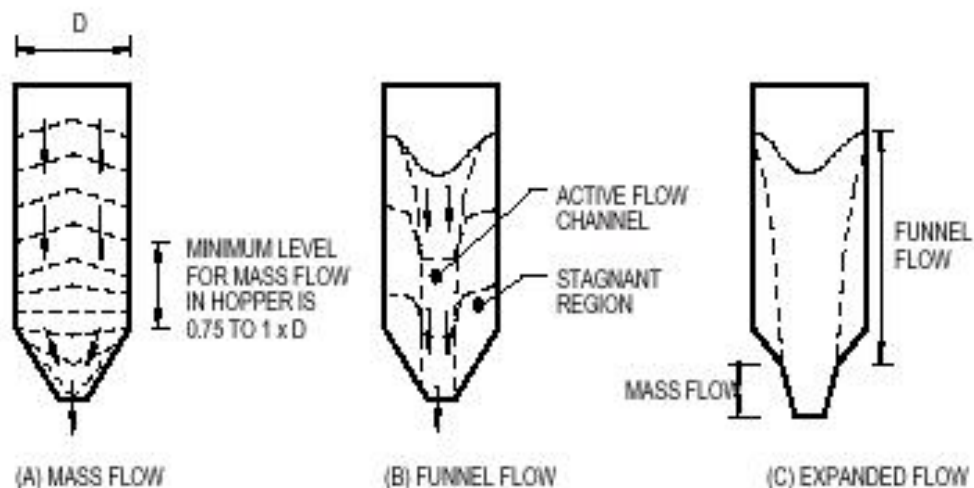


호퍼설계

인류는 농작물을 추수해서 저장하기 시작한 훨씬 전부터 수 천년 동안 분말 재료들을 저장해 왔다. 1960년 이전까지의 저장조는 어렵잡아 크게 설계되었다. 이것은 1960년, 앤드류.W. 제니크의 연구로 모두 바뀌었다. 그의 작업은 저장용기 내에서의 재료유동에 작용하는 표준들을 확인하였다. 제니크는 재료의 필요성상들에 대한 방정식들과 측정값들을 포함한 이론과 그 이론을 적용하는 방법들을 개발하였다. 그의 주요 작업들은 "대량분체의 중력유동"으로 발간되었다(1964년).

분말재료들의 보호와 저장을 위해 호퍼는 산업적으로 사용되었다. 호퍼들은 재료를 쉽게 투입할 수 있도록 설계되어야 한다. 더 중요한 것은 호퍼가 쉽게 배출할 수 있도록 설계되어야 한다는 것이다.

호퍼가 설계되는 방식은 재료가 유동하기만 한다면 호퍼에서 배출되는 분체의 유동율에 영향을 끼친다. 또, 호퍼가 설계된 방식은 저장된 재료를 얼마나 많이 배출하고 입자크기가 다른 분체들을 혼합하거나 호퍼의 유효저장능력을 감소시키는 공간잠식 등에 영향을 끼친다. 여기에서 언급된 논제들과 그 외 사항들은 저장 호퍼를 설계할 때 고려해야 할 주요 사항이다.



