

## 한가지 축대칭노즐에서 액체분사특성에 미치는 회전흐름의 영향에 대한 수값모의연구

강철수, 윤순철

경애하는 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《과학연구부문에서 최첨단돌파전을 힘있게 벌려 경제발전과 국방력강화, 인민생활향상에 이바지하는 가치있는 연구성과들을 많이 내놓아야 합니다.》

우리는 액체분사노즐의 분사흐름을 한가지 축대칭회리노즐의 액체분사흐름으로 모형화하고 분사특성에 미치는 회전흐름속도의 영향을 수값모의를 통하여 연구하였다.

회리노즐에서 액체의 미립화특성은 노즐에서 입구압력과 흐름량, 노즐출구에서 액체흐름의 분무각과 퍼짐각에 크게 의존한다.[4] 사실 회리노즐에서의 분무과정은 노즐출구에서 액체줄기가 액체막을 형성하는 1차분렬과정과 액체막이 분렬되어 액체방울이 형성되는 2차분렬과정으로 진행되는 복잡한 과정이다.[2] 노즐의 내부흐름과 출구에서 액체의 막형성과정에서는 액체덩어리가 큰 체적을 차지하므로 오일러방법에 기초한 VOF모형이 이용되고[3] 액체방울이 형성되는 액체막분렬과정은 액체방울의 크기가 매우 작고 방울수가 대단히 많으므로 라그랑주방법으로 취급된다.[1]

본문에서는 한가지 축대칭회리노즐에서 액체흐름의 1차분렬과정을 류체해석프로그램 Fluent의 VOF모형에 기초하여 수값모의하여 액체분사흐름특성에 미치는 회전흐름속도의 영향을 평가하였다.

축대칭회리노즐의 액체분사흐름을 그림 1에서와 같은 축대칭흐름으로 취급할수 있다. 회리노즐의 실제적인 기하학적모양은 그림 2와 같다.

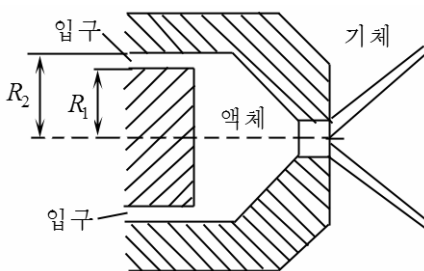


그림 1. 축대칭회리노즐

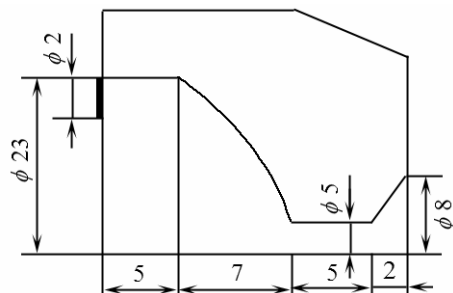


그림 2. 축대칭회리노즐의 기하학적크기(mm)

이때 입구에서 속도  $\vec{V}_{in} = \vec{V}_z + \vec{V}_\theta$ 의 크기는 실제 노즐자름면을 통하여 들어오는 입구 흐름량과 자름면의 크기를 고려하여 질량보존법칙으로부터  $|\vec{V}_z| = Q/(\pi(R_2^2 - R_1^2))$  이고  $|\vec{V}_\theta| = [(Q/n)/(\pi d^2/4)] \times \sin \theta$ 로 취급할수 있다. 여기서  $n$ 은 주입구멍의 개수,  $d = R_2 - R_1$ 은 액체주입구멍의 직경이고  $\theta$ 는 주입구멍이 대칭축과 이루는 각이다.

VOF모형에 기초한 분산상흐름은 다음의 방정식들에 의하여 해석된다.[2]

$$\text{연속방정식: } \frac{1}{\rho_q} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}), \quad \sum_{q=1}^n \alpha_q = 1$$

$$\text{운동방정식: } \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

란류흐름의 상태방정식 ( $k-\varepsilon$  모형):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{R} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

여기서  $G_k$ 는 평균속도구배에 의한 란류운동에너지를,  $G_b$ 는 뜰힘에 의한 란류에너지,  $Y_M$ 은 에너지소실속도에 주는 압축성란류의 맥동평창의 기여량,  $S_k$ ,  $S_\varepsilon$ 은 원천항이다.

$C_{1\varepsilon}=1.44$ ,  $C_{2\varepsilon}=1.92$ ,  $C_\mu=0.09$ ,  $\sigma_k=1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon=1.3$ 으로 놓고 경계조건으로는  $\vec{V}_{in} = \vec{V}_z + \vec{V}_\theta$  (입구),  $p = p_a$  (출구),  $\vec{V}_{벽} = 0$  (벽)을 준다.

노즐내부에서 흐르는 물이 공기중으로 분사되므로 VOF모형에 기초한 물분사흐름의 수값모의는 비정상란류흐름방정식에 대한 음적1차풍상도식을 리용하였다.

