

잠긴 고속속거품분사흐름모의에서 속거품모형들에 대한 연구

조효경, 윤순철

우리는 인민경제 여러 분야에서 널리 리용되고있는 고속속거품분사흐름의 수값모의에서 정확도를 개선하기 위한 연구를 진행하였다.

잠긴 고속속거품분사흐름은 화학반응의 촉진, 금속재료의 표면경화, 복잡한 기계제품의 청소, 고체재료의 절단, 오수정화 등 공업의 여러 분야에서 널리 리용되고있다.[1] 잠긴 고속속거품분사흐름은 속거품분사흐름의 구조와 특성의 복잡성으로 하여 많은 경우 수값계산으로 정확한 결과를 얻기가 불가능하므로 주로 실험적으로 연구되고있다. 실험적 관측들은 잠긴 고속속거품분사흐름에서 입구압력에 따라 증기방울들의 구름모양형태가 복잡하게 변한다는것을 보여준다.

속거품현상의 리용범위가 확대될수록 실험적연구뿐만아니라 리론적연구도 심화되고있다. 그 과정에 속거품현상을 리론적으로 고찰하기 위하여 증기수송방정식을 리용한 여러가지 속거품(Singhal, Zwart-Gerber-Belamri and Schnerr-Sauer)모형들이 제기되었으나 잠긴 고속속거품분사흐름에 대하여 검토되지 못하였다.[2]

그리하여 잠긴 고속속거품분사흐름에 대하여 압축성혼합속거품모형이 제기되고 이 모형이 속거품수가 0.1인 잠긴 예리한 열린구멍노즐에서 고속속거품분사흐름을 수값모의로 해석하는데 성공적으로 리용되었다.[3] 하지만 이 모형에서는 속거품현상에 의하여 일어나는 증발과 응축은 공기방울-액체혼합의 압축성효과를 고찰하는동안 단순화의 목적을 위하여 무시된다고 가정하였다. 증기수송을 무시하는것은 사실 액체와 증기사이변화가 증기압력가까이에서 존재하기때문에 합리적이지 못하다.

잠긴 고속속거품분사흐름을 수값모의하거나 그것들의 수값모의에 속거품모형들을 적용하기 위한 가능성을 평가하기 위하여서는 속거품모형들을 검토하는것이 필요하다.

론문에서는 실험적인 결과를 여러가지 속거품모형들을 리용한 수값모의결과들과 비교하여 잠긴 고속속거품분사흐름에 대하여 선행의 속거품모형들이 합리적이지 못하다는 것과 선행한 모형들의 결수들을 수정하면 더 정확한 결과를 얻을수 있다는것을 밝혔다.

1. 란류속거품흐름에 대한 기본방정식과 속거품모형들

속거품현상에 의하여 일어나는 온도변화는 전체 흐름마당에서 무시할수 있을 정도로 매우 작다. 그러므로 에네르기보존의 방정식은 생략된다.

질량과 운동량보존방정식은 벡토르형식으로 쓰면 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)] + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \mathbf{v}_{dr,l} \mathbf{v}_{dr,l} + \alpha_v \rho_v \mathbf{v}_{dr,v} \mathbf{v}_{dr,v}) \quad (2)$$

여기서 \mathbf{v}_m 은 질량평균속도이고 ρ_m 은 혼합밀도이다. 즉

$$\mathbf{v}_m = \frac{\alpha_l \rho_l \mathbf{v}_l + \alpha_v \rho_v \mathbf{v}_v}{\rho_m}, \quad \rho_m = \alpha_l \rho_l + \alpha_v \rho_v \quad (3)$$

증기수송방정식은 증기질량분률 f_v 에 의하여 지배되는데 다음과 같이 쓸수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m f_v) + \nabla(\rho_m \mathbf{v}_v f_v) = R_e - R_c \quad (4)$$

여기서 증기체적분률은 $\alpha_k = f_k \frac{\rho_m}{\rho_k}$ 이고 R_e 와 R_c 는 증기생성과 소멸비향(혹은 상변화률)이다.

