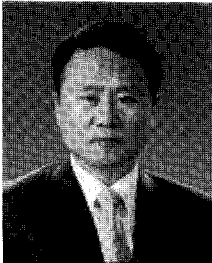


## 2008년 생활폐기물 이송관로 관련 연재

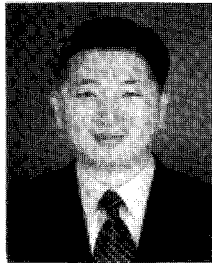
이영호 · 최영도

주제명 : 생활폐기물 이송관로의 유체역학적 고찰

### 저자



1. 성명 : 이영호 (李英浩)
2. 학력 : 한국해양대학교 기관공학과 (학사, 1980)  
한국해양대학교 대학원 기관공학과 (석사, 1982)  
동경대학 대학원 기계공학과 (박사, 1992)
3. 경력 : 한국해양대학교 교수 (1980~현재)  
유체기계공업학회 사업이사 (2006~현재)  
(재)한국조선기자재연구원 초대원장 (2001~2003)



1. 성명 : 최영도 (崔永都)
2. 학력 : 한국해양대학교 기계공학과 (학사, 1996)  
한국해양대학교 대학원 기계공학과 (석사, 1998)  
요코하마국립대학 대학원 공학연구과 (박사, 2003)
3. 경력 : 한국해양대학교 산학협력단 연구원 (2006~현재)  
요코하마국립대학 공학연구원 조수 (2003~2006)  
대우중공업(주) 항공사업본부 사원 (1996~1998)

### 1. 서언

생활폐기물 자동집하시설의 관로이송 시스템의 설계시 폐기물에 의한 부가적인 유체저항손실 및 복잡한 공기배관에서의 배관마찰손실에 대한 정확한 예측은 송풍기 선정시 필수적으로 요구되고 있으며, 이에 상응하는 단독 또는 복수 송풍기에서의 적정유량 공급 및 진공 흡입압력의 확보를 위한 시스템 제어기술이

최근 중요하게 고려되고 있다.

따라서, 본 원고에서는 전 회의 연재기사<sup>(1)~(4)</sup>에서 다루어진 생활폐기물 이송기술과 관련된 정책적, 기술적인 내용 이외에 적용 시스템의 설계시 고려되어야 할 이송관로에서 발생하는 유체저항손실 및 배관마찰손실, 진공압시스템의 송풍기 성능 및 관로 정압, 이송시스템의 최적운전을 위한 송풍기 소비동력계산식 그리고 이송관로의 최적형상변수 결정을 위한 모델실험

및 수치해석 예에 대해서 고찰하였다.

## 2. 유체저항<sup>(5)</sup>

### 2.1 입자의 운동방정식

직경  $D_p$ 인 구형입자의 속도벡터  $v$  및 유체의 속도 벡터  $u$ 가 시간적으로 변화하는 비정상 상태에서 입자의 운동방정식은 다음 식 (1)로 주어진다.

$$\frac{\pi D_p^3}{6} \left( \rho_p + \frac{\rho_f}{2} \right) \frac{dv}{dt} = F_o - R + \frac{\pi D_p^3}{6} \frac{3\rho_f}{2} \frac{du}{dt} \quad (1)$$

$$- \frac{3}{2} D_p^2 \sqrt{\pi \mu \rho_f} \int_0^t \left( \frac{dv}{d\xi} - \frac{du}{d\xi} \right) \frac{d\xi}{\sqrt{t-\xi}}$$

여기서  $\rho_p$ ,  $\rho_f$ 는 각각 입자 및 유체의 밀도,  $\mu$ 는 유체의 점도,  $F_o$ 는 외력,  $R$ 은 입자와 유체의 상대속도 순간치에 대한 유체저항이다. 위 식의 좌변에서 가속 운동하는 구에 대해서는 구가 배제한 유체질량의 절반만큼 구의 질량이 증가하므로 입자의 겉보기 질량  $m' = (\pi D_p^3/6)(\rho_p + \rho_f/2)$ 이 사용된다.

우변 제3항은 유체의 비정상 운동에 관한 항이고, 우변 제4항은 Basset 항으로 불리는 입자 운동의 이력에 관한 항이다. Basset 항은 시간  $\xi=0$ 에서  $t$ 까지의 사이에 입자속도가 변화함으로써 유체가 얻은 총 운동량의 시간적 변화를 나타낸 것이지만, 제3항과 마찬가지로 통상의 비정상 입자 운동에서는 본 항도 무시된다. 식 (1)은 매체가 기체( $\rho_p \gg \rho_f$ )이고 더구나 극단적인 비정상 상태가 아니면 다음 식 (2)와 같이 간략화된다.

$$\frac{\pi}{6} \rho_p D_p^3 \frac{dv}{dt} = F_o - R \quad (2)$$

또한, 입자의 관성을 무시할 수 있는 경우에는 다음 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$F_o = R \quad (3)$$

### 2.2 층류 및 난류 저항

유체와의 상대속도  $v_r (=v-u)$ 로 운동하는 구가 유체

로부터 받는 저항  $R$ 은 구의 운동방향으로의 투영면적  $A (= \pi D_p^2/4)$ 와 단위체적당 운동에너지  $\rho_f v_r^2/2$ 의 곱에 비례하며, 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R = C_D \cdot A \cdot \left( \frac{\rho_f v_r^2}{2} \right) \quad (4)$$

여기서  $C_D$ 는 저항계수라 불리며 차원해석에서 입자직경 기준의 레이놀즈수  $Re_p$ 만의 함수가 된다.

$$C_D = C_D(Re_p); Re_p = \rho_f D_p v_r / \mu \quad (5)$$

$C_D$ 와  $Re_p$ 의 관계는 그림 1에 도시되어 있고, 구의 표준저항곡선으로 불린다. 이것을 그림 1의 파선으로 근사하면 다음의 식이 된다.

