

쓰레기 관로운송 시스템의 운송에너지 손실에 관한 수치해석적 연구

이 중 길*, 최 윤**, 홍 기 철**, 최 영 돈†

*고려대학교 기계공학과, **현대건설 플랜트사업본부, † 고려대학교 기계공학과

Computational Study of Energy Loss in a Pipe of Refuse Collecting System

Jong-Gil Lee*, Yoon Choi**, Ki-Chul Hong**, Young-Don Choi †

*Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

**Plant Division, Hyundai Engineering&Construction, Seoul 110-920, Korea

† Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

ABSTRACT: This paper describes on energy loss in a pipe of refuse collecting system. Analysis energy loss in a pipe is the decisive factor in a design for refuse collecting system. From the analysis energy loss, we can determine the capacity of turbo blower. The flow characteristics in the pipe with the refuse bag are analyzed by three-dimensional Navier-Stokes analysis. The refuse bag is modeled using the actual measurement. We obtain friction factor by changing refuse bag's size and mixing ratio and Reynolds number. And From the result we calculate energy loss by using compressible flow analysis.

Key words: Refuse(쓰레기), Refuse collecting system(쓰레기 관로운송 시스템), Energy loss (에너지 손실), Friction factor(관마찰 계수)

기 호 설 명

D_h : 수력직경, $4A/P$ [m]
 m : 혼합비
 G : 수송량
 L : 채널 길이 [m]
 f : 관마찰 계수
 ∇ : 부피
 V : 속도
 Re : Reynolds 수, $\frac{\rho VD}{\mu}$

그리스 문자

μ : 점성 계수 [Ns/m^2]
 ρ : 밀도 [kg/m^3]

하첨자

a : 공기(air)
 r : 쓰레기(refuse)

† Corresponding author

Tel.: +82-2-3290-3355; fax: +82-2-929-9290

E-mail address: ydchoi@korea.ar.kr

1. 서론

현재까지 발생하는 쓰레기는 가정이나 사업장에서 크기에 따른 전용봉투에 담겨 인력이나 차를 이용해 수거하고 적환장에 분류한 후 중간 또는 최종 처리장으로 이동되는 시스템이었다. 하지만 이에 대한 환경적, 경제적인 손실을 해소하기 위한 방안으로 쓰레기를 지하에 매설된 관로를 이용하여 이송, 수집하는 쓰레기 관로 운송시설이 스웨덴에서 처음 개발되었고 현재 전세계 800여 개 이상의 시스템이 가동중이다. 우리나라에서는 2000년 용인수지 2지구의 최초의 대규모 단지용 시스템을 시작으로 현재 신도시 위주로 시공, 가동되고 있다. 쓰레기 관로 운송시스템은 투입된 쓰레기를 일시 저장하는 투입설비, 관로설비, 송풍기와 분리 및 배출기가 있는 중앙 집하장으로 이루어져 있다. 쓰레기 관로 운송시스템의 설계를 위해서는 최장관로 길이, 이송량에 따른 거리별 배관두께, 최대이송가능 밀도, 이송효율 등 많은 인자들이 필요하지만 그중 가장 중요시되는 부분은 송풍기의 용량결정이다. 송풍기의 용량을 결정하기 위해서는 시스템의 적정한 에너지 손실의 계산이 요구된다.

Kim and Jang⁽¹⁾은 쓰레기 투입에 따른 압력 손실을 평가하기 위해 쓰레기 관로이송 시스템을 축소한 관로 시뮬레이터를 제작하여 직관 및 곡관에서 공기의 속도와 쓰레기의 질량유량을 변화시켜 압력 손실을 측정하였고 수치해석 값과 비교하였다. Jang et al.⁽²⁾은 현장설치를 고려하여 설계된 이송관로를 대상으로 거리에 따른 압력손실 특성을 분석하였다. 음식물 쓰레기의 성상을 실험 데이터를 근거로 모델링 하였으며, 실제 쓰레기의 거동을 파악하기 위하여 비정상 해석을 수행하였다. Jang et al.⁽³⁾은 이송관로, 쓰레기 분리기, 터보 블로어를 모델링하여 관의 조도, 관경, 오름각, 등에 대해서 압력손실을 계산하였다.

