

한가지 분사장치에서 기체 및 분체의 흐름특성에 대한 연구

신 학 철

에젝터는 기체와 액체를 혼합하거나 류체에 의하여 분체를 혼합 및 가속시키는 장치로 널리 이용된다. 특히 기류식초미분쇄기의 기체 및 분체가속장치로 이용된다.

선행연구[1]에서는 압축성기체의 1차원흐름리론에 의하여 에젝터형식의 분사장치에서 기체 및 분체흐름특성을 논의하고 실험적연구를 진행하였다.

선행연구[2-4]에서는 압축성기체 및 분체의 흐름특성에 대한 수값계산과 실험적연구를 진행하였지만 에젝터형식의 가속장치에 대한 3차원적인 연구결과는 제기된것이 없다.

에젝터형식의 장치에서 기체 및 분체의 흐름특성연구는 분사장치의 설계와 그 적용을 위한 중요한 문제이다.

1. 문제 설정

분사장치에 대한 기하학적도해는 그림 1과 같다.(단위 mm) 여기서 1은 노즐, 2는 흡입관, 3은 련결관, 4는 혼합관, 5는 가속관, 노즐의 출구와 목의 면적비는 1.72이며 자리표계의 원점은 노즐목에 설정하였다.

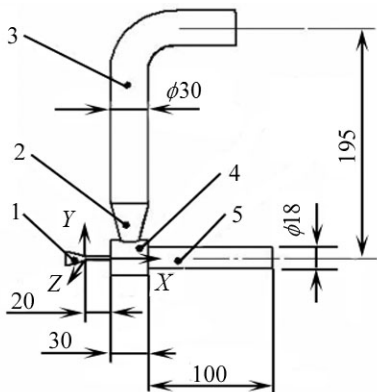


그림 1. 분사장치의 기하학적도해

장치의 흐름원리는 압축탱크의 압축공기가 노즐에서 분사될 때 분출구의 출구에서 압력이 떨어져 련결관으로 흡입된 공기와 분체가 흡입관을 거쳐 혼합관에서 분사흐름과 혼합되면서 가속관을 지나 혼합가속되어 분사되는것이다.

분사장치의 흐름은 압축성분사줄기흐름과 흡입되는 기체 및 고체알갱이와 혼합되는 복잡한 기체력학적과정을 동반하므로 흐름해석에 수값계산방법이 적용된다.

그러므로 논문에서는 그림 1과 같은 분사장치에서의 기체 및 분체의 운동특성을 분산상 흐름이라는 가정밑에 압축성3차원란류에 대한 수값계산에 의하여 논의하였다.

2. 기본방정식과 경계조건

련속방정식과 운동방정식, 에네르기방정식은 각각 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{ef} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\bar{\bar{\tau}}_{ef} \cdot \vec{v}) \right) \quad (3)$$

여기서 p 는 정력학적압력, \bar{g} 는 중력, $\bar{\tau} = \mu[(\nabla \bar{v} + \nabla \bar{v}^T) - 2\nabla \cdot \bar{v}I/3]$ 이고 k_{ef} 는 유효전도열수, J_j 는 j 매질의 확산흐름량이며 E 는 전에너지, h 는 엔탈피, $\bar{\tau}_{ef}$ 는 란류점성결수이다.

란류모형인 Spalart-Allmaras(S-A)모형은 다음과 같다.

$$(\vec{V} \cdot \nabla)(\rho \bar{v}) = G_v + \{\nabla[(\mu + \rho \bar{v})\nabla \bar{v}] + C_{b2}\rho(\nabla \bar{v})^2\}/\sigma_{\bar{v}} - Y_v \quad (4)$$

$$\mu_t = \rho \bar{v} f_{v1}, \quad f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + c_{v1}^3}, \quad \chi = \frac{\bar{v}}{v}, \quad G_v = C_{b1}\rho \bar{S} \bar{v}, \quad \bar{S} = S + \frac{\bar{v}}{k^2 d^2} f_{v2}, \quad f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}}$$

