

기류식세멘트분쇄기에서 공기 및 고체알갱이의 운동특성

신학철, 윤순철

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《선진과학기술을 받아들이기 위한 사업을 적극적으로 벌려야 하겠습니다.

선진과학기술을 받아들이는것은 나라의 과학기술을 빨리 발전시키기 위한 중요한 방도의 하나로 됩니다.》(《김정일선집》 증보판 제15권 499~500페이지)

건재공업 특히 세멘트공업에서 세멘트알갱이의 합리적인 크기를 보장하는것은 세멘트의 질과 생산성을 높이는데서 중요한 문제로 된다.

논문에서는 세멘트공업에서 리용할수 있는 마주쓰기형기류식분쇄기의 공기와 분체의 운동에 미치는 분출구와 가속관의 형태의 영향을 3차원정상압축성란류에 대한 수값해석에 의하여 결정하였다.

1. 선행결과와 문제설정

선행연구[1]에서는 충격판충돌형기류분쇄기에서 기체-분체의 충돌과정을 실험적으로 논의하였다.

선행연구[3-5]에서는 고속분출구에서 운동하는 기체-분체의 운동특성을 수값해석에 의하여 논의하였지만 마주쓰기형기류분쇄기와 같은 모형에서 3차원정상압축성란류의 수값해석에 의하여서는 논의하지 못하였다.

마주쓰기형기류식분쇄기의 흐름 및 분쇄원리는 다음과 같다.

압축기에서 압축된 압축공기가 분출구에서 저음속으로부터 초음속으로 가속분사될 때 분출구출구에서 속도가 증가하면서 압력이 급속히 감소하여 분체공급관으로 공급된 고체알갱이는 혼합부에서 분사줄기흐름과 혼합된다.

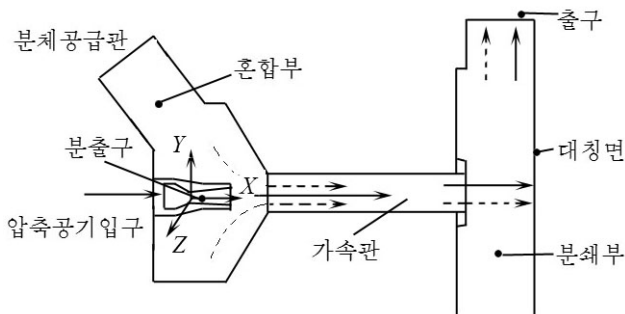


그림 1. 기류식세멘트분쇄기의 기하학적도해

혼합되는 기체-고체알갱이 혼합물은 가속관에서 혼합가속되면서 분쇄부에서 같은 방법으로 마주오는 분체와 충돌하여 분쇄된다.

마주쓰기형기류식분쇄기의 외형은 대칭일뿐만아니라 기체와 분체의 운동역시 서로 대칭이므로 어느 한 부분만을 논의할수 있다.(그림 1)

그림 1의 분출구와 가속관의 기하학적크기는 표와 같다.

표. 분출구와 가속관의 기하학적크기

	분출구			가속관		총돌거리 /mm
	목직경 /mm	출구직경 /mm	면적비	확대부길이 /mm	가속관직경 /mm	가속관길이 /mm
1형	9.8	12.8	1.706	80	75	400
2형	10.6	13.6	1.646	"	78	"

기류분쇄기에서 분출구와 가속관의 크기는 기체-분체의 운동특성에 큰 영향을 미치며 분쇄기의 성능을 결정한다.

그러므로 논문에서는 분출구와 가속관의 형태가 표와 같이 설정되었을 때 기류분쇄기의 공기-분체의 운동특성에 미치는 영향을 수값풀이에 의하여 결정하는것을 문제로 설정하였다.

