



## 합진기체의 배출에 미치는 금망 충전물의 영향

### Effects of Screen Packing Materials on Gas Discharge Dust Containing

홍영호\* · 함영민\*

Young-Ho Hong · Yeong-Min Hahm

#### ABSTRACT

This work was carried out to investigate the effects of solid mass flow rate, mean particle diameter and mesh number of screen packing material on minimum carrying velocity, which defined as the superficial gas velocity of the upper limit of choking phenomenon.

Vertical pneumatic conveying was studied on a 4.6cm I.D. pipe, 180cm in length. Experiments were performed in both the empty and the screen-packed pipe.

It was also examined the effect of superficial gas velocity, solid mass flow, mean particle diameter, and mesh number of packing material on pressure drop. Minimum carrying velocity in screen packed-pipe was lower than that in an empty pipe. Besides minimum carrying velocity was decreased with increase in mesh number of screen packing material.

The pressure drop in vertical packed-pipe was increased with superficial gas velocity, mean particle diameter, and mesh number of screen packing material.

#### 기호설명

D	: Diameter of transport line	$\Delta P_{\text{accel}}$	: Acceleration pressure drop
$f_g$	: Gas friction factor	$\Delta P_{\text{friction}}$	: Frictional pressure drop
$f_s$	: Solid particle friction factor	$\Delta P_{\text{static}}$	: Static pressure drop
g	: Gravitational acceleration	$\Delta P_T$	: Total pressure drop
L	: Length of transport line, m	$U_f$	: Actual fluid velocity
$\Delta P$	: Pressure drop, mmH <sub>2</sub> O	$U_g$	: Superficial gas velocity, m/sec
$\Delta P/L$	: Pressure drop per unit length, mmH <sub>2</sub> O/m	$U_p$	: Solid particle velocity
		$U_{c,\text{min}}$	: Minimum carrying velocity, m/sec

\* 단국대학교 공과대학 화학공학과

- : Solid mass flow rate, g/sec
- $\rho_f$  : Fluid density
- $\rho_p$  : Particle density
- $\epsilon$  : Voidage in transport line

## 1. 서 론

산업환기는 작업환경 유해요인인 분진, 유기용제, 특정화학물질 등 산업피로를 촉진시켜 작업능률을 저하시키며, 경제적 손실을 발생하는 요인등을 제거하는 기술로서 작업환경관리에서는 중요한 기술이다. 이러한 환기방식을 결정할때 실내압력에 주의하여 오염이 높은 작업장은 인근공간으로의 유출을 피하기 위하여 실내압을 음압(negative pressure)으로 유지하며, 청정공기를 필요로 하는 산업에서는 실내압을 양압(positive pressure)으로 유지할 필요가 있다. 이러한 환기는 환기를 이루는 구동력에 의해서 발생하는 압력차에 의하여 이루어지는 자연환기와 기계력을 이용하는 기계환기로 나눌 수 있으며, 그 방식에 따라 전체환기(total ventilation)와 국소환기(local ventilation)로 구별할 수 있는데<sup>1)</sup>, 이중 국소환기는 오염이 심한 장소를 대상으로해서 유해물질을 배출하는 가까운곳에 포집시설인 후드를 설치한 후 덕트(duct)를 통해 기계적인 힘을 이용하여 대기로 오염원을 배출함으로써 작업장내의 유해환경을 개선하는 방식을 취하는 환기법이다. 이와같은 국소환기에서 오염공기를 포착하여 유도하는 시설인 덕트에서의 압력차가 환기효율을 결정하는 중요한 요인이 된다. 국소환기 시설인 덕트가 건조한 분진을 제거하는 환기시설에 사용된다면, 이때의 덕트를 기압수송관으로 간주할 수 있다.

