

미분말의 물리적 성질이 저장압에 미치는 영향

강 석 호 · 김 칠 호

영남대학교 공과대학 화학공학과

(접수 1980. 3. 12)

Effects of Physical Characteristics of Fine Powders on Bottom Pressure in the Storage Silo

Suk-Ho Kang and Chil-Ho Kim

Department of Chemical Engineering,
Yeungnam University, Gyongsan 632, Korea

(Received on March 12, 1980)

요 약

평균 입자크기가 $115\mu\text{m}$ 이하인 미분말 분체의 저장 압력을 사일로의 저면에 설치한 금속박판의 굽힘 응력을 이용하여 실험적으로 결정하고 Janssen의 이론식으로 계산한 저장압과 비교 하였으며, 분체의 입자 크기와 대기의 상대 습도가 저장 압력에 미치는 영향을 조사 하였다.

입자 크기가 증가하면 분체의 겉 보기 밀도가 증가하고 저장압도 증가하는데, 이것은 Janssen 식에 표시된 바와 같이, 저장압이 겉보기 밀도에 비례함을 입증한다.

상대습도가 저장 압력에 미치는 영향은 매우 민감하며, 상대습도 70% 부근에서 미분말분체의 저장압력은 최대치에 이른다. 또 이론식으로 계산된 저장압력은 실측치보다 큰 값을 나타내므로, Janssen 식에 무차원수인 安定數 $c/h\rho_B$ 를 보정하여 식을 수정함으로써 실측치에 더욱 근사한 저단 압력을 추산할 수 있다.

Abstract

By dial-gauge readings of the deflection of metal foil attached to the bottom of the storage silo, bottom pressures exerted by fine powders of the average particle size smaller than $115\mu\text{m}$ were measured for wide ranges of relative humidity and compared with the theoretical values calculated by the Janssen's equation.

Bottom pressures increase with the increasing particle sizes and bulk density of powders. The results are in good agreement with those predicted by the equation. The influence of the relative humidity on the bottom pressures is remarkable, which reach maximum values at 70% of relative humidity.

As the observed pressures are significantly less than those given by the Janssen's equation, it is considered useful to modify the equation by inserting a dimensionless stability number, $c/h\rho_B$, in order to obtain more accurate estimates of storage pressures.

1. 서 론

분체를 빈(bin), 호퍼(hopper) 및 사일로(silo) 등의 용기에 저장시키려 할 때 용기의 내벽에 작용하는 분체의 압력은 유체의 경우와는 다르다. 유체는 깊이에 따라서 압력이 증가 하지만 분체는 어느 깊이 이상이 되면 일정하게 된다. 이것은 이론적으로 유도된 Janssen¹⁾ 식으로 설명된다.

$$P_v = \frac{r\rho_B}{2\mu'k} (1 - e^{-2\mu'K\frac{z}{r}}) \quad (1)$$

Janssen 식은 사일로의 설계에 널리 쓰여 왔는데 곡물이나 조립자에서는 잘 맞는다. 그러나 미분말의 경우에는 잘 맞지 않아서 저장 압력의 정확한 추산치를 계산할 수 없고, 또 분체의 저장작업과 분체조건에도 영향을 받는다. Tunakawa²⁾ 는 재료의 투입위치, 투입속도에 의해서, Sundarm³⁾ 등은 투입방법에 의한 분체압의 영향이 크다고 보고 하였다.

본 연구에서는 분체의 투입조건은 일정하게 유지하고 미분말 분체의 평균입자 크기와 상대습도의 변화에 대한 저면 압력을 측정하였다.

평균 입자크기가 115μ 이하인 미분말 분체 6종 19가지를 사용하여 분체변수인 겉보기 밀도 ρ_B , 분체와 용기벽과의 마찰계수 μ' , 수직압력과 수평압력의 비 K 를 상대습도와 입자크기에 따라서 측정하여 이들이 저장압에 미치는 영향을 조사하였고, 측정치와 계산치를 서로 비교하여 미분말 분체에 대해서 Janssen 식이 합당한지 아닌지를 검토하여 추정식의 수정을 기도하였다.

