

쓰레기 관로 이송시스템의 터보 블로어 소요압력 선정 방법

쓰레기 관로 이송시스템의 요소기술인 터보 블로어의 소요압력 선정에 관한 연구내용을 소개하고자 한다.

장 춘 만

한국건설기술연구원(jangcm@kict.re.kr)

본 원고에서는 지금까지 수행하여 온 쓰레기 관로 이송 시스템의 요소기술 중에서 핵심요소 기술로 알려진 터보 블로어의 소요압력 선정에 관한 것이다. 즉, 터보 블로어의 용량을 결정하기 위해서는 관로 이송 시스템의 관로 구조와 관로의 특성을 고려한 적절한 압력손실의 계산이 요구된다. 이러한 압력손실 계산은 지금까지 관로이송 시스템 제작사들의 노하우로 일반에게 정확하게 공개 되지는 않았지만, 간단한 실험 데이터나 이론식들을 조합하여 사용하는 것으로 알려지고 있다. 이로 인해 설계자의 주관적인 사고나 불필요한 과다설계로 인하여 에너지의 효율적인 이용에 많은 제한을 가져오기도 하였다. 이에 보다 객관적인 관점에서 관로의 압력손실을 평가할 수 있는 수치해석기법에 의한 압력손실의 평가 사례를 소개하고자 한다.

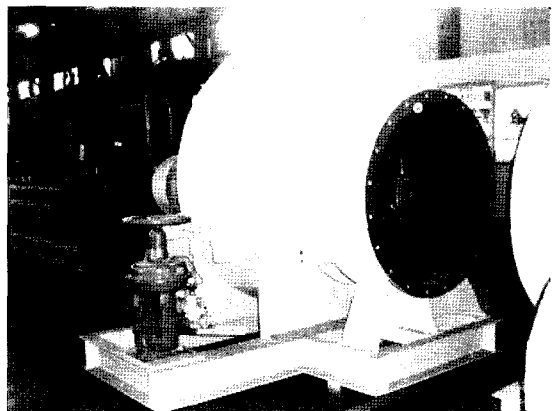
일반식에 의한 송풍기 소요압력 결정

쓰레기 관로이송 시스템에서 압력손실을 극복하고 쓰레기를 관로 배출구까지 이송하는 동력을 생성하는 송풍기의 사양(specification)은 이송 관로에서의 풍량, 배관 직경 등 기본적인 사양 이외에도 각종 설비의 손실 등을 적절히 고려하여 결정한다.

송풍기는 크게 터보형과 용적형으로 분류할 수 있다. 터보형은 날개(임펠러)가 회전함으로써 발생하는 양력이나 원심력을 이용하여, 기체(공기)에 속도와 압력을 가하는 것으로 축류형과 원심형이 있다. 한편

용적형은 실린더 등과 같은 일정 용적 중에 흡입된 기체의 용적을 회전 또는 피스톤으로 작동하여 급격히 변화시키는 것으로 회전형과 왕복동형이 있다.

공기이송에 있어서는, 일반적으로 터보형의 원심형과 용적형의 회전식이 사용된다. 용적형은 압력변동에 비해 풍량 변동이 적은 것이 특징이며, 공기 이송의 운전특성은 좋으나 대풍량에서는 소음이 크고 효율이 낮다는 단점이 있다. 따라서, 대구경의 이송관로 형태에서는 터보형이, 소구경의 형태에서는 용적형이 적합하다. 일반적으로 쓰레기 관로이송 시스템은 대구경의 이송관로를 사용하기에 그림 1의 터보형 송풍기(블로어)를 많이 선정한다.



[그림 1] 터보형 블로어

쓰레기 관로이송 시스템에서 사용할 송풍기의 사양을 결정함에 있어서, 우선적으로 고려하여야 할 점은 관로의 이송 압력, 즉 압력손실 값을 결정하는 일이다. 이송 압력 값은 쓰레기 이송용 관로에서, 가동시간 내에 이송할 쓰레기의 수송이 원활하도록 하는 공기압력을 의미한다.