구동력인 압력범위가 1atm~8.15atm의 압력범위에서 조작되는 가압기압수송과 0.4atm~1atm의 압력범위에서 조작되는 감압기압수송으로 구별되는 기압수송중 수평수송은 고체-기체의 비(solid-ratio)가 비교적 작은 영역에서는 고체입자들이 수송관에서 균일하게 분산되어지나, 고체 공급량이 증가하게 되면 고체입자들이 수송관의 아래 부분으로 가라앉는 등의 현상이 일어나며, 고체 공급량이 비교적 클때는 흐름이 불안정하고 압력강하의 변동이 크다<sup>6)</sup>. 즉 겉보기 속도가 증가하면 수송관의 단위길이당 압력강하가 감소하다가 어느속도

에서 갑자기 감소하는 불안정성을 보인후 다시 증가하기 시작한다. 기압수송형태로 분진을 배출할 경우 비교적 흐름이 균일하며, 분진의 수송시 단위 질량당 수송효율이 크다는 잇점을 가지고 있으나 기체-고체의 수송을 시행하는데 많은 기술적인 어려움을 내포하고 있으며, 환기시설중의 덕트에서의 분진등의 퇴적과 제진장치내의 분진이 퇴적하기 때문에 압력손실이 증대하고 그때문에 소요 송풍량을 얻을 수 없게 된다. 이와같은 이유 때문에 함진기체의 수직기압수송시 공급되는 분진의 양이 일정할 때 비교적 낮은 기체공압속도에서 발생하는 슬러그(slug) 흐름을 방지하고, 쇼오킹 현상이 균일한 조건에서 조작하며, 기압수송시 발생하는 압력의 변동을 줄이려면 수송관내부에 충전물을 충전시킬 필요가 있다. 이런 목적의 충전물로 가장 이상적인 충전물인 금망이 충전된 충전기압수송은 건조 및 탈착이나 흡착을 시키는 반응기와 산업환기시설에 응용할 수 있으나 이에 대한 공학적 연구자료 등이 그리 충분하지 않은 형편이다. 따라서 본 연구에서는 규사를 분진으로 하는 함진기체를 수직기압수송의 형태로 배출시킬때 분진의 평균입경, 질량속도 그리고 기체유속 및 충전물이 수직기압수송시 발생하는 최소수송속도와 압력강하에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

## 2. 기압수송에서 압력강하

국소환기시설의 후드에서 흡입된 함진공기를 제진장치를 통해 외부로 방출할때 까지 덕트내에서 기류가 가지고 있는 기계적 에너지는 수송관 내벽면의 마찰등에 의해 손실된다. 마찰에 의한 손실은 기체의 속도, 송풍관 내면의 성질에 의해 결정되며, 수송관의 형태에 따라 발생하는 손실은 그때 발생하는 난류속도의 증감에 기인하며 이것을 통칭하여 압력강하라고 한다. 공기-고체입자의 기압수송시 압력강하는 다음 5 가지 형태로 구성된다.

- (1) 고체입자의 가속에 의한 압력강하.
- (2) 수송유체인 공기의 가속에 의한 압력강하.
- (3) 고체입자와 공기의 정적두에 의한 압력강하.
- (4) 공기와 수송관 사이의 마찰에 의한 압력강하.
- (5) 공기와 고체입자 사이의 마찰에 의한 압력강하.

$$\text{즉 } \Delta P_T = \Delta P_A + \Delta P_S + \Delta P_F \dots\dots\dots (1)$$

공기와 고체입자는 장치의 입구에서부터 정상상태의 유속에 도달할때까지 상당한 거리에 걸쳐서 가속되는데, 가속거리는 입도와 고체의 유량에 의하여 결정되고, 기체속도나 고체-고체의 질량비에는 크게 영향을 받지 않는다. 따라서 정상상태의 흐름과정에서 전체압력강하는 다음과 같이 알려져 있다<sup>2)</sup>.

$$\Delta P_{T/L} = \rho_p(1-\epsilon)g + \epsilon \rho_f g + 2f_g U_i^2 \rho_f / D + 2f_s U_p^2 \rho_p(1-\epsilon) / D \dots\dots\dots (2)$$

