

## 쓰레기 관로이송 시스템의 관로 압력강하 평가

장춘만\* · 이상윤\*\* · 서상호\*\*\*

### Pressure Drop in a Circular Pipe of Waste Collection Piping System

Choon-Man Jang\*, Sang-Yun Lee\*\*, Sang-Ho Suh\*\*\*

*Key Words* : Organic Waste(음식물 쓰레기), Waste Collection Piping System(쓰레기 관로이송 시스템), Numerical Simulation(수치해석), Pressure Drop(압력강하)

#### ABSTRACT

This paper describes an evaluation method of pressure drop in a circular pipe of waste collection piping system. Accurate pressure drop in a piping system is very important to determine the capacity of turbo blower, which is one of the main elements in the system. Three-dimensional Navier-Stokes analysis is introduced to analyze the pressure drop in the piping system. Organic waste is selected and modeled using the result of site survey performed in an apartment area. Evaluation method of pressure drop used in the present numerical simulation is performed in the shortened pipe line prior to the calculation of the real system. Throughout the numerical simulation, pressure drop in a waste pipe is obtained and compared to the value determined by analytical method. The pressure drop obtained by numerical simulation has a good agreement with that of the analytic method. It is noted that present evaluation method is effective to determine a pressure drop in the piping system. Detailed flow characteristics inside the pipe line are also analyzed and discussed.

#### 1. 서론

쓰레기 관로이송 시스템은 건물 내부 또는 외부에 설치된 쓰레기 투입구로 투입된 쓰레기를 지하로 연결된 매설 관로를 이용하여 자동으로 수거하는 방식으로, 유럽 및 미국, 일본 등에서 병원이나 공항, 오피스 건물,

공동주택단지 등을 대상으로 적용이 확대되고 있다.

쓰레기 관로이송 시스템은 쓰레기 발생원 부근의 투입구, 공기흡입구, 이송관로, 각종 댐퍼, 계측장치, 중앙집하장, 분류설비(사이클론 등), 압축설비, 흡입송풍기, 방향설비 및 중앙제어장치 등으로 구성되어 있다. 이 중에서 쓰레기를 이송하는 통로가 되는 관로이송 시스템 및 흡입송풍기의 적절한 사양 결정은 각종 쓰레기의 이송뿐만 아니라 운전에너지의 절약에도 중요하다.

한편, 쓰레기 관로이송 시스템을 개발하고 사용하고 있는 외국의 경우에는 자국의 쓰레기 성상에 맞는 관로

\* 한국건설기술연구원 화재 및 설비연구부

\*\* (주)ANST

\*\*\* 숭실대학교 기계공학과

E-mail : jangcm@kict.re.kr

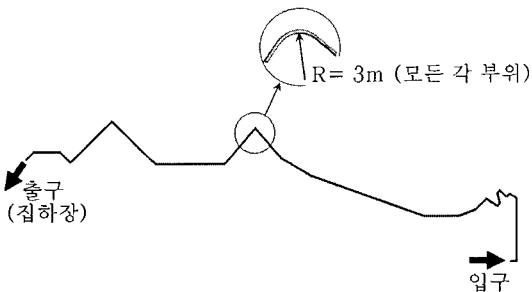


Fig. 1 Plane view of piping system (total length : 2.97 km)

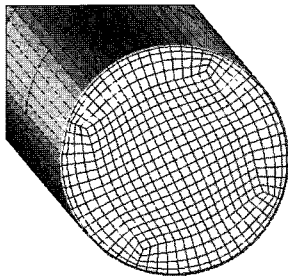


Fig. 2 Computational grid on the section of circular pipe

이송 시스템 개발을 수행하여 왔다.

우리나라의 경우에는 외국과는 달리 일반쓰레기 외에도 수분함량이 높은 음식물 쓰레기가 관로이송을 통해 배출되는 주요한 쓰레기 중에 하나이며, 이에 대한 연구는 세계적으로 전무한 실정이다. 현재 국내에 설치되는 쓰레기 관로이송 시스템의 대부분이 외국 설계회사의 기술을 바탕으로 설치된다는 점에서, 국내 음식물 실정에 맞는 쓰레기 관로이송 시스템의 타당성 검토는 중요한 설계요소 중에 하나라고 볼 수 있다.