일반식에 의한 압력손실 계산은 다음과 같이 한다. 먼저, 이송압력 (P_{s1}, P_a)은 다음 식으로 구한다.

$$P_{s1} = L \cdot \Delta P_a \cdot \alpha \quad (1)$$

여기서, L : 상당길이 (m)

ΔP_a : 단위 길이 당 압력손실 (Pa/m)

α : 쓰레기에 의한 증가 압력 계수

상당길이란, 직관, 곡관 및 분기관 등으로 다양하게 구성된 이송 관로를 직관화하였을 때에 상당하는 길이로 관로의 특성에 따라 그 값이 다르게 된다.

단위 길이 당 마찰저항에 의한 압력손실 (ΔP_a)는

다음 식으로 계산한다.

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

여기서, λ_a : 마찰계수

V_a : 평균 속도 (m/s)

d_i : 이송 관로 내경 (m)

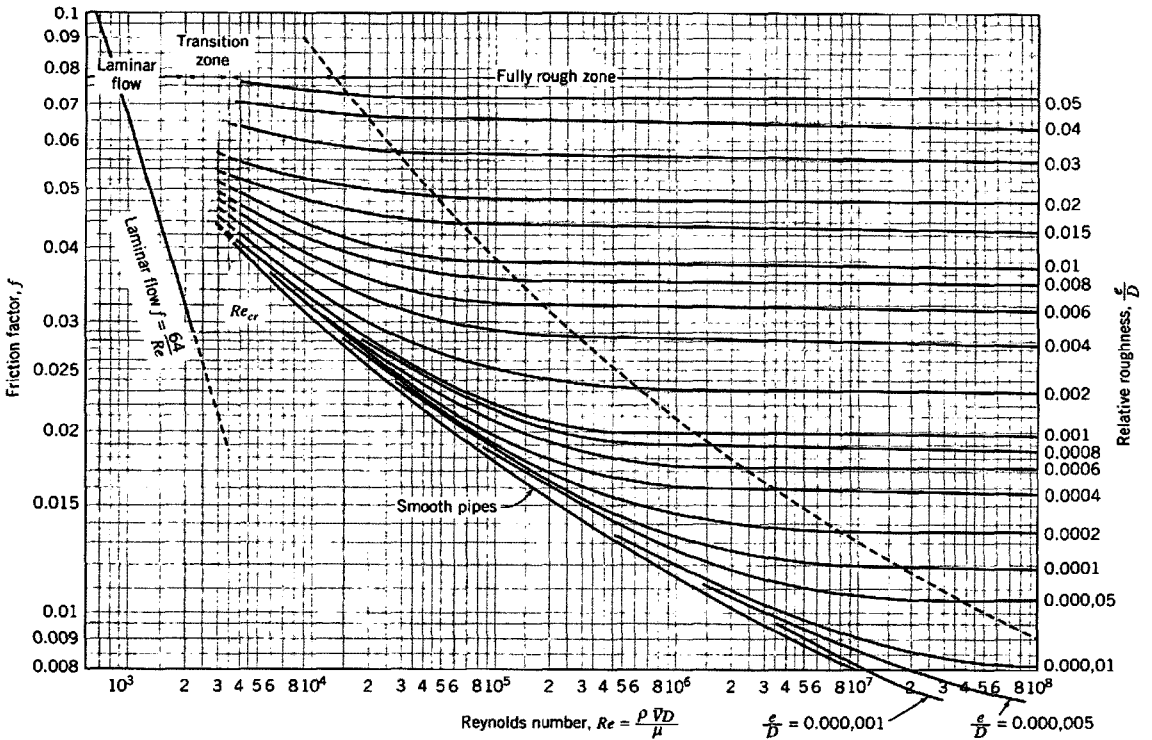
마찰계수 (λ_a)는 그림 2와 같이 무디선도(Moody Chart)로 구할 수 있다.