속거품모형들은 증기수송방정식으로부터 유도되고 서로 다른 경험인자들에 의하여 형태적으로 모형들이 구별된다. 즉

① Singhal모형

$$p < p_v; R_e = C_e \frac{\max(0.1, \sqrt{k})}{\sigma_s} \rho_v \sqrt{\frac{2\rho_l(p_v - p)}{3\rho_l}} (1 - f_v - f_g) \quad (5)$$

$$p > p_v; R_c = C_c \frac{\max(0.1, \sqrt{k})}{\sigma_s} \rho_v \sqrt{\frac{2\rho_l(p - p_v)}{3\rho_l}} f_v \quad (6)$$

$$p_v = p_{sat} + 0.195 \rho_m k, \quad C_e = 0.02, \quad C_c = 0.01 \quad (\sigma_s - \text{결면장력계수})$$

② Schnerr-Sauer모형

$$p < p_v; R_e = \frac{3\alpha(1-\alpha)}{\rho_m \Re_B} \rho_v \sqrt{\frac{2\rho_l(p_v - p)}{3}} \quad (7)$$

$$p > p_v; R_c = \frac{3\alpha(1-\alpha)}{\rho_m \Re_B} \rho_v \sqrt{\frac{2\rho_l(p - p_v)}{3}} \quad (8)$$

$$\Re_B = 10^{-6} m, \quad \alpha = n \frac{4}{3} \pi \Re_B^3 / \left(1 - n \frac{4}{3} \pi \Re_B^3 \right), \quad n = 10^{13}$$

③ Zwart-Gerber-Belamri모형

$$p < p_v; R_e = C_e \frac{3\alpha_{nuc}(1-\alpha_v)}{\Re_B} \rho_v \sqrt{\frac{2\rho_l(p_v - p)}{3}} \quad (9)$$

$$p > p_v; R_c = C_c \frac{3\alpha_v}{\Re_B} \rho_v \sqrt{\frac{2\rho_l(p - p_v)}{3}} \quad (10)$$

$$C_e = 50, \quad C_c = 0.01, \quad \alpha_{nuc} = 5 \times 10^{-4}, \quad \Re_B = 10^{-6} m$$

④ 새로운 모형

$$p < p_v; R_e = C_e \frac{\max(0.1, \sqrt{k})}{\sigma_s} \rho_v \sqrt{\frac{2\rho_l(p_v - p)}{3\rho_l}} (1 - f_v - f_g) \quad (11)$$

$$p > p_v; R_c = C_c \frac{\max(0.1, \sqrt{k})}{\sigma_s} \rho_v \sqrt{\frac{2\rho_l(p - p_v)}{3\rho_l}} f_v \quad (12)$$

$$p_v = p_{sat} + 0.195 \rho_m k, \quad C_e = 1, \quad C_c = 0.01$$

속거품수는 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma = \frac{p_b - p_{sat}}{p_i - p_b} \approx \frac{p_b}{p_i} \quad (13)$$

여기서 p_{sat} 는 액체의 포화증기압이고, p_i 는 노즐의 입구압력, p_b 는 출구압력이다.

2. 계산결과분석

여기서는 잠긴 고속속거품분사흐름에 대한 계산그물을 작성하고 위에서 설명한 모형들을 리용하여 수값모의를 진행하였으며 그 결과를 실험자료와 비교하였다.

수값모의에서 리용한 축대칭노즐과 흐름마당의 기하학적치수는 다음과 같다.(그림 1)

고속속거품발생노즐근방에서는 그물을 조밀하게 작성하고 출구쪽으로 가면서 점차 성글게 작성하여 그물수를 6만개로 취하였다.

축대칭정상관류흐름방정식에 대하여 압력의존음적1차풍상도식을 리용하여 수값모의를 진행한다. 이때 오차항을 10^{-5} 으로 취하였다.