여기서  $f_s = 0.0285 U_p^{-1} (gD)^{-1/2}$

$$f_g = 0.0014 + 0.125(1/R_e)^{0.32}$$

일반적으로 수직기압 수송계는 작은입자가 수송되므로 비-쇼오킹 흐름 영역에서 수행되어지는데 이러한 비-쇼오킹 흐름계에서는 고체입자들이 매우 균일하게 분산되어 수송되므로 회박상으로 수송되며, 기체의 유속이 클 경우 공극률은 거의 1에 가깝게 된다. 실제적으로 공극률이 1과 유사한 값을 갖는다면 식 (2)의 총괄압력강하값은 아래와 같다고 볼 수 있다.

$$\Delta P_{T/L} = g \rho_f + 2f_g U_i^2 \rho_f / D \dots\dots\dots (3)$$

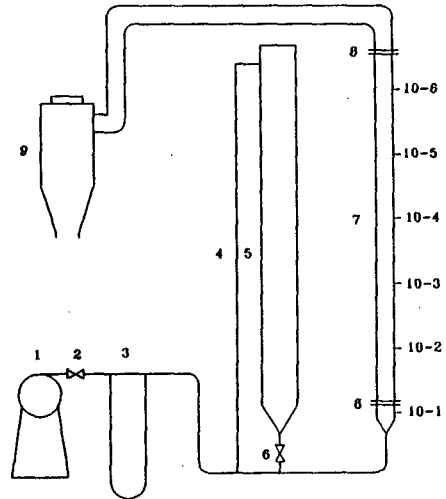
이러한 사실로부터 Stermerding에 의해 제시된 바와 같이 공기압 수송시 총괄압력강하는 마찰에 의한 압력강하와 정압에 의한 압력강하에 영향을 받는다<sup>3)</sup>.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

실험에 사용된 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 높이가 180cm, 직경이 4.6cm인 아크릴수지 원통관을 사용한 주수송관안에 높이 1cm, 지름 1cm 정도인 원통형 금망충진물을 채웠다. 시험구간에서의 압력강하를 측정하기 위하여 주수송관의 하단으로부터 36cm의 간격으로 6개의 pressure tap을 설치하였다. 그리고 호퍼는 높이가 170cm, 내경이 6.6cm인 아크릴수지 원통관을 사용하였으며, 호퍼 아래에 오리피스(orifice)와 밸브를 장치하였고, 호퍼내의 압력과 수송관내의 압력이 같아져서 기체흐름의 양에 관계없이 일정한 양의 고체입자가 도입될 수 있도록 equalizing line을 설치하여 고체입자의 도입속도를 조절하였다<sup>4)</sup>. 그리고 공기압축기를 사용하여 공기를 공급하였고,

피토투브(pitot tube)를 이용해 보정한 오리피스 미터(orifice meter)로 유량을 측정하였으며 주수송관에서 배출되는 고체입자는 집진기를 이용하여 집진하였다.



- |                    |                        |
|--------------------|------------------------|
| 1. Air Compressor  | 6. Orifice & Valve     |
| 2. Ball Valve      | 7. Main Transport Line |
| 3. Orifice Meter   | 8. Flange              |
| 4. Equalizing Line | 9. Cyclone             |
| 5. Hopper          | 10. Pressure Tap       |

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

#### 3.2 실험방법

공기압축기를 사용하여 공기를 수송관에 도입시키고 호퍼(Hopper)아래의 밸브를 열어 고체입자를 도입시키고 공기의 유량을 조절하여 최소 수송속도를 구하였다. 호퍼로부터 도입되는 고체입자의 속도는 직경이 서로 다른 5개의 오리피스를 사용하여 조절하였고, 정해진 실험조건에서 정상상태를 도달되었을때 주 수송관의 pressure tap과 연결된 마노미터로부터 압력강하를 측정하였다. 본 실험에서 행한 실험조건은 기체공압속도가 3.0~6.0m/sec이고, 고체질량속도의 범위는 2.90~16.35g/sec이며, 고체입자는 평균직경이 약 425 μm, 280 μm, 180 μm인 세종류의 호추산 규사를 사용하였다. 공기의 유속을 측정하기 위한 오리피스미터는 피토투브를 이용하여 공기유속을 보정하였고, 주수송관의