2. 기본방정식과 경계조건

3차원정상압축성란류흐름방정식인 연속방정식, 운동방정식, 에네르기방정식은 각각 다음과 같다.[2]

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

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

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

여기서 p 는 정력학적압력, \vec{g} 는 중력, \vec{F}_p 는 단위질량의 고체립자가 기체에 주는 힘, $\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - 2\nabla \cdot \frac{\vec{v} \vec{I}}{3} \right]$ 이고 k_{ef} 는 유효전도계수, J_j 는 j 매질의 확산흐름량이며 E 는 전에네르기, h 는 엔탈피, $\bar{\bar{\tau}}_{ef}$ 는 란류점성계수이다.

란류모형으로는 $k-\varepsilon$ 모형과 Spalart-Allmaras(S-A)모형을 리용한다.

중력을 고려한 경우에 고체립자의 운동법칙은 다음과 같다.

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

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

$$F_d = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_d \text{Re}}{24}, \text{Re} = \frac{\rho d_p |\vec{V}_p - \vec{V}|}{\mu}, C_d = \begin{cases} 0.424, & \text{Re} > 1\,000 \\ 24(1 + \text{Re}^{2/3}/6)/\text{Re}, & \text{Re} \leq 1\,000 \end{cases} \quad (5)$$

경계조건으로서 분출구의 입구, 출구에서 압력조건을, 벽에서는 단열부착조건을 주었다. 고체알갱이의 모양은 구형이며 분체의 공급은 분체공급관의 입구를 통하여 정상적으로 공급되며 분체의 공급량은 공기체적의 10%이하로 제한하였다.

3. 수값계산과정

마주쏘기형기류분쇄기에서의 흐름마당의 대칭성을 고려하여 면대칭문제를 설정하고 계산구역을 57 000여개의 4면체요소로 분할하였으며 분출구와 출구부분에 마디점수를 보다 조밀하게 하였다.

흐름마당의 수값계산은 3차원정상압축성란류방정식 (1)–(3)과 S-A모형 혹은 $k-\varepsilon$ 란류모형[2]을 리용하였다.

또한 Roe의 평균근사와 밀도에 기초한 편결음적2차풍상계차도식을 선택하고 courant수는 1.6~4.2로 하였다.

계산구역의 입구와 출구, 분체공급관입구에서 압력은 각각 0.5, 0.1, 0.1MPa, 흐름벽들에는 모두 단열부착조건을 주었으며 거칠음상수는 0.5로 하였다.

계산그물수가 57 000개이상에서는 그물수가 계산결과에 영향을 미치지 않으며 리용된 두가지 란류모형도 계산결과에 영향을 미치지 않았다.

기체-분체흐름계산에서는 먼저 기체상만이 흐를 때 수렴풀이를 얻고 분체를 분체공급관의 입구에 각각 10, 15, 20t/h씩 공급하는 방식으로 하였다.

고체알갱이의 평균크기는 $145\mu\text{m}$, 분산지수는 4.5인 로진-램을러(Rosin-Rammlar)분포를 따르며 공기와 분체의 체적비가 10%이하이므로 분산상흐름으로 가정하였다.

4. 결과와 분석

1형(흐름량 $6.6\text{m}^3/\text{min}$)과 2형(흐름량 $7.7\text{m}^3/\text{min}$)에 대하여 입구압력이 $p_0=0.5\text{MPa}$ 일 때 X 축우에서 공기의 압력과 속도분포는 그림 2, 3과 같다.

그림 2, 3에서 보는바와 같이 분출구와 분사흐름에서 1형과 2형의 압력과 속도차이는 약 8.9%이고 가속관에서의 압력은 일치한다.