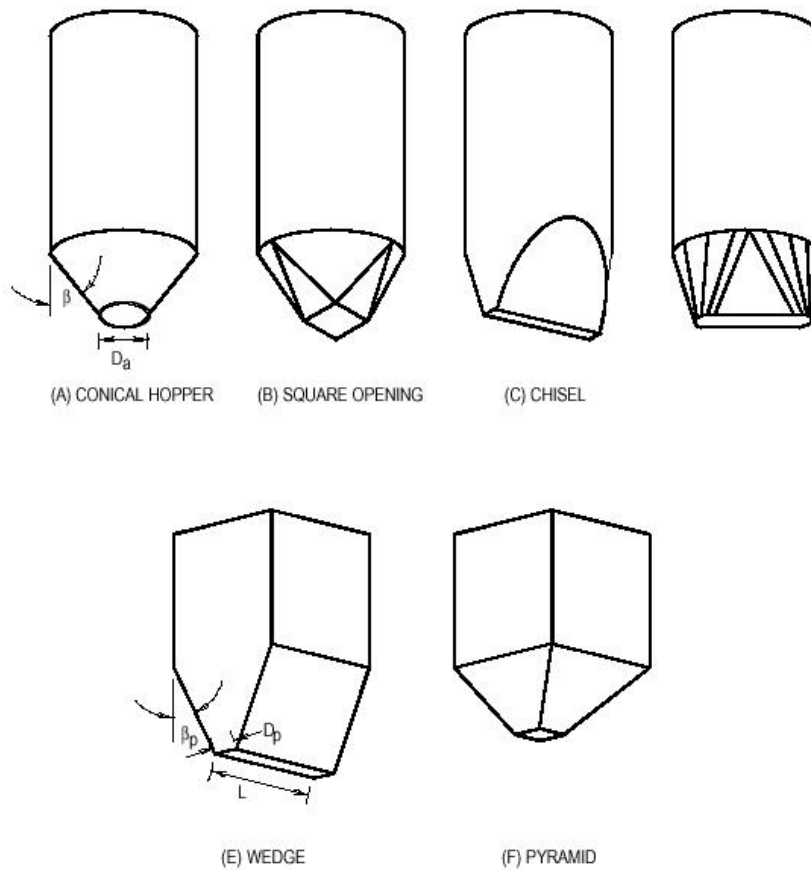
[그림1] (A) Mass Flow의 경우-내벽 부근의 재료들을 포함한 용기내의 모든 재료들이 유동
 (B) Funnel Flow의 경우-내벽 부근의 재료는 정지, 중심부에 있는 재료들만 유동
 (C) Expanded Flow의 경우- 호퍼 출구에서의 Mass Flow와 호퍼 상부에서의 Funnel Flow가 조합되어 있다(개조상황에 통상적으로 적용).

1. 유동형태

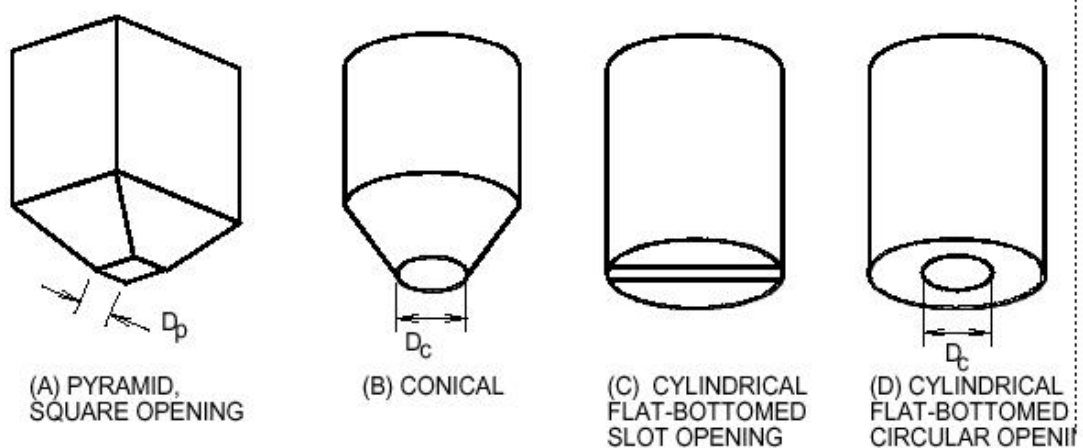
호퍼내의 분체는 전체유동(Mass Flow)과 부분유동(Funnel Flow)의 서로 다른 유동형태를 가진다. 또 확산유동(Expanded Flow)이라는 상기 2가지 유동형태가 조합된 특별한 경우도 있다. 이 유동들은 호퍼내에서 분체들이 움직이는 모양에서 그 이름이 지어졌다. 유동들간의 차이점과 특징들은 [그림1]에 설명되어 있다.

Mass Flow와 Funnel Flow간의 주된 차이점은 Mass Flow는 용기내에 있는 모든 재료가 꼭 동일한 속도는 아닐지라도 움직이는 상태에 있다는 것이다. Funnel Flow의 경우는 호퍼내벽과 접한 재료들이 유동치 않고 정지해 있는 동안 호퍼출구 상부의 중심에 있는 재료만이 유동상태에 있다.

호퍼들은 반드시 원통형이 아닌 여러 종류의 모양과 설계들로 사용되기 시작했다. [그림2]는 Mass Flow 호퍼용으로 확인된 일련의 통상적인 설계안들을 제시하고 있다. 또 [그림3]에는 Funnel Flow가 일어날 수 있는 호퍼들의 통상적인 설계안 들이 제시되어 있다.