로 공급되는 고체입자는 오리피스미터에 의해 측정된 공기흐름에 의해 분산시켰다. 한편, 호퍼내에서 고체입자들이 수송관내로 도입되기 시작하면, 호퍼내의 고체입자들의 채워진 높이가 점차 감소하게 되나, 높이에 따르는 도입량의 변화를 조사한바에 따르면 이 높이의 변화는 도입량에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이것은 Hariu와 Molstad가 발표한 내용과 일치한다<sup>5)</sup>. 호퍼내의 고체입자가 채워진 높이는 도입량에 별다른 영향을 미치지 않았지만 고체입자의 평균직경은 도입량에 약간의 영향을 미쳤다. 즉 입자의 평균직경이 작을수록 같은 opening dimension을 가진 오리피스에서 도입되는 부피는 약간씩 증가하였다. 기체유속, 고체질량유속 및 고체입자의 크기의 변화에 대한 압력강하의 측정은 주 수송관의 pressure tap중 주 수송관의 하단에서 첫번째 tap과 주수송관으로부터 180cm의 높이에 위치한 여섯번째 pressure tap까지의 평균압력구배로부터 단위길이당의 압력강하를 구하였다. 최소 수송속도를 측정하는 방법은 육안으로 관찰하는 직접적인 방법과 공압 기체속도와 압력강하의 상관관계에서 압력강하가 최소가 될때의 속도를 구하는 간접적인 방법이 있으나, 본 실험에서는 입자의 흐름현상을 육안으로 관찰하는 직접적인 방법으로 최소 수송속도를 측정하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 최소 수송속도

Fig. 2는 비충진관에서 고체입자의 크기 및 질량 속도에 대한 최소 수송속도를 나타낸 것으로, 그림에서 보는 바와같이 고체입자의 평균입경과 질량속도가 커짐에 따라 최소 수송속도값은 커지는데, 이러한 이유는 고체질량속도가 증가함에 따라 수송관벽과 고체입자 사이의 마찰과 입자의 순환에 의한 초오킹 현상이 발생하므로 최소 수송속도는 증가하는 것이다. Fig. 3은 금망충진물의 메쉬크기에 따라 수직충진관에서 평균입경이 280 $\mu\text{m}$ 인 고체입자의 고체질량속도에 대한 최소 수송속도를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는바와 같이 수직수송관에서 최소 수송속도는 비충진관에서 보다 충전수송관에서 작고, 충전관에서는 충전물인 금망의 메쉬크기가 클수록 최소 수송속도가 작아지는 현상을 보인

다. 이러한 이유는 충진을 하게되면 충전물의 존재로 인하여 초오킹 현상이 비교적 줄어들고 수송관벽에서 실제 기체 속도는 거의 무시될수 있으며, 수송관 중심부에서의 유체속도가 연속적으로 증가하므로 비충진 수송관에 비하여 최소 수송속도가 작으며, 또한 고체질량 속도가 클수록 최소 수송속도가 증가하는데 이는 입자밀도의 증가로 인해 고체입자와 충전물 그리고 수송관벽 사이의 마찰과 입자의 순환에 의해 입자가 수송관벽을 따라 떨어

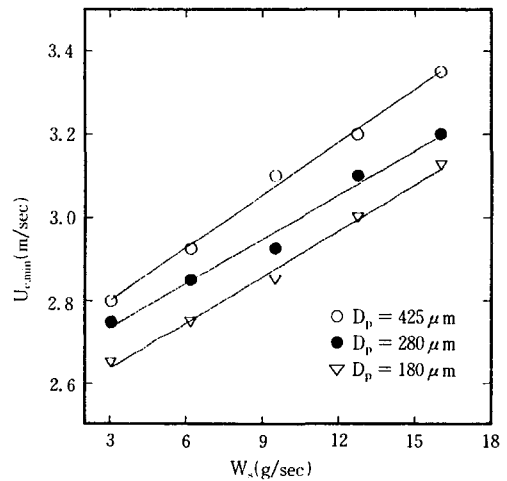


Fig. 2 Minimum carrying velocity as a function of solid rate and particle diameter in empty pipe

