

초음속 축소-확대 노즐 수치해석 및 충돌판 충돌형 젯트 밀의 분쇄 특성

길준호*[†] · 하백현

한양대학교 응용화학공학부

*쌍용중앙연구소

(1998년 2월 26일 접수, 1998년 7월 6일 채택)

A Numerical Analysis of the Supersonic Convergent-Divergent Nozzle and the Grinding Characteristics of a Target-type Jet Mill

Jun-Ho Kil*[†] and Baik-Hyon Ha

School of Chemical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

*Ssangyong Research Center, Yuseong, Taejeon 305-345, Korea

(Received 26 February 1998; accepted 6 July 1998)

요 약

본 연구에서는 전산유체역학 CODE인 FLUENT™을 이용하여 여러 가지 형상의 초음속 축소-확대 노즐에 대한 기-고 혼합체의 속도분포 수치해석을 다루었고, 충돌판 충돌형 젯트 밀의 분쇄특성을 연구하였다. 수치해석 결과와 실험결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있었고, 분쇄효율 관점에서 최적 노즐 형상을 선정할 수 있었다. 그리고 다음 인자들의 관점에서 최적 분쇄 조건을 조사하였다: 분쇄 압력, 노즐출구에서 충돌판까지의 거리, 젯트기류 방향과의 충돌판 각도, 중량 혼합비. 그 결과 충돌거리의 노즐 출구 직경의 2-3배 거리, 충돌판 각도는 60-90°, 중량 혼합비는 0.5보다 작은 범위가 최적인 것을 발견할 수 있었다.

Abstract— In this study, we dealt with numerical analysis of the velocity distribution in the flow of gas-solid mixture about the various shapes of supersonic convergent-divergent nozzle by using the computational fluid dynamics CODE, FLUENT™. We also studied grinding characteristics of a target-type jet mill. It was found that the results of the present numerical analysis and experiment were in good agreement. We could select the optimum nozzle shape with respect to the grinding efficiency. And then the optimum grinding conditions were investigated with respect to the following parameters: the grinding pressure, the distance from the nozzle outlet to the target plate, the angle between the jet flow direction and target surface, and the mixing ratio by weight. The results show that the optimum conditions of the collision length, target angle, and mixing ratio are 2-3 times the distance of the nozzle outlet diameter, 60-90°, and <0.5, respectively.

Key words: Supersonic Nozzle, Numerical Analysis, Target-Type Jet Mill, Grinding Characteristics

1. 서 론

고압의 압축공기를 분쇄 매체로 하여 분쇄를 행하는 유체 에너지 밀(이하 젯트 밀로 표기)은 미분쇄 용이성, 분쇄시 오염물질 혼입 최소화, 열약성 물질에의 적합성 등 여러 장점때문에 최근 미분쇄를 필요로 하는 고기능성 분쇄 제조에 필수적인 분쇄기로 주목받고 있다. 젯트 밀에 있어서 분쇄는 일반적으로 고속의 기류에 의해 가속된 입자가 입자간 충돌, 벽면 혹은 충돌판에 충돌함으로써 이루어지는 것으로 알려져 왔으나[1,2], 입자-입자간 충돌 및 입자-분쇄 벽면간 충돌확률은 낮다[3-5]. 충돌판 충돌형 젯트 밀은 입자-충돌판간 직접 충돌이 가능하고, 충돌력이 크기 때문에 분쇄효과가 크

며, 노즐형상, 분쇄 조건 등에 따라 분쇄효율이 다르다. 이러한 충돌판 충돌형 젯트 밀 연구에는 Rumpf[6,7]와 Schlaug[8]가 노즐에서의 기-고 혼합흐름을 이론적으로 연구하였고, Okuda와 Choi[9]가 노즐 내부에서의 입자거동을 연구하였으며, Idem[10]이 단일 입자의 분쇄특성을 연구한 바 있다. 본 연구의 목적은 상기의 기초연구 결과를 배경으로 최근 주목받고 있는 석회석 미분말의 최적 분쇄조건을 설정하고, 이론적·정량적인 분쇄 메카니즘에 대한 정보를 제공하려는 데 있다. 따라서 본 연구에서는 노즐 형상별 수치해석을 실시하고, 수치해석 결과와 분쇄실험결과를 비교하여 최적 노즐을 선정하였고, 선정된 노즐을 이용하여 분쇄효율적인 측면에서 최적분쇄 조건을 도출하기 위해 분쇄압력의 영향, 충돌판까지의 거리 영향, 충돌각도의 영향, 원료공급속도의 영향 등을 정량적으로 고찰하였다.