[그림2 : Mass Flow 호퍼의 일반적인 설계]

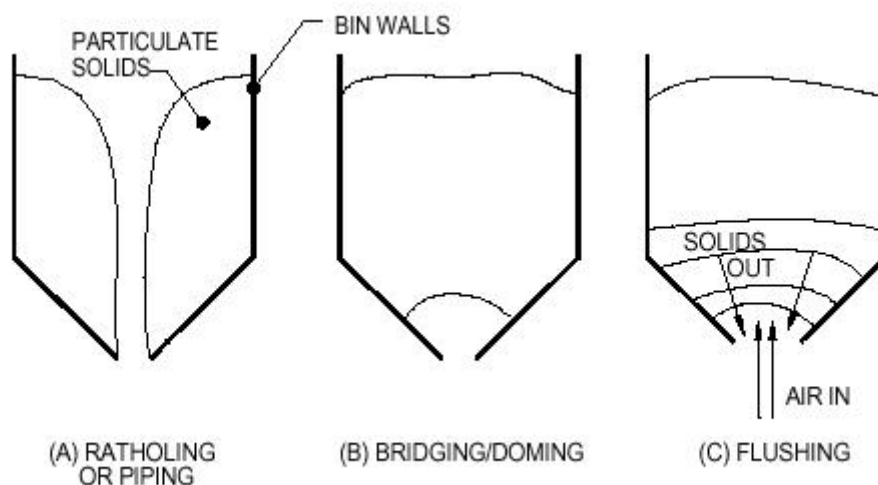


[그림3 : Funnel Flow 호퍼의 일반적인 설계]

2. 호퍼 설계의 문제점들

호퍼 설계의 문제점들은 통상적으로 호퍼 출구쪽에서 재료가 적절하게 배출되지 않았다던지 유동중 재료가 분리되는 2가지 형태중 한 가지에 해당된다. 우리가 해결하거나 피하고자 하는 문제점들은 다음과 같다.

- **래솔링/파이핑** : 래솔링(Ratholing) 혹은 파이핑(Piping)은 호퍼의 중앙부가 배출될 때 일어나지만 (부분유동과 같이) 정지면들이 유동없이 고정되어 있을 만큼 안정되어 있어 용기내 저장된 분체의 중앙부에 아래 방향으로 구멍을 남긴다.(그림4a)
- **너무 느린 유동** : 후속 공정에 공급할 수 있을 만큼의 량이 호퍼에서 빨리 배출되지 않는다.
- **아칭(Arching) 혹은 도밍(Doming)으로 인한 유동장애** : 재료가 지나치게 결합되어 유동이 완전히 멈추게 되는 아치형 다리 혹은 돔(Dome)을 형성할 만큼 재료가 점착성일 경우.(그림4B)
- **플러싱(Flushing)** : 플러싱은 재료가 안정된 돔을 입자들이 형성할 만큼 점착성이 높지 않지만 다소간의 재료를 완화키 위해 다져진 재료 내부로 공기가 침투되는 동안 재료의 배출율이 서서히 낮아질 만큼 높을 때 일어난다. 이런 결과는 공기가 재료에 침투하는 두께가 얇은 만큼 분체의 유동이 느리고 새로 드러난 재료의 표면층에 공기가 침투하여 유동과정을 다시 시작하게 한다.(그림4C)
- **배출잔량** : 용기내의 사장(死藏)공간(空間)이 재료의 전량배출을 방해한다.
- **분리** : 크기와 밀도가 다른 입자들은 큰 입자들 사이의 빈 공간에서 움직이는 작은 입자들의 진동과 침투로 인해 분리되려는 경향이 있다.
- **합체(合體)** : 많은 재료들이 호퍼내에 장기간 저장하게 되면 각 입자들이 서로 보다 견고하게 결합하기 위해 스스로 재배열 하려는 경향이 있다. 이런 경향은 다공층상에서 Foust의 고밀도 팩킹과 같이 이것에 기인한다. 합체된 재료들은 브릿지 혹은 렐홀 경향이 있으며 유동성은 보다 더 나빠진다.
- **케이킹(Kaking)** : 케이킹이라는 또 다른 중요한 경향이 있다. 케이킹은 습도의 변화로 인해 입자들 사이에서 일어나는 물리화학적 결합에 기인한다. 공기중의 습기는 시멘트와 염(鹽)과 같은 분체들과 반응하거나 용해 시킬 수 있다. 공기 습도가 바뀔 때 용해된 분체들이 재결정화되고 입자들이 커질 수 있다. 이런 경향에 대한 좋은 설명이 E.J. Griffith의 " Cake Formation in Particulate System "(VCH출판사, 1991.뉴욕)에 게재되어 있다.