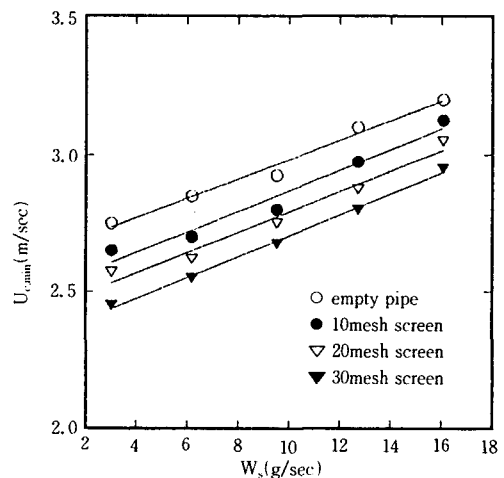


Fig. 3 Minimum carrying velocity vs. solid rate (D<sub>p</sub> = 280 μm)

지는 고체입자의 속도가 증가하므로 최소 수송속도가 증가하는 것이다.

4.2 압력강하

수직수송관에서 기압수송방법에 의해 합진기체를 배출할때 필요한 공기의 유속은 앞서 얻어진 최소 수송속도보다 커야 하며 이러한 공기유속범위에서 기압수송시 압력강하에 미치는 공탑기체속도, 고체입자의 크기, 고체입자의 질량속도, 그리고 충전물인 금망의 메쉬크기에 대한 영향은 다음과 같다. Fig. 4는 비충진 수송관내에서 평균입경이 425 μm인 고체 입자의 질량속도와 공탑기체속도에 대한 단위길이당의 압력강하를 나타낸 그림이다.

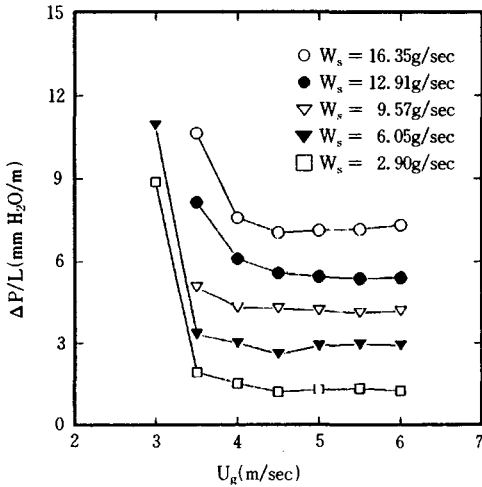


Fig. 4 Pressure drop per unit length as a function of solid rate and superficial gas velocity in empty pipe (Dp = 425 μm)

그림에서 알 수 있는 바와같이 공탑기체속도가 비교적 작은 영역에서는 수송관내에서의 압력강하가 감소하다가 비교적 큰 영역에서는 압력강하가 거의 일정한 값을 가지는데 이는 공탑기체속도가 클때는 수송관내에서 발생하는 마찰에 의한 압력강하가 총괄압력강하에 증대한 영향을 미치어 공탑기체속도가 감소함에 따라 총괄압력강하도 감소하기 때문이며, 이와달리 공탑기체속도가 작은 영역에서는 총괄압력강하는 고체의 hold-up에 의해 영향을 받아, 공탑기체속도가 감소함에 따라 총괄압력강하는 다시 증가하게 된다. 즉, 수직기압수송에서 기

체에 대한 고체입자의 상대속도는 기체유속이 클수록 커지며, 이때 합진기체의 존재하는 고체입자는 균일하게 분산된다. 본 실험에서는 0.0755의 용적농도(volumetric concentration)로 수송관에 합진기체가 공급되므로 고체의 질량흐름속도가 일정하고 공기의 유속이 서서히 감소하면 수송관으로 공급되는 고체의 상대적 농도가 증가하고 이때의 공기속도는 고체입자를 균일하게 수송하기 위하여 적합하지 않은 현상이 나타나는 공탑기체속도에서 압력강하값은 최소치 값을 가지게 된다. 따라서 본 실험의 조건인 내경이 4.6cm인 비충진 수송관의 경우 평균입경이 425 μm인 규사를 기압수송시킬때 조밀상 흐름에서 희박상흐름으로 변화하는 공탑기체속도는 대략 5.0m/sec범위임을 알 수 있다.