[†]E-mail: JHKIL@ssrc.ssy.co.kr

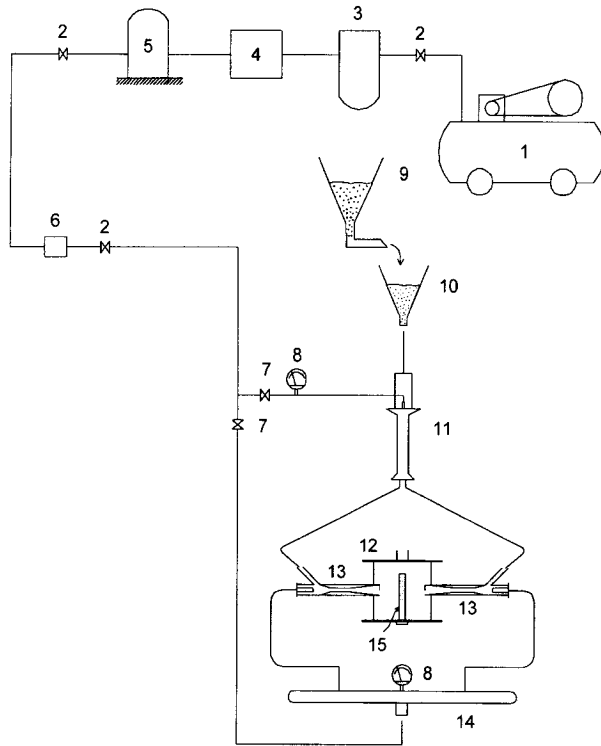


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

- | | |
|--------------------------|----------------------|
| 1. Compressor | 9. Vibrating feeder |
| 2. Stop valve | 10. Feed hopper |
| 3. Filter | 11. Dividing ejector |
| 4. Air dryer | 12. Grinding chamber |
| 5. Receive tank | 13. Ejector nozzle |
| 6. Flow meter | 14. Air tank |
| 7. Flow regulation valve | 15. Target plate |
| 8. Pressure gauge | |

2. 실험 및 수치해석

2-1. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에 사용한 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 압축기 ①에서 압축된 공기는 공기 건조기 ④에서 건조된 후 저장탱크 ⑤로 저장되고, 저장된 압축공기는 다시 유량계 ⑥을 거쳐 각 압력조절밸브 ⑦에서 일정 압력으로 조절된 후 분쇄 에너지로 사용된다. 한편 진동식피더 ⑨에서 일정 공급속도로 조절된 공급원료는 원료 호퍼 ⑩를 거쳐 분배기 ⑪로 유입되어 압축공기와 함께 혼합된다. 기-고 혼합체는 두 흐름으로 고르게 분기되어 분쇄실(200mmΦ × 150 mmH) ⑫에 서로 대칭으로 설치된 2개의 분사노즐 ⑬으로 유입된다. 또한 공기저장관 ⑭에서 저장된 분쇄에너지로 사용되는 압축공기는 압력계이지 ⑧로 일정 분쇄압력으로 조정된 후 분배기 ⑪로부터 유입되는 기-고 혼합체를 가속하여 충돌판 ⑮에 충돌시켜 분쇄가 이루어지도록 하였다. 분쇄생성물은 백필터 포집기에서 포집하여 MASTERSIZER(MALVERN PowerMate SX/16i)를 이용하여 입도분석하였고, 실험 변수 조절을 위해 노즐 케이스, 충돌판을 가변적으로 조정할 수 있게 설치하였다. Table 1은 본 실험에 사용한 석회석 시료의 물성 및 실험범위를 나타낸 것이다. 실험에 사용한 석회석은 롤러밀에서 미리 일정 입도로 예비분쇄하여 분쇄실험에 사용하였다.

2-2. 수치해석

Table 1. Physical properties of feed material and experimental ranges

Feed material	Limestone
True density	2,700 kg/m ³
Particle size(Average. dia)	-D ₅₀ : 13.9 μm
Nozzle type	Type=I, II, III, IV, V
Feed rate	W _f =20-300 kg/hr
Pressure at injector nozzle	P _g =4.0-7.0 kg/cm ² ·G
Angle between air stream and target plate	θ=15-90°
Distance between nozzle outlet and target plate	L=16-32 mm

Table 2. Dimensions for various types of nozzles

Nozzle type	Length(mm)			Diameter(mm)			Angle(°)	
	Lc	Lt	Ld	Dc	Dt	Dd	α	β
Type I	9.5	8.75	19.0	8.7	7.7	8.7	2.3	1.1
Type II	9.5	8.75	19.0	8.7	7.7	11.4	2.3	5.6
Type III	9.5	8.75	19.0	8.7	7.7	15.9	2.3	12.2
Type IV	9.5	8.75	19.0	8.7	10.9	12.3	4.2	2.1
Type V	9.5	8.75	19.0	8.7	13.3	15.1	5.4	2.7

*Description : c=convergent; t=throat; d=divergent; α=converging angle; β=diverging angle

Table 2는 수치해석 및 분쇄 실험에 사용한 5종의 축소-확대 노즐의 형상, 치수를 나타낸 것이다. 형상, 치수가 각각 다른 5종의 노즐을 초경합금으로 제작하여 전산유체 CODE인 FLUENT™을 이용하여 각 노즐별로 수치해석을 실시하고, 수치해석 결과와 실험 변수별 분쇄실험결과를 비교분석한 후, 최적 노즐을 선정하고 선정된 노즐을 주로 사용하여 각 영향인자별로 분쇄실험을 하였다. 수치해석에 사용한 FLUENT™는 Lagrangian 이론에 따라 입자의 힘 수치를 적분함으로써 분산된 고상입자의 궤적을 예측할 수 있는 프로그램이다. 식 (1)의 힘 수치는 입자에 가해지는 힘과 입자 관성력이 같다는 가정(cartesian 좌표에서 x-축에 대해)에서 출발한다.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u_g - u_p) + g_x(\rho_p - \rho_g)/\rho_p + F_x \quad (1)$$

여기서 $F_D(u_g - u_p)$ 는 단위입자 중량당 항력으로 F_D 는 다음과 같이 주어진다.