$$C_D = \frac{24}{Re_p} : Re_p < 2 \quad (6)$$

$$C_D = \frac{10}{\sqrt{Re_p}} : 2 < Re_p < 500 \quad (7)$$

$$C_D = 0.44 : Re_p > 500 \quad (8)$$

식 (6)~(8)을 식 (4)에 대입하면, 각  $Re_p$  영역에서의 유체저항은 다음과 같이 된다.

$$R = 3\pi\mu D_p v_r : Re_p < 2 \quad (9)$$

$$R = (5\pi/4) \sqrt{\mu \rho_f} (D_p v_r)^{1.5} : 2 < Re_p < 500 \quad (10)$$

$$R = 0.055\pi D_p^2 \rho_f v_r^2 : Re_p > 500 \quad (11)$$

식 (9)는 층류저항 혹은 Stokes 저항이라고 하며 관성항을 무시한 Navier-Stokes 식으로부터 해석적으로 유도할 수 있다. 따라서 식 (9)는 엄밀하게는  $Re_p \ll 1$ 에서 밖에 성립하지 않는다. 또한 식 (11)은 난류 저항이

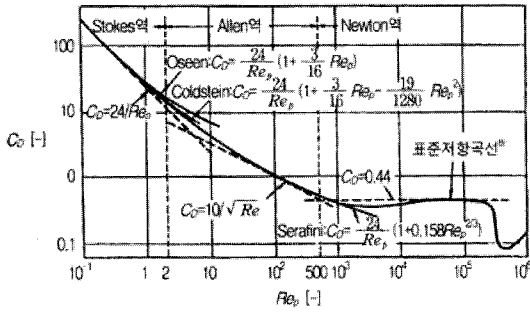


그림 1 구의 저항계수와 Reynolds 수

라 불리며, Newton(1710년)에 의해 실험적으로 얻어진 식이다. Stokes 영역을 조금 초월한 범위에서는 Oseen 이 물체로부터 떨어진 곳에서의 흐름에 관성항을 고려하여 풀고 다음 식 (12)를 제안하였다.

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left( 1 + \frac{3}{16} Re_p \right) : Re_p < 5 \quad (12)$$

그밖에  $C_D$ 와  $Re_p$ 를 연관시키는 수많은 실험식이 제안되었지만, 간편하게  $Re_p < 1000$ 에서 실험값과 잘 일치하는 식으로서 다음 식 (13)이 있다.

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left( 1 + 0.158 Re_p^{\frac{2}{3}} \right) : Re_p < 1000 \quad (13)$$

### 3. 관로 마찰손실<sup>(6)</sup>

#### 3.1 가속손실을 나타내는 식

입자가 수평관내에 공급되는 순간의 입자 속도는 0 이고, 기류에 의해서 최종속도까지 가속된다. 이 때 기류는 입자를 가속하기 위해서 에너지를 소비하고, 가속손실  $\Delta p_B$ 를 발생시킨다.

입자가 최종속도에 도달할 때까지의 관의 길이, 즉 가속거리는, 이론적으로는 무한대이기 때문에, 그림 2 와 같이 압력구배가 일정하게 되기까지의 거리 OC를 가속거리로 보는 것이 일반적이다.

OC간의 정속상태에서의 압력손실 BC를 CA에서 빼 값  $AB=DO$ 를 입자의 가속손실이라고 하며, 다음과 같이  $\Delta p_{B1}$ ,  $\Delta p_{B2}$  그리고  $\Delta p_{B3}$ 의 3가지 식으로 나타낼 수 있다.

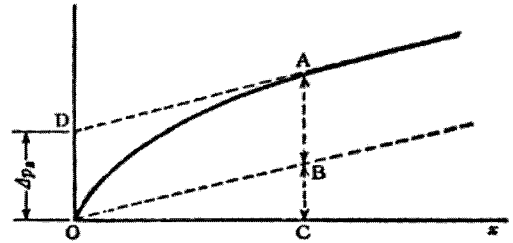


그림 2 가속손실

#### (a) $\Delta p_{B1}$

운동량의 법칙을 이용하면, 단면적  $F$ 의 원관내에서 입자의 가속을  $c$  (고체입자 평균속도)까지 가속하기 위해서 필요한 압력손실  $\Delta p_{B1}$ 은

$$F \Delta p_{B1} = G_K c \quad (G_K : \text{고체입자 질량유량}) \quad (14)$$

로 주어질 수 있다. 따라서

$$\Delta p_{B1} = \frac{G_K}{F} c \quad (15)$$

로 된다. 또한 입자의 가속변화를  $\Delta c$ 로 하면

$$F \Delta p_{B1} = \rho_L F v \mu \Delta c \quad (\rho_L : \text{기체 밀도}) \quad (16)$$

에서 다음 식 (17)이 얻어진다.

$$\Delta p_{B1} = \rho_L \mu v \Delta c \quad (\mu : \text{혼합비}) \quad (17)$$

#### (b) $\Delta p_{B2}$

가속손실을 입자의 가속에 의해서 발생하는 압력손실  $\Delta p_{sb}$ 와, 가속구간에서의 입자와 관벽과의 마찰에 의한 압력손실  $\Delta p_{sr}$ 의 합으로 생각하여

$$\Delta p_{B2} = \Delta p_{sb} + \Delta p_{sr} \quad (18)$$

로 나타낸다.  $\Delta p_{sb}$ 에 대해서는 식 (14)와 같이

$$F \Delta p_{sb} = G_K \Delta c$$

가 성립하기 때문에, 양변에  $v$ 를 곱해서

$$\Delta p_{sb} = \frac{G_K}{F_U} v \Delta c = \frac{2\Delta c}{v} \frac{G_K}{F_U} \frac{v^2}{2} = \frac{2\Delta c}{v} \mu \rho_L \frac{v^2}{2} \quad (19)$$

로 된다. 여기서

$$\xi_{sb} = 2 \frac{\Delta c}{v} \quad (20)$$

로 두면

$$\Delta p_{sb} = \xi_{sb} \mu \frac{\rho_L v^2}{2} \quad (21)$$

가 얻어진다.