또한 계산에 리용되는 조건들은 다음과 같다.

$$\rho_l = 998.2 \text{ kg/m}^3, \nu_l = 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}, \rho_v = 0.554 \text{ kg/m}^3, \nu_v = 1.34 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

이때 류량결수는

$$c_d = \frac{4q_m}{\pi d^2 \sqrt{2(p_i - p_0)/\rho_l}}, \quad \sigma = \frac{p_b - p_{sat}}{p_i - p_b} \approx \frac{p_b}{p_i} \quad (14)$$

이고 표준화된 류량결수는

$$c'_d = \frac{c_{d1}}{c_{d2}} \quad (15)$$

이다. 여기서 c_{d1} 은 속거품이 있는 경우 노즐출구의 류량결수이고 c_{d2} 는 속거품이 없는 경우 노즐출구의 류량결수이다.

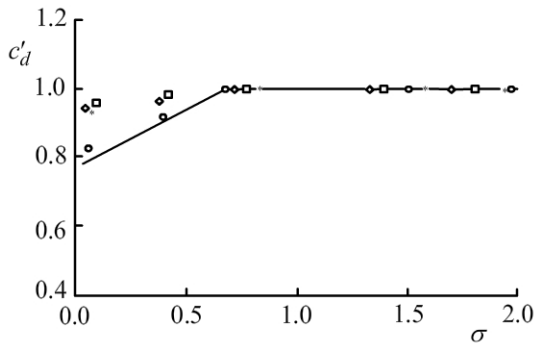


그림 2. 속거품모형들을 리용한 수값모의결과와 실험자료의 비교

(*: Singhal모형, □: Schnerr-Sauer모형, ◇: Zwart-Gerber-Belamri모형, ○: 새로운 모형, —: 실험자료)

위에서 작성한 계산그물에 주어진 조건들을 주고 수값모의를 진행하였다.

속거품수를 0.1~2.0까지 변화시키면서 선행의 속거품모형들과 새로운 모형을 리용하여 속거품생성정도를 류량결수로 평가하였다.

결과 이 속거품모형들에 의한 수값모의에서 속거품수가 0.1일 때 속거품이 제일 많이 생성되었으며 약 0.7이상부터는 속거품이 생겨나지 않았다.

같은 속거품수에 대하여 속거품생성정도가 모형에 따라 다르게 나타났는데 이전 속거품모형들을 잠긴 속거품분사흐름에 리용하는 경우 실험자료[4]와 비교하고 그 결과를 보여

주었다.(그림 2)

속거품이 생겨나지 않는 속거품수에 대하여서는 모형들의 수값모의결과가 일치하였으나 속거품이 생겨나는 구역에서는 모형들을 리용한 결과값들이 차이났다. 즉 선행모형들을 리용한 수값모의에서 속거품생성정도는 실험자료와 많은 차이가 있다는것을 알수 있다.

이상의 결과로부터 잠긴 고속속거품분사흐름에 대한 수값모의에서는 새로운 모형을 리용하는것이 더 정확하다는것을 알수 있다. 이것은 수값모의대상에 따라 속거품모형들의 결수를 부단히 재검토하고 수정해야 한다는것을 보여준다.

맺 는 말

잠긴 고속속거품분사흐름에서 이전 속거품모형들을 그대로 리용하는것보다 선행모형들의 결수들을 수정하면 더 정확한 결과를 얻을수 있다.

또한 수값모의대상에 따라 속거품모형들의 결수들을 검토하고 수정하는것이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] H. Soyama; Journal of Science and Technology, 9, 1, 1, 2014.
- [2] A. K. Singhal et al.; J. Fluids Eng., 3, 617, 2002.
- [3] G. Peng et al.; Journal of Science and Technology, 6, 4, 499, 2011.
- [4] W. H. Nurick; J. Fluids Eng., 98, 681, 1976.

주체107(2018)년 9월 8일 원고접수

Study on Cavitation Models for the Numerical Simulation of a Submerged High-Speed Cavitation Jet Flow

Jo Hyo Gyong, Yun Sun Chol

In this paper, the results of the numerical simulation using various cavitation models are compared with experimental data. And we show the limitation of the previous models and more exact results by modification of Singhal model coefficients for a submerged high-speed cavitation jet flow.

Key words; high-speed cavitation jet flow, two- phase mixture model, discharge coefficient