

기류분쇄기용에젝터에서의 기체 및 알갱이 흐름특성연구

신학철, 김의성

위대한 수령 김일성동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《과학자, 기술자들이 기계설계를 잘하도록 하여야 하겠습니다. 기계설계를 잘해야 질 좋고 능률 높은 기계를 만들수 있으며 기계공업을 빨리 발전시킬수 있습니다.》(《김일성전집》 제47권 434~435페이지)

에젝터는 서로 다른 기체와 액체 혹은 류체와 분체를 혼합하는데 리용될뿐아니라 기류분쇄기에서도 널리 리용된다.

에젝터의 류체동력학적원리[5]는 마주쓰기형기류분쇄기에서 리용되며 여기서는 복잡한 원료공급장치를 필요로 하지 않는다.

선행연구[3]에서는 마주쓰기형기류분쇄기에 외부관과 에젝터를 보충적으로 설치하여 분쇄실안의 분체들을 재순환충돌시키는 방법을 리용하였다.

에젝터를 가진 류동화된 기류분쇄기의 분쇄성능은 기체와 분체의 속도, 분체주입량 등에 의하여 결정된다.

에젝터에서의 흐름은 노즐의 분사흐름에 의하여 실현되며 노즐에서의 흐름파라미터들은 압축성기체의 1차원등엔트로피관계식에 의하여 결정된다.[1]

노즐에서 기체의 분사와 외부관에서 기체-분체의 흡입, 에젝터내에서 기체와 분체의 혼합과 가속을 동반하는 흐름은 압축성기체와 분체의 복잡한 혼합흐름이다.

선행연구[5]에서는 복잡한 공급장치가 없는 에젝터를 가진 한가지 기류분쇄기에 대하여 논의하였으며 선행연구[4]에서는 압력 및 분체조건이 주어졌을 때 마주쓰기형기류분쇄기의 가속노즐에서 기체 및 분체의 흐름을 압축성축대칭혼상흐름으로 보고 수값풀이하였다.

선행연구[6]에서는 자름면면적이 장방형인 노즐의 확대부에서 흡입되는 공기 및 분체의 흐름특성을 2차원압축성류체흐름에 대한 수값계산에 의하여 결정하였으며 선행연구[2]에서는 랭각도금분사흐름에서 분체와 도금판과의 충돌속도를 Fluent의련결음적방법과 2차정확도의 리산화도식을 리용하여 수값적으로 고찰하였다.

기류분쇄용에젝터에서 수값계산의 기본문제는 분체가 서로 충돌하는 점근방에서 공기와 분체의 흐름특성과 속도, 충돌속도에 대한 질량비분포를 결정하는것이다.

1. 문제 설정

에젝터를 가진 기류분쇄기의 분쇄부와 에젝터에 대한 기하학적도해는 그림 1과 같다.(단위 : mm)

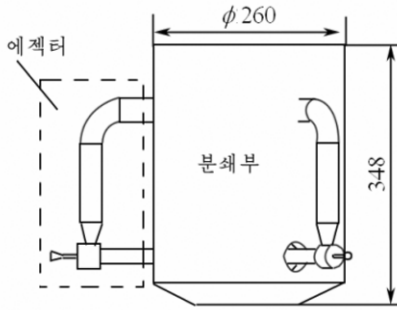


그림 1. 에젝터장치를 가진
류동화된 기류분쇄기

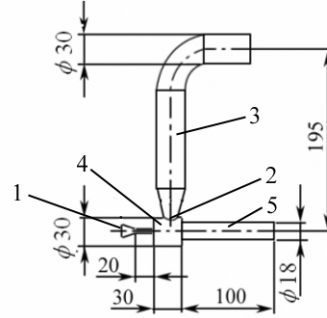


그림 2. 에젝터
1-노즐, 2-흡입관, 3-연결관, 4-혼합관, 5-가속관

에젝터를 가진 류동화된 기류식미분쇄기에는 에젝터가 3개 혹은 4개가 있다.