$\Delta p_{sr}$ 은 벽면의 마찰응력을  $\tau_s$ 로 하고, 관의 길이  $dx$ 의 부분에 대해서

$$F \Delta p_{sr} = \tau_s \pi dx \quad (22)$$

로 나타낼 수 있다. 상식의 양변에 기류의 평균속도  $v$ 를 곱하고, 게다가  $\tau_s$ 에 대한 식  $\tau_s = a_s G_K c / (\pi d^2 / 4)$ 를 이용하면, 관의 길이  $x$ 에 대해서

$$\Delta p_{sr} = \frac{4\mu\rho_L}{d} \int_0^x c v a_s dx \quad (a_s : \text{계수}) \quad (23)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서

$$\Delta p_{sr} = \xi_{sr} \frac{\rho_L}{2} v^2 \mu \quad (24)$$

로 두면, 손실계수  $\xi_{sr}$ 은

$$\xi_{sr} = 8 \int_0^x \frac{a_s}{d} \frac{c}{v} dx \quad (25)$$

로 된다.

따라서, 가속손실은

$$\Delta p_{B2} = (\xi_{sb} + \xi_{sr}) \frac{\rho_L}{2} v^2 \mu = \xi_B \frac{\rho_L}{2} v^2 \mu \quad (26)$$

$$\xi_B = \xi_{sb} + \xi_{sr} \quad (27)$$

로 나타낼 수 있고, 수평관에 대한  $\xi_B$ 는 그림 3과 같이 된다.

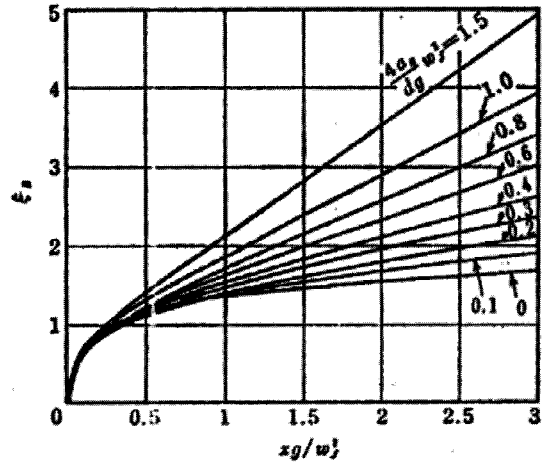


그림 3 가속손실계수

(c)  $\Delta p_{B3}$

또한, 가속손실은

$$\Delta p_{B3} = \xi_B \frac{\rho_L}{2} v^2 \quad (28)$$

로도 나타낼 수 있다

### 3.2 수평관내의 가속손실

(a) 공기속도의 영향

그림 4는 가속손실  $\Delta p_B$ 와 기류의 평균속도  $v$ 와의 관계를 입자의 유량  $G_K$ 를 파라미터로서 나타낸 것이다.

이 결과에 따르면, 기류속도가 큰 영역에서는 후술

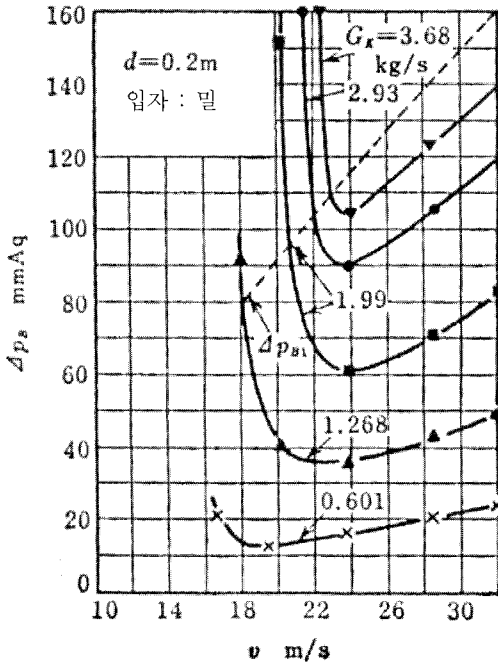


그림 4 가속손실과 기류 평균속도의 관계

의 정속부(定速部)의 경우와 같이 가속손실은 기류의 속도에 비례해서 직선상태로 가속한다. 그림의 파선은 식 (15)에 의해서 구한 값이다.

(b) 입자의 질량유량 및 입자직경의 영향

입자에 대한 측정 결과로부터  $\Delta p_B$ 와  $G_K$ 의 관계는 그림 5와 같이 되고, 식 (15)가 나타내는 바와 같이  $\Delta p_B$ 는  $G_K$ 와 함께 직선 상태로 증가한다.

그림중의 알파벳 기호는 측정된 각 입자에 대응하고, 예를 들면 그림의 직선 a는 입자직경이 작은 경우이고, 입자직경이 큰 경우의 직선 f보다도 큰 값을 가진다.

동일한 기류속도의 조건에서는 입자직경이 작은 입자의 속도는 입자직경이 큰 입자의 속도보다도 크고, 입자직경이 작은 입자는 큰 속도까지 가속되기 때문에 가속손실이 크게 될 것이다.

(c) 관 직경의 영향

관 직경이 클수록  $\Delta p_B$ 는 작다.