Table 1. Specification of the Sample Powder

SAMPLE	SAMPLE NO	A.S.T.M mesh	AVERAGE PARTICLE SIZE (μ m)
crushed glass powder	1	150/170	96.5
	2	170/350	66.0
	○3	-350	22.0
Wheat flour	4	150/170	96.5
	●5	170/350	75.5
	6	250/350	53.5
	7	-350	22.0
Limestone powder	8	115/150	115.0
	△9	150/170	96.5
	10	170/250	75.5
	▲11	250/350	53.5
	□12	-350	22.0
Ceramic molding powder	13	115/170	106.5
	14	170/250	75.5
	15	250/350	53.5
	16	-350	22.0
Montmorillonite	■17	150/350	74.5
	18	-350	22.0
Magnesium carbonate	×19	-350	22.0

2. 실험방법

2-1. 시 료

본 실험에 사용된 시료는 Table 1과 같이 6종의 분체를 각각 1~4가지 입자크기별로 분리한 총 19가지이다. 분쇄된 유리분말은 광일주식회사(서울) 제품의 유리구슬(glass beads), 석회석분말은 태화칼슘(왜관)에서 사용하는 원료

광석, 요업성형분말(ceramic molding powder)은 도자기 제조용 성형재료이다. 이 3가지 시료는 볼밀(ball mill)에서 분쇄하여 각 시료를 100g씩 평량하여 1시간동안 체질을 하여서 분급하였고, 점토광물(Montmorillonite)은 동해백토(주) (영일) 제품, 밀가루는 경상제분(주)(대구)의 중력밀가루, 탄산마그네슘은 한국상사 제품으로 이들은 체분리만 하였다.

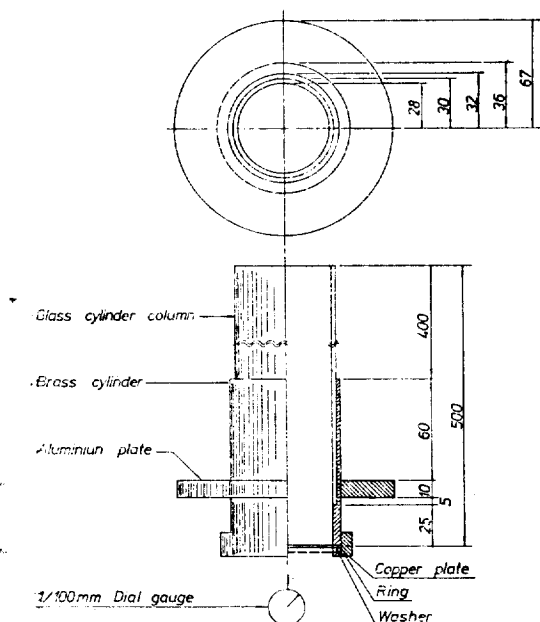


Fig. 1. Schematic diagram of the test silo measuring the bottom pressure developed by powder charge. (unit: mm)

2-2. 분체저장압력 측정장치

실험장치는 Fig. 1과 같이 본체는 수직원통 유리관 (5.6 cm×50 cm)으로 낫쇠실린더(brass cylinder) (5.6 cm×10 cm)에 고정하였다. 하단부에 0.1 mm 동제박판을 끼우고 이것이 움직이지 않도록 낫쇠(washer)를 부착시켰다. 저장기내에 분체가 2.5 cm씩 쌓일 때마다 동제박판의 굽힘(deflection), δ ,을 측정하기 위해서 중심부에 1/100 mm 다이알 게이지(dial gauge) (Te-clock Co., Japan)를 부착해서 굽힘을 읽어서 저면압력을 식(2)로 결정하였다.

2-3. 압력측정 및 계산

습도조절은 항온항습 장치를 (80×60×200 cm, Forma Scientific, Inc., Ohio.) 사용하여 온도를 20°C로 고정하고 습도를 30%, 50%, 70%, 85% 및 98% 등의 5가지 범위로 조절하였다. 특히 상대 습도가 바뀌었을 때는 원하는 습도를 맞추어 분체시료를 24시간 방치한 뒤 실험에 사용하였다. 그리고 재료의 투입은 용기 바닥으로부터 55 cm 높이에서 깔대기를 통하여 분체의 일정량이 균일하게 흐르도록 하였다.