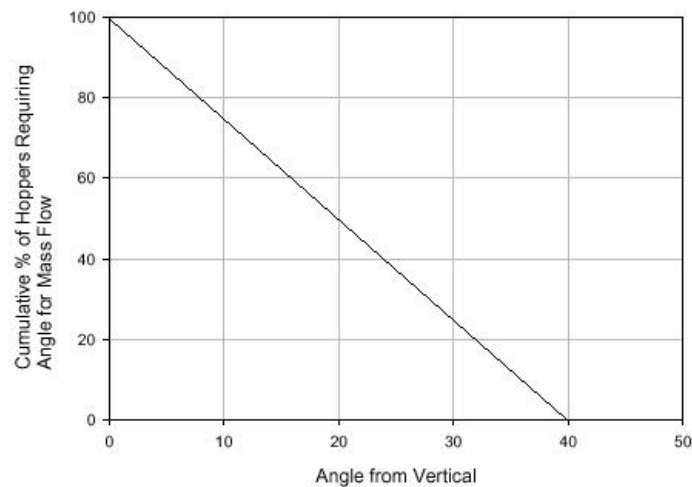


[그림4 : Bin/Hopper 설계의 일반적인 문제점들]

3. 전체유동(Mass Flow)의 예상

빈(Bin)과 호퍼 설계에 관련된 많은 문제점들이 호퍼가 전체유동형태로 운전되도록 설계함으로써 해결될 수 있다. Ter Bora는 500여 재료들의 데이터 결과들을 [그림5]에서 보여주고 있다. 전체유동을 일어나게 하는 원추각은 수직축에서 40° ~ 0° 범위에 있다.

전체유동은 모든 경우에서 필요한 것은 아니다. 일련의 상황들 중에는 전체유동의 호퍼설계가 제한된 천정과 거리 때문에 비현실적일 때가 있다. [표1]은 전체유동과 부분유동의 핵심 장.단점들을 요약한 것이다. 대부분의 용도들에서 당신이 하나의 선택을 해야 한다면 당신은 전체유동을 원한다. 하지만 극단적인 경우 혹은 전체유동이 진정 필요치 않은 경우에는 짧은 부분유동의 호퍼 설계를 희망할 것이다.



[그림5 : 500여 분말 재료들의 전단시험에서 나온 Ter Bora W/Bayer의 데이터]

[표1 : 전체유동과 부분유동 호퍼의 장.단점]

	전체유동(Mass Flow)	부분유동(Funnel Flow)
장점	<ul style="list-style-type: none"> - 일관된 유동 - 감소된 원주방향의 분리 - 벽체의 응력을 예상할 수 있다 - 내용적 전체의 효과적 사용 - 선투입=선배출 	<ul style="list-style-type: none"> - 높이를 낮출 수 있다
단점	<ul style="list-style-type: none"> - 내벽 표면의 마모 - 벽체에 대한 높은 응력 - 높이가 높다 	<ul style="list-style-type: none"> - 레슬링 - 분리 - 선투입=후배출 - 합체경향의 심화 - 내벽에 대한 불균일한 응력이 용기를 찌그러트릴 수 있다 - 재료가 넘칠 수 있다 - 유효저장능력의 감소

결합 메커니즘

분체들이 서로 결합을 하고 완전하게 막히어 유동을 하지 않는데는 여러 가지 메커니즘이 있다. 이들 중 일부는 앞에서 언급되었으며 결합 메커니즘들은 다음과 같다.

1) 분체의 브릿지(케이킹)

- 무기결합(無基結合)
- 화학반응
- 국부용융(局部溶融)
- 결합제의 경화
- 용해된 물질의 결정화

2) 점착과 응집

- 서로 덩어리가 되게 하는 여러 가지 영향들이 있으며 점착과 응집이라 칭한다. 호퍼의 내벽 혹은 서로 결합하고 소성변형할 수 있는 물리적으로 변형가능한 입자들이 여기에 해당된다. 통상적으로 매우 작은 입자들이 점착성을 나타낸다.