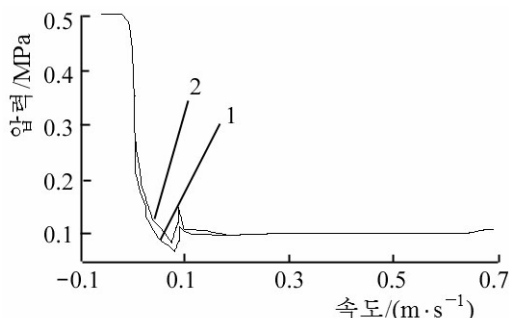


그림 2. 1형의 중심축우에서 압력분포

1-분출구에서의 압력분포,
2-분사흐름에서의 압력분포

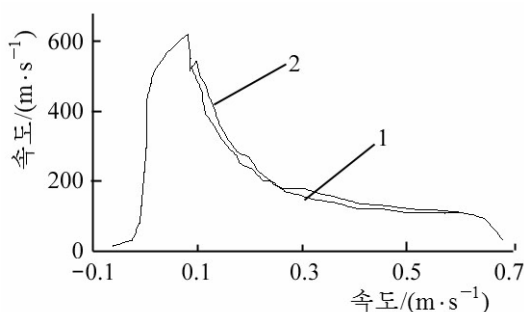


그림 3. 2형의 중심축우에서 속도분포

1, 2는 그림 2에서와 같음

1형과 2형에 대하여 분출구의 입구압력이 0.5MPa, 분체공급량이 10, 15, 20t/h일 때 중심축우에서 기체의 속도분포는 그림 4, 5와 같다.

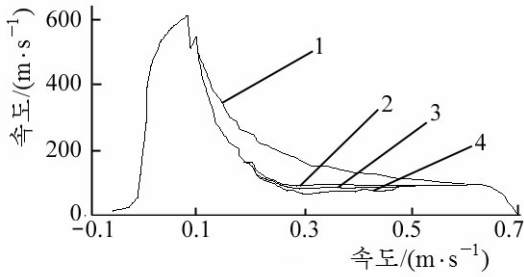


그림 4. 1형의 X 축우에서 속도분포
1-공기, 2, 3, 4는 각각 분체공급량이
10, 15, 20t/h일 때

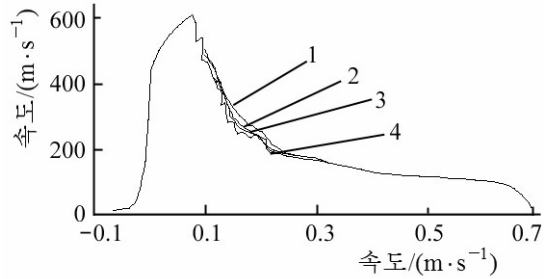


그림 5. 2형의 X 축우에서 속도분포
1-4는 그림 4에서와 같음

그림 4에서 보는바와 같이 1형에서 분체의 공급량이 증가함에 따라서 가속관의 입구 근방에서 공기의 속도는 분체가 공급되지 않을 때에 비하여 약 76%이하로 감소하지만 가속관의 출구에서 차이는 작다.

그리고 그림 5에서 보는바와 같이 2형에서 분체가 공급되면 공기의 속도는 분체가 공급되지 않을 때에 비하여 약간 떨어지나 가속관의 출구에서는 거의 같다.

그것은 2형이 1형에 비하여 분출구의 흐름량이 많고 가속관의 면적이 큰것으로 하여 공급되는 분체들이 중심축우의 속도분포에 영향을 크게 미치지 못하기때문이다.

1형에 대하여 입구압력이 $p_0 = 0.5\text{MPa}$ 일 때 분체의 공급량에 따르는 충돌속도에 대한 질량분포는 그림 6과 같다.