한편, 쓰레기의 투입에 의해 부과되는 압력손실의 증가분(α)은 다음 관계로 유도할 수 있다.

$$\alpha = (1 + km) \quad (3)$$

여기서, k : 쓰레기 압력손실계수

m : 쓰레기 혼합비 ($G_s/G_a =$ 이송 쓰레기 중량 / 이송 공기 중량)



[그림 2] 무디선도



이상에서 보듯이, 쓰레기 이송관로 시스템에서 쓰레기에 의한 압력손실계수 k값을 구하는 것이 터보 블로어 용량을 결정하는데 매우 중요한 요소이다.

참고로 송풍기 흡입 및 토출 측의 압력손실을 고려하는 시스템 전체의 압력손실의 계산은 다음과 같다.

전체 송풍기 소요압력 (Pt, Pa)은 송풍기 흡입측 및 송풍기 토출측의 풍압의 합으로 계산한다.

- 송풍기 흡입측 소요압력 (PS, Pa)

$$PS = PS1 + PS2 + PS3 \quad (4)$$

여기서, PS1 : 쓰레기 이송 관로의 압력손실

PS2 : 수집센터 시설 내의 송풍기 흡입측의 각종 기기의 압력손실 (분리기, 집진기 등의 수집센터 시설 내의 분리기에서 송풍기까지의 각 기기에 의한 압력손실)

PS3 : 송풍기 흡입측 공기배관 압력손실 (분리기에서 집진기, 집진기에서 송풍기등의 수집센터 내의 분리기 이후에서 송풍기까지 공기관에 의한 압력손실)

- 송풍기 토출측 소요압력 (Pd, Pa)은 다음과 같다.

$$Pd = Pd1 + Pd2 \quad (5)$$

여기서, Pd1 : 송풍기 토출부에서 외기까지의 각종 기기에 의한 압력손실

Pd2 : 송풍기 토출부에서 외기까지의 공기배관에 의한 압력손실

따라서, 송풍기 전체 소요 압력 (Pt, Pa)은 다음과 같다.

$$Pt = Ps + Pd \quad (6)$$

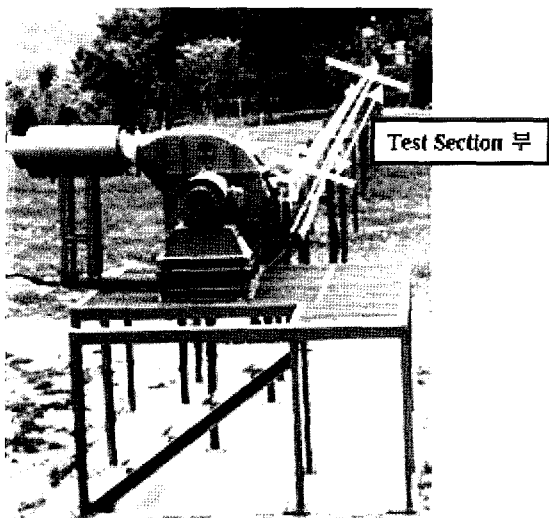
수치해석을 이용한 이송관로의 압력손실 평가

앞 절에서 살펴본 것과 같이 일반식을 사용하여 쓰레기 이송관로의 압력손실을 평가하여 터보 블로워

의 사양을 결정 할 수 있다. 그러나 관로의 형상에 따른 손실계수 등을 임의로 선정하는 경우가 발생하기에 설계자의 주관적인 경험에 의해 일부 계수들이 결정된다. 이에, 보다 객관적인 관점에서 관로의 압력손실을 결정하는데는 수치해석에 의한 평가방법이 있다.

