

생활폐기물 자동집하시설의 관로망 최적 설계

성순경*†, 서상호**

Optimal Piping Network Design of Pneumatic Waste Collection System

Sun-Kyung Sung*†, Sang-Ho Suh**

Key Words : Design Criteria(설계기준), Numerical Simulation(수치해석), Optimal Piping Network Design(관로망 최적설계), Waste Collection System(생활폐기물 자동집하시설)

ABSTRACT

The pneumatic waste collection system, which is a complete solution for solving the waste collection problems, are constructed in many countries all over the world. However, research data for piping network design are insufficient. In this paper the pressure losses of the straight and curved pipes, pipe junctions are obtained using the numerical method in order to investigate the optimal pipe network design for the waste collection system. As an experimental result, the length of 1.8 meter is the reasonable for the radius of curvature of a curved pipe and the angle of 30 degree is suitable for confluent pipe.

1. 서 론

생활폐기물 자동집하시설은 1960년대에 스웨덴의 Centralsug사에서 처음으로 개발되어 현재 세계 각국에서 가동 중에 있다. 국내에서도 자동집하시설이 용인 수지지구와 송도 국제도시에서 처음 시공되어 운전 중이고, 각 지자체나 한국토지주택공사 등에서 대단위 택지 개발 시 건설되는 경우가 점차 늘어나고 있다.

생활폐기물 자동집하시설은 건물 외부나 단지 내의 투입구를 통해 수집한 쓰레기를 지하에 매설된 관로를 따라 중앙의 집하시설로 자동 수거하는 방식으로 투입설비, 관로설비, 집하설비로 구분된다.⁽¹⁾

투입설비에서부터 집하설비까지 생활폐기물은 관로 내에서 공기가 같이 유동하게 되며, 공기의 유동은 집하장에서 송풍장치를 이용하여 흡인하고 집하설비에서 생활폐기물과 분리된다.

이때 관로 내에서는 공기와 생활폐기물로 인한 유동저항이 발생하고 송풍장치의 동력을 필요로 하게 된다.

본 연구의 목적은 생활폐기물 자동집하시설에서 쓰레기가 관로망을 통하여 이송될 때 관로의 곡관부와 합류관 내에서

발생하는 배관 손실에 대한 최적설계를 통하여 자동집하시설의 소비 에너지를 최적화하기 위함이다. 국내의 경우 최적 관로망 설계를 하기 위해 발주처에서는 Table 1과 같은 설계기준을 제시하고, 설계회사들은 이 기준에 따라 설계를 진행하는 경우가 많이 있다.⁽²⁾ 그러나 이 설계기준의 타당성에 대해서는 지금까지 연구결과가 발표된 적이 없다. 따라서 이에 대한 내용을 기준으로 관로에 대한 최적화 방안을 검토하였다.

관로망의 최적설계를 위해 생활폐기물 자동집하시설 중에서 관로망부분에 대한 유동해석을 수치해석적인 방법을 이용하여 수행하고, 압력손실이나 유동현상 등에 관한 정보를 구하였다. 구한 유동정보는 이미 설계기준으로 제시되어 있는 관로망 설계 자료와 비교하여 최적인 관로망 설계 자료를 도출하였다.

Table 1 Design criteria for piping network

LH Corp.
• confluent angle : less than 30°
• Length of straj,ight part at confluent pipe for main line : 3D
• Distance between confluent pipes : 6D
• radius of curvature : more than 1800 mm

* 경원대학교 건축설비공학과

** 숭실대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail : sksung@kyungwon.ac.kr

2. 관로망의 모델링 및 수치해석방법

2.1 관로망의 모델링

관로망의 구성은 직관부, 곡관부, 합류부 및 개폐밸브로 구성된다. 개폐밸브는 주로 플레이트형 밸브를 많이 이용하므로 전개시에는 유동저항에 큰 영향을 미치지 않아 대상에서 제외하였다. Table 1에서 볼 수 있는 바와 같이 관로망구성에서 유동저항에 큰 영향을 미치는 부분이 곡관부와 합류부이므로 본 연구에서는 이를 중점 대상으로 하였다.⁽³⁾

90도 곡관부에 대한 모델링을 위하여 Fig. 1과 같이 곡관에 직관 부분을 연장하여 구성하였다. 적용된 직관과 곡관의 직경은 가장 많이 사용되고 있는 호칭경 500 mm로서 배관 두께가 Sch 40일 내경이 478 mm이고 내면의 절대조도는 0.15 mm를 기준으로 하였다. 여기에서 곡관부에서의 마찰손실을 해석하기 위하여 입구 부분과 출구 부분의 길이를 각각 20m로 하고 곡률반경은 1.4m, 1.8m, 2.2m, 2.6m, 3.0m, 3.2m, 3.6m로 변화시켰다.