본 연구에서는 쓰레기 관로이송 시스템에 놓여져 있는 실제 봉투를 모델링 하여 봉투의 크기, 혼합률(mixing ratio), 레이놀즈 수의 변화에 따른 관마찰계수(friction factor)를 계산하였다

2. 수치해석

2.1 해석 관로 시스템

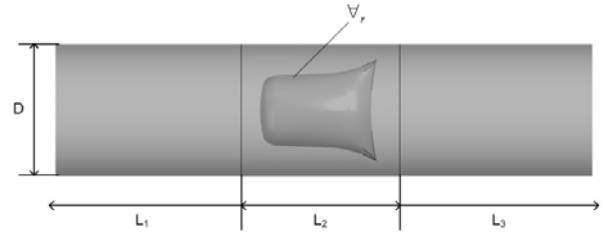


Fig. 1 Computation domain

본 연구에서는 관로 바닥에 쓰레기 봉투가 놓여져있는 상황을 모사하여 계산을 수행했다. 혼합비(mixing ratio)를 0에서 1까지 변화시키기 위하여 관경 500mm의 직관을 $10D_h$ 에서 $400D_h$ 까지 변화시켰다. 쓰레기 봉투는 10L, 20L 봉투를 실측하여 모델링 하였다. 관로의 해석영역은 Fig. 1 에 나타내었다.

관로의 시작부분 부터 쓰레기 봉투 영역까지의 길이 L_1 은 2400mm, 쓰레기 봉투 영역 길이 L_2 는 600mm, 나머지 길이 L_3 는 17000mm 부터 797000mm 까지 이다.

2.2 수치해석 방법

Table 1에 물리적 유동조건과 수치해석 기법들을 표시하였다.

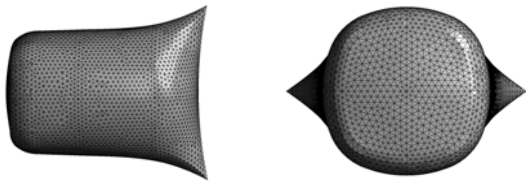
유동의 속도는 공기자체의 속도가 아니라 상대속도이므로 5-30m/s 으로 해석되며 10L, 20L 쓰레기 봉투가 관 바닥에 닿아있는 상태에서 계산을 수행하였다.

전체 해석에 사용된 격자수는 각 경우에 따라 18~140만개 이며 Fig . 2 와 같이 쓰레기 봉투 앞 뒤로 입구부와 출구부는 O-grid 6면체 정렬격자를 사용하였고 봉투부분은 4면체 비정렬 격자를 자동 생성시켰다. 비정렬격자의 단점을 보완하고자 변면부근에 prism 격자를 5단으로 쌓았다. 각영역은 interface로 연결 시켰다.

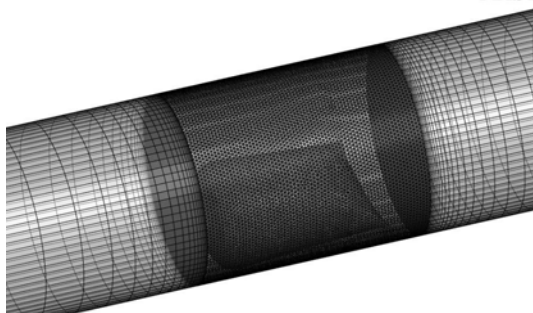
난류모형은 와점성 공식에 제한자(limiter)를 사용하여 seperation예측을 정확히 할수 있는 것으로 알려진 SST(Shear Stress Transport) 모델을 사용하였고 입구조건을 구하기 위해 따로 $45D_h$ 의 직관을 해석하여 완전 발달된 유동장을 확보하고 이를 입구조건으로 삼아 본 해석을 수행함

Table 1. Physical condition and computational scheme

Relative Velocity	5 - 25 [m/s]
Reynolds number	160,000 - 800,000
Working Fluid	Air at 25°C
Hydraulic diameter	500 [mm]
Pipe length	20,000~800,000 [mm]
Refuse bag size	10, 20 [L]
Density	1.185 [kg/m ³]
Dynamic viscosity	1.831 × 10 ⁻⁵ [kg/ms]
Commercial code	CFX 11.0
Total nodes	180,000 - 1,400,000
Turbulence model	SST Model



(a) Refuse bag mesh



(b)

Fig. 2 Computational grid

으므로 입구직관부가 짧은 단점을 보완하였다.