본 연구에서는 쓰레기 관로이송 시스템을 대상으로, 쓰레기를 투입한 관로 내의 압력강하를 평가하기 위한 음식물 쓰레기의 수치해석 모델, 이를 이용한 평가 사례 그리고 내부유동장 특성을 3차원 나비에-스톡스 방정식을 이용하여 수행하였다.

## 2. 해석관로 시스템 및 해석방법

### 2.1. 해석관로 시스템

본 연구에서는 현장 설치를 고려하여 설계된 이송관로를 대상으로 하였으며, 해석 관로의 평면도를 Fig. 1에 나타내었다. 관로 길이는 2.97km이며, 원형관의 내경은 482.6mm이다. 또한, 관로에 있어서 곡률부의 반경

은 3m로 설정하였다. 본 연구에서는 쓰레기 관로이송 시스템 중에서 투입구측의 이송관로에서부터 쓰레기의 분리기와 흡입송풍기 (터보 블로어)의 상부 관로까지를 해석영역으로 하였다. 즉, 본 해석영역은 실제의 이송관로의 총 길이를 포함하고 있으며, 관로해석을 통하여 관로 하류측에 설치된 송풍기의 성능을 결정하기 위한 압력강하 특성을 평가한다.

### 2.2. 수치해석 방법

쓰레기 이송관로 내에서 유동장 특성과 압력손실을 평가하기 위하여 상용 소프트웨어인 CFX-10<sup>(1)</sup>을 사용하였다. CFX-10은 Pressure Based AMG Coupled Solver를 사용하며, 모든 Mach 수에 대한 해석을 하나의 Solver로 수행하는 해석 코드이다. 비압축성 삼차원 정상유동에 대한 연속방정식과 Reynolds-Averaged Navier-Stokes 방정식 등의 지배방정식은 유한체적법으로 이산화되며, 대류항과 확산항의 이산화 방법으로는 각각 수정된 상류차분기법과 중심차분법이 사용되었다. 난류모델로는 k-ε 모델을 사용하였다. 공기인 기체와 쓰레기인 고체의 상호관계를 고려하기 위하여 Lagrangian기법에 의한 이상유동 해석을 수행하였다.

계산격자는 Fig. 2에서 나타난 것과 같이 원관 단면에 O-Grid를, 전체 이송관에 대해서는 Hexa Mesh를 사용하였다. 많은 곡면부와 직면부가 혼재하는 본 쓰레기 이송관로에서 Tetra Mesh를 사용하여 격자를 생성하면 Hexa Mesh 비해 동일정도의 격자특성을 나타내는데 수십 배 많은 Node가 필요하게 된다. 본 관로해석에 사용한 전체 노드(node) 수는 1,960,000 개이다.

수치해석에 사용한 경계조건으로는 입구에서는 상대 압력 조건을, 출구에서는 유속조건 (= 27 m/s)을 주었다.

### 2.3. 음식물 쓰레기 성상

음식물 쓰레기는 일반 쓰레기와는 달리 수분함량이 높아서, 쓰레기 관로이송 시스템 설계에 있어서 일반쓰레기와 비교하여 관로의 압력계산 뿐만 아니라 쓰레기 수거율에도 다른 특성을 나타낸다. 본 연구에서는 음식물쓰레기 성상을 모델링하기 위하여 음식물 쓰레기의 수분함량에 관한 현장 측정 데이터<sup>(2)</sup>를 분석하였다.