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (2)$$

Re는 상대 레이놀즈수를 나타내고 다음과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{\rho D_p |u_p - u_g|}{\mu} \quad (3)$$

항력계수 C_D 는 다음 식 (4)의 상대 레이놀즈수의 함수이다.

$$C_D = a_1 + a_2/Re + a_3/Re^2 \quad (4)$$

여기서 a_i 는 Morsi와 Alexander[17]가 제시한 레이놀즈수 범위에 적용되는 상수이다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 노즐 유형별 유속분포

Fig. 2는 5종의 노즐에 대해 노즐입구 압력조건을 7kg/cm²·G로 동

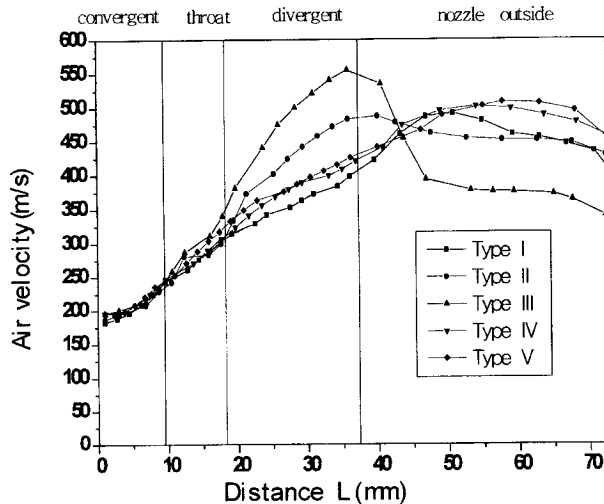


Fig. 2. Air velocity profiles of nozzles at grinding pressure $P_g=7 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{G}$ (numerical analysis result).

일조건으로 하였을 때, 노즐내부 및 거리별로 x축 방향(젯트기류 분사방향)의 유속분포 수치해석 결과를 나타낸 것이다. Type I 노즐을 기준으로 확대부를 확대한 Type II, III 노즐의 경우 확대부 출구 부근에서 최대 유속분포를 보이다가 출구에서 토출된 후에는 거리가 멀어질수록 속도가 점점 감소하였다. 특히 Type III 노즐의 속도감소는 거리증가에 따라 급격한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Viswanathan[11]이 보고한 바와 같이 확대부의 과확대에 의한 노즐 내부에 충격파가 발생됨으로써 압력 에너지가 속도에너지로 효율적으로 전환되지 못하고 단순 확산기로 작용한 결과로 판단된다. 반면 Type I, IV, V 노즐의 경우는 토출구로부터 약 35 mm 정도 거리까지 속도가 유지되는 것으로 나타났다.

3-2. 노즐별 분쇄특성

Fig. 2의 유속분포 수치해석 결과를 바탕으로 5종의 노즐에 대해 분쇄특성을 비교하기 위해 분쇄압력, $7 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{G}$, 공급속도, 60 kg/hr 조건으로, 노즐 출구에서 충돌판까지 거리를 각각 16, 24, 32 mm로 위치를 변경하여 분쇄실험한 결과를 Table 3에 나타내었다. 여기서 D_{50} 은 분쇄 평균입径, $R \cdot r$ 은 분쇄비를 나타낸 것이다. 분쇄특성은 공급원료와 조건별 분쇄생성물을 MASTERSIZER 입도분석기로 분석하여 입도변화를 평균입径 기준으로 비교하였다. 분쇄 평균입径(D_{50} , μm)을 기준으로 분쇄비($R \cdot r$)를 비교해 본 결과 수치해석 결과에서 공기속도가 높게 나타난 Type I, IV, V 노즐이 Type II, III 대비 상대적으로 분쇄성능이 높게 나타났다. Table 4는 분쇄특성이 상이한 것으로 나타난 Type I, III, V 노즐에 대해 각 입자크기별 입

Table 3. Comparison of grinding characteristics for various types of nozzles(experimental result)

Nozzle type	Feed D_{50} (μm)	Distance from nozzle outlet					
		16 mm		24 mm		32 mm	
		D_{50} (μm)	$R \cdot r$ (-)	D_{50} (μm)	$R \cdot r$ (-)	D_{50} (μm)	$R \cdot r$ (-)
Type I	13.9	3.4	4.1	3.6	3.9	3.7	3.8
Type II		4.6	3.0	4.4	3.1	5.1	2.7
Type III		3.8	3.7	4.0	3.5	5.8	2.4
Type IV		3.5	4.0	3.5	4.0	4.4	3.2
Type V		3.3	4.2	3.9	3.6	4.0	3.5

Table 4. Comparison of particle velocity for various types of nozzles (numerical analysis result)

Particle size (μm)	Particle velocity(m/s)								
	Distance, 16 mm			Distance, 24 mm			Distance, 32 mm		
	Type I	Type III	Type V	Type I	Type III	Type V	Type I	Type III	Type V
1	470	378	502	451	373	501	421	345	416
3	445	422	462	446	403	476	440	380	463
12	338	340	351	349	342	369	356	343	377
24	277	273	288	287	278	303	295	281	312
48	223	214	233	233	219	245	240	223	254
96	178	168	186	185	173	195	192	176	202