3) 접촉력

- 접촉력에는 입자들 간의 모세관력과 액체결합이 포함된다. 이런 영향들은 3相(고체, 액체, 기체)간의 접촉 표면들과의 접촉장력에 기인한다.

4) 인력(引力)

- 인력에는 분자간의 힘인 반 델 발스 힘과 보다 큰 범위를 가지는 정전기력과 자기력 등이 포함된다. 또 작은 범위의 반발력도 있으나 입자들이 접촉할 만큼 충분히 근접할 경우 인력은 더 강해진다.

5) 체결력

- 체결력은 옷걸이에 코트를 걸어 놓았을 때 얽히는 것과 비슷하게 섬유상 재료들 사이에서 일어나는 기하학적인 얽힘에 기인한다. 초기의 많은 작업들에서는 정지각(Repose Angle)에 근거하여 호퍼를 설계하고자 하였지만 정지각 만으로는 호퍼의 성능에 작용하는 모든 메커니즘을 설명하기에는 충분치 않다. 정지각은 야적높이와 넓이를 정의하는데 만 유용할 뿐이고 엔지니어들 사이에서 그것의 인기는 쉽게 평가될 수 있다는 것에 기인하는 것이지 유용성에 기인한 것은 아니다.

필요조건 시험

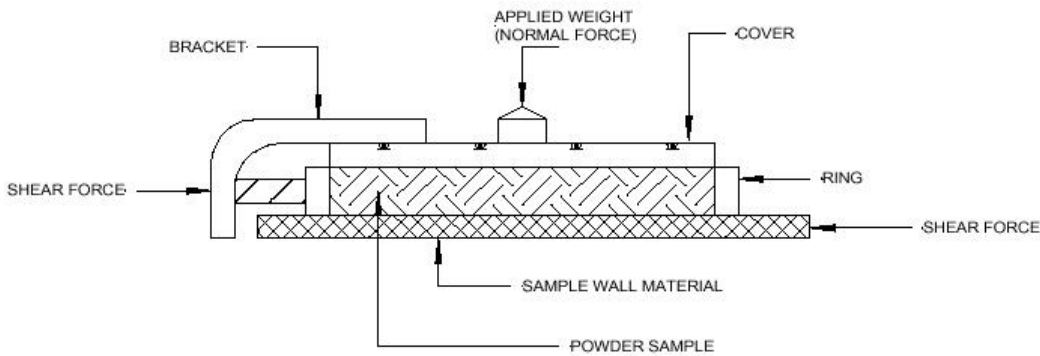
저장 호퍼를 설계하기 위해서는 다음과 같은 몇 가지의 재료 특성들이 요구된다.

- 내부 마찰계수(재료 입자들 사이의 마찰계수)
- 내벽 마찰계수

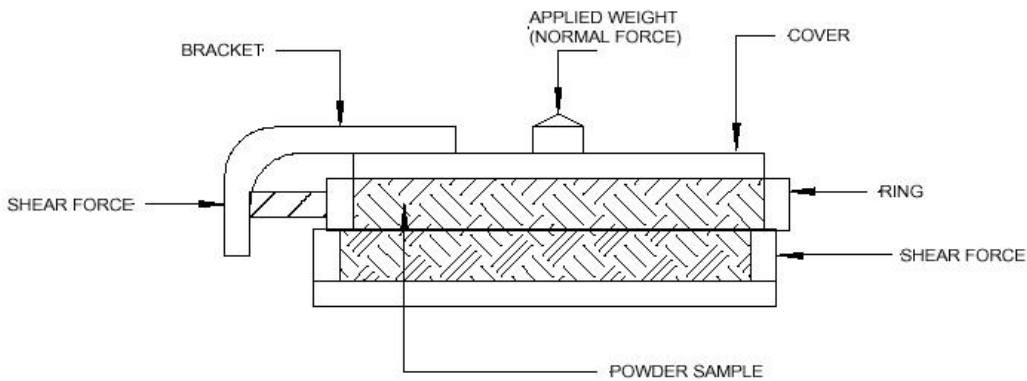
- 침투성(투과성)
- 압축성

고려되어야 할 다른 인자들로는 케이킹이 문제될 수 있다면 상도표(相圖表: Phase Diagram)에 따른 온도와 수분함량 등이 있다.