본 현장검증 데이터를 통하여 얻어진 집단주거단지(아파트)의 음식물 쓰레기 수분량은 약 60-80%로 다양하게 분포되었다. 현장조사에서는 계절별로 배출쓰레기

Table 1. Modeling of organic waste

Diameter of organic waste (mm)	Percentage (%)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
20	10	675
10	20	
5	70	



Fig. 3 Configuration of model pipe (top view)

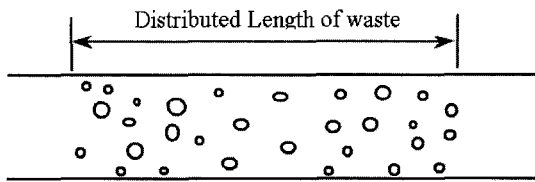


Fig. 4 Distributed length of waste

의 성상과 물리적 구성에 따라 세분화하여 측정하였다. 음식물 쓰레기의 관로 이송에 의한 압력손실을 수치적으로 계산하기 위해서는 음식물 쓰레기의 크기별 모델링이 필요하다.

즉, 음식물 쓰레기가 관로 내부를 통과할 때 일정 크기로 분리되게 되는데, 이에 대한 실증적 데이터가 전무한 상태이므로, 본 연구에서는 음식물 쓰레기의 관로이송 실험 등의 경험과 쓰레기의 성상을 바탕으로 수치해석에 필요한 음식물 쓰레기의 크기별 분포를 Table 1과 같이 설정하였다.

#### 2.4. 해석적 방법에 의한 쓰레기 이송관로 압력평가

쓰레기 관로이송 시스템의 설계에 있어서, 쓰레기의 투입에 따른 관로 내의 압력강하를 실험값을 기초로 하는 단순 대수식을 이용하여 간이적으로 평가할 수 있다. 즉, 압력강하  $P$  (Pa)는 다음 식으로 나타낸다.

$$P = L \cdot \Delta P_a \cdot \alpha \tag{1}$$

여기서,  $L$ ,  $\Delta P_a$  및  $\alpha$ 는 각각 상당직관길이, 단위길이당 마찰저항에 의한 압력강하 그리고 쓰레기에 의한 가압력 계수를 의미한다. 상당직관 길이는 곡관 등의 관로 형상을 직관길이를 보정하여 구한다. 단위길이당 마찰저항에 의한 압력강하는 무디선도 (Moody Diagram) 나 이를 수식화한 다음 식으로 구한다.

$$\Delta P_a = \lambda_a \cdot \frac{1}{d_i} \cdot \frac{\rho V_a^2}{2} \tag{2}$$

여기서,  $\lambda_a$ 는 마찰계수 ( $= 0.0055 \left[ 1 + \left( 20000 \cdot \frac{\epsilon}{d_i} + \frac{10^6}{Re} \right)^{1/3} \right]$ ),

$V_a$ 는 평균통과속도,  $\epsilon$ 는 관의 조도 그리고  $d_i$ 는 관 내경을 나타낸다.

마지막으로, 식(1)에서의 가압계수  $\alpha$ 는  $\alpha = (1 + km)$ 로 표현하며,  $k$ 는 상수를,  $m$ 은 수송 공기량에 대한 쓰레기량을 의미한다.  $k$  및  $m$  값은 쓰레기의 특성에 따라 결정하게 된다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 단축관을 이용한 예비계산

해석관로 길이가 수 km에 달하는 관로 전체를 이용하여 수치해석 모델의 타당성을 검증하는 데는 많은 계산시간이 소요되므로, 본 연구에서는 예비 계산을 위해 해석관로 중에서 곡관부를 포함하는 단축관을 선정하였다. 본 예비계산에서 선정된 곡관부의 길이는 106 m, 내경은 482.6 mm이며, 단축관 형상의 평면도는 Fig. 3에 나타내었다.

단축관을 이용한 예비계산에서는 순수 공기만을 관로 이송하였을 때의 압력강하와 음식물 쓰레기를 공기와 함께 이송시켰을 때의 압력강하를 수치해석으로 평가하였다.

먼저, 순수한 공기만이 단축관을 통하여 흘러갈 때의 압력강하는 1576 Pa로, 단위길이당 압력강하는 14.9 Pa/m로 계산되었다. 한편, 2.4절의 해석적 방법에 의한 압력평가로는 단위길이당 압력강하는 14.88 Pa/m이며, 이는 수치해석을 통하여 구한 값과 잘 일치함을 확인할 수 있다.