저장 사일로내에 분체 높이가 2.5 cm씩 쌓일 때마다 다이알 게이지 눈금을 읽어서 분체의 저면압력 P_v 를 식 (2), (3)으로 표시되는 원판의 굽힘 응력에 관한 계산식⁴⁾으로부터 계산하였다. 저면압력측정치 ($[(P_v)_{obs}]$) 계산에 사용된 식은 (2)식과 같고, 장치의 원판은 동제박판을 사용하였으므로 $(P_v)_{obs}$ 계산에 필요한 데이터는 Table 2에 주어져 있다.

Table 2. Variables needed for the bottom pressure calculation

Symbol	Description	Value	Unit
r	Inside radius of disc.	28.10	mm
h	Thickness of copper plate	0.10	mm
E	Elastic modulus	11934×10^4	kg/mm ²
ν	poisson ratio	0.34	—
D	Bending stiffness of copper plate	1.124	kg-mm
δ	Deflection	—	mm
P_v	Load per unit area	—	kg/mm ²

저면압력 계산치 ($[(P_v)_{calc}]$)를 Janssen 식으로부터 구하기 위해서 5종 7가지 시료의 분체변수인 ρ_B , μ' 및 K 를 상대 습도와 입자크기에 따라 측정하여 이들을 Table 3에 표시했다. 절보기 밀도 ρ_B 는 사일로 단위체적당 분체의 질량으로 계산하고, 수직압력과 수평압력의 비 K 는 (4)식으로 계산되는데, 별도의 이축전단시험에서 분체의 내부 마찰각 ϕ 를 측정하였다. 분

Table 3. Some physical parameters influencing the bottom pressure in the powder silo.

SAMPLE	No.	R.H (%)	(ρ_B (g/cm ³))	μ	K
Crushed glass powder	○ 3	30	0.610	0.700	0.543
		50	0.625	0.753	0.490
		70	0.630	0.734	0.727
		85	0.635	0.809	0.599
		98	0.641	1.110	0.727
Wheat flour	● 5	30	0.538	0.916	0.317
		50	0.545	0.890	0.490
		70	0.550	0.909	0.547
		85	0.555	0.909	0.378
		98	0.560	0.965	0.390
Limestone powder	△ 9	30	1.140	0.637	0.506
		50	1.145	0.612	0.333
		70	1.150	0.649	0.333
		85	1.153	0.649	0.339
		98	1.155	0.687	0.333
"	▲ 11	30	1.110	0.674	0.390
		50	1.120	0.700	0.361
		70	1.130	0.700	0.333
		85	1.140	0.674	0.302
		98	1.190	0.809	0.306
"	□ 12	30	0.900	0.700	0.414
		50	0.910	0.726	0.320
		70	0.930	0.763	0.406
		85	0.950	0.692	0.554
		98	0.970	0.839	0.490
Montmorillonite	■ 17	30	0.673	0.637	0.577
		50	0.695	0.734	0.490
		70	0.710	0.753	0.490
		85	0.750	0.781	0.412
		98	0.780	0.869	0.528
Magnesium carbonate	× 19	30	0.210	0.740	0.777
		50	0.220	0.764	0.588
		70	0.242	0.713	0.655
		85	0.252	0.674	0.955
		98	0.260	0.764	0.632

체와 용기벽과의 마찰계수 μ 는 별도의 실험으로 측정하였다.

$$P_v = \frac{64 D \delta}{r_0^4} = \frac{64 E h_0^3 \delta}{12 r_0^4 (1 - \nu^2)} \quad (2)$$

$$D = \frac{E h_0^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (3)$$

$$K = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad (4)$$

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 미분말의 저면압력 계산치 ($[(P_v)_{calc}]$)와 실험치 ($[(P_v)_{obs.}]$)를 저장 높이와 반경의 비 z/r 에 대해 도시한 것이다. 전반적인 실험 결과에 의하면, 장치에 관한 무차원수인 저장 높이와 반경의 비 z/r 가 7~8정도가 되면 저면압력은 일정한 수치에 도달한다. 실험변수의 영향을 서로 비교할 수 있도록 이 수치를 저면압력의 최대치 ($[(P_v)_{max}]$)로 정하였다.

