

## 2008년 생활폐기물 이송관로 관련 연재

장 춘 만

주제명 : 공기이송관로 모델실험장치 운전 및 성능해석

### 저 자



1. 성 명 : 장 춘 만 (張春晩)
2. 생년월일 : 1961년 11월 8일
3. 학 력 : 인하대학교 공과대학 기계공학과 (학사, 1984)  
 인하대학교 대학원 기계공학과 (석사, 1986)  
 일본 Kyushu University 대학원 기계에너지공학과 (박사, 2000)
4. 경 력 : (주)LG전자 생활시스템연구소 유체유동팀 연구원 (1988~1997)  
 일본 Kyushu University 문부과학교과관 조수/ 연구원 (2000~2002)  
 인하대학교 기계공학과 Brain Pool 연구원 (2003~2004)  
 한국건설기술연구원 화재 및 설비연구센터 연구원 (2004~현재)

### 1. 서론

생활폐기물 관로이송 시스템의 설계에 있어서 관로의 형상에 따른 압력손실의 정확한 예측은 주요한 설계상의 요소기술 중의 하나이다.

생활폐기물 관로이송 시스템은 약 40년 전 스웨덴에서 주거지역 내에 쓰레기 수거의 환경 및 위생적인 해결 대안을 찾기 위하여 연구 개발하기 시작한 이래로, 현재에는 유럽 및 미국, 일본 등에서 주거 밀집지역 뿐만 아니라 병원, 공항, 사무소 건물 등 그 사용범위가 확대되고 있다. 쓰레기 관로이송 시스템은 종래의 인력과 차량에 의한 쓰레기 수거방식과는 달리, 쓰레기를 투입구에 투입하면 중앙제어 시스템의 통제에 의하여 지하매설 관로에 흐르는 고속의 공기와 함

께 중앙집하시설로 운반되어 쓰레기의 종류에 따라 소각장에 직접 투입시키거나 컨테이너에 자동 적재 후 최종 처리장까지 운송하는 방법을 채택하고 있다.

생활폐기물 관로이송 시스템은 쓰레기 투입구, 이송관로, 각종 댐퍼, 계측장치, 중앙 집하장, 분류설비, 압축설비, 송풍기, 중앙제어장치 등으로 구성되어 있는데 이 중 쓰레기를 이송하는 통로인 이송관로 및 흡입 송풍기의 적절한 용량 결정은 쓰레기의 최적이송 뿐만 아니라 운전에너지의 절약에도 중요한 역할을 한다.

본 원고에서의 생활폐기물 이송관로 시스템에서 쓰레기의 이송에 따른 관로저항을 평가하기 위하여 관로 시뮬레이터를 제작하여 실험하고, 수치적으로 평가한 사례에 대하여 소개한다.

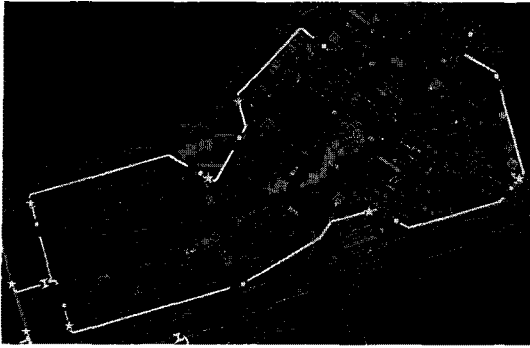


그림 1. 이송관로 배치 사례

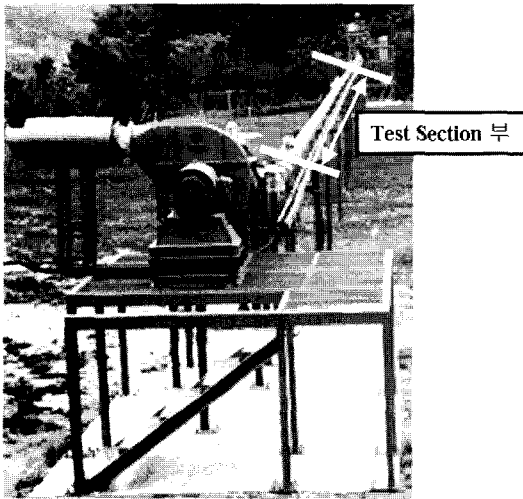


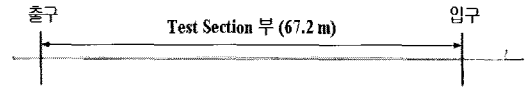
그림 2. 관로 이송시물레이터 (I자관)