관로내의 압력강하를 계산하기 위해 CFX 11.0 을 사용하여 수행하였다. 해석 해의 수렴조건은 전 변수에 대해 잔차(residual)의 제곱평균(RMS ; root mean square) 값이 10⁻⁵이하에서 수렴할 수 있도록 설정하였다.

2.3 혼합비와 관마찰계수

2.3.1 혼합비 (mixing ratio)

쓰레기 봉투를 초당 α 개 투입한다고 하면 쓰레기 간의 거리는 V_r/α 가된다. $V_r/\alpha=L$ 이라고 하고 혼합비를 구하면 다음과 같다.

$$m = \frac{G_r}{G_a} = \frac{\rho_r \nabla_r \alpha}{\rho_a \pi R^2 V_r} = \frac{\rho_r \nabla_r}{\rho_a \pi R^2 L} \quad (1)$$

2.3.2 관마찰계수 (friction factor)

공기속도가 V_0 이고 쓰레기 봉투의 속도가 V_r 인 관에서의 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P}{\rho} &= f_a \frac{L}{D} \frac{V_0^2}{2} + f_r \frac{L}{D} \frac{(V_0 - V_r)^2}{2} \\ &= \left[f_a + f_r \frac{\left(1 - \frac{V_r}{V_0}\right)^2}{2} \right] \frac{V_0^2}{2} \frac{L}{D} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 f_a 는 공기만 흐를때의 관의 마찰계수,

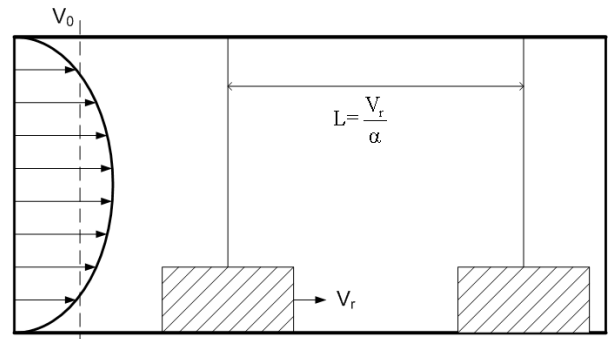


Fig. 3 mixing ratio

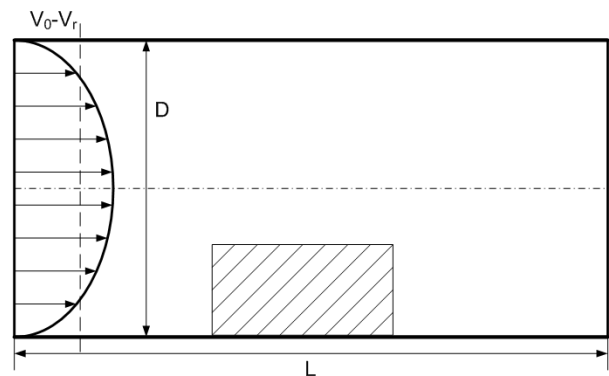


Fig. 4 friction factor

f_r 는 쓰레기만 이송 될 때 관의 마찰계수이다.

f_a 는 $Re_a = \frac{V_0 D \rho_a}{\mu}$ 의 함수이고 f_r 은 $Re_r = \frac{(V_0 - V_r) D \rho_a}{\mu}$ 의 함수이다.

f_r 을 구하기 위해서 에너지 방정식을 다시 쓰면

$$\frac{\Delta P_{total}}{\rho} - \frac{\Delta P_a}{\rho} = \frac{\Delta P_{total}}{\rho} - \frac{f_a^* L (V_0 - V_r)^2}{2D} \quad (3)$$

$$= f_r \frac{L (V_0 - V_r)^2}{2D}$$

이므로

$$f_r = \frac{\frac{\Delta P_{total}}{\rho} - f_a^* \frac{L (V_0 - V_r)^2}{2D}}{\frac{L (V_0 - V_r)^2}{2D}} \quad (4)$$

$$= \frac{\rho}{L (V_0 - V_r)^2} \frac{\Delta P_{total}}{D} - f_a^*$$

이 된다. 여기서 f_a^* 는 $Re = \frac{(V_0 - V_r) D \rho}{\mu}$ 에서의 friction factor이다.

