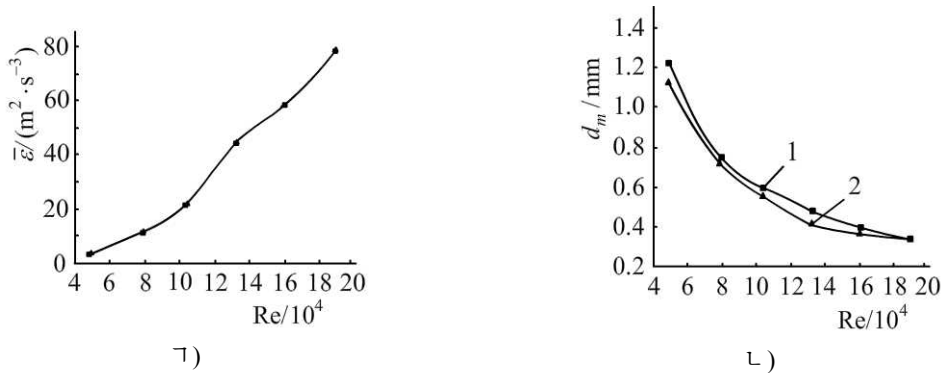


그림 3. Re 에 따르는 평균란류산일률과 평균기포직경의 변화

ㄱ) 평균란류산일률, ㄴ) 평균기포직경(1-실험값, 2-계산값)

다음으로 벤츨리관식기포발생기에서 기포의 평균직경에 미치는 기액비의 영향을 평가하기 위하여 입구레이놀즈수 $Re=49\ 000$ 일 때 $\alpha=0.002 \sim 0.2$ 사이에서 수치모의를 진행하였다.(그림 4) 평균기포직경은 기액비가 0.15까지 완만하게 증가하고 그 이상에서는 빨리 증가한다. 이 현상은 기액비가 커질수록 기체와 액체의 경계면에서 기포분렬을 일으키는 란류산일률이 작아지는 것과 관련된다.

맺는 말

실험자료와 수치모의결과를 비교하여 판로란류에서 성립하는 란류산일률과 평균기포직경사이의 관계식을 벤츨리관식기포발생기에 적용할수 있도록 비례계수를 결정하였다. 또한 평균기포직경이 액체입구류량이 증가하면 작아지고 기액비가 증가하면 커지는 특성을 정량적으로 평가하였다.

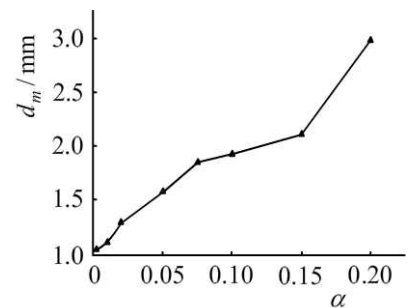


그림 4. 기액비에 따르는 평균기포직경변화특성($Re=49\ 000$)

참고 문헌

- [1] A. Agarwal et al.; Chemosphere, **84**, 1175, 2011.
- [2] Xiung Yu et al.; International Journal of Mining Science and Technology, **25**, 524, 2015.
- [3] Jingjing Li et al.; Nuclear Engineering and Design, **325**, 90, 2017.
- [4] C. Martinez-Bazan et al.; Journal of Fluid Mechanics, **401**, 157, 1999.

Influence of Liquid Inlet Flow Rate and Volume Fraction on the Average Diameter of Bubbles in a Venturi Type Bubble Generator

Yun Sun Chol, Ri Wi Song

In the paper, by means of comparison of experimental data with the results of numerical simulation, the factor was determined so that the relationship between the turbulent dissipation and the diameter of bubble, which is satisfied in turbulent flow of tube, could be applied in the venturi type bubble generator. Besides, it was quantitatively evaluated that the diameter of bubble is decreased with liquid inlet flow rate and increased with air volume fraction.

Keywords: air bubble, numerical simulation