(d) 입자의 종류의 영향

그림 5에 의하면 대부분의 측정값은 부유속도가 크게 될수록 동일한  $G_K$ 에 대한  $\Delta p_B$ 가 작게 됨을 나타내고 있다.

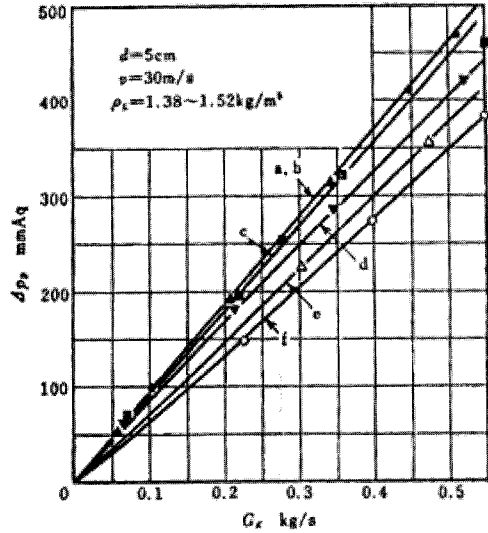


그림 5 가속손실과 입자 유량의 관계

### 3.3 정속부의 부가압력손실

입자가 원관 내부를 일정한 속도로 흘러갈 때, 다음과 같은 부가압력손실이 발생한다.

a. 입자와 관벽의 마찰 및 충돌에 의한 압력손실 ( $\Delta p_{KR}$ )

b. 입자상호의 충돌에 의한 압력손실 ( $\Delta p_{KK}$ )

c. 수직관 또는 경사관에서 중력에 거슬러서 입자를 위쪽으로 보내기 위한 일에 근거한 압력손실( $\Delta p_{Kh}$ )

즉 수송매체인 기체는 밀도가 약 800배인 입자의 운동을 유지하기 위해서는 그 에너지의 일부를 끊임없이 공급해야만 하기 때문에, 이러한 에너지의 공급은 단상류로서의 압력손실  $\Delta p_L$  이외에 부가압력손실을 발생시키는 원인이 된다.

이상의 고찰로부터 전압력손실  $\Delta p$ 를

$$\Delta p = \Delta p_L + \Delta p_{KR} + \Delta p_{KK} + \Delta p_{Kh} \quad (29)$$

$$= \Delta p_L + \Delta p_K \quad (30)$$

$$\Delta p_K = \Delta p_{KR} + \Delta p_{KK} + \Delta p_{Kh} \quad (31)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

### 3.4 단상류의 압력손실

식 (29) 및 식 (30)의  $\Delta p_L$ 은 일반적으로

$$\Delta p_L = \lambda_L \frac{l}{d} \frac{\rho_L}{2} v^2 \quad (l: \text{관길이, } d: \text{관직경}) \quad (32)$$

로 나타낼 수 있다.

여기서 기체 단상류 관마찰계수  $\lambda_L$ 은 층류의 경우에는 식 (33)로 나타낼 수 있으며, 난류의 경우에는 식 (34) 혹은 식 (35)에 의해서 나타낼 수 있다. 그림 6은 레이놀즈수에 따른  $\lambda_L$ 의 범위를 나타내고 있다.

$$\lambda_L = \frac{64}{\text{Re}} \quad (33)$$

$$\lambda_L = 0.3164 \text{Re}^{-\frac{1}{4}} \quad (34)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_L}} = 2.0 \log_{10} (\text{Re} \sqrt{\lambda_L}) - 0.8 \quad (35)$$

### 3.5 수평관내 압력손실 특성

입자와 관직경의 조합에 의한 실험으로부터 관의 단위길이에 대한 압력손실과 기류평균속도와의 관계를 구한 일례를 그림 7에서 보이고 있으며, 일반적으로 직관의 압력손실에 대해서 이와 같은 그래프가 자주 사용된다.

(a) 기류평균속도의 영향

그림 7에 의하면 기류평균속도의 증가와 함께 압력손실은 증가하고, 유속이 크게 되면 각 곡선은  $G_K=0$  (혼합비가  $\mu=0$ 인 상태, 즉 기류 단상류)의 경우의 곡선에 평행하게 된다.

따라서 부가압력손실  $\Delta p_K$ 은 이 범위에서는  $G_K$ 만의 함수로 된다. 또한 어떤 곡선에서도 최소값이 존재하고, 그 위치는  $G_K$ 가 크게 될수록 그림의 파선과 같이  $v$ 가 큰 쪽으로 이동한다.

이 위치는 실제로 장치를 운전하는 경우에는 경제적으로 유리한 운전상태에 대응한다. 압력손실이 최소값에 대응하는 기류속도보다도 유속이 작게 되면 압력

손실은 다시 커지게 된다.

관내에 입자가 퇴적하면 흐름의 단면적이 작게 되고, 게다가 퇴적입자에 의한 거칠기의 증가로 인하여 압력손실이 급격히 증가한다.

(b) 공기밀도의 영향

동일한  $G_K$ 와  $v$ 에 대해서는  $\rho_L$ 이 클수록  $\Delta p/l$ 이 커지게 되지만,  $v$ 가 작을 때에는  $\rho_L$ 의 영향은 거의 없다.

(c) 입자유량의 영향

그림 7에서  $d$ =일정,  $v$ =일정의 조건에서는  $G_K$ 와 함께  $\Delta p_K/l$ 은 증가한다.