자속도의 수치해석 결과를 나타낸 것이다. 입자속도 수치해석에서는 입자상호간의 간섭은 없는 것으로 가정하였다. 입자속도는 동일 분쇄시료를 대상으로 노즐 입구조건을 압력, $7 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{G}$ 로 하여 노즐 토출구로부터의 거리, 35 mm까지 전 구간에 걸쳐 입자 속도분포를 수치해석한 것 중 분쇄 조건으로한 충돌판까지의 거리, 16, 24, 32 mm 지점에서의 입자속도를 비교한 것이다. 비교대상 노즐 모두 입자크기별 속도는 상당한 차이를 보였으며, $1 \mu\text{m}$ 의 작은 입자의 경우는 공기 속도에 근접하는 속도를 나타내고 토출구로부터 거리가 멀어짐에 따라 가속력이 점점 감소하는 것으로 나타났으며, $3 \mu\text{m}$ 입자의 경우도 유사한 결과로 나타났다. 반면, $12 \mu\text{m}$ 이상 입자의 경우는 거리가 멀어질수록 입자가속력이 점점 증가하는 것으로 나타났으며, $12 \mu\text{m}$ 정도의 입자를 기점으로 이보다 작은 입자는 $M > 1$ 의 초음속 속도를 보이고, 이보다 큰 입자는 $M < 1$ 의 아음속을 갖는 것으로 나타났다. 여기서 M 은 마하수를 나타낸 것으로 유체의 속도와 동일한 흐름조건하에서의 음속과의 비로 정의되는 값이다. 비교 노즐별로 비교해 보면 공기속도가 크게 나타난 Type I, V 노즐이 Type III 노즐에 비해 상대적으로 입자 가속력이 큰 것으로 나타났다. 이러한 입자 가속력이 큰 노즐이 Table 3에서의 분쇄실험결과에서 볼 수 있듯이 분쇄비가 큰 것으로 나타났다. 따라서 입자속도 수치해석 결과와 분쇄실험결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

3-3. 노즐별 분쇄에너지 효율

Bond 법칙[12]에 따르면, 이론 분쇄에너지는 단위입자 파쇄 이론 분쇄 에너지로서 물리적 측정방법에 의해 결정될 수 있는데, 분체고유의 물성 특성치인 고체표면 에너지와 분쇄에 의해 새로 생성된 표면적 증가량을 곱하여 구할 수 있다. 한편 분쇄기에서 실제소비된 총 투입에너지는 적산 전력계에서 구할 수 있다. 따라서 본 고에서는 다음 (5)식의 이론 분쇄에너지(E_1)와 적산 전력계로 산출한 (6)식의 총 투입에너지(E_2)로 (7)식의 이론 분쇄에너지 효율(η)을 산출하여 상대 비교하였다.

* 이론 분쇄에너지(E_1 , kwh/T)

$$= \Delta S \times E_s$$

$$= \frac{\Delta S (\text{cm}^2/\text{g}) (8.36 \times 10^4) (\text{erg}/\text{cm}^2) \times 10^6 (\text{g}/\text{T})}{860 \times 10^3 \times 4.2 \times 10^7 (\text{erg}/\text{kwh})} \quad (5)$$

* 석회석 표면에너지(E_s): $8.36 \times 10^4 (\text{erg}/\text{cm}^2)$

$$* \text{총 투입에너지}(E_2, \text{kwh/T}) = \frac{P_e (\text{kw})}{W_f (\text{T/h})} \quad (6)$$

$$* \text{이론 분쇄에너지효율}(\eta, \%) = \frac{E_1}{E_2} \times 100 \quad (7)$$

위에서 ΔS 는 비표면적 증가, P_e 는 전력소비량, W_f 는 원료공급속도

Table 5. Comparison of grinding efficiency for various types nozzles (experimental result)

Nozzle type	W_g (m ³ /min)	ΔS (cm ² /g)	E_1 (kwh/T)	E_2 (kwh/T)	η (%)
Type I	3.9	1870	4.3	390	1.10
Type III	5.1	1112	2.6	510	0.51
Type V	11.6	1928	4.5	1160	0.39

를 나타낸 것이다. 비표면적은 문헌[13]에 보고된 방법에 따라 입도 분석 결과로 산출하여 비교하였다. Table 5는 치수가 서로 다른 Type I, III, V 노즐에 대해 분쇄 압력, 7 kg/cm²·G, 공급속도, 60 kg/hr로 하였을 때, 충돌판까지의 거리 16 mm 지점에서의 공기 소비량, 비표면적 증가, 이론 분쇄에너지 효율을 비교하여 나타낸 것이다. 3종의 노즐의 분쇄성능을 분쇄효율 측면에서 비교해 볼 때, 동일 분쇄 압력조건인 7 kg/cm²·G에서 목부 단면적이 상대적으로 큰 Type III, V 노즐의 경우 상대적으로 공기소비량이 많아 총 투입 에너지가 크기 때문에 분쇄에너지 효율은 Type I 노즐이 가장 우수한 것으로 나타났다. 따라서 비교대상 노즐 중 Type I 노즐이 최적인 것으로 판단된다.

3-4. 분쇄 압력의 영향

최적 노즐로 판단되는 Type I 노즐에 대해 분쇄 압력에 따른 분쇄 특성을 알아보기 위해 분쇄 압력을 4-7 kg/cm²·G까지 변화시켜 분쇄 실험을 하였다. Fig. 3은 각 입자 크기별 입자 속도분포를 나타낸 것이고, Fig. 4는 분쇄 압력별 비표면적 증가를 나타낸 것이다. 입자속도는 각 압력조건별로 입자크기에 따라 큰 차이를 나타내었으며, 입자크기 증가에 따른 입자속도 감소폭은 입자크기가 커질수록 둔화되는 것으로 나타났다. 압력 증가에 따른 입자속도는 전 입자구간에서 비례적으로 증가하였으며, 비표면적도 거의 선형적으로 증가하였다. 따라서 비표면적 증가는 입자속도에 주로 영향을 받는다고 할 수 있다. Fig. 5는 분쇄압력별로 각 입자 크기별 단위중량당 입자운동에너지를 나타낸 것으로 분쇄 실험에 사용한 석회석의 입자 운동에너지는 분쇄조건 4-7 kg/cm²·G에서 입자 크기별로 1.2×10⁴-11.0×10⁴ J/kg를 갖는 것으로 나타났으며, 분쇄압력이 증가할수록, 작은 입자일수록 입자파쇄에 필요한 운동에너지를 크게 받는 것으로 나타났다.