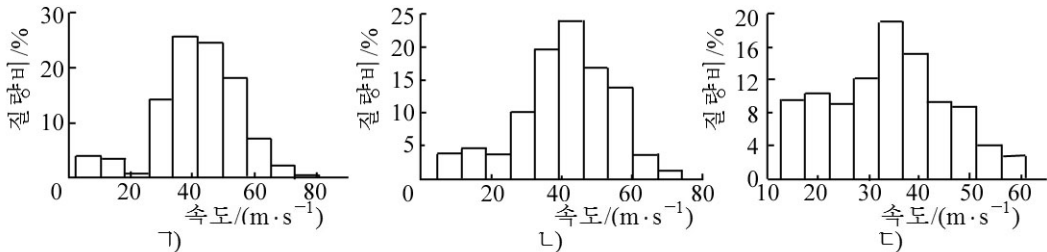


그림 6. 1형에서 분체공급량에 따르는 충돌속도에 대한 질량분포

㉠, ㉡, ㉢)는 각각 분체공급량이 10, 15, 20t/h일 때

그림 6에서 보는바와 같이 1형에 대하여 분체공급량이 각각 10, 15, 20t/h일 때 충돌속도가 50m/s이상인 질량분포는 각각 29.5, 26.8, 16.0%이다.

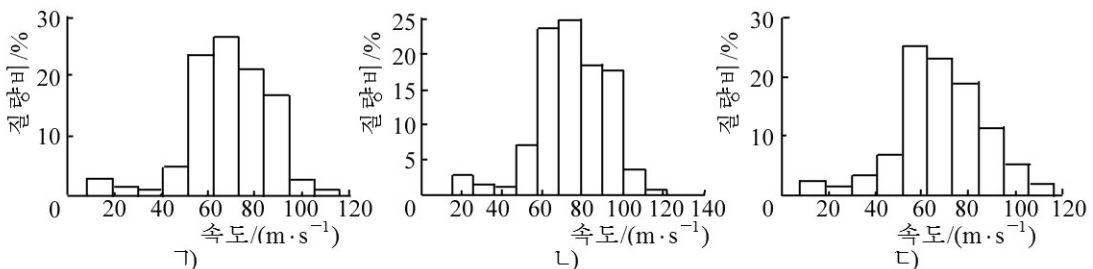


그림 7. 2형에서 분체공급량에 따르는 충돌속도에 대한 질량분포

㉠, ㉡, ㉢)는 그림 6에서와 같음

그림 7에서 분체의 공급량이 각각 10, 15, 20t/h일 때 분체의 충돌속도가 50m/s이상인 질량분포는 각각 76, 71.6, 87%이다. 그러나 충돌속도가 90m/s에 해당하는 질량분포는 각각 10, 17.5, 5%이다.

1형에서는 이러한 속도에 대한 질량분포가 존재하지 않는다. 이것은 2형이 분체의 공급량이 15t/h일 때 충돌효과가 가장 높다는것을 보여준다.

맺 는 말

마주쏘기형기류식분쇄기에서 분체의 충돌속도 즉 분쇄효율은 분출구와 가속관의 모양은 물론 압축기의 능력, 분쇄되는 물체의 물리적성질, 생산량 등에 관계된다. 그러나 압축기의 능력과 분체의 공급량이 주어진 조건에서 분체의 충돌속도를 증가시키자면 분출구의 면적비와 가속관의 직경을 합리적으로 설정하는것이 가장 합리적이다.

참 고 문 헌

- [1] 리기봉 등; 화학공업, 5, 35, 1993.
- [2] J. C. Tannehill et al.; Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer., Taylor & Francis, 56 ~792, 1997.
- [3] S. Voropayev et al.; Minerals Engineering, 15, 6, 446, 2002.
- [4] B. Jodoin; Cold Spray Nozzle Mach Number Limitation, 11, 496, 2001.
- [5] L. David et al.; arXiv; 1110.3090V2[Physics-dyn], 2011.

주체104(2015)년 8월 5일 원고접수

Flow Characteristics of Air and Particle in a Jet Mill for Grinding Cement

Sin Hak Chol, Yun Sun Chol

We analyzed influence of form of nozzle and acceleration tube in cross jet mill for grinding cement on flow characteristics of air and particle by numerical solution about 3D steady compressible turbulence flow. We determined a limit of velocity and mass ratio distribution according to the form of nozzle and acceleration tube, when the inlet pressure of nozzle in a cross jet mill and feed of particle were given.

Key word: cross jet mill