Fig. 2는 관로망 중에서 합류 영역을 모델링한 것이다. 합류관은 현장에서 시공하고 있는 방식과 같이 주관에 지관이 붙는 형식으로 단관부가 붙고 이어서 곡관이 설치되는 형식으로 모델링하였다.

Fig. 2에서 합류각도 α 는 20°, 30°, 45°로 정하였고 단관부 L의 길이는 3D, 5D로 하였으며, 주관의 길이 방향으로 입구와 출구 쪽에 직선 구간을 두어 모델링하였다. 합류관에 사용된 곡관은 Fig. 1의 곡관부에서 수행한 해석결과를 이용하여 곡률반경을 선정하였다.

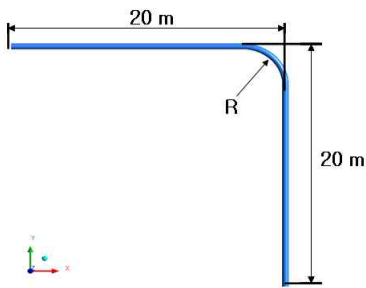


Fig. 1 Geometrical modeling for a curved pipe region

2.2 수치해석방법

생활폐기물 자동집하시설의 관로망 중에서 곡관 부분과 합류 부분의 압력손실과 쓰레기 입자거동을 살펴보기 위하여 상용소프트웨어인 ANSYS CFX 11을 사용하여 수치해석하였다. 계산격자는 상용 소프트웨어인 ICEM을 사용하여 Hexa Mesh로 구성하였으며 해석해의 정밀도를 높이기 위해 Fig. 3과 같이 O-grid를 사용하였다. 사용공기의 압력이 그다지 높지 않으므로 비압축성 정상유동에 대한 연속방정식과 Reynolds Averaged Navier-Stokes 방정식 등의 지배방정식은 비선형 방정식을 풀기 위하여 High Resolution Scheme으로 이산화하고 반복계산을 수행하여 속도와 압력에 대하여 수렴하도록 하였다. 난류모델은 k- ϵ 모델을 적용하였다. 수치해석을 위한 경계조건으로는 입구에서는 유속과 입자조건, 출구에서는 상대압력조건을 주었다. 생활폐기물의 입자는 공기와 함께 유동하도록 하였다.

관내의 공기 유동 속도는 25 m/s이고, 온도는 상온을 기준으로 15°C로 하였으며, 투입되는 생활폐기물의 입자 크기와 크기별 분포는 Table 2와 같은 조건을 기준으로 하였다.

공간상의 3차원 비압축성 난류유동에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 하기 위해서 유한체적법(FVM)을 이용하였다. 시뮬레이션에 사용된 질량보존방정식과 운동량보존방정식은 지배방정식으로 식(1) 및 (2)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \tag{2}$$

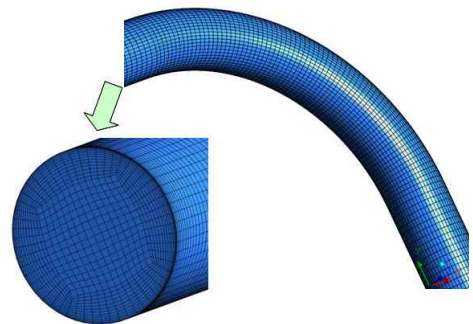


Fig. 3 O-grid hexa meshing for the curved pipe

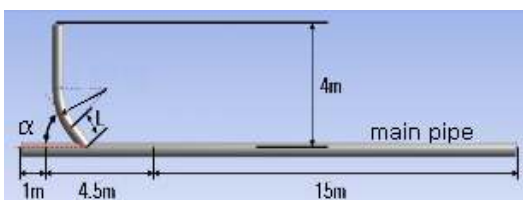





Fig. 2 Geometrical modeling for a confluent pipe region

Table 2 Particle size & distribution ratio of waste

waste particle size	diameter (mm)	distribution ratio(%)	density (kg/m ³)
	20	10	844
	10	20	
	5	70	