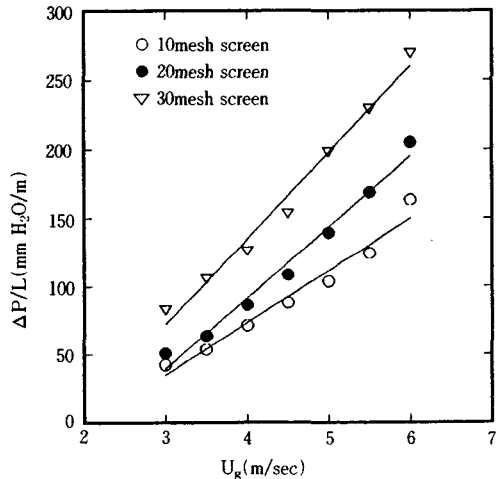


Fig. 5 Pressure drop per unit length as a function of mesh size of screen packing materials and superficial gas velocity in screen packed pipe (Ws = 0)

Fig. 5는 금망을 충전한 수직수송관에서 공탑기체속도에 대한 단위길이당의 압력강하를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타나는 바와같이 공탑기체속도가 증가할수록 압력강하가 증가하는데 이는 공탑기체속도가 증가함에 따라 앞의 식 (2)에서 살펴본 바와같이 기체의 흐름에 대한 마찰에 의한 압력강하는 공탑기체속도의 제곱근에 비례하는 값을 가지므로 공탑기체 속도가 증가함에 따라 마찰에 의한 압력강하는 증가하기 때문이다. Fig. 6은 고체질량속도

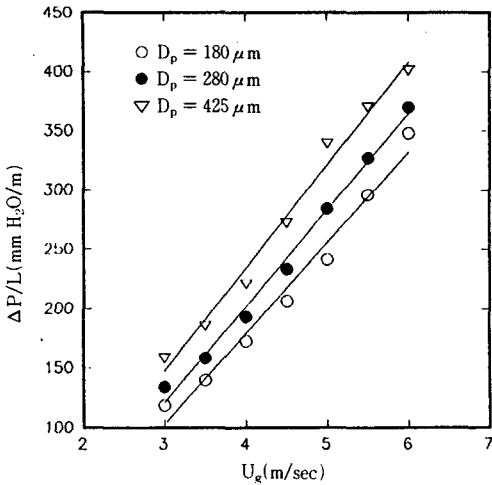


Fig. 6 Pressure drop per unit length as a function of particle diameter and superficial gas velocity in screen packed pipe

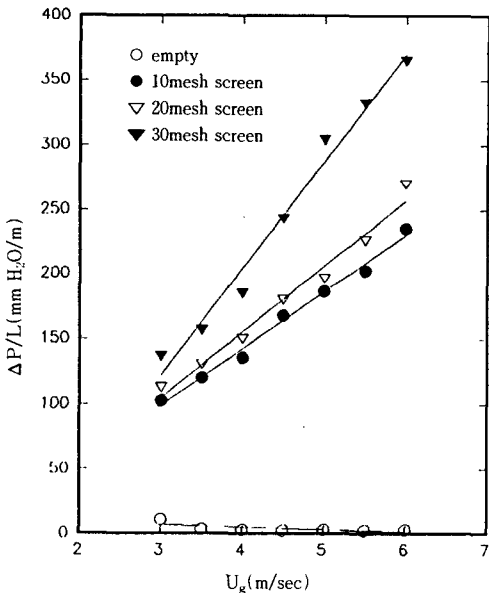


Fig. 7 Comparison of pressure drop per unit length in screen packed pipe with that in empty pipe ( $D_p = 425 \mu m$ ,  $W_s = 6.05g/sec$ )

가 9.37~9.57g/sec일때, 고체입자의 크기와 기체 공탐속도에 따른 단위길이당 압력강하를 나타낸 그림으로, 고체입자의 크기가 클 경우에는 작은 경우