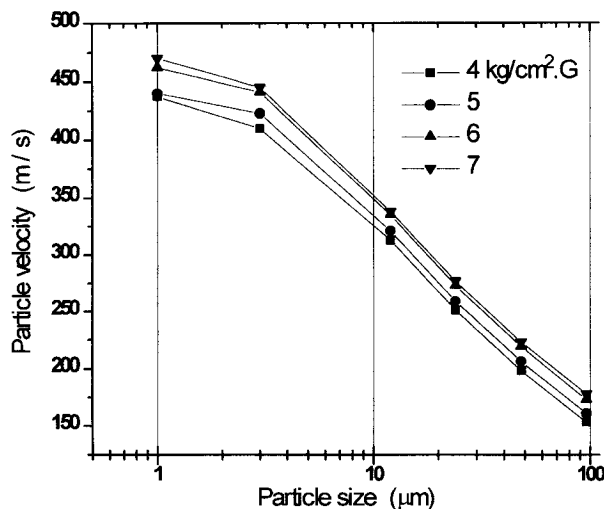
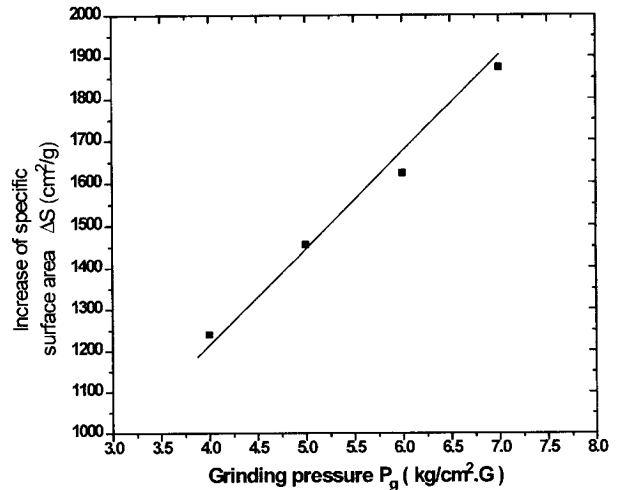
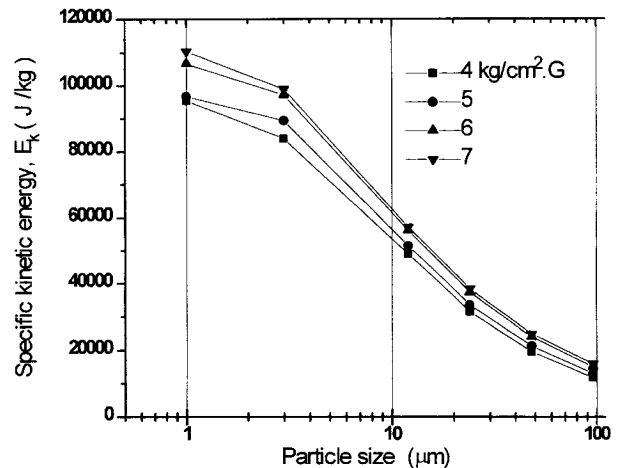


Fig. 3. Particle velocity distribution about the different particle size at target distance L=16 mm (numerical analysis result).

Fig. 4. Relation between increase of specific surface area ΔS and grinding pressure P_g at target distance $L=16$ mm, and target angle $\theta=90^\circ$ (experimental result).Fig. 5. Specific kinetic energy of each particle at target distance $L=16$ mm, and target angle $\theta=90^\circ$ (experimental result).

3-5. 충돌판까지의 거리 영향

충돌판 충돌 분쇄방식의 젯트 밀에 있어서, 각 입자가 갖는 가속력 차이에 따른 입자 운동에너지의 차이로 공급원료의 특성에 따라 적정 분쇄거리(L)가 존재한다. 따라서 최적 노즐로 선정된 Type I 노즐을 사용하여, 각 입자가 갖는 가속력 차이에 따른 입자 운동에너지의 차이로 분쇄 평균입도 3-4 μm 정도의 미분쇄시 적정거리를 알아보기 위해 노즐 출구에서 충돌판 표면까지의 거리를 각각 16, 24, 32 mm 위치로 조정하여 분쇄압력, 7 kg/cm²·G에서 분쇄특성을 비교하였다. Fig. 6은 거리에 따른 입자 크기별 속도분포를 나타낸 것이다. 각 입자는 축소-목-확대부를 지나면서 입자 크기별로 급속히 가속되고 노즐 출구에서 분사된 후에는 그 가속력이 더욱 커지는 것으로 나타났다. 입자 크기별로 가속도가 큰 차이를 보였으며, 1-3 μm의 작은 입자는 토출구로부터 분사된 후 짧은 거리를 지나면서 급속히 가속되다가 일정거리(10-20 mm)를 지난 후 가속도가 점점 감소하였고, 3 μm 이상의 입자는 노즐 출구로부터의 거리 -70 mm 지점까지 가속도가 증가하다가 70 mm 지점부터는 점점 감소하였다. Fig. 7은 충돌판까지의 거리와 비표면적 증가와의 관계를 나타낸 것이다. 충돌판까지의 거리가 멀어질수록 비표면적은 점점 감소하였다. 이러한 결과는 Okuda와 Choi[9]가 큰 입자 분쇄시 최적거리가 70±10