보편적인 시험장치중의 하나가 제니크 전단시험기 이다. 제니크 전단시험기는 3축 전단시험기와 비슷하다. 분말 시료는 시료고정대에 놓고 시료고정대의 움직임이 내벽 마찰계수를 정의하기 위해 [그림6a]에서와 같이 저장호퍼 재료의 시편사이에서 전단을 일으킨다. 혹은 그 움직임이 내부 마찰계수를 정의키 위해 [그림6b]에서와 같이 분말 시료의 내부에서 전단을 일으킨다.



(a) 내벽마찰시험 : 분말시료가 내벽재료의 시편과 접촉하고 있으며 전단은 분말과 내벽재료 시편사이에서 일어난다.



(b) 내부마찰시험 : 분말시료의 내부 자체에서 전단이 일어난다.

[그림6 : 제니크 시험기에 의한 내부와 내벽 마찰시험]

다음 공식과 같이 전단력 F 는 수직력 N 에 마찰계수 μ 를 곱한 관계성을 가지며 마찰시험들은 이 마찰계수를 정의하기 위한 물리학의 간단한 응용이다.

$$F = \mu N \quad \text{----- (1)}$$

일반적으로 마찰계수는 내벽 마찰각도 ϕ 로 표현된다.

$$\phi = \arctan(\mu) \quad \text{----- (2)}$$

네델란드의 I.A.S.Z. Peschl 이 개발한 2개의 원판(圓板)사이에 시료를 놓고 한 원판 중심축 주변을 다른 원판이 회전하는 Peschl 시험기의 회전판 시험과 같이 상품화된 다른 전단시험 장치들도 있다. 이것은 입자들이 다져지게 하고 전단이 장시간 일어날 수 있기 때문에 제니크 전단시험기 이상의 장점을 가진다. 하지만 시료고정대의 작동 부품간 마찰이 측정된 결과값의 정확성에 대한 의심을 불러 일으킬 수 있으며 회전판들의 중심에서 가정된 제로 상태의 응력에 대한 의문이 있다.

여러 해 동안 많이 사용된 또 다른 시험이 전단환상(剪斷環狀) 셀(Cell)이다. 회전판 시험기와 같이 전단환상셀은 무한(無限) 작동한다. 시료는 2개의 실린더 사이의 환상공간에 채워진다. 해당 수직력을 작용케 하고 환상공간에 있는 분말을 고정하기 위해 시료상부에 덮개를 덮는다. 덮개는 조립부품대에 비례하여 회전되며 시료에 전단력을 일으킨다. 이 장치는 탄성재료와 페이스트 상 재료에 적합하다. 측정된 결과값은 호퍼설계에 사용키 위한 완전한 시험을 실시한 적이 없으며 밀봉재 분말들은 문제가 될 수 있다.

호퍼와 싸일로에서의 응력

직선부를 가진 원통형 싸일로에서 미분요소 dz 에 작용하는 힘들의 평형에 대해 고찰해 보자. 정적상태에서 주변유압(공기)은 싸일로 내의 모든 입자들에 균일하게 작용한다.

하지만 단면적 A 에 작용하며 체적요소 이상의 재료과부하가 기인되는 압축성 수직응력 P_v 가 있다. 또 싸일로 내벽에 작용하는 고체상의 전단응력 τ_R 가 있다. 다음과 같이 Z 방향의 힘에 작용하고 있는 여러 요소들이 있다.

Z 의 상부표면에서 하향작용하는 수직응력	$P_v A$
$Z + \Delta Z$ 의 표면에서 상향작용하는 수직응력	$-(P_v + dP_v) A$
싸일로 벽의 윗 방향으로 작용하는 전단응력	$-\tau_R \pi D dz$
미분요소에 대해 아래방향으로 작용하는 중력	$\rho^o A dz g$

일정상태(가속도 0 혹은 관성을 무시한 상태)에서 힘의 합은 0이 되어야 하며 다음과 같이 힘의 평형을 이룬다.

$$P_v A - (P_v + dP_v) A - \tau_R \pi D dz + \rho^o A dz g = 0 \quad \text{-----}(3)$$

이를 축소하면

$$-A(dP_v) - \tau_R \pi D dz + \rho^o A dz g = 0 \quad \text{-----}(4)$$

벽에서의 전단응력은 물리학적으로 마찰계수 μ 를 가지는 벽에 원주방향으로 작용하는 측면의 수직응력 P_w 와 관계된다.

$$\tau_R = \mu P_w \quad \text{-----(5)}$$

식(4)에 식(5)를 대입하면

$$-A(dP_v) - \mu P_w \pi D dz + \rho^0 A dz g = 0 \quad \text{-----(6)}$$

P_w 와 P_v 항을 가진 식(6)이 된다.