음식물 쓰레기가 관로로 이송될 경우의 압력손실을 계산하기 위하여, 일반적으로 음식물 쓰레기를 투입 시

Table 2. Conditions of calculation

Name	Value
amount of waste	250 kg
air velocity	27 m/s
roughness	0.16 mm
percent of water	67.5 %

Table 3. Pressure loss according to distributed length of organic waste

Type	Distributed length of organic waste (m)	Pressure drop (Pa)	Increase to air only (%)
1	3189	1587	0.6
2	638	1622	2.9
3	320	1684	6.8
4	160	1814	15.0
5	64	2237	42.0

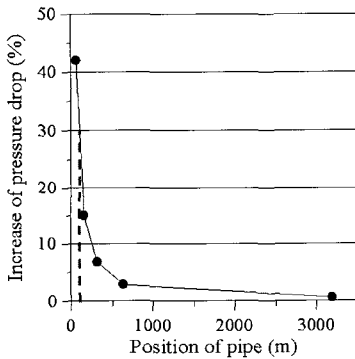


Fig. 5 Percent of pressure drop according to position of pipe

Table 4 Comparison of pressure drop for air only

piping system	pressure drop	
	total, kPa	unit length, Pa/m
real pipe	42.9	14.6
shortened pipe	-	14.9

의 압력손실 값은 순수 공기에 비해 약 30% 증가하는 실험결과를 토대로 관로 내에서 쓰레기의 분포길이를 변수로 하여 압력강하를 계산하였다.

여기서, 쓰레기 분포 길이란 Fig. 4에서 나타냈듯이 특정양의 음식물쓰레기가 투입되어 이송될 경우에 관로

내에 분포된 길이를 의미한다. 본 쓰레기 관로이송 해석에서는 투입구의 아래쪽에 위치한 음식물 쓰레기를 모아주는 슈트(chute)의 용량을 기준으로 투입 쓰레기 양을 결정하였다. 쓰레기 분포 길이는 투입쓰레기의 질량 유량에 의하여 결정된다. 해석 시의 주요 계산조건을 Table 2에 나타낸다.

즉, 슈트의 최대용량인 250 kg을 한번의 투입량으로 정하여, 이 양의 쓰레기가 관로 입구부에 특정 분포길이를 흘러가는 조건을 입구 경계조건으로 설정하였다.

음식물 쓰레기 투입에 의한 압력상승을 평가하기 위하여, 음식물 쓰레기의 분포 길이를 Table 3과 같이 5가지 조건으로 평가하였다. Table 3에서 알 수 있듯이 투입된 음식물 쓰레기 250 kg가 단축관 관로에 골고루 분포되었다고 가정할 Type 1에서는 순수 공기만이 통과할 때의 압력손실보다 약 0.6% 정도 증가됨을 알 수 있다. 설계사양인 30% 압력증가가 되기 위해서는 Fig. 5에서 알 수 있듯이 약 80 m의 분포길이가 필요하다.

이에 본 수치계산에서는 단축관을 포함하여 실제관로에서의 계산에서도 음식물 쓰레기가 투입구에서부터 80 m로 고르게 분포되어 흘러간다고 가정하고 정상 수치해석에 의한 압력강하 평가를 수행하였다.

### 3.2. 이송관로의 공기 흐름에 대한 압력강하 평가

실제 이송관로에서 공기흐름에 의한 압력강하를 수치해석을 이용하여 구하였다. 관로입구에서는 상대압력을 0으로, 출구에서는 공기흐름속도인 27 m/s를 경계조건으로 설정하였다.

순수공기에 대한 계산결과, 전체 관로의 압력손실과 단위 길이 당 압력손실을 Table 4에 나타내었다.

즉, 실제관로에서 단위 길이 당 압력강하는 14.6 Pa/m로 나타났으며, 이는 단축관에서 구한 14.9 Pa/m과 잘 일치함을 알 수 있다. 즉, 단위길이당 압력값의 편차가 실제관과 단축관에서 최대 2% 이내임을 알 수 있다.