실험중에 발생하는 측정기기에 대한 미세한 지

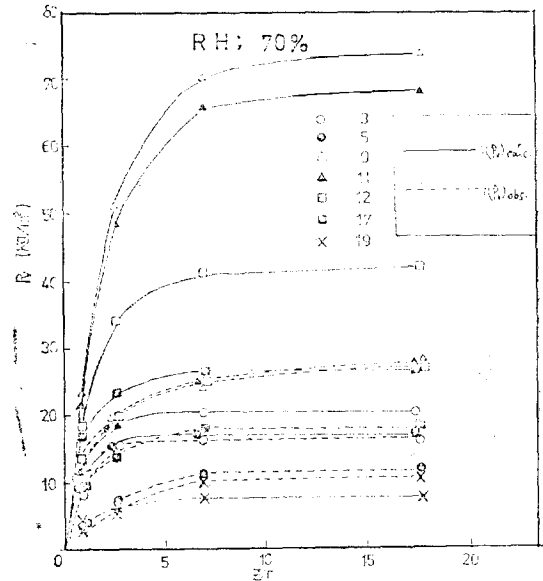


Fig. 2. Typical bottom pressure profile with height for some powders charged in the test silo.

동도 측정결과에 많은 영향을 미치므로 수회 실험의 평균치로부터 10% 이내의 오차 범위내에 있는 측정결과를 만으로 Fig. 2를 작성하였고, 그 결과는 다음 항목에서 고찰한다.

3-1. 평균입자 크기의 영향

Fig. 3은 분쇄된 유리분말 밀가루, 석회석, 분

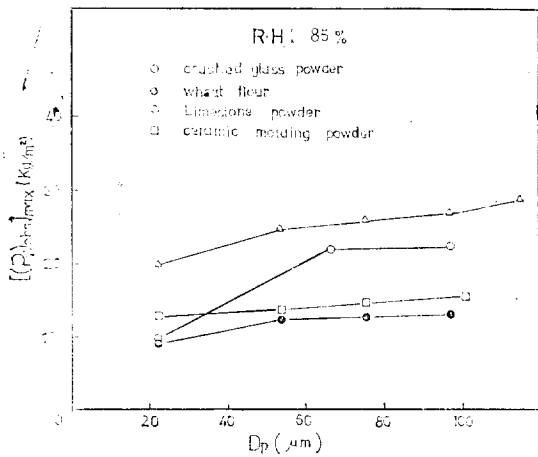


Fig. 3. Maximum bottom pressure changes with average particle size

말 및 요업성형분말을 시료로 하여 상대습도 85%에서 저면압력 측정치의 최대값 ($[P]_{obs} \max$)을 평균입자 크기 D_p 에 대해서 나타낸 것이다. 입자크기가 증가하면 저면압력도 증가하는데 이것은 Table 3에 표시한대로 동일 시료에 있어서 평균 입자크기가 증가하면 겔보기 밀도가 증가하기 때문이며 이것은 Janssen식에서 겔보기 밀도 증가가 저면압력 증가에 직접 비례하는 사실과 잘 일치한다.

3-2. 상대습도의 영향

분체의 저면압력에 간접적인 영향을 미치는 상대습도는 ρ_B , μ' 및 ϕ 에 직접 영향을 주고, 이들 인자가 저면압력 측정치에 영향을 주게된다. Janssen식에 대한 이들 인자의 영향을 오차분석법⁵⁾으로 고찰하면 각인자의 3~10% 변화에 대해서 저면압력 계산치는 12~27%, 저면압력 측정치는 33.6%의 변화를 초래한다. 그런데 상대습도에 대한 이들 인자의 영향을 일정한 비율로 표시할 수 없기 때문에 상대습도 변화가 분체의 저면압력에 미치는 영향은 실험적으로 결정될 수 밖에 없다.