$$S = \sqrt{2\Omega^2}, \quad Y_v = C_{w1}\rho f_w \left(\frac{\bar{v}}{d}\right)^2, \quad f_w = g \left(\frac{1 + c_{w3}^6}{g^6 + c_{w3}^6}\right)^{1/6}, \quad g = r + c_{w2}(r^6 - r), \quad r \equiv \frac{\bar{v}}{\bar{S}k^2 d^2}$$

$$C_{b1} = 0.1335, \quad C_{b2} = 0.622, \quad \sigma_{\bar{v}} = 1/3, \quad c_{v1} = 7.1, \quad c_{w1} = C_{b1}/k^2 + (1 + C_{b2})/\sigma_{\bar{v}}$$

$$c_{w2} = 0.3, \quad c_{w3} = 2.0, \quad k = 0.4187$$

중력을 고려한 경우에 고체립자의 운동법칙은 다음과 같다.

$$\frac{d\vec{V}_p}{dt} = F_d(\vec{V} - \vec{V}_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (5)$$

여기서 첨수 p 는 립자에 해당한 변수임을 표시하며 $F_d(\vec{V} - \vec{V}_p)$ 는 고체립자의 단위질량에 작용하는 저항힘이고

$$F_d = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_d \text{Re}}{24}, \quad \text{Re} = \frac{\rho d_p |\vec{V}_p - \vec{V}|}{\mu}, \quad C_d = \begin{cases} 0.424, & \text{Re} > 1000 \\ 24(1 + \text{Re}^{2/3}/6)/\text{Re}, & \text{Re} \leq 1000 \end{cases} \quad (6)$$

경계조건으로서는 분출구와 흡입관입구 그리고 분사흐름구역의 외부경계에서 압력조건, 벽에서 단열부착조건을 주었다.

3. 수값계산과정

흐름모형(그림 1)의 수값계산을 위하여 분사흐름구역의 너비는 가속관직경의 16.4배, 길이는 가속관길이의 5.5배로 정하고 외부경계로 택하였다. 그리고 계산구역을 대칭면을 기준으로 한쪽 부분만을 택하고 56 000~84 000개의 6면체요소로 분할하였으며 대칭면에 대하여서는 면대칭조건을 주었다.

흐름마당의 수값계산은 3차원정상압축성란류방정식 (1)~(3)과 압축성관로흐름에 적합한 S-A란류모형 (4)를 리용하고 Roe의 평균근사와 밀도에 대한련결음적2차정확도의 품상계차도식을 선택하여 진행하였다. 계산결과는 위에서 지적된 계산세포들에 대하여 S-A란류모형과 $k-\varepsilon$ 란류모형을 리용한 결과가 일치한다는것을 보여준다.

분체의 운동법칙은 방정식 (5), (6)을 만족시키며 분체의 밀도는 2800kg/m^3 , 모양은 구형이고 평균직경은 $140\sim 150\mu\text{m}$, 분산지수는 $n=4.5$ 인 로진-램을로(Rosin-Rammler)분포를 가지고있다고 가정하였다.

분출구입구에서 기체의 압력은 절대압력으로서 $p_0 = 0.5\sim 0.6\text{MPa}$ (온도 360K), 출구압력은 $p_e = 0.1\text{MPa}$ (온도 300K), 련결관입구압력은 $p_{in} = 0.1\text{MPa}$ (온도 300K), 흐름벽들은 모두 단열부착조건을 주었으며 거칠음상수는 0.5로 하였다.

4. 계산결과와 분석

기체상만이 흐를 때 분사장치의 중심축우에서 기체의 속도, 압력분포는 그림 2와 같다. 여기서 분출구의 노즐에서 속도분포는 압축성흐름의 속도변화법칙을 정확히 반영한다. 또한 분출구의 출구로부터 가속관의 출구까지의 구간에서는 속도차는 일정하게 유지하지만 압력은 가속관의 입구로부터 분사흐름구간까지 큰 차이가 없다.