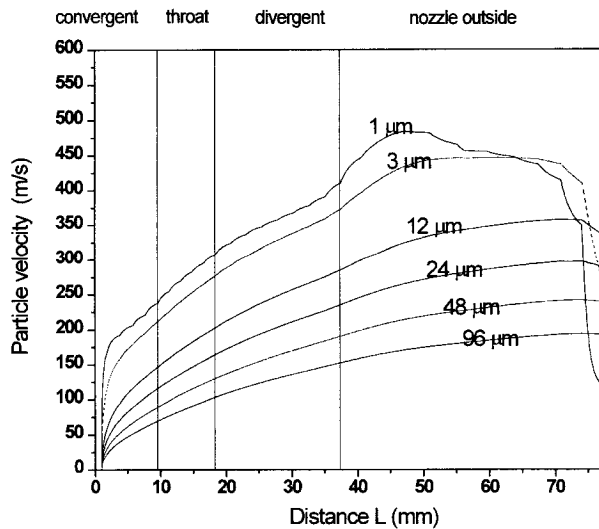


Fig. 6. Particle velocity profiles at each position at grinding pressure $P_g = 7 \text{ kg/cm}^2 \cdot G$ (numerical analysis result).

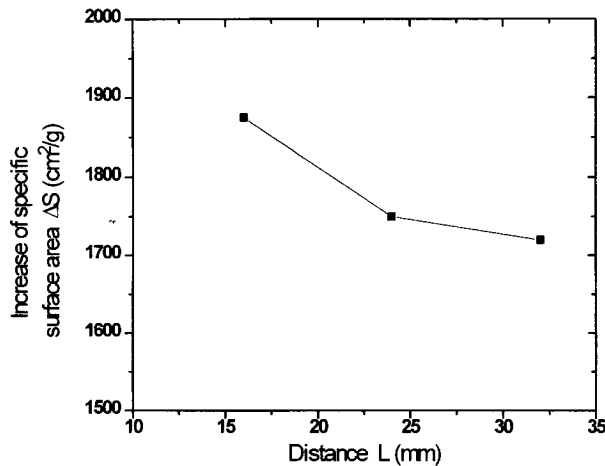


Fig. 7. Relation between increase of specific surface area ΔS and target distance L at grinding pressure $P_g = 7 \text{ kg/cm}^2 \cdot G$, and target angle $\theta = 90^\circ$ (experimental result).

mm라고 보고한 것과는 다소 차이가 있는데, 이는 실험에 사용한 공급원료의 특성 차이(입도, 피분쇄성 등)에 의한 것으로 판단되며, 평균입경 $3\text{--}4 \mu\text{m}$ 정도의 미분 분쇄시에는 작은 입자의 가속도가 충분히 유지될 수 있는 거리로 가능한 충돌판을 가까이 조정해야 함을 알 수 있다. Fig. 8은 거리에 따른 각 입도구간별 입자 변화량(중량 %)을 공급원료 대비 비교한 것이다. 공급원료 대비 분쇄분의 입도는 $12 \mu\text{m}$ 를 기준으로 입도 분포가 양극화되는 것으로 나타났으며, 이는 $12 \mu\text{m}$ 이상의 큰 입자가 주로 분쇄되어 그 이하의 입자로 분포되는 결과로 해석된다. 거리에 따른 분쇄 특성은 충돌판까지의 거리에 따라 분쇄 입도가 상이하며, 거리가 가까울수록 상대적으로 작은 입자가 분쇄되는 것을 알 수 있다. 거리 16 mm 지점에서는 $12\text{--}48 \mu\text{m}$ 정도의 중간 크기 입자가 주로 분쇄되어 $1\text{--}12 \mu\text{m}$ 입도로 많이 분포되고, 반면 거리 16, 24 mm 지점에서는 $48 \mu\text{m}$ 이상의 큰 입자가 주로 분쇄되어 $4\text{--}48 \mu\text{m}$ 의 입도로 상대적으로 많이 분포하는 것으로 판단된다. Fig. 9에 나타난 R-R 입도분포지수[15]를 보면 충돌 거리에 따라 주로 분쇄되는 입도 범위의 차이로 생성된 입자의 분포도가 상이함을 알 수 있다. R-R 입도분포지수는 $12 \mu\text{m}$ 정도의 입자를 기점으로 거리가 가까울수록 작은 입자의 입도분포지수는 커지고 상

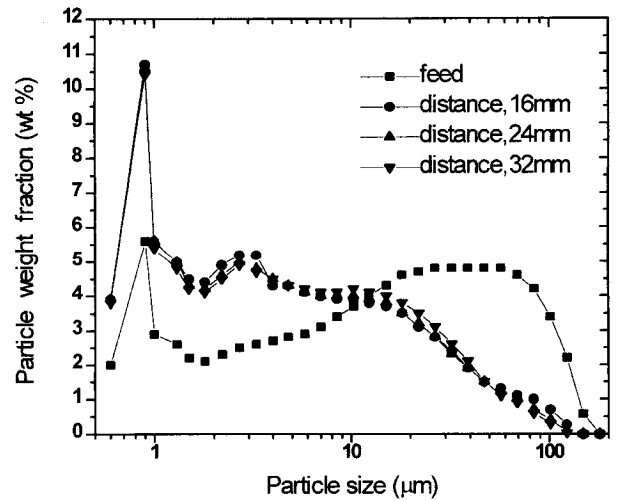


Fig. 8. Variation of particle weight fraction according to target distance L at grinding pressure $P_g = 7 \text{ kg/cm}^2 \cdot G$, and target angle $\theta = 90^\circ$ (experimental result).