Fig. 4는 분쇄된 유리 분말, 밀가루, 석회석 분말, 점토광물(Montmorillonite) 및 탄산마그네슘

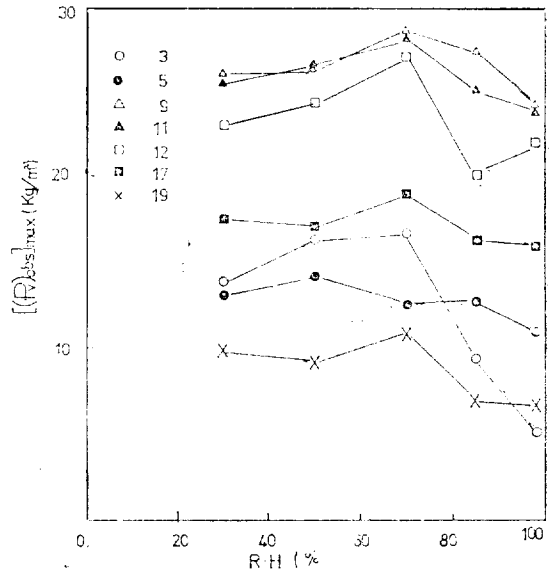


Fig. 4. Maximum bottom pressure changes with relative humidity.

의 저면압력에 대한 상대습도의 영향을 나타낸 것이다. 상대습도가 증가하면 분체의 저면압력은 증가하나 상대습도 70%에서 최대가 된다.

그리고 상대습도가 98%가 되면 모든 시료는 엉겨 붙는 상태가 되는데 입자간의 응집과 분체와 용기벽 사이의 응집 현상 때문에 저면압력은 크게 감소한다. 그러나 다른 물성 실험과는 달리 재현성 있는 data를 얻는데 어려움이 있으므로 7종 시료전체에 대하여 얻어진 데이터는 기복이 있는 곡선으로 표시된다.

3-3. 저면압력 측정치와 계산치의 비교

분체의 저장높이와 반경의 비 z/r 의 모든 값에 대해서 미분말의 저면압력 계산치와 실험치는 차이가 있다. 이들을 비교하기 위하여 저면압력 계산치와 측정치의 상관관계를 Fig. 5에 도시하였다. 대부분의 계산치는 측정치보다 35~85%정도가 크다.

분체의 저장 높이와 반경의 비 z/r 가 7~8 정도에서 저면압력은 일정하게 되므로 이것을 최대치로 삼아서 저면압력 계산치와 측정치의 최대값들의 상관관계⁶⁾를 Fig. 6에 도시하였다.