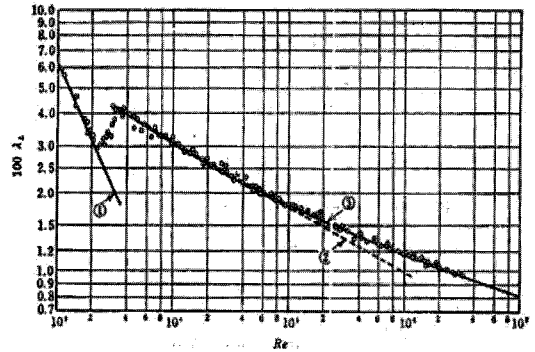


그림 6 관마찰계수 (① : 식 (33), ② : 식 (34), ③ : 식 (35))

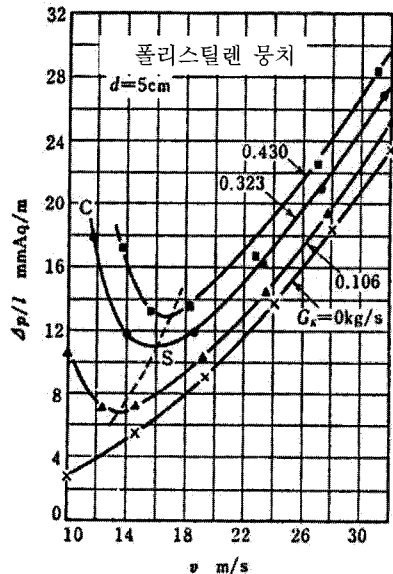


그림 7 압력손실과 기류 평균속도의 관계

(d) 입자직경의 영향

$\Delta p_K/l$ 에 미치는 고체입자 직경  $d_K$ 의 영향은 단순하게 결정되지 않는다.

(e) 입자밀도의 영향

고체입자의 밀도  $\rho_K$ 의 증가와 함께  $\Delta p_K/l$ 은 커지게 된다.

(f) 관직경의 영향

$G_K$ =일정,  $v$ =일정 조건에서는 동일한 입자에 대한  $\Delta p_K/l$ 은 관직경의 증가와 함께 상당히 감소한다.

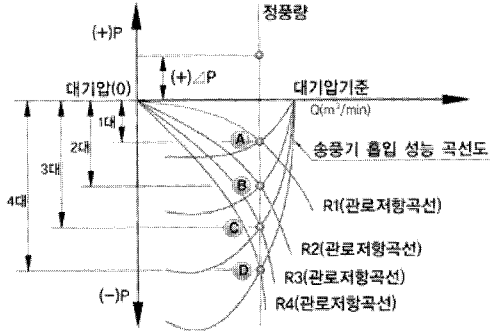


그림 8 진공압 시스템의 송풍기 성능곡선 및 운전점

## 4. 진공압 시스템의 송풍기 성능 및 관로 정압

### 4.1 송풍기 성능곡선

이송관로내 쓰레기 투입량에 따른 송풍기 흡입 성능 곡선에 대하여 공기저항과 이송관로의 길이에 따른 관로 마찰저항에 의해 발생하는 시스템 저항곡선을 그림 8<sup>(7)</sup>에서 보이고 있다. 송풍기의 배출 압력을 기준으로 하는 일반적인 성능곡선 및 관로저항곡선<sup>(8,9)</sup>과는 달리, 쓰레기 이송량이 증가할수록 운전점에서의 송풍기의 흡입압력은 부압이 더욱 커지게 되고 관로저항도 함께 증가함을 알 수 있다.

즉, 쓰레기량이 많고, 관로 길이가 길수록 R1→R2→R3→R4로 변화하여 관로내 진공압이 증가하고 운전점이 A→B→C→D로 형성된다.

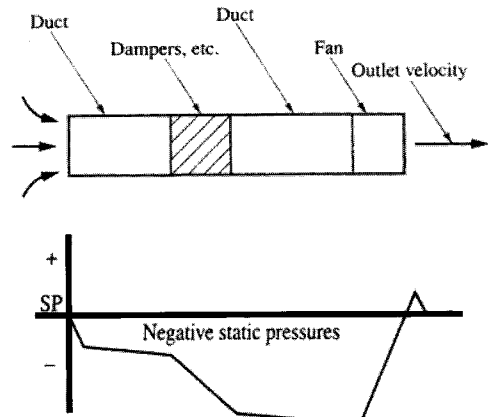


그림 9 공기환기 시스템에서의 관로 정압변화

### 4.2 관로 정압변화

공기환기 시스템에서와 같이 단순관로에서의 정압 변화는 그림 9<sup>(10)</sup>에서 보이는 바와 같이 관로말단에서의 대기방출에 따른 압력의 증가를 제외하고는 관로내의 전 구간에서 대기압보다 낮은 정압분포를 보인다.

한편, 실제 상업용으로 사용되고 있는 금속 폐기물 이송시스템 관로의 압력분포에 대한 일례를 그림 10<sup>(11)</sup>에서 보이고 있다. 전체 시스템은 금속물 가공을 위한 복수의 작업대(①, ②, ③)에 설치된 폐기물 수거함에서 흡입된 폐기물이 관로말단에 설치된 송풍기에서 발생시킨 진공압력에 의해 송풍기 전단에 설치된 폐기물 분리기로 이송되는 구조로 이루어져 있으며, 그림 10에서는 복수의 폐기물 투입구 설치에 따른 전체 시스템에서의 압력분포를 잘 나타내고 있다.

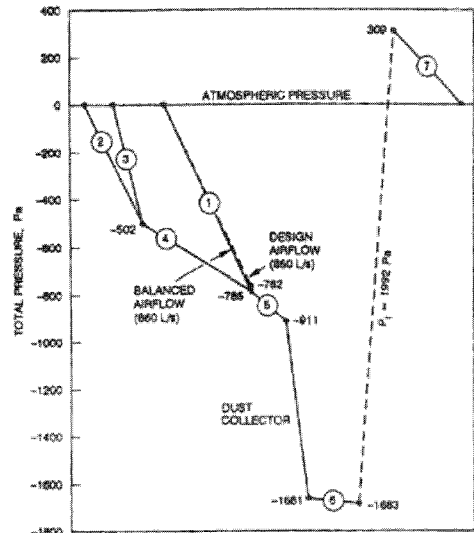


그림 10 금속물 가공 작업장의 폐기물 이송시스템 : (a) 개략도 및 (b)전압선도

## 5. 송풍기 동력계산식

생활폐기물 이송시스템에서 송풍기는 관로내부에 공기흐름과 진공압력을 발생시켜서 관로에 접속된 각 지점에서 투입된 생활폐기물을 집하장으로 이송시키고, 쓰레기 처리설비들로부터 발생한 오염공기를 탈취설비로 이송시키기 위해 사용된다.