에 비해 고체입자의 수송속도가 현저히 작아지기 때문에 고체입자의 크기가 클수록 수송관내의 고체 입자의 hold-up이 큰 상태가 되어 정압압력 강하가 커져서 압력강하값이 증가하는 것이다. Fig. 7은 고체입자의 크기가 약  $425 \mu m$ 이고, 고체 질량속도가 6.05g/sec인 경우에 공탐기체속도에 대한 단위 길이당의 압력강하를 비충진관과 금망충진관의 경우를 비교하여 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이와 같이 금망충진물을 충전하고 함진기체를 배출하였을 경우 충전하지 않은 배출의 경우와는 다르게 공탐기체속도가 증가할수록 압력강하가 증가하는 것을 알 수 있는데, 이러한 현상은 충진을 하게 되면 충전물의 존재로 인하여 함진기체와 충전물 사이의 마찰에 의한 압력강하(frictional pressure drop)가 증가하기 때문이고, 충전물의 매쉬번호가 클수록 압력강하가 증가하는데 이는 매쉬번호가 커질수록 주 수송관내의 실제 기체속도와 고체입자와 충전물 사이의 마찰에 의한 압력강하(frictional pressure drop)가 커지기 때문이다. 공탐기체속도가 비교적 큰 범위에서 30매쉬 금망충진물을 충전하였을때 압력강하값이 비교적 큰 것은 30매쉬 금망충진물이 더욱 조밀한 망상구조를 가지며, 고체 입자가 금망의 구멍을 통하여 재분산되지 못하고 그밀에 쌓이기 때문에 고체의 hold-up의 증가로 정압압력강하(static pressure drop)가 증가하기 때문으로 사료된다.

### 5. 결 론

수직수송관에 금망을 충전한 금망충진관 및 비충진관에서 함진기체의 배출시 고체입자의 질량속도와 크기에 따른 최소수송속도 및 기체의 유속, 고체질량속도, 그리고 고체입자의 크기와 충전물인 금망의 매쉬크기의 변화에 따라 압력강하를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기체유속이 4.5m/sec 이상인 조건에서 가압기 상수송시 공극율은 거의 1의 값을 가지므로, 총괄압력강하는 기체밀도와 기체의 유속에 비례하는 값을 갖는다. 즉 총괄압력강하는 마찰에 의한 압력강하와 정압에 의한 압력강하의 영향을 받는다.
- 2) 함진기체의 배출시 수직수송관에서의 최소 수송속도의 측정으로부터 금망을 충전한 수송관

에서의 최소 수송속도는 비충진 수송장치에 비하여 작은값을 보인다.

- 3) 내경이 4.6cm인 비충진 수송관에서 규사를 함유한 합진기체를 기압수송의 방법으로 배출시킬때 공탑기체속도가 5.0m/sec 부근의 범위에서 입자의 평균입경과 고체질량속도에 무관하게 조밀상 흐름에서 희박상 흐름으로 전환되는데 비하여 금망을 충전한 수직수송에서는 공탑기체속도가 3.0m/sec 이상의 범위에서 희박상 흐름으로 진행되었다.
- 4) 금망충진관과 비충진관에서의 압력강하측정 결과로부터 국소환기시설인 닥트에서의 합진기체의 원활한 배출을 위하여는 충전수송관이 비충진 수송관에 비하여 유용하다는 사실을 알 수 있다.

## 참 고 문 헌

- 1) 日本化學工業社編 公害防止對策 p.158 1978.
- 2) G. E. Klinzing, Gas-Solid Transport, McGraw-Hill Book Co., New York, 1981.
- 3) Stermerding, S. Chem. Eng. Sci., 17, 599 1962.
- 4) Marchello, J. M. and Gomezplata, A. Gas-Solids Handling in the Process Industries, Marcel Dekker, Inc. New York, 1976.
- 5) Hariu, O. H. & Molstad, M. C. Ind. Eng. Chem., 41, 1148 1949.
- 6) Coulson, J. M. and Richardson, J. F. Chemical Engineering, vol. 2. 3rd ed., Pergamon Press, 1978.