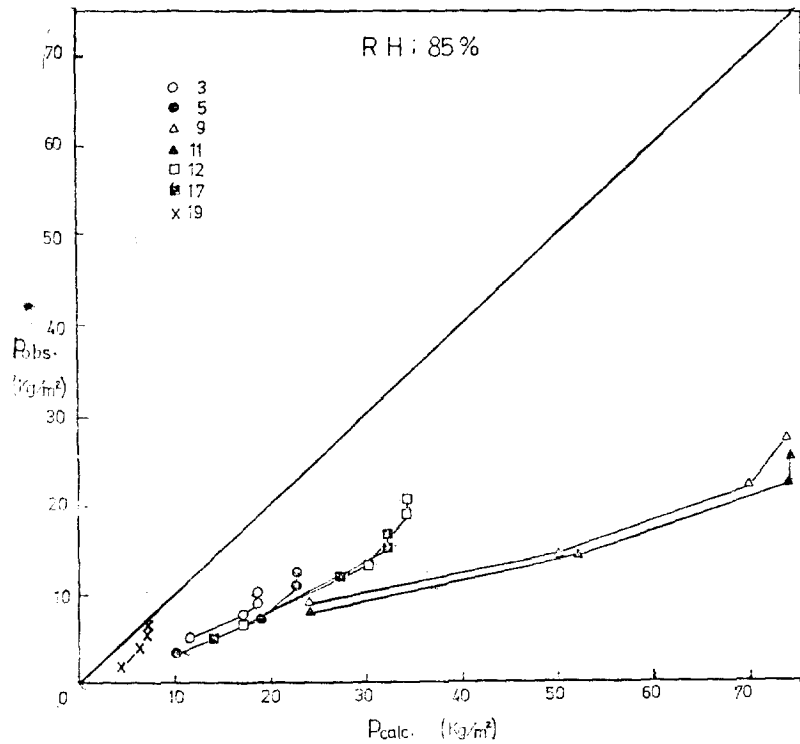


Fig. 5. Correlations between the calculated bottom pressure and the observed one

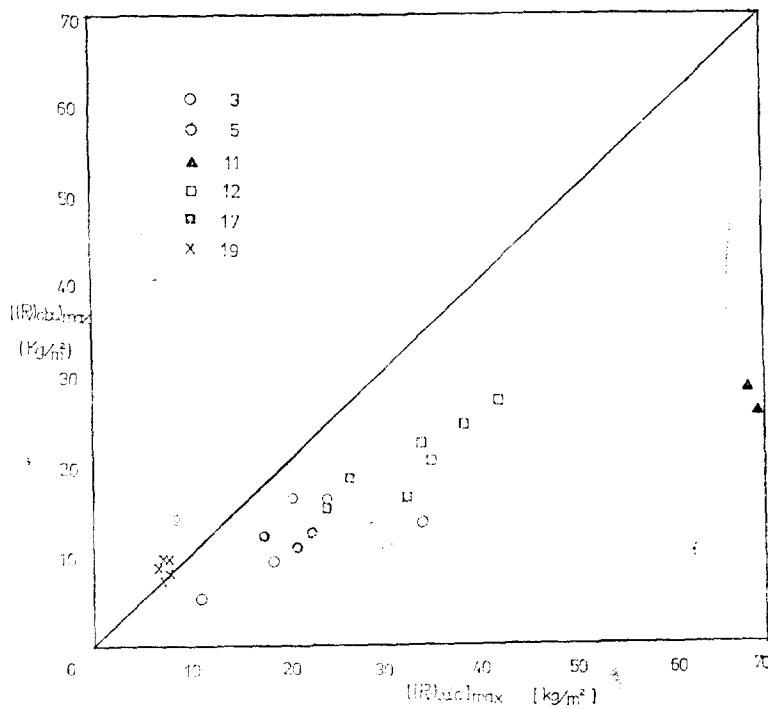


Fig. 6. Correlations of calculated maximum bottom pressure and observed maximum bottom pressure regardless of relative humidity

이때 측정치는 계산치의 45~70% 정도가 된다. 따라서 Janssen 식을 이용하여 미분말 분체의 저면압력을 추산하는데는 정확성에 관한 문제점이 있다. 관계되는 연구⁷⁾에 의하면 상자형 안식각 측정장치를 이용하여 미분말의 안식각을 측정할 때, 조립자 분말의 경우와는 다르게, 수직면 높이 h 가 형성되며, 또 별도로 이축전단시험에서 측정된 분체의 점착력 c 와 수직면 높이 h 는 직선관계가 있음이 밝혀졌다. 따라서 분체의 점착력 c , 상자형 측정장치에서 형성되는 분체의 수직면 높이 h , 그리고 분체의 겉보기 밀도 ρ_B 등에서 얻어지는 무차원수($c/h\rho_B$)를 Janssen 식에 보정항으로 도입하였다. 즉 무차원수인 안정수(Stability number), ($c/h\rho_B$)를 Janssen 식의 분모에 곱하여 보정한 보정 계산치와 측정치의 상관 관계를 고찰하기 위하여 Fig. 7을 작성하였는데, Fig. 6과는 달리, 상관계수가 0.89로서 ($c/h\rho_B$)를 보정한 수정식의 계산치가 실험치에 더욱 접근함을 확인하였다. 따라서 미분말 분체의 저장압력 추산에는 점착력이 고려되어야 하며 점착력을 고려하기 위하여는 무차원의 안정수 ($c/h\rho_B$)를 Janssen 식에 도입하여 (5)식과 같이 추정하는 것이 미분말 분체의 저장압력 추산에는 타당하다고 믿는다.