$\frac{\Delta P_{total}}{\rho}$ 는 L에 따라서 변화하므로 mixing ratio m의 함수이다. 그러므로 f_r 은 m과 Re_r 의 함수이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수치해석 타당성 평가

수치해석의 타당성을 검증하기 위해 $100D_h$ 의 관을 대상으로 순수 공기만이 관로를 통해 이송될 때에 입구 출구부에서의 압력 손실값으로 friction factor를 구하고 Colebrook 식에 의한 friction값과 비교하였다. 공기의 속도는 5 m/s에서 25 m/s로 변화시키면서 계산하였다.

수치해석에 의한 관마찰계수와 식에 의한 마찰

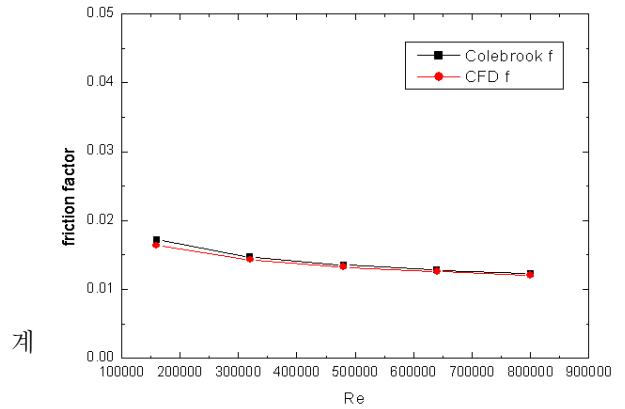


Fig. 5 Comparison of simulation and calculation

수값 비교를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 수치해석과 Colebrook 식에 의한 관마찰계수 값이 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 쓰레기 봉투가 있을 때의 해석결과로서 봉투크기 20L, 풍속 25m/s, 관 길이 20m 일 때의 해석 결과를 보여주고 있다. 바람이 좌에서 우로 불고있는 상황에서 끝단에 약하게 박리가 일어남을 보여주는 등 물리적으로 타당한 결과를 보여줌으로서 해석이 문제없이 이루어 짐을 알 수 있다.