3. 결과 및 고찰

3.1 곡관부의 최적설계

관로망의 90도 곡관부 안에서 폐기물이 유동하는 경우 쓰레기는 공기보다 밀도가 높아 관성이 크므로 쓰레기 입자의 거동은 공기유동과는 전혀 다르게 나타난다. 폐기물 입자는 Fig. 4와 같이 곡관부 바깥 벽면에 부딪쳐 반발하고, Fig 4의 (b)와 같이 곡률반경이 다른 경우 벽면에 충돌하는 횟수가 다르게 되며 거동 형태도 다르게 나타난다. 이와 같이 대부분의 폐기물 입자가 곡관의 바깥면에 충돌하게 되어 곡관의 바깥면은 마모현상이 크게 일어나게 된다.⁽⁴⁾ 이때 폐기물의 충돌에 의한 관벽의 마모는 입사 각도가 큰 곡률반경이 작을수록 커지게 된다. 곡관부의 최적설계를 위해서는 압력손실과 관벽의 마모를 복합적으로 고려하여야 할 필요로 한다. 이로 인하여 곡관의 바깥면은 두꺼운 재료를 사용하거나 내마모성이 큰 재질을 사용하는 것이 좋다.

곡관을 지난 폐기물 입자의 속도는 충돌 후 급격하게 낮아지고, 직관부분으로 진입한 후 서서히 회복하게 된다. 이때 곡률반경이 작을수록 떨어지는 속도가 크게 된다. 이와 같이 폐기물 속도의 감속과 거동의 변화로 이곳에서는 압력손실이 크게 일어나게 되고, 공기만이 유동하는 경우보다 훨씬 크게 나타남을 Fig. 5와 Fig. 6에서 볼 수 있다. Fig. 5는 곡관부에서의 압력분포를 나타내며 곡률반경이 작은 경우 곡면의 외부 전체에 걸쳐서 높은 압력상승이 나타남을 볼 수 있고, 곡률반경이 작은 경우에는 급격한 압력상승이 적은 부분에서 나타남을 볼 수 있어 압력손실이 상대적으로 적음을 알 수 있다. Fig. 6은 곡관부의 곡률반경 변화에 대한 압력손실