에젝터(그림 2)에서 노즐의 출구와 목의 면적비는 1.72이고 자리표계의 중심은 노즐목에 설정하였다.

분사장치의 흐름원리는 압축탱크의 압축공기가 노즐에서 분사될 때 노즐의 출구에서 압력이 떨어져 연결관으로 흡입된 공기와 분체가 흡입관을 거쳐 혼합관에서 분사흐름과 혼합되면서 가속관에서 가속분사된다. 에젝터흐름은 압축성흐름의 혼합과정이며 복잡한 기체동력학적과정을 동반하므로 흐름해석에 수값계산방법이 적용된다.

논문에서는 그림 2와 같은 에젝터의 분사장치에서 기체 및 분체의 흐름이 3차원정상 압축성란류와 분산상흐름이라는 가정밑에 수값계산에 의하여 그 흐름특성을 결정하는 계산방법을 확립하였다.

2. 기본방정식과 경계조건, 수값계산과정

3차원정상압축성란류의 지배방정식은 다음과 같다.

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

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (\text{운동방정식}) \quad (2)$$

여기서 ρ 는 기체의 밀도, \vec{v} 는 기체의 속도, P 는 정력학적압력, \vec{g} 는 중력이며 $\vec{\tau}$ 는 응력 텐서로서 $\vec{\tau} = \mu[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - 2\nabla \cdot \vec{v}I/3]$ 이다. I 는 단위텐서이다.

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

여기서 k_{ef} 는 유효열전도계수, J_j 는 j 성분의 흐름속도, E 는 전에너지, h 는 엔탈피이다.

중력이 있을 때의 고체알갱이의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d\vec{V}_p}{dt} = F_d(\vec{V} - \vec{V}_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (4)$$

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

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

분사장치의 흐름특성을 계산하기 위하여 그림 1과 같은 모형의 분사흐름구역의 길이와 너비는 가속관직경의 16.4, 5.5배로, 경계는 외부경계로 택하였다. 그리고 계산구역을 대칭면을 기준으로 한쪽 부분만을 택하고 56 000개의 6면체요소로 분할하였으며 대칭면에 대하여서는 면대칭조건을 주었다. 흐름마당의 수값계산은 3차원정상압축성란류방정식 (1)~(3)과 압축성관로흐름에 적합한 S-A란류모형[6]을 리용하고 Roe의 근사와 밀도에 관한 련결 음적도식과 2차정확도의 풍상계차도식을 선택하여 진행하였다.

분체의 모양은 구형이고 운동법칙은 식 (4)를 만족시키며 평균직경은 $140\sim150\mu\text{m}$, 분산지수 $n=4.5$ 인 Rosin-Rammler분포를 가지고있다고 가정하였다.

노즐입구에서 기체의 압력은 절대압력으로서 $P_0=0.5\sim0.6\text{MPa}$ (온도 340K), 출구압력 $P_e=0.1\text{MPa}$ (온도 300K), 련결관입구에서 압력은 $p_{in}=0.1\text{MPa}$ (온도 300K), 흐름벽들은 모두 단열부착조건을 주었으며 거칠음상수는 0.5로 하였다.

3. 계산결과와 분석

기체상만이 흐르고 입구압력이 각이할 때 분사장치의 중심축우에서의 기체의 압력과 속도분포는 그림 3과 같다.