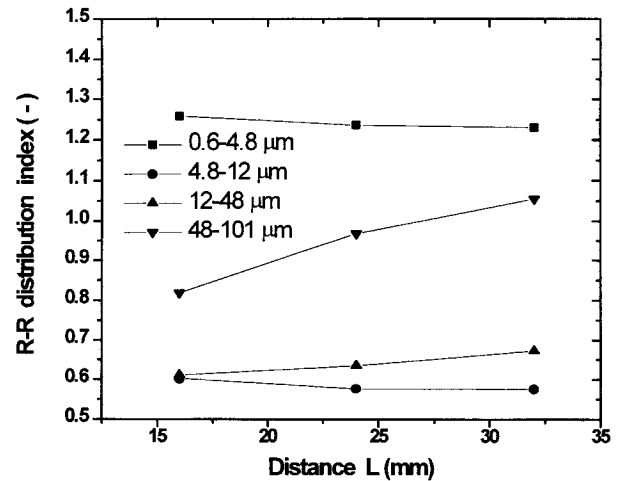


Fig. 9. Relation between R-R distribution index and target distance L at grinding pressure $P_g = 7 \text{ kg/cm}^2 \cdot G$, and target angle $\theta = 90^\circ$ (experimental result).

대적으로 큰 입자의 입도분포지수는 작아지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 충돌판까지의 거리가 가까울수록 공급원료 각 입자 크기별로 파쇄에 필요한 운동에너지를 충분히 받아 생성물 중 미립분 생성량이 상대적으로 많아지는 원인으로 해석할 수 있다.

3-6. 충돌판 각도의 영향

Fig. 10은 충돌판각도(θ)와 비표면적 증가(ΔS)와의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 충돌판 각도 θ 는 젯트기류 분사방향 x축과 충돌판 표면과의 각도를 의미한다. 충돌판 각도가 커짐에 따라 비표면적은 증가하였고, 충돌각도 60° 까지는 각도 증가에 따른 비표면적 증가폭이 크고, $60\text{--}90^\circ$ 범위에서는 상대적으로 비표면적 증가폭이 작았다. 따라서 적정 충돌각도는 $60\text{--}90^\circ$ 범위로 판단되며, 60° 이상에서 비표면적 증가폭이 작은 이유는 충돌각도가 커질수록 입자에 가해지는 충돌력은 커지지만, 충돌 후 분쇄된 입자의 반발작용에 따른 시간차 발생으로 새로 충돌판으로 분사 유입되는 입자군 사이의 간섭이 발생하여 상대적으로 충돌력이 상쇄되기 때문인 것으로 판단된다[16].

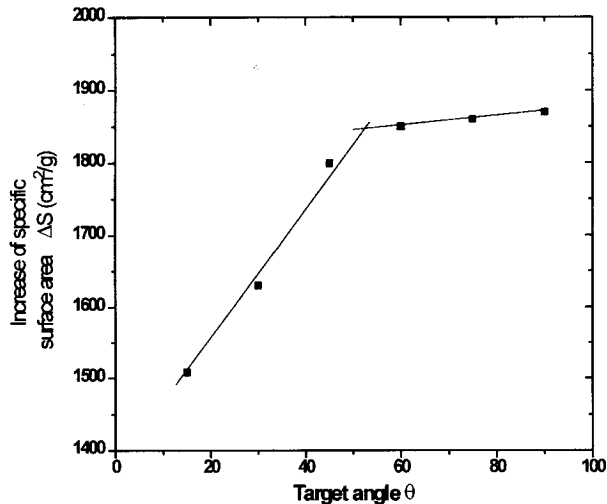


Fig. 10. Relation between increase of specific surface area ΔS and target angle θ at grinding pressure $P_g=7 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{G}$, and target distance $L=16 \text{ mm}$ (experimental result).

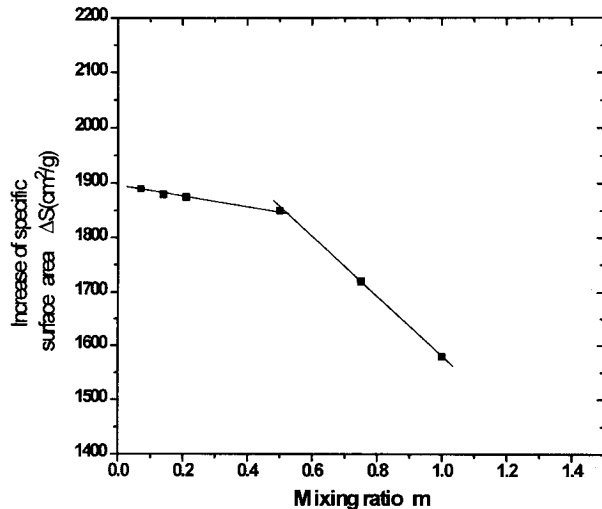


Fig. 11. Relation between increase of specific surface area ΔS and mixing ratio m at grinding pressure $P_g=7 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{G}$, target angle $\theta=90^\circ$, and target distance $L=16 \text{ mm}$ (experimental result).