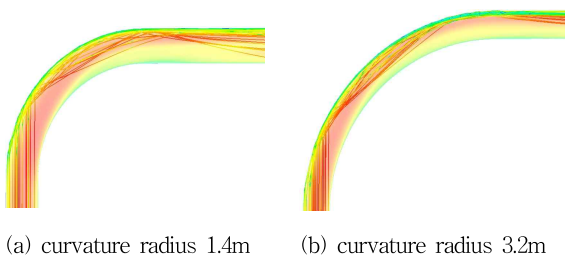


Fig. 4 Particle Track at the curved pipe

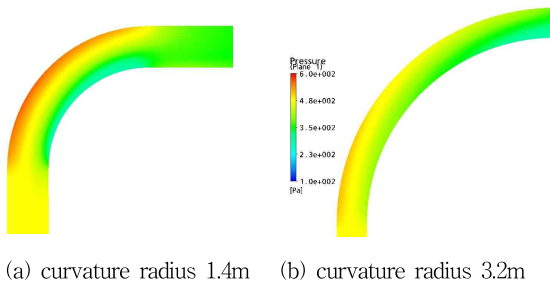


Fig. 5 Pressure losses for the curved pipe with the curvature radius

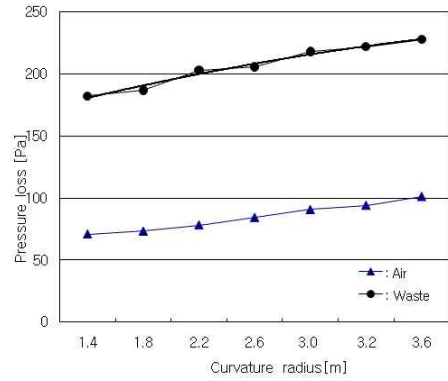


Fig. 6 Diagram of Pressure losses for the curved pipe with the curvature radius

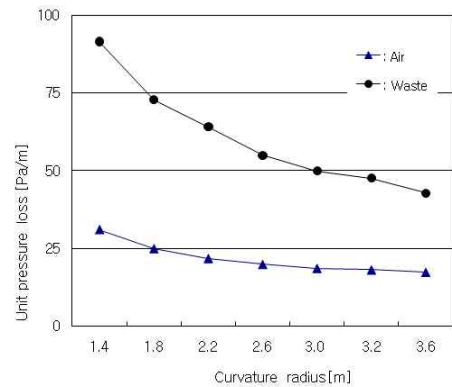


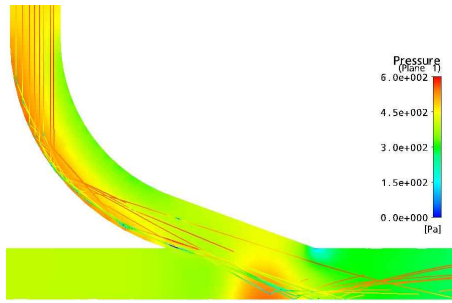
Fig. 7 Unit pressure losses for the curved pipe with the curvature radius

의 변화를 선도로 나타낸 그림이다. 압력손실의 절대값은 곡률반경이 커짐에 따라 증가하는 양상을 보이고 있으며, 공기만이 유동하는 경우보다 압력손실의 증가세가 약간 더 크게 나타남을 알 수 있다. 관의 직경에 대한 곡률반경의 비율이 2.5배 정도인 1.4 m인 경우가 3.6 m인 경우보다 압력손실이 작게 나타났으나 이는 곡관부의 길이가 짧아 작게 된 것으로, 1.8 m인 경우와 3.6 m인 경우 압력손실의 차이는 41 Pa 정도로 나타났다.

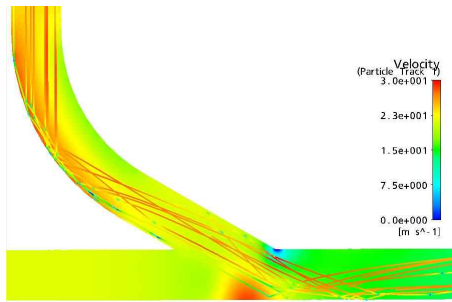
곡관부에서 발생하는 단위 길이당 압력손실은 Fig. 7과 같이 곡률반경 1.4 m일 경우가 가장 크게 나타났고, 곡률반경 3.6 m인 경우보다 2.1배 높음을 볼 수 있다. 따라서 곡률반경이 작을수록 압력손실이 크게 증가하며, 공기만이 유동하는 경우에 비하여 압력손실이 두 배 이상 증가함을 볼 수 있고, 손실 증가율도 훨씬 크게 나타남을 알 수 있다.

3.2 합류부의 최적설계

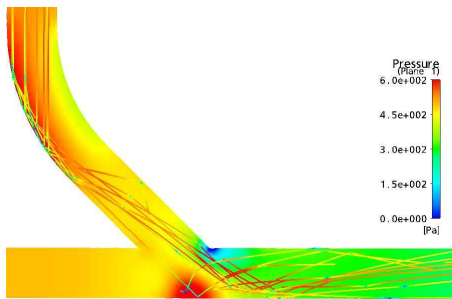
지관으로부터 주관에 합류하는 경우 일반적으로 시공의 편리성을 이유로 주관에 단관을 연결하고 곡관을 지관과 연결하는 형태로 합류관이 제작된다.



(a) 20 degree



(b) 30 degree



(c) 45 degree

Fig. 8 Pressure losses & particle tracks for the confluent pipe with the confluent angles

합류관에 사용되는 곡관의 곡률반경을 1.8m로 적용한 경우에 대하여 주관과 단관의 합류각도의 변화와 직관과 단관의 길이 변화에 대한 합류관에서의 압력손실과 폐기물 입자 거동에 대하여 살펴보았다.

Fig. 8은 합류관 각도 변화에 따른 압력분포와 폐기물 입자 거동 상태를 나타낸 것으로 합류각도가 가장 큰 45도의 경우 합류점을 지난 부분에서 입자의 반발로 높게 튀어 오름을 볼 수 있으며 합류관 중간에서도 가로질러 충돌하는 현상이 있음을 볼 수 있다. 합류각도가 제일 작은 20도의 경우에는 입자의 거동상태가 원활함을 볼 수 있다. 따라서 합류각도가 작을수록 입자는 양호한 거동을 하고 있음을 알 수 있다.

