◎ 논 문

관로 형상에 따른 생활폐기물 이송시스템의 유동특성

장춘만*

Flow Characteristics of Piping System Having Various Shapes in Refuse Collecting System

Choon-Man Jang*

Key Words : Refuse collecting system(생활폐기물 이송시스템), Piping system(이송관), Cyclone(분리기), Turbo blower(터보 블로어), Numerical simulation(수치해석), Pressure loss(압력손실)

ABSTRACT

This paper describes flow characteristics in a piping system having various duct shapes on refuse collecting system. A simulator for the refuse collecting system is designed to analyze the flow characteristics in the piping system. The simulator consists of an air intake, a waste chute, circular duct having various shapes, cyclone and turbo blower. The simulator has four different duct shapes: straight, curved, inclined and Y-shaped ducts. Three-dimensional Navier-Stokes analysis is introduced to analyze the pressure loss in the piping system. Throughout the numerical simulation, pressure loss obtained by numerical simulation has a good agreement with the results of experimental measurements. The selected length of curved and Y-ducts for the pressure loss is determined using pressure distributions on the duct. Flow and pressure characteristics in the piping system of the simulator are evaluated by numerical simulation and discussed in detail.

1. 서 론

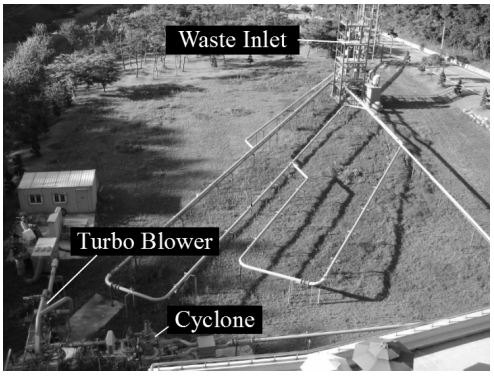
최근 들어 가정에서 배출되는 일반 및 음식물 쓰레기인 생활폐기물을 지하에 매설한 관로를 이용하여 공동주택의 쓰레기 투입구에서 집하장까지 자동으로 이송시키는 생활폐기물 이송시스템이 신도시를 중심으로 활발히 설치되고 있다. 이 시스템은 쓰레기 처리의 편리성과 주거환경의 개선 및 경제성 측면에서 각광을 받고 있다.

생활폐기물 이송시스템은 쓰레기 투입구, 공기흡입구, 이송관, 중앙 집하장, 분리기 및 터보 블로어 등으로 구성된다.

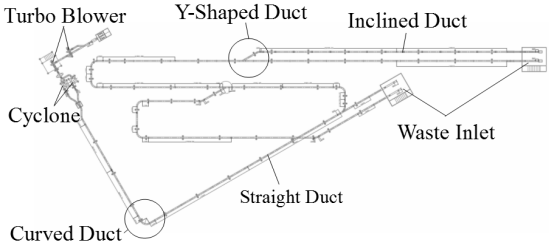
생활폐기물 이송시스템의 이송관은 수백에서 수천 개의 쓰레기 투입구가 집하장에 연결되어 있으며, 각각의 투입구로 부터 주관(main pipe)으로 분기되어 설치된다. 또한 이송관은 설치지형에 따라 직관, 곡관, 경사관 등의 다양한 연결관 형상을 갖으며, 생활폐기물 이송시스템의 전체 압력손실 평가에도 연결관 형상의 특성을 고려하여야한다.[1),2)] 특히 쓰레기 형상을 모델링하여 곡관부가 106 m인 단축관을 이용하여 압력특성을 고찰하였다.[2)] 이송관 형상특성을 고려한 이송관 압력손실의 데이터베이스(DB) 구축은 실제 관로에서 압력손실 값을 정확하게 예측하는데 효율적이다.

본 연구에서는 생활폐기물 이송관의 형상에 따른 압력손실을 평가하기 위하여 다양한 관로형상을 갖는 관로이송 시뮬레이터를 제작, 실험 및 수치해석 방법으로 압력손실 특성을 분석하였다.

* 한국건설기술연구원 설비플랜트연구실
E-mail : jangcm@kict.re.kr



(a) Perspective view



(b) Top view

Fig. 1 Simulator for refuse collecting system

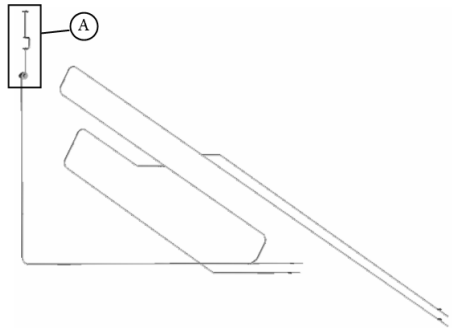
2. 관로이송 시뮬레이터

본 연구에서는 통상 이송관 직경이 500-600 mm이고, 관길이가 수천 m에 이르는 생활폐기물 이송 시스템을 축소 설계한 관로이송 시뮬레이터를 도입하였다. 본 관로이송 시뮬레이터의 주요 구성품은 쓰레기 투입구, 이송관, 분리기 및 2단 직렬연결 원심송풍기이며, 전체 구성은 Fig. 1에 나타내었다.