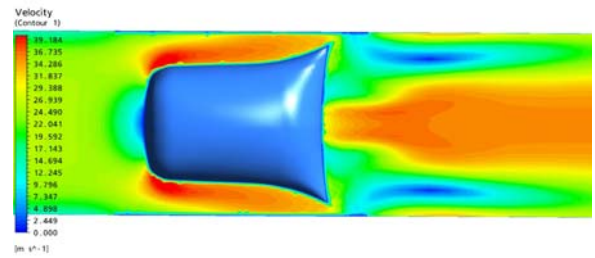


Fig. 6 Velocity contour around refuse bag

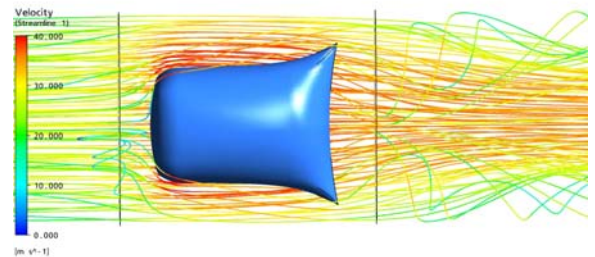


Fig. 7 Streamline around refuse bag

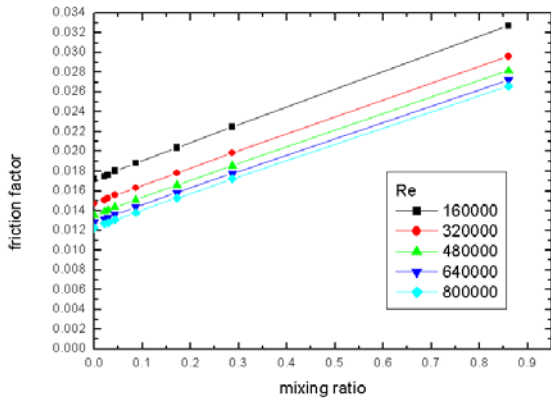


Fig. 6 Friction factor for 20L refuse bag

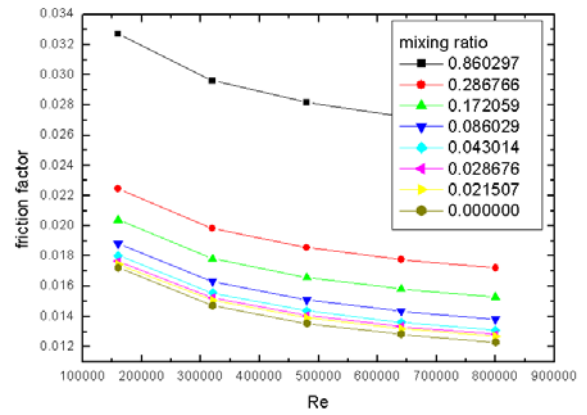


Fig. 7 Friction factor for 20L refuse bag

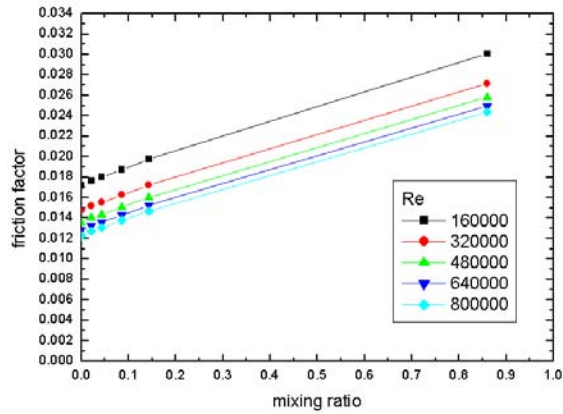


Fig. 8 Friction factor for 10L refuse bag

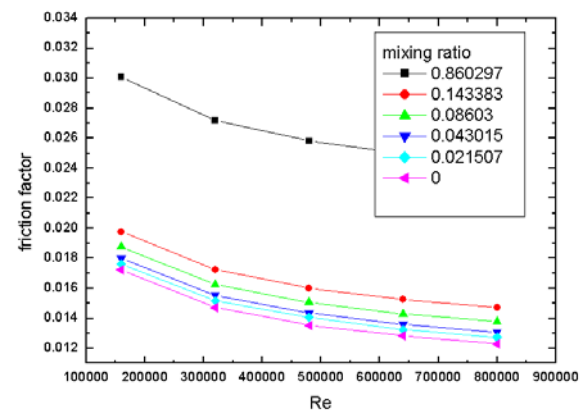


Fig. 9 Friction factor for 10L refuse bag

3.2 관마찰계수 비교

식 (4)에서 볼 수 있듯이 혼합비와 공기이송 속도에 따라 관마찰계수의 값이 달라지므로 이 값은 쓰레기 관로 이송 시스템의 중요한 설계 요소이다.

10L와 20L 쓰레기 봉투 각각의 관마찰계수를 계산하여 Fig. 6과 Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9에 나타내었다. Fig. 6, Fig. 8 그래프의 횡축은 쓰레기와 공기의 혼합비(mixing ratio)를 나타내고 혼합비가 0인 경우는 쓰레기 봉투 없이 공기만 이송될 때의 결과를 의미한다. Fig. 7, Fig. 9 그래프의 횡축은 상대속도에 대한 레이놀즈 수를 나타낸다. 레이놀즈 수는 160000, 320000, 480000, 640000, 800000 으로, 혼합비는 0부터 0.86까지 변화시킨 결과를 나타내었다.

그림들에서 볼 수 있듯이 혼합비가 높을수록 같은 레이놀즈 수에서 관마찰계수는 높아진다. 그

리고 같은 레이놀즈 수에서 혼합비에 따른 관마찰계수의 변화는 선형으로 나타났다. 동일한 혼합비에서는 레이놀즈 수가 높을수록 관마찰계수는 낮아지고 비선형임을 볼 수 있었다.