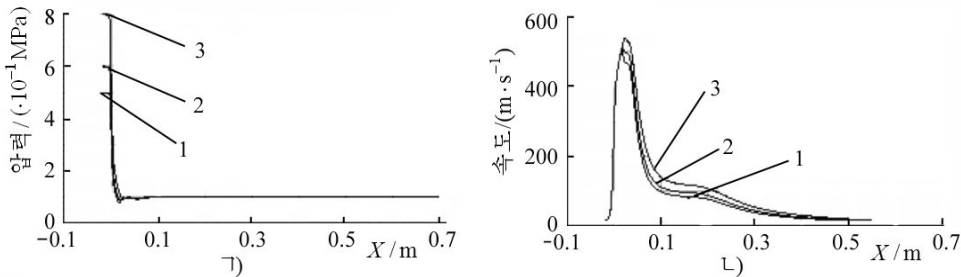


그림 2. 분사장치의 중심축우에서 공기의 압력분포(ㄱ)와 속도분포(ㄴ)
1-3은 각각 0.5, 0.6, 0.8MPa일 때

입구압력이 0.6, 0.8MPa이고 분체공급량이 각각 20, 47, 118, 133kg/h일 때 에젝터의 중심축우에서의 압력, 속도분포는 그림 3과 같다.

그림 3에서 보는바와 같이 분체가 공급될 때 노즐의 출구에서 충격파는 약화되고 분체의 공급량이 증가할 때 속도분포변화는 기체상만이 흐를 때와 같은 변화를 가진다.

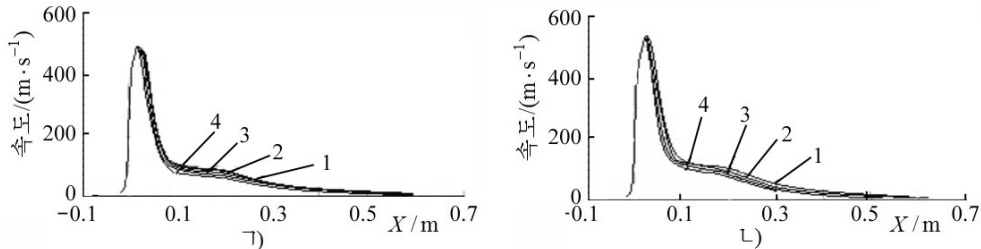


그림 3. 분체가 공급될 때 중심축우에서 공기의 속도분포
ㄱ) 입구압력이 0.6MPa일 때, ㄴ) 입구압력이 0.8MPa일 때
1-4는 각각 분체공급량이 20, 47, 118, 133kg/h일 때

입구압력이 0.6MPa기압이고 분체공급량이 70kg/h일 때 가속관의 출구면과 가속관의 출구면으로부터의 거리가 각각 50, 100mm인 검사면에서 분체의 속도에 따르는 질량비는 그림 4와 같다.

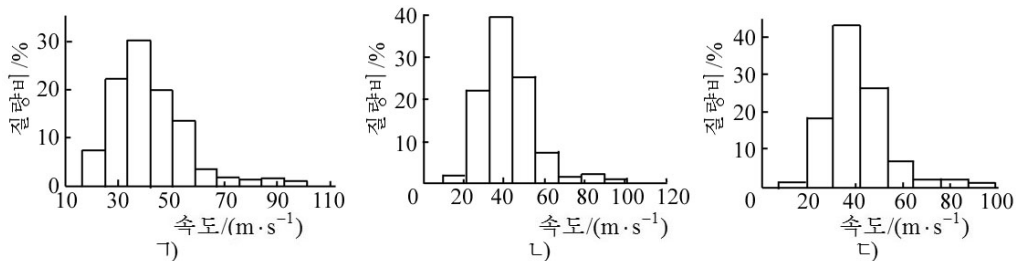


그림 4. 입구압력이 0.6MPa일 때 속도에 따르는 질량비
ㄱ) 가속관출구, ㄴ) 50mm, ㄷ) 출구면으로부터의 거리가 각각 50, 100mm일 때

그림 4에서 보는바와 같이 우에서 지적된 검사면에서 분체의 속도가 각각 37.5, 38.2, 36.8m/s일 때 최대질량비는 30, 40, 38.3%이다.

입구압력이 0.8MPa이고 분체공급량이 70kg/h일 때 그림 4와 같은 검사면에서의 속도에 따르는 질량비는 그림 5와 같다.