3-7. 원료 공급속도의 영향

Fig. 11은 원료 공급속도(이하 혼합비)와 비표면적 증가 관계를 나타낸 것이다. 여기서 혼합비는 공기 단위중량당 공급원료 단위중량을 의미한다. 혼합비 증가에 따라 비표면적은 점점 감소하는 경향이 있으며, 혼합비 $m < 0.5$ 범위에서는 혼합비 증가에 따른 비표면적 감소폭이 적은 반면, $m > 0.5$ 에서는 감소폭이 혼합비 증가에 따라 급격하였다. 일반적으로 혼합비 증가시 입자의 운동에너지는 감소하는 반면 입자간 충돌확률은 증가한다[14]. 따라서 분쇄 효율적인 측면에서 적정 혼합비가 존재하는 것으로 알려져 있다. Fig. 11에서 $m < 0.5$ 범위에서 비표면적 감소폭이 적은 이유는 혼합비 증가에 따른 입자간 충돌확률 증가효과가 입자 운동에너지 감소영향보다 크기 때문으로 판단되며, $m > 0.5$ 에서 비표면적 감소폭이 큰 이유는 반대로 혼합비 증가에 따른 입자 운동에너지 감소영향이 입자간 충돌확률 증가효과보다 크기 때문으로 판단된다. 따라서 분쇄 실험에 사용한 석회석의 적정혼합비는 비표면적 감소폭이 적은 0.5 미만인 범위로 판단된다.

4. 결 론

충돌판 충돌형 분쇄방식의 젯트 밀에 대해, FLUENT™을 이용한 노즐수치해석 및 석회석 미분말 분쇄조건별 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 전산유체역학 CODE인 FLUENT™을 이용하여 초음속 노즐의 유속분포, 입자크기에 따른 속도분포를 수치해석할 수 있었으며, 수치해석 결과와 실험결과가 잘 일치하였다.
- (2) 수치해석 결과와 석회석 분쇄 실험결과를 통해 초음속 축소-확대 노즐의 최적 설계조건을 도출할 수 있었으며, 확대부의 형상, 치수가 노즐 분사속도에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.
- (3) 입자속도 수치해석 결과 입자크기, 분쇄압력별로 입자 속도분포가 상이하였으며, 이러한 속도분포도가 분쇄에 미치는 주 인자로 작용하고 있음을 알 수 있었다.
- (4) 동일 분쇄압력에서도 충돌판 거리, 충돌각도, 혼합비 등 분쇄 조건에 따라 분쇄특성이 상이하였으며, 충돌판위치는 노즐출구로부터의 거리를 기준으로 노즐 확대부 출구경의 2-3배 가속거리에서 분쇄특성이 가장 우수하였으며, 충돌각도는 $60-90^\circ$, 혼합비는 0.5 미만의 범위가 최적인 것으로 추정되었다.

사용기호

- a_i : constants in Eq. (4) [-]
- C_D : drag coefficient [-]
- D_c : diameter of convergent at nozzle [mm]
- D_t : diameter of throat part at nozzle [mm]
- D_d : diameter of divergent at nozzle [mm]
- D_{50} : median diameter of particle [μm]
- D_p : particle diameter in Eq. (2) [m]
- E_s : solid surface energy in Eq. (5) [erg/cm²]
- E_1 : theoretical grinding energy [kwh/T]
- E_2 : total input energy [kwh/T]
- E_k : specific kinetic energy [J/kg]
- L_c : length of convergent part at nozzle [mm]
- L_t : length of throat part at nozzle [mm]
- L_d : length of divergent part at nozzle [mm]
- L : distance from nozzle outlet to target surface [mm]
- M : Mach number [-]
- m : mixing ratio defined as particle feed rate to air flow rate in weight [-]
- P_g : power consumption in Eq. (6) [kw]
- P_g : initial grinding pressure [$\text{kg/cm}^2 \cdot \text{G}$]
- Re : relative Reynolds number [-]
- u_g : air velocity [m/s]
- u_p : particle velocity [m/s]
- W_f : feed rate of solid [kg/hr]
- W_g : air flow rate [m^3/min]

그라이스 문자

- α : converging angle of convergent part [mm]
- β : diverging angle of divergent part [mm]
- θ : target angle [°]
- ρ_g : density of fluid [kg/m^3]
- ρ_p : density of particle [kg/m^3]

μ : molecular viscosity of the fluid [Pa·s]
 ΔS : increase of specific surface area [cm²/g]
 η : theoretical grinding energy efficiency [%]

하첨자

g : fluid or air
 k : kinetic
 p : particle
 s : solid

참고문헌

1. Okuda, S. and Choi, W. S.: *J. Chem. Eng. Japan*, **13**, 219(1980).
2. Kanda, Y. and Honma, T.: *Powder Science & Engineering, Japan*, **19**, 70(1987).
3. idem: *Chem-Ing-Tech*, **31**, 323(1959).
4. idem: *ibid*, **32**, 129(1960).
5. Rumpf, H. and Kureten.: *ibid*, **38**, 335(1966).
6. Rumpf, H.: *Chem-Ing-Tech*, **32**, 129(1960).
7. idem: *ibid*, **32**, 335(1960).
8. Schlaug, H.: "Dechema Zerkleinern Symposium", Verlag Chemie, Weinheim, und VDI-verlag, Dusseldorf, p. 531(1963).
9. Okuda, S. and Choi, W. S.: *J. Chem. Eng. Japan*, **11**, 432(1978).
10. idem: *J. Chem. Eng. Japan*, **12**, 383(1979).
11. Viswanathan, K.: *Bulk Solid Handling*, **7**, 585(1987).
12. Inoue, T.: *J. Society of Powder Technology, Japan*, **22**, 404(1985).
13. Bull, F. A.: *J. Inst. Fuel*, **28**, 163(1955).
14. Tanka, T.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop.*, **12**, 213(1973).
15. Beke, B.: "Principle of Comminution", Publishing House of the Hungarian Academy of Science, Budapest, p. 27(1964).
16. Honma, T.: *Bull. Yamagata Univ.*, **18**, 79(1985).
17. Morisi, S. A. and Alexander, A.: *J. Fluid Mech.*, **55**, 193(1972).