20L와 10L 쓰레기 봉투의 결과를 맞춤 곡선(curve fitting) 하면 각각 다음과 같다.

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} + 0.017132m + 0.00159 \quad (5)$$

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} + 0.014182m + 0.00175 \quad (6)$$

이는 Colebrook 식인 $f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$ 에 $\alpha m + \beta$ 가 더해진 꼴이다. 여기서 α 와 β 는 쓰레기 봉투크기에 대한 함수인데 20L와 10L 외에 다른 크기의

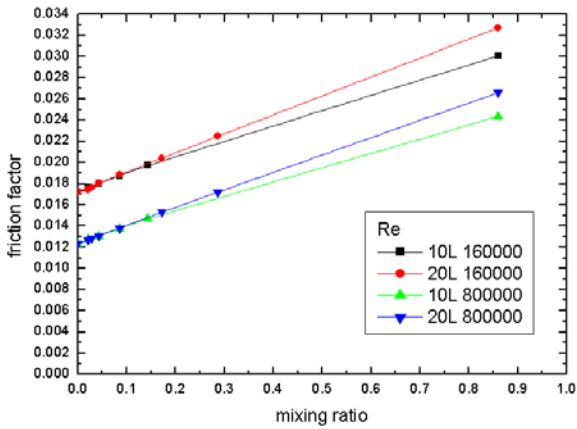


Fig. 10 Comparison of 20L and 10L

봉투에 대한 추가적인 수치해석을 통해 함수로 나타낼 수 있다.

쓰레기 봉투의 크기가 20L인 경우에는 주어진 조건들에서 관마찰계수의 값이 0.0123에서 0.0327까지의 분포를 보였고 10L인 경우에는 0.0123에서 0.03의 분포를 보여 각각의 경우 혼합비가 0일 때는 관마찰계수의 값이 동일 했지만 0.86에서는 관마찰계수의 값이 0.0027의 차이 즉 8.3%정도 감소함을 알 수 있었다.

Fig. 10 에 레이놀즈 수 160000과 800000에서 10L와 20L 쓰레기 봉투의 관마찰계수를 비교하여 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 쓰레기 봉투가 이송되는 쓰레기 관로이송 시스템에서 운전조건 즉 혼합비와 레이놀즈 수에 따른 압력강하 특성을 해석하여 송풍기의 용량을 효과적으로 결정할 수 있는 관마찰계수의 값을 계산하였다. 혼합비가 높아질수록 관마찰계수는 높아지고 레이놀즈수가 높아질수록 관마찰계수는 낮아짐을 알 수 있었다. 또한 봉

투의 크기가 작아질수록 관마찰계수의 값은 낮아짐을 알 수 있었다. 결국 효율적인 쓰레기 관로이송 시스템의 운전을 위해서는 혼합비를 낮추는 즉 쓰레기 봉투간의 거리를 길게 해야하고 상대속도를 최대한 높여야 하며 봉투의 크기는 작게 해야 한다는 결론을 얻을 수 있었다. 하지만 쓰레기 관로이송 시스템 안의 유동은 압축성 유동이므로 관내의 정확한 압력 분포를 알아보기 위해서는 앞서 구한 관마찰계수를 이용하여 유체의 온도와 밀도 등을 고려한 추가적인 해석이 필요하다.

후 기

본 연구는 (주)현대건설의 지원을 받아 수행하였습니다. 지원하여 주신 (주)현대건설에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Rief, B. A. Pettersson, 2001, Statistical theory and modeling for turbulent flows, pp. 133-135
2. Jang, C. M., and Choi, M. D., 2006, Flow Characteristics of Waste Inside the Circular Duct Using Waste moving Simulator, Proceedings of The Fourth National Congress on Fluids Engineering, pp. 747-750
3. Choi, Y. D., Lee, J. G., 2008, 음식물 쓰레기 운송조건과 성능 보증방안 연구, 현대건설주식회사
4. CFX-11 Solver Theory, Ansys Inc., 2007