이와 같은 역할을 담당하고 있는 송풍기를 선정하기 위해서는 이송관로의 단면적, 길이, 배관내 유속, 풍량 그리고 관로에 투입되는 생활폐기물 용량을 고려해서 동력이 결정되어야 하며, 일반적으로 다음과 같은 설계변수에 따른 동력계산식이 적용된다.

(a) 공기에 의한 압력손실 :  $\Delta P_{ar}$

$$\Delta P_{ar} = \lambda_a \frac{le}{Di} \frac{\rho V_{ar}^2}{2} + P_{av} \quad [\text{Pa}] \quad (36)$$

$\lambda_a$  : 마찰 계수

$le$  : 최대 등가 이송 거리

$Di$  : 파이프의 내경

$\rho$  : 공기의 밀도

$V_{ar}$  : 공기 속도

$P_{av}$  : 공기 흡입 밸브에서의 압력 손실

(b) 공기에 의한 압력 손실

(등온 팽창에 의한 보정) :  $P_{ar}$

$$P_{ar} = P_0 \left( 1 - \sqrt{\frac{1 - 2\Delta P_{ar}}{P_0}} \right) \quad [\text{Pa}] \quad (37)$$

$P_0$  : 대기압

(c) 쓰레기에 의한 부가압력손실 :  $P_{re}$

$$P_{re} = P_{ar} (\alpha \cdot m) \quad [\text{Pa}] \quad (38)$$

$\alpha$  : 압력 손실 계수

$$m = \frac{G_s}{G_{ar}}$$

$G_s$  : 쓰레기 이송 무게

$G_{ar}$  : 이송 공기 무게

(d) 총 압력손실 :  $P$

$$P = P_{ar} + P_{re} \quad [\text{Pa}] \quad (39)$$

(e) 송풍기의 흡입압력 :  $P_s$  (부압)

$$P_s = -(P + P_s1 + P_s2) \quad [\text{Pa}] \quad (40)$$

$P_s1$  : 원심분리기에 의한 압력손실

$P_s2$  : 밸브 및 파이프에 의한 압력손실

(f) 송풍기의 토출압력 :  $P_d$

$$P_d = P_d1 + P_d2 + P_d3 + P_d4 \quad [\text{Pa}] \quad (41)$$

$P_d1$  : 여과필터 압력손실

$P_d2$  : 탈취기 압력손실

$P_d3$  : 배관 및 밸브 압력손실

$P_d4$  : 소음기 압력손실

(g) 이송 풍량(송풍기의 흡입량) :  $Q, Q_s$

$$Q = \frac{\pi Di^2}{4} V_{ar} 60 + Qlk \quad [\text{m}^3/\text{min}] \quad (42)$$

$$Q_s = Q \frac{P_0}{P_s}$$

$Q$  : at 20°C, 1atm

$Qlk$  : 누설량

$Q_s$  : 흡입상태에서의 공기량

(h) 배출 공기 온도 :  $T_d$

$$T_d = T_s + \frac{T_s}{\eta_{ad}} \left[ \left( \frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad [\text{K}] \quad (43)$$

$T_s$  : 흡입공기 온도

$\eta_{ad}$  : 송풍기 단열효율

$k$  : 비열비

(i) 송풍기의 동력 :  $L_{ad}, L_m$

$$L_{ad} = \frac{k}{(k-1)} P_s Q_s \left[ \left( \frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] / 60000 \quad [\text{kW}] \quad (44)$$

$L_{ad}$  : 소요동력

$$L_m = \frac{L_{ad}}{\eta_{ad}} \beta$$

$L_m$  : 전동기 출력

$\eta_{ad}$  : 송풍기의 단열 효율

$\beta$  : 여유분



## 6. 수집관로 모델에 대한 실험 및 수치해석 예

생활폐기물 자동 이송시스템의 운영시 수집 관로의 배치 및 송풍기 운전조건에 따라서 관로 압력변화, 쓰레기 종류별 이송 소요시간 변화, 관로 마모 등이 예상되기 때문에 최적형상의 관로를 설계하기 위해서는 이론적인 검토뿐만 아니라 수집관로 모델을 이용한 실험 및 수치해석에 의한 정량적인 데이터의 확보도 필수적이다.

이와 관련하여, 이<sup>(12)</sup>는 실제 현장에서 설치예정인 생활폐기물 이송시스템의 기본 관로형상을 토대로 하여 설계된 이송관로 축소모델에서 관로 압력측정실험, PIV 계측에 의한 폐기물 형상에 따른 후방 유동, CFD 해석에 의한 관로내부 입자 궤적에 따른 마모예측, 투입 쓰레기에서 화재발생시를 가정한 이송시스템 관로내부 화재상황 가시화 등의 관련연구를 수행하였으며, 본 원고에서는 이송관로 시스템의 설계에 직접 적용되고 있는 모델실험 및 수치해석 결과의 일부를 소개하기로 한다.