잔센(Janssen)은 측면의 수직응력에 윗 방향 수직응력이 비례함을 가정하여 이 방정식을 풀었다.

$$P_w = K P_v \quad \text{-----(7)}$$

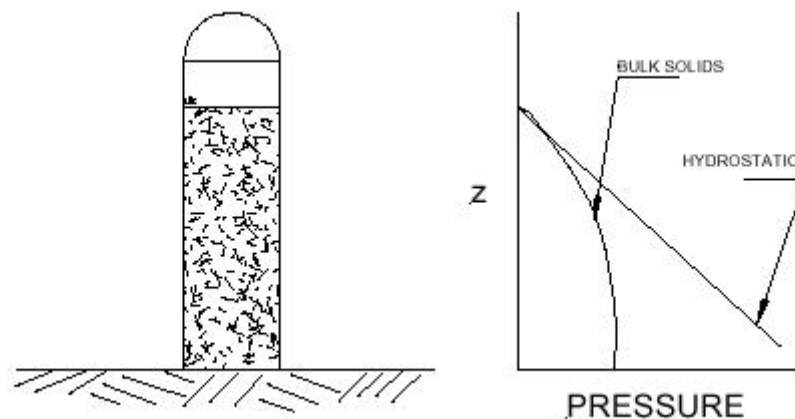
식(6)에 식(7)을 대입하여 정리하면 ($A = \pi D^2/4$)

$$dP_v = \frac{4\mu K}{D} \left(P_v - \frac{\rho^0 g D}{4\mu K} \right) dz \quad \text{-----(8)}$$

식(8)은 $Z=0$ 에서 $P_v=0$ 인 경계상태로 적분되어 다음 식으로 된다.

$$P_v = \frac{\rho^0 g D}{4\mu K g_c} \left(1 - \exp\left(-\frac{4\mu K z}{D}\right) \right) \quad \text{-----(9)}$$

식(9)에서 g_c 는 결과값의 질량단위를 힘의 단위로 바꾸기 위한 중력상수의 변환 계수이다. 식(9)는 잔센 방정식으로 알려져 있다. 싸일로내의 그레놀 재료 상부 표면에서 깊이를 함수로 하여 압력을 그릴 때 [그림기]와 같은 그래프를 얻을 수 있다.

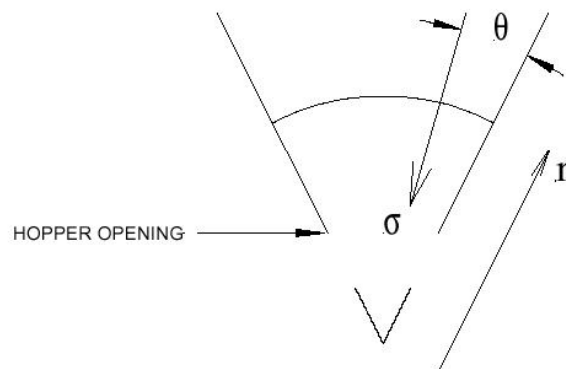


[그림7 : 싸일로의 수직공칭응력 도표]

압력증가는 깊이가 아니라 싸일로의 직경이 함수라는 것을 [그림7]에서 나타내고 있다. 이것은 시중의 싸일로들이 낮고 폭이 넓은 것 보다는 좁고 높게 설계되는 이유중의 하나이다.