## 2. 관로 시물레이터

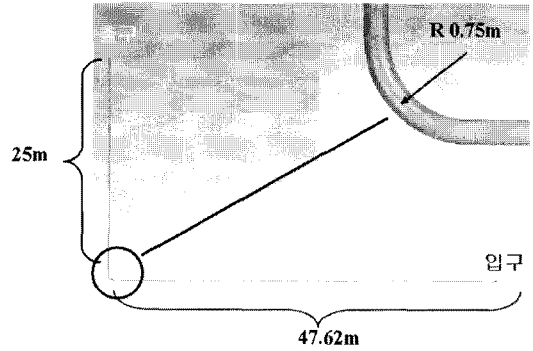
그림 1은 국내 모 아파트 단지의 설계 시에 사용한 생활폐기물 이송관로의 관로 배치도를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 이송관로는 직관부를 비롯하여 곡관, 분기관 및 경사관 등으로 매우 다양한 형상을 갖고 있다. 이러한 다양한 형상을 갖는 관로에서 공기 및 쓰레기를 투입하였을 경우에 압력손실을 평가하기 위해서는 실제관을 모델화하여 압력특성을 평가할 필요가 있다.

이송관로의 압력특성 평가를 위해, 축소 모델화된 관로 시물레이터를 설계, 제작하여, 실험 및 수치해석을 통해 비교평가를 수행하였다.

1차적으로 고려한 관로 시물레이터의 전체 형상은



(a) "I" type duct



(b) "L" type duct

그림 3. 관로 이송시물레이터 시험부 형상 (I, L자관)

그림 2에 나타냈으며, 주요 구성 요소로는 공기 흡입구, 쓰레기 투입구, 이송 관로의 테스트 부 (직관 및 곡관), 분리기(cyclone), 터보 블로어 등이다. 관로의 형상에 따른 압력손실값을 분석하기 위하여, 쓰레기 투입구의 하류측에서부터 분리기의 상류측까지 시험부(test section)를 설정하여 압력 값을 측정할 수 있도록 하였다. 본 시물레이터에서의 직선관로(I자) 및 곡선관로(L자) 시험부의 길이는 각각 67.2m 및 65.6m로 하였다.

## 3. 실험 및 수치해석 방법

### 3.1 실험방법

그림 3에 나타낸 것과 같이, 직선 및 곡선관로에서의 실험은 공기흡입구 상부에 피토탐를 설치하여 반경에 따른 유속분포를 측정하여 전체 유량을 환산하였으며, 압력은 시험부 입구 및 출구, 그리고 시험부 내부에 균등한 거리 두 곳에 압력센서 및 "U 튜브"를 추가 설치하여 실시간 및 평균압력을 각 위치에서 측정하였다. 즉 압력은 총 4곳에서 측정하여 시험부에서의 압력강하 특성을 고찰한다.

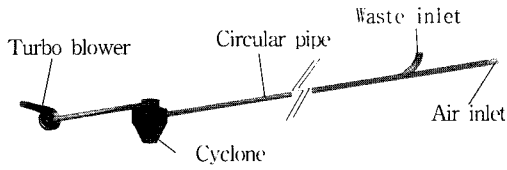
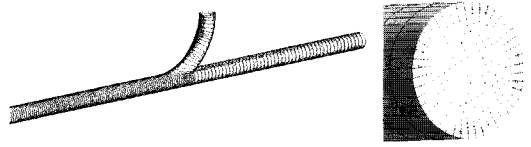
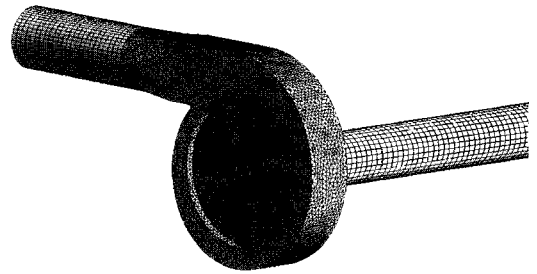