Table 3과 Fig. 9에서는 각 조건에 대한 압력손실을 나타내었다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 합류하는 관의 경우 합류각이 작을수록 합류되는 부분에 맞는 직관의 길이가 짧을수록 압력손실이 작게 나타났다. 연결 직관의 길이가 5D

Table 3 Pressure losses for the confluent pipe with the confluent angles

Angle[°]	Straight part of confluent pipe	Pressure loss[Pa]
20	3D	249
	5D	268
30	3D	257
	5D	284
45	3D	294
	5D	321

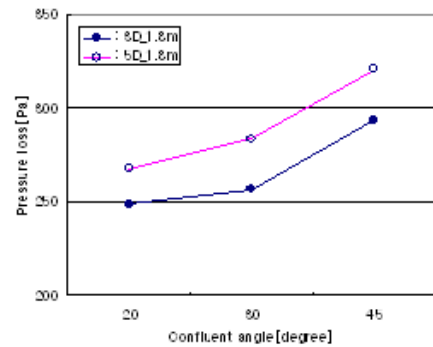


Fig. 9 Pressure losses for the confluent pipe with the confluent angles

인 경우 3D인 경우보다 배관의 길이가 2D만큼 길어지므로 압력손실이 커지나 직선구간에서 발생하는 경우보다 약간 더 크게 나타나므로 연결 직관의 길이는 3D인 경우가 유리함을 알 수 있다. 합류각은 작을수록 압력손실이 작게 발생하나 30°보다 작으면 주 배관에 분기 배관이 묻히게 되고, 이때 주 배관에 연결되는 직관 부분이 3D 보다 작게 되면 직관 부분이 없이 곡관부가 주 관로에 직접 연결되므로 시공상의 애로사항이 발생하게 된다.

그러므로 합류각은 30°가 적정하고 합류부에서 곡관과 연결되는 직관부위는 3D로 하는 것이 가장 바람직한 것을 알 수 있다.

4. 결 론

생활폐기물 자동 집하설비의 설계발주처에서 제시한 곡관부와 합류부의 설계기준과 본 연구에서 수행한 수치해석 결과를 비교하고 설계기준의 타당성을 검토하였다.

- 1) 수치해석 결과를 보면 곡률반경이 작을수록 압력손실이 커지고 있다. 하지만 곡률반경이 2.6 m 이상에서는 큰 차이가 미소하고 곡률 반경 1.8 m 이상부터는 곡률 반경에 따른 압력손실의 변화율도 작다. 설계기준에서 곡률반경을 최소 1.8 m 이상으로 할 것을 요구하고 있고 시공의 편의성을 고려할 때 호칭지름 500 mm인 경

우 곡관의 곡률반경을 1.8 m로 정하는 것이 타당함을 확인하였다. 하지만 곡률반경은 가능한 크게 하는 것이 유리함을 알 수 있다.

- 2) 합류부에서는 합류각을 30도로하고 곡관과 연결되는 직관의 길이는 3D인 경우가 가장 바람직하다. 각도가 작을수록 손실이 적게 발생하지만 시공이 매우 어려워 지게 된다.

참고문헌

- (1) Won-Sik Chung, I-Tae Kim, 2005, "Set-up for Efficient Application Methodology in Korea by Analysis of Pneumatic Refuse Collection System Cases", The Proceedings of the Spring Annual Conference, KSEE.
- (2) Sang-Ho Suh, Jun-Gil Park, Sun-kyung Sung, Min-Tae Cho, 2008, "Piping Network Design Trend of Pneumatic Waste Collection System", The Workshop of Pneumatic Waste Collection System, KFMA.
- (3) Choon-Man Jang, Sang-Yun Lee, Sang-Ho Suh, Youn-Taek Oh, 2006, "Analysis of Internal Flow Characteristics in a Circular Pipe of Waste Collection Piping System Using Numerical Simulation", The Proceedings of The Fourth National Congress on Fluids Engineering, Kyungju.
- (4) I-Tae Kim, Won-Sik Chung, 2006, "The Feasibility Study of Automatic Garbage Assembly System", The Proceedings of The Fourth National Congress on Fluids Engineering, Kyungju.