먼저, 실험과 수치해석 결과의 비교, 분석을 위하여 쓰레기 관로이송 장치를 축소한 관로 시뮬레이터를 설계, 제작하였다. 관로 시뮬레이터의 전체 형상은 그림 3에 나타냈으며, 주요 구성 요소로는 공기 흡입구, 쓰레기 투입구, 이송 관로의 테스트 부 (직관 및 곡관), 콜렉터(collector), 터보 블로어 등이다. 관로의 형상에 따른 압력손실(강하) 값을 분석하기 위하여, 쓰레기 투입구의 하류측에서부터 콜렉터의 상류측까지 시험부(test section)을 설정하여 압력 값을 측정할 수 있도록 하였다. 본 시뮬레이터에서의 직선관로에서 시험부의 길이는 각각 67.2 m 이다. 통상 실물에서 400 ~ 600 mm의 직경으로 쓰레기 이송관로를 설계하는 것을 참고로 하여, 본 축소 모델용 관로 시뮬레이터에서는 관로 내경을 205 mm로 축소하여 설계하였다.

쓰레기 이송관로 내에서 압력손실을 평가하기 위하여 상용 소프트웨어인 CFX-10을 사용하였다. CFX-10은 Pressure Based AMG Coupled Solver를



[그림 3] 관로 시뮬레이터

사용하며, 모든 Mach 수에 대한 해석을 하나의 Solver로 수행하는 해석 코드이다. 비압축성 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.

관로 시뮬레이터에서 수치해석의 타당성을 검증하기 위하여 직선관로를 대상으로 순수공기만이 관로를 통하여 이송될 때에 시험부 상, 하단에서의 압력손실(강하)를 실험값과 비교하였다. 수치해석에서는 공기의 관로이송 속도를 최소 20 m/s에서 최대 30 m/s로 변화시켜 가며 압력손실을 평가하였다.

실험과 수치해석에서 구한 단위길이 당의 압력손실 값 비교를 그림 4에 나타내었다. 그림에서 알 수

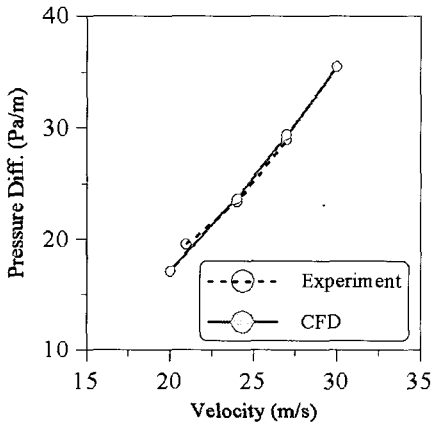
있듯이, 수치해석 구한 압력손실은 실험값과 잘 일치함을 알 수 있다.

관로 내부 유동장 해석을 통해 구한 압력손실 및 내부유동장 특성은 관로의 형상 변수값에 따라 크게 달라지게 된다. 이러한 형상변수의 영향에 따라 실제 설계 시에 발생하는 적정 설계값의 결정을 위해서는 각각의 형상변화에 따른 성능 특성값을 데이터 베이스(Database)화 하는 것이 중요하다. 관로 시뮬레이터에 있어서 성능에 중요한 영향을 미치는 인자인, 관로 표면의 거칠기(ε) 및 관로 내경을 변수로 선정한 수치해석 결과의 예를 그림 5 및 그림 6에 각각 나타내었다. 수치계산 시에는 관로 내의 공기 흐름속도를 27 m/s로 고정하였다. 그림 5는 관로의 표면조도에 따른 압력손실 특성을 나타낸다. 그림에서 해석적인 결과는 앞절에서 기술한 무디선도를 이용하여 결정한 압력손실 값이다. 그림에 나타냈듯이, 표면조도가 증가하면 압력강하는 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 또한, 해석으로 구한 압력손실 값은 수치해석결과와 잘 일치한다.

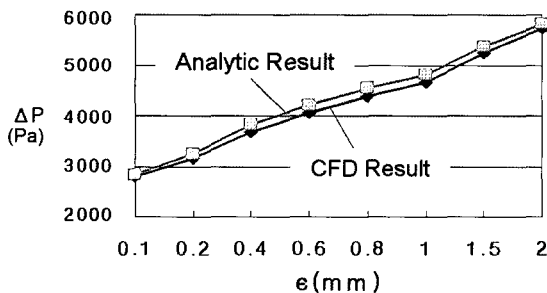
그림 6은 공기 흐름속도를 27 m/s로 하였을 때의 관로경에 따른 압력손실분포를 나타낸다. 관로경이 증가함에 따라 압력손실도 상대적으로 감소함을 알 수 있다.