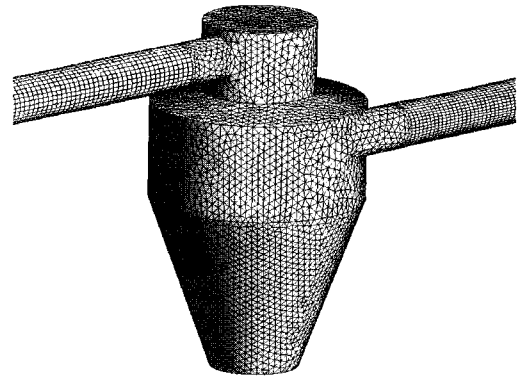
그림 4. 수치시뮬레이션 영역 (I자관)



(a) 이송관 부



(b) 송풍기 부



(c) 분리기 부

그림 6. 계산격자

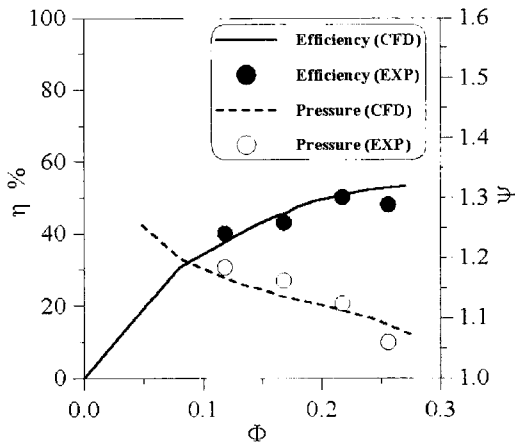


그림 5. 송풍기 성능곡선

### 3.2 수치해석 영역/ 방법

수치해석에 의한 관로 내부의 유동장 평가는 직선관로(I자) 및 곡선관로(L자)에서 각각 실시하였다. 즉 생활폐기물 관로이송 시스템 구성요소 중에서 핵심부품인 쓰레기 투입구, 공기 흡입구, 이송관로, 원심분리기 그리고 송풍기로 구성하였으며, 전체 형상을 그림 4에 나타내었다. 직선관의 내경은 204.7mm 이며, 전체 관로 길이는 약 80m이다.

그림 5는 송풍기의 설계사양인 임펠러 회전 각속도가 3550 rpm일 때의 성능곡선을 나타낸다.

쓰레기 이송관로 및 요소부품에 대한 유동장 특성과 압력손실 등을 관찰하기 위하여 상용 소프트웨어인 CFX를 사용하였다. CFX는 Pressure Based AMG Coupled Solver를 사용하여, 모든 Mach수에 대한 해석을 하나의 Solver로 수행하는 해석 코드이다. 비압축성 삼차원 정상유동에 대한 연속방정식과 Reynolds-Averaged Navier-Stokes 방정식등의 지배방정식은 유한체적법으로 이산화되며, 대류항과 확산항의 이산화

방법으로는 각각 수정된 상류차분기법과 중심차분법이 사용되었다. 난류모델로는  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다.

수치해석에 사용된 격자는 그림 6에서 보는 것과 같이 쓰레기 투입구, 공기 흡입구와 원형단면의 직선관로에 대해서는 O-grid Hexa mesh를, 송풍기와 원심분리기에 대해서는 Tetra prism mesh를 사용하였다. 본 관로이송 시스템에 사용된 전체 격자수는 약 120만 개 이다.