### 6.1 실험장치의 개요 및 실험조건

그림 11<sup>(12)</sup>은 실제 현장에서 설치되고 있는 생활폐기물 이송시스템 수집관로를 참고하여 약 1/10의 크기로 축소 제작한 모델을 보이고 있으며, 배관은 모두 투명한 아크릴 관으로 제작하였고, 직경은 150mm이다. 쓰레기 모델은 크기 및 비중을 각각 달리한 다양한 모델을 제작하여 실험에 사용하였다.

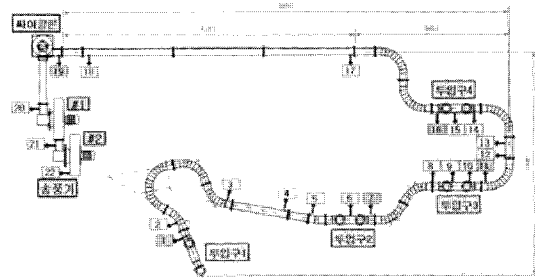
송풍기 입출구측을 포함한 배관 전체에 압력계측공을 모두 22개소에 설치하여 압력을 계측하였으며, 송풍기는 원심터보형 2대를 직렬로 조합 운전하였다.

PIV계측에서는 관로내부에 설치한 생활폐기물 모델에 대하여 모델형상에 따른 후방흐름을 가시화하여 폐기물형상에 따른 유체저항을 검토하였다.

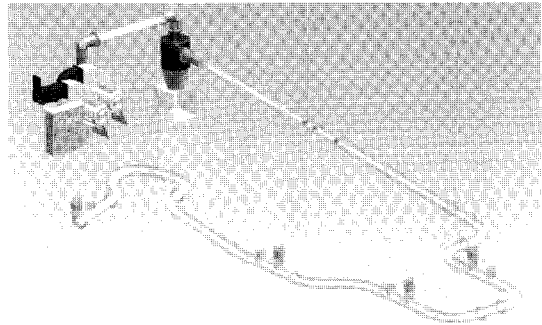
한편, 수집관로 모델에서의 실험조건으로서는 4종류의 쓰레기 투입구 위치변경, 송풍기 운전대수 변경(흡입압력 변화) 그리고 쓰레기의 종류(밀도 및 크기 등)를 변경하여 관로내부의 압력 및 쓰레기 이송시간 등을 계측하였다.

### 6.2 압력강하 및 이송시간 검토

그림 12는 3종류의 송풍기 흡입유속에 따른 관로내



(a)



(b)



(c)

그림 11 생활폐기물 이송관로 시스템 모델 실험장치 :  
(a) 설치도, (b) 3차원 모델링도, (c) 모델실험 전경

부 압력강하 특성을 보이고 있으며, 흡입유속이 증가할수록 진공압력이 증가하며, 흡입 송풍기에서 관로의 위치가 멀리 떨어져 있을수록 진공도가 낮음을 알 수 있다.

또한, 그림13은 쓰레기 모델의 비중에 따른 이송시간을 나타내고 있으며, 유속이 빨라질수록 이송 소요

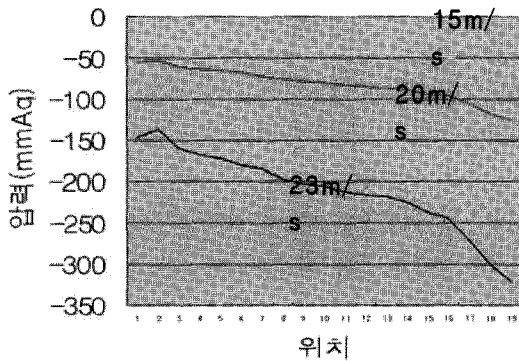


그림 12 송풍기 흡입유속에 따른 관로내부 압력강하 특성

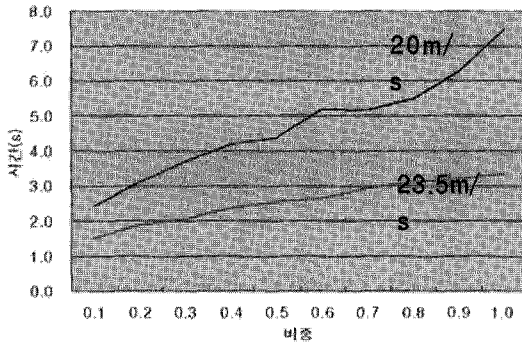
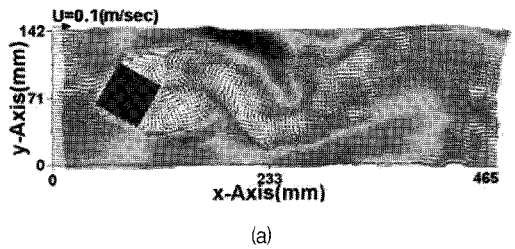


그림 13 쓰레기모델 비중에 따른 이송시간

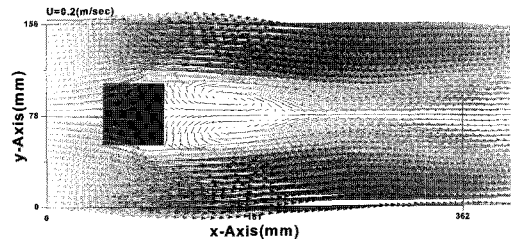
시간이 단축되고, 비중이 증가할수록 이송 소요시간도 직선적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

### 6.3 쓰레기 모델 형상에 따른 유체저항 가시화

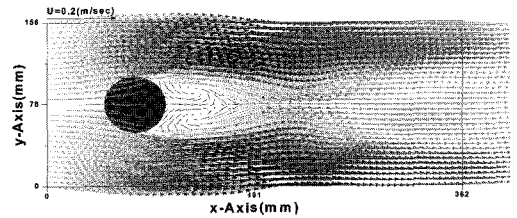
그림 14는 쓰레기모델 형상에 따른 관로 내부유동 변화를 PIV실험에 의해 계측한 결과이다. 실제 수집관로에서는 흡입 송풍기에 의한 유속에 따라서 쓰레기가 이송되지만, 본 실험에서는 쓰레기 주위의 가시화가 용이하도록 쓰레기모델을 관로내부에 고정하여 실험을 수행하였다. 가시화 결과에 의하면 관로내부의 흐름방향에 대한 쓰레기 모델의 단면 형상에 따라서 쓰레기 모델 주위의 유동장 변화가 크게 일어남을 알 수 있으며, 특히 동일한 형상의 정방형 각주 (a) 및 (b)에 대한 결과는 흐름방향에 대한 쓰레기 표면형상이 다를 경우 유동장은 큰 차이를 보이고 있으며, 결과적으로 관로내의 기류와 접하는 쓰레기의 유체저항이 큰 차이를 나타낼 것으로 예상된다.