앞서 서술한바와 같이, 다양한 관로 형상에 대하여 쓰레기 투입 시의 압력증가량을 나타내는 압력손실 계수 k (식 3 참조)의 결정은 쓰레기 이송관로의 용량결정에 중요하다.

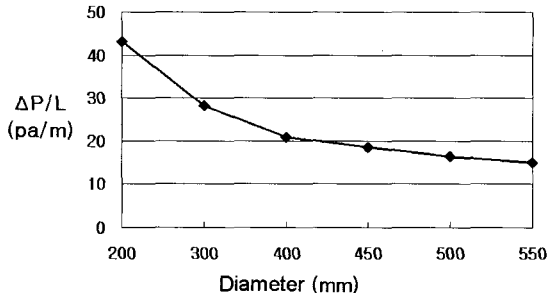
먼저, 직선관로를 이용한 관로시뮬레이터의 관경을 205 및 500 mm 두 종류로 설정하여 3차원 수치해석을 통하여 압력손실과 쓰레기 압력손실계수를 각각



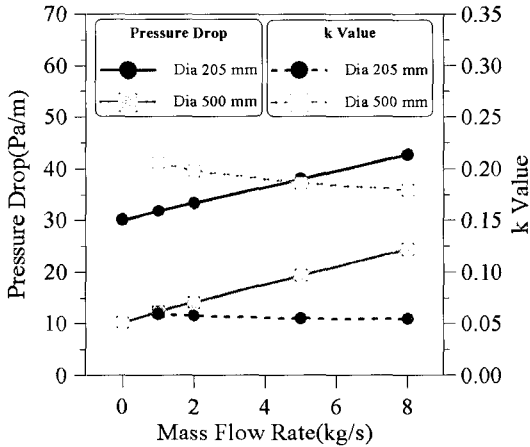
[그림 4] 실험과 수치해석 결과 비교



[그림 5] 관 조도에 따른 압력손실



[그림 6] 관 직경에 따른 압력손실



[그림 7] 관 직경에 따른 압력손실 및 쓰레기 압력손실계

평가하였으며, 그 결과를 그림 7에 나타내었다.

그래프의 횡축은 투입 쓰레기의 질량유량(mass flow rate)을 나타내며, 질량유량 값이 0인 경우는 쓰레기 투입없이 공기만이 이송될 때의 결과를 의미한다. 본 계산에서의 질량유량은 실험에서 사용한 관

로이송 시뮬레이터의 관경인 205 mm일 때를 기준으로 하였다. 관경이 다를 경우에는 관경이 205 mm 일 때의 이송관로의 부피에 대한 쓰레기의 밀도와 동일하도록 질량유량 값을 보정하여 계산을 수행하였다.

그림 7에서 알 수 있듯이 쓰레기의 질량유량이 커지고, 관경이 작을수록 이송관로 내의 단위길이당 압력손실 값이 크게 된다. 또한 이송관로의 관경이 커질수록 쓰레기 압력손실계수 값은 증가하는 반면, 쓰레기의 질량유량이 커질수록 계수값이 감소함을 알 수 있다. 즉, 단위길이당 압력손실과 쓰레기 압력손실계수 값은 서로 반비례한다.

이상에서 살펴보았듯이, 음식물 쓰레기 투입에 의한 쓰레기 압력손실계수 값은 전체 관로에서의 압력손실에 미치는 영향이 클 뿐만 아니라, 곡관의 경우에는 곡률반경 및 관경에 따라서도 영향을 미치게 된다. 따라서 터보 블로어 용량은 다양한 관로 형상과 작동조건에 대한 쓰레기 압력손실계수를 포함하는 주요 설계변수의 데이터베이스 구축으로 보다 객관적으로 결정 할 수 있으리라 생각된다. (9)