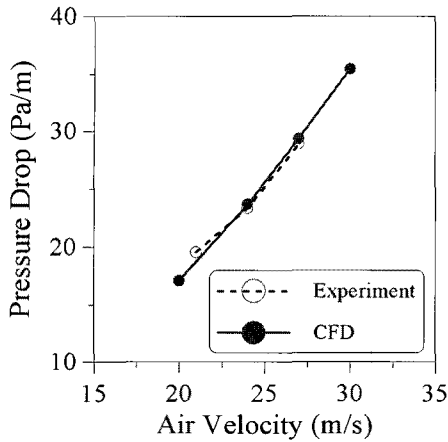


그림 7. 유속에 따른 관로내의 압력손실

경계조건으로는 공기 흡입구와 송풍기의 출구부에서는 상대압력 조건을, 직선관로의 관벽과 쓰레기 분리기 내부에 대해서는 No-Slip조건을 적용하였다.

## 4. 결과 및 분석

### 4.1 관로 내 압력손실 평가

수치해석의 타당성을 검토하기 위하여 관로 시뮬레이터에서 쓰레기를 투입하지 않고 공기만을 이송하였을 경우에 관로 내에서 발생하는 압력 손실 값을 측정하고 수치해석 결과와 비교하였다. 그림 7에서 보는 것과 같이 통상의 공기이송속도인 27 m/s를 진후하는 이송속도 범위에서 공기의 이송속도에 따른 단위 길이당 압력강하 값은 실험값과 수치해석 결과 모두에서 잘 일치함을 알 수 있다.

### 4.2 쓰레기 관로이송에 대한 수치평가

관로 시뮬레이터에서 쓰레기가 공기와 함께 흡입되는 경우의 압력 손실의 증가 현상을 모사하기 위한 적절한 유동 계산 조건을 설정하기 위하여, 실제 실험 조건, 쓰레기 투입 시간 등의 실험 결과를 이용하여, 쓰레기의 성상 조건 및 분포 길이를 결정하였다. 본 케이스에서는 공기만의 흐름에 비해 쓰레기가 투입된 경우에는 압력 강하가 공기단독에 비하여 30% 증가 되는 조건으로 설정하였으며, 표 1에 계산조건을 나타내었다.

표 1. 쓰레기 투입 시의 계산조건

계산스펙	공기온도	섭씨 25 도
	쓰레기 성상	지름 20 mm: 10 % 지름 10 mm: 20 % 지름 5 mm: 70 %
경계조건	관 입구 경계조건	상대압력: 0
	관 출구 경계조건	유속(= 27 m/s)
	관로벽면	No Slip 조건

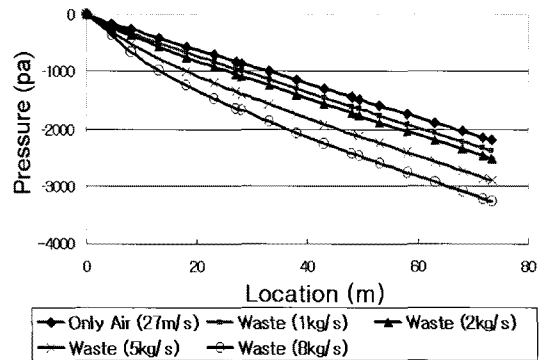


그림 8. 압력손실 (I type duct)

그림 8은 직선관로에서의 관로 시뮬레이터의 시험부의 입구에서부터 거리에 따른 압력값을 나타낸다. 그림에서 위치가 0m인 경우는 시험부의 입구를 의미한다. 그림에는 각 관로에서의 공기만을 이송하였을 경우와 투입 쓰레기의 질량유량을 변수로 하여 압력 손실분포를 나타내었다. 즉 관로 유속에 대하여 공기 단독 및 4 종류의 서로 다른 질량유량조건에서 쓰레기가 투입되었을 경우의 투입구부터의 압력강하를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 거리에 따른 압력강하는 대체로 선형적으로 나타나고 있으나 질량유량이 증가 할수록 입구영역에서 쓰레기입자가 관벽과의 충돌이 증가하여 압력강하의 기울기가 상대적으로 크게 됨을 알 수 있다.

### 4.3 쓰레기의 비정상 거동에 의한 수치평가

관로 시뮬레이터 내의 실제 쓰레기의 거동은 비정상(unsteady) 상태이기에, 정상상태로 가정하고 평가하려면 수치적인 가정이 많이 필요하게 된다.