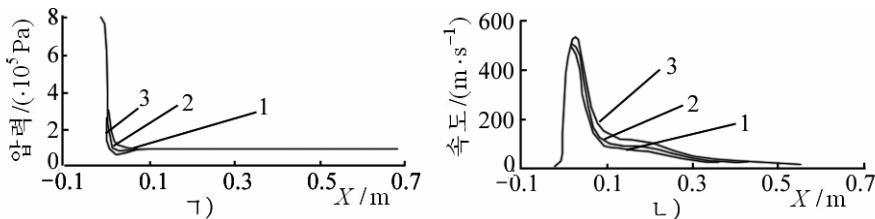


그림 3. 분사장치의 중심축우에서 공기의 압력, 속도분포
1) 압력분포, 2) 속도분포; 1-3은 각각 압력이 0.5, 0.6, 0.8MPa일 때

그림 3에서 보는바와 같이 노즐에서는 압축성 흐름의 속도변화법칙이 정확히 만족되며 노즐출구로부터 가속관의 출구까지의 구간에서는 속도차가 일정하게 유지되고 가속관내부에서의 압력변화는 작다.

입구에서의 압력이 0.6, 0.8MPa이고 분체공급량이 각각 10, 30, 60, 120kg/h일 때 에젝터의 중심축우에서 공기의 속도분포는 그림 4와 같다.

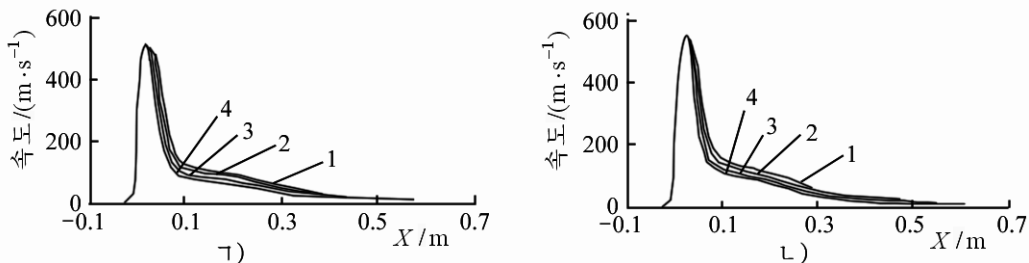


그림 4. 분체가 공급될 때 중심축우에서 공기의 속도분포
1) 2) 3) 4)는 각각 압력이 0.6, 0.8MPa일 때
1-4는 각각 분체공급량이 각각 10, 30, 60, 120kg/h일 때

그림 4에서 보는바와 같이 분체가 공급될 때 노즐의 출구에서 충격파는 약화되고 속도분포변화는 기체상만이 흐를 때와 같은 변화를 가진다.

노즐입구에서의 압력이 0.6MPa이고 분체공급량이 10kg/h일 때 가속관의 출구면과 가속관의 출구면으로부터의 거리가 각각 50, 100mm인 검사면에서 분체의 속도에 따르는 질량비는 그림 5와 같다.

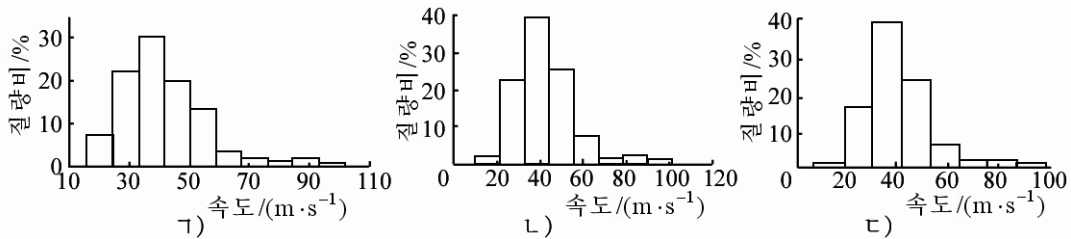


그림 5. 속도에 대한 질량비

ㄱ) 가속관출구, ㄴ), ㄷ)는 각각 가속관의 출구면으로부터의 거리가 각각 50, 100mm일 때

그림 5에서 보는바와 같이 위에서 지적된 검사면에서 분체의 속도가 각각 37.5, 38.2, 36.8m/s일 때 최대질량비는 30, 40, 38.3%이다.

노즐입구에서의 압력이 0.8MPa이고 분체공급량이 10kg/h일 때 그림 5와 같은 검사면에서의 속도에 따르는 질량비는 그림 6과 같다.