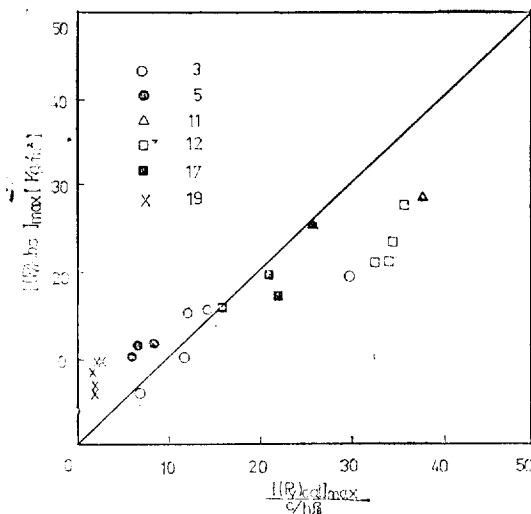


Fig. 7. Correlations of modified maximum calculated bottom pressure and observed one regardless of relative humidity

$$P_v = \frac{r\rho_B}{2\mu'K(c/h\rho_B)}(1 - e^{-2\mu'K\frac{z}{r}}) \quad (5)$$

4. 결 론

평균 입자크기가 $115\mu\text{m}$ 이하인 미분말 분체의 저장특성을 고찰하기 위하여 용기내에 저장되는 분체의 저면압력에 미치는 입자크기와 상대습도의 영향을 조사하였다.

분체의 입자크기는 분체의 겉보기 밀도를 증가시키고, 겉보기 밀도는 분체의 저장압력을 증가시키는데 이 결과는 저장압력에 관한 Janssen의 이론식과 잘 일치한다. 그리고 상대습도가 70%일때 분체의 저면압력은, 분체의 종류에 관계없이, 대체로 최대치를 나타낸다.

분체의 저면압력을 추산하는 Janssen의 이론식에 무차원인 안정수, $c/h\rho_B$,를 보정항으로 삽입 함으로써, 실험치에 더욱 접근하는 저면압력을 추산할 수 있는 새로운 수정식을 제안하였다.

記號 說明

- c ; Cohesion of powder. (G/cm^2)
- D ; Bending stiffness of copper plate. ($\text{kg}\cdot\text{mm}$)
- D_p ; Average particle size of powder. (μ)
- E ; Elastic modulus of copper plate. (kg/mm^2)
- h ; Vertical plane height in the test box. (cm)
- h_0 ; Thickness of copper plate. (mm)
- K ; Ratio of the normal pressure to the applied pressure. (—)
- P_v ; Bottom pressure exerted by the powder in the test silo. (kg/m^2)
- $(P_v)_{\text{calc}}$; Calculated bottom pressure from Janssen's equation (kg/m^2)
- $(P_v)_{\text{obs}}$; Observed bottom pressure. (kg/m^2)
- r ; Radius of test silo. (cm)
- r_0 ; Radius of copper plate. (mm)
- z ; Height of powder in the test silo. (cm)
- z/r ; Ratio of powder height to radius of test silo. (—)

- α ; Angle of repose of powder. (degree)
 δ ; Deflection reading of copper plate. (mm)
 μ' ; Friction coefficient between solid particle and glass wall. (-)
 ν ; Poisson ratio of copper plate. (-)
 ρ_B Bulk density of powder. (g/cm)³
 ϕ ; Angle of internal friction of powder. (degree)

參 考 文 獻

- McCabe, W. L and J.C. Smith, "Unit Operations of Chemical Engineering", 3rd. ed., McGraw-Hill Book Co., New York, (1976), p.811.
- 綱川 浩, 粉體工學研究會誌, 10 (6), 346 (1973)
- Sundarm, V, and S.C. Cowin, Powder Technology. 22 (1), 27 (1979).
- 曹東震 外, 機械工學便覽, 大光書林, 서울 (1976), p. 60.
- Mickley, H. S., T. K. Sherwood and C. E. Reed, "Applied Mathematics in Chemical Engineering" (1957), p. 53.
- 李孝求, 朴勝安. 統計學入門, 서울, (1978), pp. 34-40.
- 강석호, 우문경. "분체의 저장 및 흐름성에 관한 연구" 연구보고(영남대학교 공업기술연구소) 7 (1), 8(1979).