표 2 쓰레기 질량유량에 따른 압력손실

	Input condition		Results (Pressure drop)		
	Mass flow (kg/s)	Injection time (sec)	Steady (mean value)	Transient (peak value)	Steady/Transient
1	2.0	0.5	2237	2143	0.96
2	5.0	0.5	2245	2319	0.91
3	8.0	0.5	2853	2497	0.88

표 3 쓰레기 투입시간에 따른 압력손실

	Input condition		Results (Pressure drop)		
	Mass flow (kg/s)	Injection time (sec)	Steady (mean value)	Transient (peak value)	Steady/Transient
A	5.0	0.5	2245	2319	0.91
B	5.0	1.0		2438	0.96
C	5.0	1.5		2500	0.98

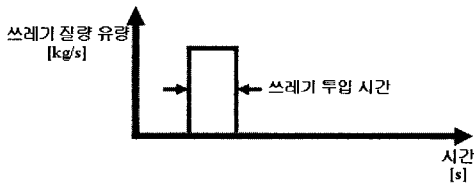


그림 9. Transient 계산을 위한 쓰레기 투입조건

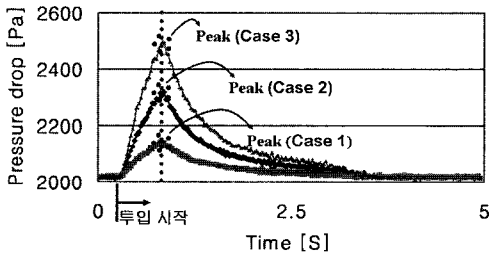


그림 10 쓰레기 질량유량에 따른 압력손실

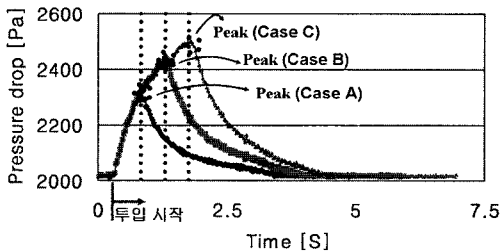


그림 11 쓰레기 투입시간에 따른 압력손실

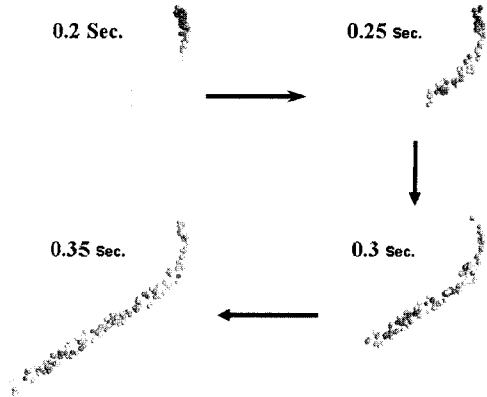


그림 12 쓰레기 거동

Transient계산을 위하여 그림 9에서 나타낸 것과 같이, 쓰레기 투입구에서 일정시간의 투입시간과 질량 유량을 입력변수로 설정하였다. 쓰레기의 투입시간 및 쓰레기 투입 질량유량은 각각 3 가지씩 변화시켜 가면서 수치해석하였으며, 입력조건과 계산결과인 압력손실 값은 표 2 및 3에 각각 나타내었다.

표 2에서서는 동일한 투입시간에 대하여 질량유량을 3 가지로 가정하고 transient계산을 수행한 결과와 정상해석결과를 비교하여 나타내고 있다. 그림 10에서 알 수 있듯이, 쓰레기 투입시간이 동일하면 최고 압력손실값을 갖는 시간이 모두 동일함을 알 수 있다.

표 3에서서는 동일한 질량유량에 대하여 쓰레기 투입시간을 3 가지로 가정하고 transient계산을 수행한 결과와 정상해석결과를 비교하여 나타내고 있다. 이 경우에는 그림 11에서 나타냈듯이, 쓰레기 투입시간이 길어질수록 최고 압력손실값을 나타내는 시간이 지연되는 것을 알 수 있다.

그림 12는 쓰레기 투입 질량유량이 8kg/s이고 투입시간이 0.5초인 경우의 쓰레기 입자 거동을 시간별로 나타낸 것이다.