### 3.3. 이송관로의 음식물 쓰레기 이송 시 압력강하 평가

실제관로에서는 음식물 쓰레기 성상분석 자료를 토대로 예비계산을 통해 도출된 음식물 쓰레기 분포길이를 80 m로 하여 수치해석을 수행, 음식물 쓰레기가 이송되는 관로의 압력강하 특성을 평가하였다. Table 5에 실제관로에서 구한 전체 및 단위 길이 당 압력강하를 단축관에서 구한 압력강하 값과 비교하여 나타냈다. Table 5

Table 5 Comparison of pressure drop for organic waste

piping system	pressure drop	
	total, kPa	unit length, Pa/m
real pipe	55.3	18.6
shortened pipe	-	19.3

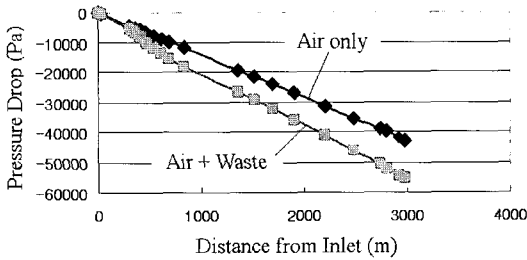
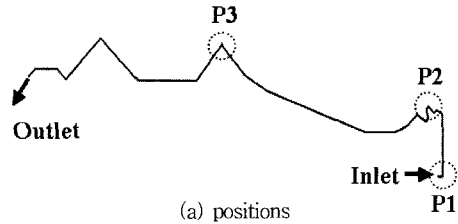


Fig. 6 Pressure drop according to the position of pipe line

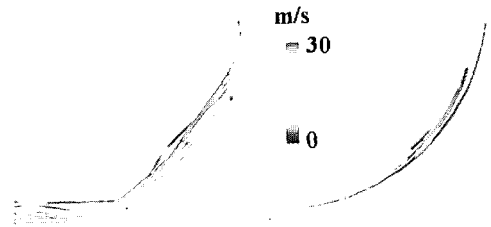
에서 알 수 있듯이, 실제관로와 단축관에서 구한 압력강하값은 최대 4% 이내의 편차를 나타내며, 두 경우 모두 잘 일치함을 알 수 있다. 쓰레기를 투입하였을 때 단축관이 실제관에 비해 상대적으로 압력강하가 크게 나는 것은 순수공기만을 이송한 경우와 비교하여 볼 때, 단축관의 곡률부분에서의 압력강하가 직관부보다 상대적으로 크다는 것을 의미한다. 또한, 쓰레기를 투입하지 않고 순수공기만으로 계산한 경우와 비교하여 볼 때, 본 계산 모델을 적용하여 구한 압력강하가 27.4% 증가함을 알 수 있으며, 이는 단축관에서 가정한 30% 증가와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이상에서 알 수 있듯이, 본 연구에서 설정한 음식물 쓰레기의 해석모델이 음식물 쓰레기의 관로이송에 따른 압력강하를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

Figure 6은 입구에서부터 관로의 압력강하 변화를 나타내었다. 그림에서 마름모를 연결한 선은 순수공기에 대한 관로 압력강하를 나타내고, 사각형을 연결한 선은 음식물 쓰레기에 대한 압력강하값의 분포를 나타낸다. 또, 횡축의 좌표값이 0인 지점은 쓰레기 투입구의 위치를 나타낸다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, 관로 투입구로부터 약 300 m 지점에서 600 m 지점까지는 쓰레기를 투입한 경우의 압력강하 기울기가 다른 구간보다 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 Fig. 1의 전체 관로 형상도에서 알 수 있듯이, 이 지역에서 관로의 형상이 복잡한 데에 기인한 것이다.