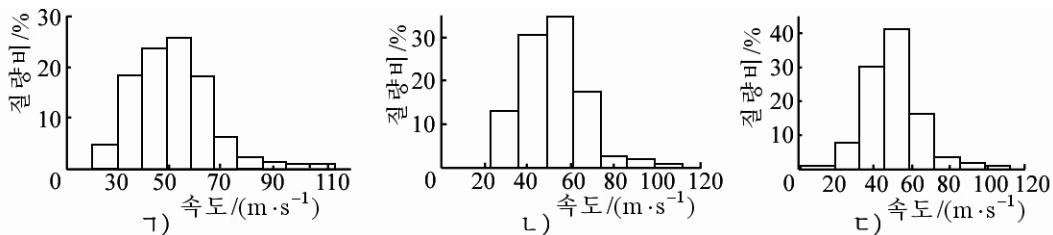


그림 6. 속도에 따르는 질량비

ㄱ), ㄴ), ㄷ)는 그림 5에서와 같음

그림 6에서 보는바와 같이 분체의 속도가 53.0, 55.2, 52.5m/s일 때 최대질량비는 각각 25.1, 35.0, 42.0%이다. 그러나 그림 5, 6에서 최대질량비를 가지는 속도는 그림 6의 경우가 그림 5의 경우에 비하여 41, 45, 43% 증가하고 그 이상의 속도에 대한 질량비는 더 크다.

분체의 공급량이 120kg/h, 노즐의 입구압력이 각각 0.6, 0.8MPa, 가속관출구로부터의 거리가 100mm인 검사면위에서 속도에 따르는 질량비는 그림 7과 같다.

그림 7에서 보는바와 같이 최대질량비에 해당하는 속도는 노즐입구압력이 0.8MPa일 때 0.6MPa에 비하여 54% 증가한다.

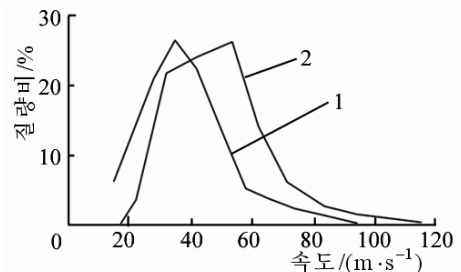


그림 7. 검사면에서의 질량비
1, 2는 각각 입구압력이 각각 0.6, 0.8MPa

맺는 말

그림 1과 같은 계산모형에서 입구압력이 0.6~0.8MPa이고 분체의 공급량이 10kg/h일 때 가속관의 출구로부터 50mm 되는 곳에서 분체의 최대질량비가 가장 크다. 그러나 분체의 공급량이 120kg/h일 때는 가속관의 출구로부터 100mm 되는 곳에서 최대질량비가 가장 크다.

에젝터형식의 기류분쇄기에서 분쇄능력은 압축기의 능력, 분체주입량, 립자의 속도에 따르는 질량비에도 관계된다.

참 고 문 헌

- [1] F. M. White; Fluid Mechanics, McGraw-Hill, 620~670, 2011.
- [2] B. Jodoin; JTTEES, 11, 496, 2001.
- [3] N. Roland; EP 1080786A1, 2001.
- [4] D. Eskin et al.; Powder Technology, 105, 257, 1999.
- [5] 季关昌; 矿业研究发, 16, 1, 3, 1996.
- [6] 森本洋史 等; 化学工学論文集, 6, 30, 802, 2004.

주체106(2017)년 2월 5일 원고접수

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

Sin Hak Chol, Kim Ui Song

The pressure and velocity distribution of gas and the distribution of particle mass ratio versus particle velocity along the center axis of an ejector device at different pressures and particle feed rate by a numerical simulation were considered. The numerical calculation results and methodologies of the paper can be widely used for the performance analysis and design of the ejector device at different pressures and particle feed rate.

Key words: ejector, nozzle