#### 4.4 관로크기 및 형상에 따른 압력손실 특성

그림 1에 나타냈듯이 실제 생활폐기물 관로는 다양한 형상과 직경을 가지며, 각 경우에 대하여 압력손실의 DB작업은 중요하다.

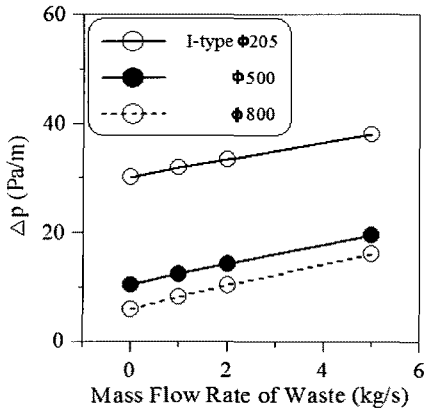


그림 13 쓰레기 질량유량/관경에 따른 압력손실

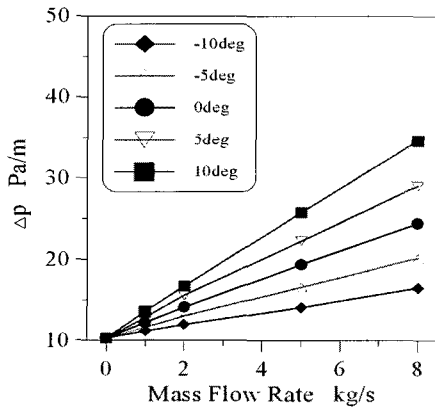


그림 14 직관에서의 경사각에 따른 압력손실

그림 13은 관로이송 시뮬레이터의 직선관로에 대해 관의 내경이 205, 500, 800 mm일 때 쓰레기 투입량에 대한 단위길이 당 압력손실을 나타낸 것이다. 여기서 쓰레기의 질량유량이 0인 것은 공기만 이송되는 경우를 의미하며, 횡축의 수치는 관의 내경이 205 mm인 경우를 기준으로 나타냈다. 관 내경이 500, 800 mm 일 때는 기준관인 205 mm 관의 경우와 같은 밀도만큼의 쓰레기가 투입되도록 쓰레기 질량유량 값을 보정하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 단위길이 당 압력손실 값은 쓰레기의 투입량에 비례하고 관의 직경에는 반비례하는 것을 알 수 있다.

그림 14는 직선관로가 수평면에 대해 일정한 각도로 기울어진 경우에 쓰레기 투입량에 대한 압력손실을 나타낸 것이다. 수평한 관과 함께  $\pm 5^\circ$ ,  $\pm 10^\circ$ 의 기울어진 관에 대해서 압력강하 특성을 비교를 하였다.

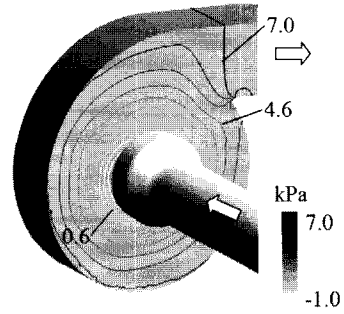


그림 15 송풍기 케이싱부 압력분포 (3550 rpm, contour intervals = 0.8 kPa)

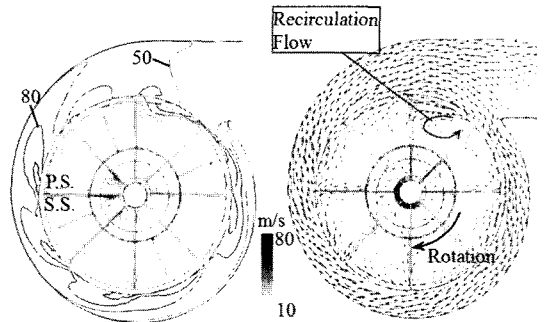


그림 16 송풍기 내부 속도분포 (3550 rpm, contour intervals = 10 m/s)