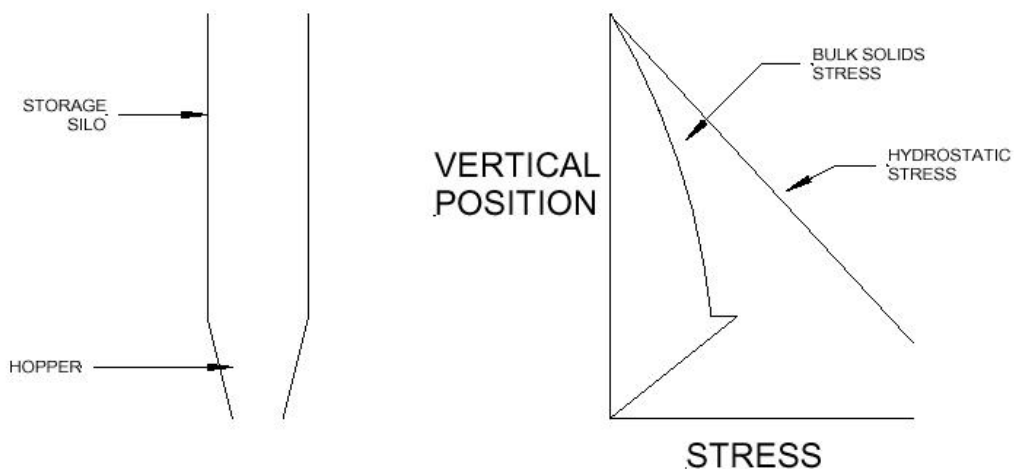
A.W. Jenike는 수렴되는 호퍼부를 갖는 싸일로의 바닥에서, 수렴 호퍼부의 응력크기는 수렴호퍼부 꼭지점 (각도에 따라서도)에서의 거리에 비례한다는 것을 정의하였다.(Storage and Flow of Solids, Bulletin No. 123). 그 응력은 [그림8]에서와 같이 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma = \sigma(r, \theta) \quad \text{-----(10)}$$



[그림8 : 호퍼에서의 응력 σ 는 위치 (r, θ) 의 함수이다.]

레디얼 응력장(Radial Stress Field)의 가정에 적용하는 정밀한 계산들은 이 단원의 범위에 속하지 않지만 [그림9]에 대한 계산 결과들은 호퍼 배출부의 싸일로 바닥에 대한 조건들을 우리에게 제시하고 있다. [그림9]는 호퍼 배출구에서 필연적으로 응력이 없다는 것을 나타낸다. 이것은 스크류와 로타리 밸브 같은 배출장치를 쉽게 설치할 수 있게 하는 이유이다.



[그림9 : 수렴호퍼 배출부의 응력을 포함한 호퍼 응력장]

EXAMPLE 1. APPLICATION OF JANSSEN'S EQUATION

A large welded steel silo 4 meters in diameter and 20 meters high is to be built. The silo has a central discharge on a flat bottom. Estimate the pressure on the wall at the bottom of the silo if the silo is filled with (a) plastic pellets, and (b) water. The plastic pellets have the following characteristics

$$\rho = 560 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$\phi = 20^\circ$$

SOLUTION:

(a) The Janssen Equation, Eq.(9), is for silos of circular cross section. Diameter and height are given in the problem statement. The coefficient of wall friction is obtained by inverting Eq.(2) as

$$\mu = \tan(20^\circ) = 0.364$$

K, the Janssen Coefficient, is assumed to be 0.4. The Janssen coefficient can vary with material as indicated in Figure 4-4, but it is not often measured. Substituting these quantities into Eq.(9) we get the vertical stress at the bottom of the silo:

$$P_v = \frac{\rho g D}{4\mu K g_c} \left(1 - \exp\left(-\frac{r z \mu K}{D}\right) \right)$$

$$= \frac{(560 \text{ kg} / \text{m}^3)(9.807 \text{ m} / \text{s}^2)(4 \text{ m})}{(4)(0.364)(0.4)(1 \text{ kg} \text{ m} / \text{N s}^2)} \left(1 - \exp\left(\frac{-4(20 \text{ m})(0.364)(0.4)}{12 \text{ m}}\right) \right)$$

$$= 23,430 \text{ N} / \text{m}^2 \text{ (or } 3.4 \text{ psi)}$$

To estimate the normal stress on the wall we apply Janssen's assumption

$$P_w = K P_v$$

$$= 0.4(23,430 \text{ N} / \text{m}^2)$$

$$= 9,372 \text{ N} / \text{m}^2 \text{ (} 1.4 \text{ psi)}$$

(b) If the silo was filled with water instead of granular solids, the pressure at depth H is given by

$$P = \frac{\rho g H}{g_c}$$

$$= \frac{1,000 \text{ kg} / \text{m}^3 (9.807 \text{ m} / \text{s}^2)(20 \text{ m})}{1 \text{ kg} \text{ m} / \text{N s}^2}$$

$$= 196,140 \text{ N} / \text{m}^2 \text{ (} 28.4 \text{ psi)}$$

The result in (b) is a factor of about 20 times greater than the normal wall stress calculated in (a). This is due to the wall friction exerting a vertical upward force on the granular solids.