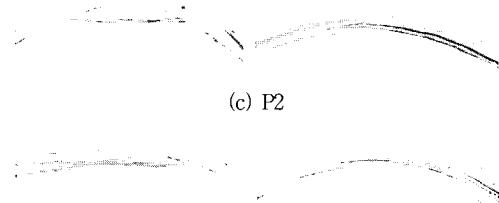
쓰레기 이송관로 내에서 음식물 쓰레기의 3차원 거동



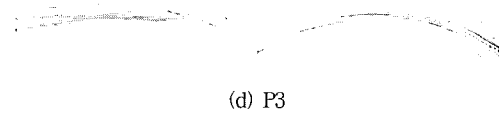
(a) positions



(b) P1



(c) P2



(d) P3

streak lines

streamlines

Fig. 7 Distribution of streak and streamlines

은 실험적인 방법을 이용한다고 하여도 음식물 쓰레기의 특성상 그 거동을 고찰하기에는 한계가 있다. 본 연구에서는 3차원 수치해석 결과를 이용하여, 이송관로의 몇 곳을 선정하여 관로내의 음식물 쓰레기 거동을 고찰하였다.

Figure 7은 관로상의 곡률부 3 곳에서 유맥선 (streak line)과 유선 (stream line) 분포를 나타내고 있다. Fig. 7(a)에는 Figs. 7(b)-(d)의 관로위치를 나타낸다. 쓰레기의 입자궤적을 나타내는 유맥선의 분포에서, 관로 내부에서의 쓰레기 거동을 파악할 수 있다. 즉, 곡률부분에서 대부분의 입자가 곡률의 외측 벽면에 부딪쳐서 지나감을 알 수 있다. 이것을 통하여, 음식물 쓰레기의 입자가 벽면과 충돌함으로써 벽면근방에서 감속되어지는 현상을 확인할 수 있다. 이송관로 내에서 공기의 흐름분포를 나타내는 유선은 관로의 중앙에서 상대적으로 큰 속도를 갖음을 알 수 있다. 특히 쓰레기 입자가 많이 충돌

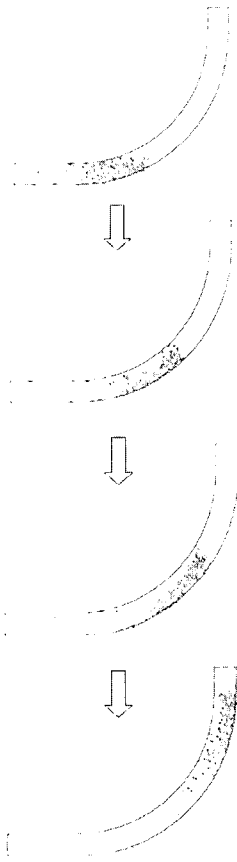


Fig. 8 Behavior of waste in a curved duct

하는 관로 외측쪽이 관로 안쪽보다 상대적으로 유속이 느림을 알 수 있다.

Figure 8은 Fig. 7의 P1 위치에서 쓰레기 이송관로 내에서 음식물 쓰레기의 3차원 거동을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 관벽을 부딪힌 쓰레기 입자들이 관벽 외측을 따라 길이가 길어짐을 알 수 있는데, 이는 관벽 외측에 충돌한 쓰레기의 입자가 관벽과의 마찰로 인하여 속도가 상대적으로 감속함을 의미한다.

#### 4. 결 론

음식물 쓰레기의 관로 이송에 의한 압력강하를 수치적으로 모델링하고 해석하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 쓰레기를 투입한 관로내의 압력강하를 평가하기 위한 음식물 쓰레기의 수치해석 모델을 개발하고, 실제 이송관로에 적용하여 개발 모델의 타당성을 확인하였다.
- 2) 음식물 이송관로의 형상이 곡관 등으로 복잡하게 구성된 구간에서의 압력강하는 공기 단독의 경우에 비해 음식물 쓰레기가 이송되는 경우 압력강하의 기울기가 상대적으로 크게 뒀을 알 수 있었다.
- 3) 음식물 쓰레기가 곡관 내부를 통과할 때는, 대부분의 쓰레기가 곡관의 외측벽면에 부딪혀서 마찰로 인한 속도감소가 발생하며, 이로 인하여 시스템의 저항이 증가됨을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구를 위하여 재정적인 지원을 하여 주신 (주)현대건설에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) CFX-10 Manual, 2005년
- (2) 연구보고서: “용인수지1지구 쓰레기 배출실태 조사 (쓰레기 관로수송방식 적용방안에 관한 연구),” 한국건설기술연구원, 1996년 8월.