(a)



(b)



(b)

그림 14 쓰레기모델 형상에 따른 내부유동 특성 : 쓰레기 모델 (a) & (b) 정방형 각주, (c) 원형 실린더

### 6.4 수집관로 내부 마모 예측

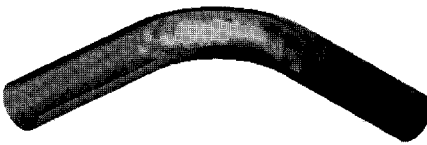
그림 15와 16은 수집관로 내부 쓰레기 이송에 따른 마모량 예측을 위하여 동일한 관로 직경 및 길이에 대하여 관로 곡률에 따른 CFD해석을 수행한 결과를 보이고 있다.

쓰레기입자가 곡관부를 통과할 경우 원심력에 의해 입자들이 곡관의 벽면과 충돌 한 후, 산란되어 출구로 빠져나가게 되며, 입자의 속도증가에 의한 충격량 보다 입자가 벽면에 부딪치는 입사각도에 따른 충격량이 더 크게 작용하는 것으로 확인되었다.

따라서, 곡률반경이 작을수록 최대 부식률은 큰 값을 나타내게 되며, 곡률반경이 클수록 국부적인 최대



(a)



(b)

그림 15 곡률반경이 상대적으로 작을 경우의 (a) 유체입자계적 및 (b) erosion rate 분포



(a)



(b)

그림 16 곡률반경이 상대적으로 클 경우의 (a) 유체 입자계적 및 (b) erosion rate 분포

부식률이 큰 값을 가지는 것으로 판명되었다.

또한, 곡률반경이 클수록 입자들의 속도가 주류의 속도에 빨리 도달하게 되어 벽면에 가해진 충돌량이 커지게 되는 것으로 예측되었다.

## 7. 맺음말

생활폐기물 자동집하시설의 관로이송 시스템의 설계시 정확한 예측이 요구되는 폐기물에 의한 추가적인 유체저항손실 및 복잡한 공기배관에서의 배관마찰손실에 대해서 유체역학적인 관점에서 고찰하였으며, 관로 내부 압력손실에 대한 원인에 대해서 정량적으로 예측 가능한 실험식 및 이론식에 대해서 검토하였다.

또한, 진공압 시스템의 송풍기 성능 및 관로 정압변화에 대해서 고찰하였으며, 생활폐기물 이송시스템 설계시에 적용 가능한 흡입용 송풍기 동력계산식에 대해서도 검토를 하였으며, 실제 모델실험 수행 및 수치해

석에 의한 이송시스템 설계변수의 확인 방법 등에 대해서도 소개하였다.

이상의 검토결과에 의하면 향후 생활폐기물 자동 이송시스템 설계 및 운영시 최적의 운전상태를 확보하기 위해서는 시스템의 설계단계에서부터 설치 현장의 특성을 고려한 이송관로의 최적형상변수 결정 및 정확한 송풍기 소비동력의 계산이 중요하다.

## 참고문헌

- (1) 정원식, 2008, 생활폐기물에 관한 현황 및 정책, 유체기계저널, 제11권, 제2호, pp. 96~102.
- (2) 이준영, 2008, 공기이송시설의 경제성 평가, 유체기계저널, 제11권, 제3호, pp. 91~95.
- (3) 장춘만, 공기이송관로 모델실험장치 운전 및 성능해석, 2008, 공기이송시설의 경제성 평가, 유체기계저널, 제11권, 제4호, pp. 93~99.
- (4) 김일복, 2008, 자동집하시설의 송풍기 선정에 관한 기술, 유체기계저널, 제11권, 제5호, pp. 74~78.
- (5) 서태수 외 9명, 2004, 입자응용과학, 학술정보.
- (6) 森川敬信, 1979, 流体-固体二相層(空氣輸送と水力輸送), 日刊工業出版.
- (7) 김일복, 2007, 송풍기 단독 및 직력 운전시의 유량과 압력 특성 고찰, 생활폐기물 자동집하용 공기관로 이송기술에 관한 워크샵 및 공개시연 발표자료집, pp. 81~95.
- (8) Robert Jorgensen, 1983, Fan Engineering - An engineer's Handbook on Fans and Their Applications, Buffalo Forge Company.
- (9) 김회룡, 2005, 송풍기 실무, 2005 유체기계 핵심기술 집합지도 II, 중소기업진흥공단 & 유체기계공업학회.
- (10) Frank P. Bleier, 1998, Fan Hadbook-Selection, Application, and Design, McGraw-Hill.
- (11) 1997 ASHRAE HANDBOOK, 1997, Fundamentals (SI Edition), American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Enginners, Inc., pp. 55~60.
- (12) 이영호, 2007, 폐기물 이송배관 모델 설계 및 배관 유동특성, 생활폐기물 자동집하용 공기관로 이송기술에 관한 워크샵 및 공개시연 발표자료집, pp. 97~175.