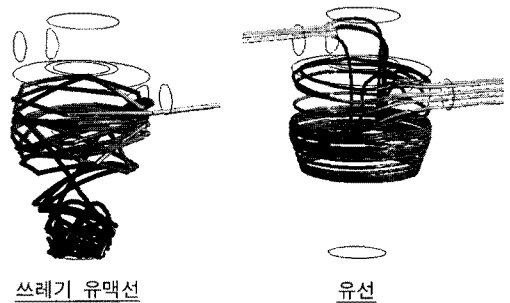


그림 17 분리기 내부유동

그림에서 보는 바와 같이 수평한 관을 기준으로 상승각이 클수록 압력손실이 증가한다. 또한 쓰레기 질량유량이 0일 때, 즉 공기만 이송될 때는 기울어진 정도에 따라 압력손실의 차이가 없지만, 쓰레기 질량유량이 증가할수록 관로의 기울기에 대해 압력손실 값이 큰 증가를 보이는 것을 알 수 있다.

#### 4.5 송풍기 및 분리기 내부유동 특성

쓰레기 관로이송 시스템의 수치해석을 수행함에 있어서 관로 내에 유동을 발생시키고, 쓰레기를 이송할 수 있는 부압을 생성하는 것이 송풍기의 역할이다. 즉 송풍기 임펠러를 회전시킴으로 인해서 관로 내에 일정한 유동속도를 유지할 수가 있다.

그림 15는 쓰레기 분리기와 연결된 송풍기 케이싱의 압력분포를 나타낸다. 송풍기 케이싱 압력은 송풍기에 의해 상류의 부압이 회복됨을 알 수 있다.

그림 16은 송풍기 임펠러부의 단면에서 속도분포와 속도벡터를 나타낸다. 임펠러의 회전속도는 설계값인 3550 rpm으로 하였다. 그림에서 속도벡터를 보면 송풍기의 출구부 쪽에서 임펠러의 날개와 날개 사이에 재순환유동(Recirculation Flow)이 나타나는 것을 볼 수 있다.

그림 17은 쓰레기 분리기에서의 유동특성을 나타낸 그림이다. 쓰레기를 투입했을 경우에 쓰레기 입자는 이송관로를 지나서 쓰레기 분리기를 지날 때 중력에 의해 공기와 분리되어 쓰레기 분리기의 하단에 쌓이게 된다. 이때 공기는 쓰레기 분리기의 출구를 지나 송풍기의 입구방향으로 이동함을 알 수 있다.

#### 5. 결론

본 원고에서는 송풍기의 부압에 의한 생활폐기물 공기이송 시스템 중에서 공기 및 쓰레기가 관로이송에 의해 발생하는 압력손실을 관로 시뮬레이터를 이용하여 실험 및 수치적으로 평가한 사례에 대하여 소

개하였다.

실제 시스템에서는 다양한 현상의 관로와 압력조건이 필요하기에, 보다 정확한 설계를 위해서는 다양한 관로 형상 및 유동조건에 대한 압력손실 평가의 DB 구축이 중요하다.

#### 참고문헌

- (1) 장춘만, 최명덕, 2006, "관로시뮬레이터를 이용한 쓰레기 유동특성 연구," Proceedings of The Fourth National Congress on Fluids Engineering, pp. 747~750.
- (2) Jang, C-M, Kim, D-W, and Lee, S-Y, 2007, "Performance Characteristics of Turbo Blower in a Refuse Collecting System According to Operation Conditions," AICFM9-264, pp. 1~6.
- (3) 장춘만, 김동우, 최명덕, 2007, "관로이송 시뮬레이터를 이용한 요소부품의 특성 평가," 대한기계학회 추계학술대회 논문집.
- (4) 김동우, 장춘만, 최명덕, 2008, "쓰레기 관로이송 시스템에서의 다양한 관로형상에 대한 압력손실 평가," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집.
- (5) 장춘만, 이상윤, 서상호, 2007, "쓰레기 관로이송 시스템의 관로 압력강하 평가," 유체기계저널 10 권6호, pp. 55~60.
- (6) 장춘만, 2006, "쓰레기관로 이송시스템의 터보블로어 용량산정을 위한 연구사례," 건설기술정보 (한국건설기술연구원), 275호, pp. 26~31.
- (7) CFX-10 Manual, 2005