사실 분사흐름의 입구조건이 정상이므로 비정상계산에서 흐름특성이 정상상태를 유지할 때까지 계산을 진행하였다. 계산실험에서는 주입액체의 일정한 흐름량에서 회전흐름 속도를 여러가지로 변화시키면서 입구압력, 분무각도의 변화를 평가하였다.

약 10만회정도의 반복계산결과에 분사되는 물줄기의 모양이 정상상태를 유지하고 잔차가  $10^{-6}$  정도로 보장되었다.

또한 그물수를 3만, 4만, 10만정도로 변화시키면서 계산결과와 그물의존도를 평가하였다. 계산결과 리산화그물수가 10만, 4만일 때 큰 차이가 없으므로 액체분사흐름에 대한 계산실험은 그물수 4만개에서 진행하였다.

먼저  $\dot{V}=12\text{L/min}$ 에서 회전흐름속도  $V_\theta=0\sim 16\text{m/s}$ 까지 증가시키면서 물줄기의 분사과정에 대한 상체적비율상태를 평가하였다.

회전흐름속도변화에 따르는 분무각  $\alpha$ 와 입구압력  $\Delta p$ 의 계산값은 그림 3과 같다.

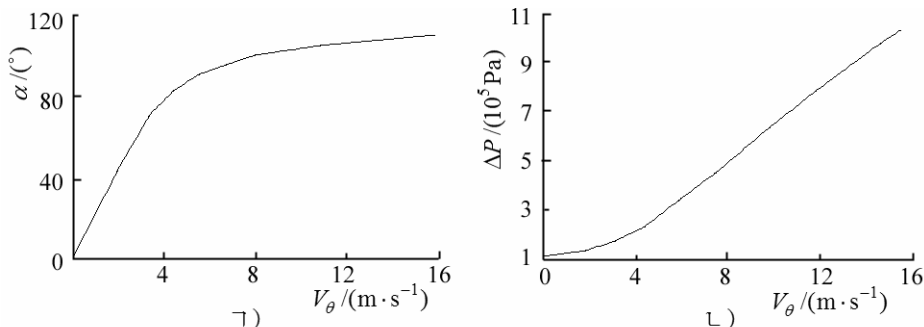


그림 3. 회전흐름속도에 따르는 분무각(1)과 입구압력(2)의 변화

그림 3에서 보는바와 같이 회전흐름속도가 증가할 때 분무각도 증가한다. 주입액체의 회전흐름속도가 령일 때에는 물줄기가 갈라지지 않고  $V_\theta = 2\text{m/s}$  부터 물줄기는 원추모양으로 퍼졌다.  $V_\theta = 0 \sim 5\text{m/s}$  까지는 분무각이 현저히 커졌지만  $V_\theta = 5.44\text{m/s}$  이상에서는 분무각의 변화가 상대적으로 매우 작다. 그러나 입구압력은 주입액체의 회전흐름속도가 증가할 때 계속 커진다. 압력차가 증가하는 특성은 회전속도가 증가할 때 노즐내부벽에서 마찰력이 증대하고 원심력에 의하여 대칭축에서 압력이 낮아지는것과 관련된다.

주입흐름량  $\dot{V} = 12\text{L/min}$  에 대하여 회전흐름속도  $V_\theta = 0 \sim 16\text{m/s}$  범위에서 변화될 때 분무각은  $\alpha = 0 \sim 110^\circ$  범위에서 변하고 압력차는  $\Delta p = 10^5 \sim 11 \cdot 10^5 \text{Pa}$  범위에 있다는것을 보여주었다. 계산결과는 주입액체의 회전흐름속도를 높이면 분무각은 커지지만 일정한 회전속도이상부터는 거의 변하지 않는다.

또한 흐름량이 일정할 때 입구압력은 회전흐름속도를 높일수록 커진다.

수값모의결과는 액체의 분무각이 회리노즐출구의 확대각에 크게 의존한다는것을 보여주었다.

## 참 고 문 헌

- [1] V. Kumar et al.; ILASS Americas, 25<sup>th</sup> Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 1~5, 2013.
- [2] K. M. Bade et al.; ILASS Americas, 22<sup>nd</sup> Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 1~9, 2010.
- [3] C. W. Hirt et al.; J. Comput. Phys., 39, 201, 1981.
- [4] I. C. Acunha; Engenharia Térmica(Thermal Engineering), 8, 1, 24, 2009.

주체105(2016)년 1월 5일 원고접수

## **Numerical Simulation about the Influence of Swirl Flow on the Characteristics of the Liquid Atomization in an Axisymmetric Nozzle**

*Kang Chol Su, Yun Sun Chol*

The influence of swirl velocity on the characteristics of liquid primary breakup in an axisymmetric pressure-swirl nozzle was estimated according to the numerical simulation using the VOF model in the program Fluent 6.3.

Key words: VOF model, axisymmetric pressure-swirl nozzle, primary breakup