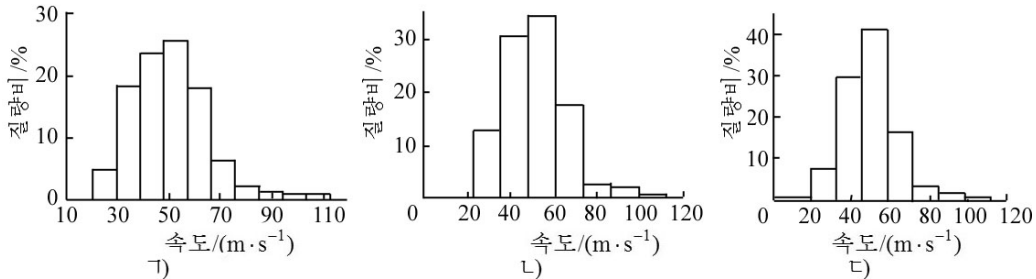


그림 5. 입구압력이 0.8MPa일 때 속도에 따르는 질량비

㉠), ㉡), ㉢)는 그림 4에서와 같음

그림 5에서 보는바와 같이 분체의 속도가 각각 53, 55.2, 52.5m/s에서 최대질량비는 25.1, 35, 42%이다.

그러나 그림 4, 5에서 최대질량비를 가지는 속도는 그림 5의 경우가 그림 4의 경우에 비하여 41, 45, 43% 증가하고 그 이상의 속도에 대한 질량비는 더 많다.

분체의 공급량이 133kg/h, 분출구의 입구압력이 각각 0.6, 0.8MPa, 가속관출구로부터의 거리가 100mm일 때 속도에 따르는 질량비는 그림 6과 같다.

그림 6에서 보는바와 같이 최대질량비에 해당되는 속도는 압력이 0.8MPa일 때 0.6MPa에 비하여 54% 증가한다.

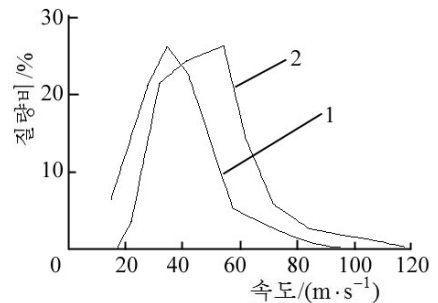


그림 6. 검사면에서의 질량비

1, 2는 각각 입구압력이 0.6, 0.8MPa일 때

맺는 말

그림 1과 같은 에젝터형식의 가속 및 혼합장치에서 입구압력이 0.6~0.8MPa이고 분체의 공급량이 70kg/h일 때 가속관의 출구로부터 50mm되는 곳에서 분체의 최대질량비가 가장 크다. 그러나 분체의 공급량이 156kg/h일 때는 가속관의 출구로부터 100mm되는 곳에서 최대질량비가 가장 크다. 압축기의 압력과 분체 및 류체재료의 성질 그리고 생산량이 주어진 조건에서 에젝터형식의 혼합 및 가속장치의 효율을 높이기 위하여서는 분체의 속도에 해당하는 질량비를 합리적으로 선정하여야 한다.

참고 문헌

- [1] 리기봉 등; 화학공업, 5, 35, 1993.
- [2] B. Jodoin; Cold Spray Nozzle Mach Number Limitation, 11, 496, 2001.
- [3] L. David et al.; arXiv; 1110.3090V2[Physics-dyn], 2011.
- [4] 森本洋史 等; 化学工学論文集, 30, 6, 802, 2004.

주제104(2015)년 5월 5일 원고접수

Flow Characteristics of Gas and Particles at an Ejector for Cross Jet Mill

Sin Hak Chol

The pressure and velocity of gas and the distribution of particle mass ratio versus particle velocity along the center axis of an ejector at different pressures and particle feed rate by a numerical simulation were discussed in this paper.

The numerical calculation results and methodologies of the paper can be widely used for the performance analysis and design of the ejector operating at different pressures and particle feed rate.

Key word: ejector