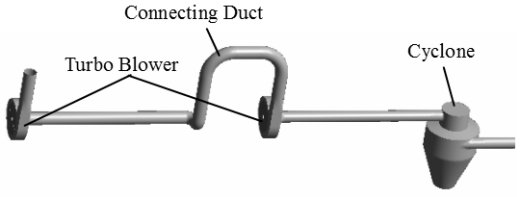
본 실험용 시뮬레이터는 2곳의 쓰레기 투입 스테이션에 일반 및 음식물쓰레기 투입구가 각각 설치되어 있으며, 이송관 말단부에는 관로전환기를 설치하여 일반 및 음식물쓰레기가 각각의 분리기에서 분리되도록 하였다. 또한 2 단 직렬연결 터보블로어는 이송관 내부에서 최고 35 m/s의 유속이 발생할 수 있도록 인버터제어 모터를 설치하였다. 시뮬레이터 이송관의 내부 직경은 204.7 mm이며, 전체 관로길이는 590m이다. 이송관은 직관부, 곡관부, 경사관부 및 합류관(Y-관)부의 특성을 평가할 수 있도록 설계되었다.

3. 수치해석 방법 및 경계조건

본 연구에서는 Fig. 1의 시뮬레이터의 전체 구성도를 포함하는 영역을 수치 계산영역으로 하여 수치해석 평가를 수행하였다. 즉 관로이송 시뮬레이터는 쓰레기 투입구, 공기 흡입구,

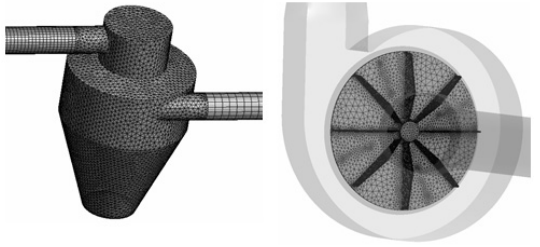


(a) Perspective view



(b) Details of "A"

Fig. 2 Computational domain of simulator



(a) Cyclone (b) Turbo blower

Fig. 3 Computational grids

분리기 및 2대의 직렬연결 터보 블로어로 구성되어 있으며, 수치평가 시에는 Fig. 2에 나타냈듯이 이러한 모든 요소부품을 포함하여 수행하였다.

관로이송 시뮬레이터 이송관 내에서 유동 특성과 압력손실을 평가하기 위하여 상용 소프트웨어인 CFX-11[3]을 사용하였다. CFX-11은 Pressure Based AMG(Algebraic Multigrid) 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 수행

하였다.[2]

계산격자는 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 원관 단면에 O-Grid를, 전체 이송관에 대해서는 Hexahedral Mesh를 사용하였다. 또한 터보블로어 영역에서는 회전하는 터보블로어 임펠러와 정지하는 케이싱의 복잡한 형상과 경계조건을 원활히 설정하기 위하여 임펠러부와 케이싱부로 분리하여 각각에 계산격자를 형성시켰다.

Fig. 3에서 나타냈듯이, 터보블로어 임펠러 및 케이싱 내부는 사면체를 이용한 비정열격자로 구성하였다. 본 관로이송 시뮬레이터의 수치해석에 사용한 전체 노드(node) 수는 1,500,000 개이다.

수치해석 경계조건으로는 입구 및 출구에서는 대기압 조건을, 2대의 터보블로어 임펠러는 요구 유속에 부합하는 임펠러 회전수를 각각의 블로어에 설정하였다. 예를 들어 이송관의 유속을 27 m/s로 유지하기 위해서는 모터 회전수를 40Hz에 해당하는 2450 rpm으로 설정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 압력손실 계산 타당성 검토

관로이송 시뮬레이터를 이용한 압력손실 측정과 이송관 내부의 유속을 측정하기 위하여 압력센서 및 피토관을 사용하였다.

수치계산에 앞서 계산격자의 노드수에 따른 압력손실의 특성을 실험값과 비교하기 위하여 계산격자수에 따른 압력손실 특성을 비교, 평가하였다. 압력의 비교를 위하여, Fig. 4에서와 같이 직관과 곡관이 혼재하는 라인(Fig. 4에서 굵은 직선부분) 중 4곳의 압력 체크 포인트에서 측정한 압력과 수치계산으로 통해 구한 압력을 비교하였다. 즉, 측정점 P1은 공기 흡입구부터 43.95 m 떨어진 거리에 위치하며, P2, P3 및 P4는 각각 47.52 m, 56.15 m 및 64.83 m 지점에 위치한다.

Fig. 5에서는 이송관 내부유속이 27 m/s인 조건에서 세 종류의 계산격자 노드수에 대한 압력특성을 실험값과 비교하여 나타내었다. Fig. 5에서 노드수는 분리기와 터보 블로어의 격자를 제외하고, 이송관에서의 계산격자수 만을 의미한다. 세 종류의 계산격자에 따른 압력은 전체영역에서 최대 2% 이내의 오차를 나타내며, 실험값과도 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 6은 이송관 내부유속이 25 및 29 m/s인 경우의 실험값과 수치해석 값의 압력분포를 각각 비교한 것이다. 이 유속범위는 일반적인 이송관로의 사용유속범위이며, 그림에서와 같이 수치해석에서 구한 압력값이 실험값과 잘 일치함을 알 수 있다.

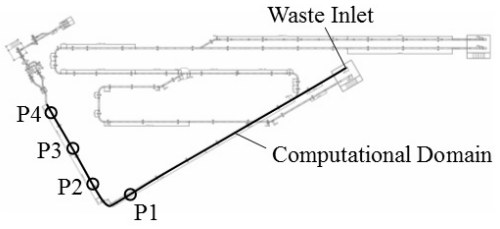


Fig. 4 Measuring positions of pressure for the validation of numerical simulation

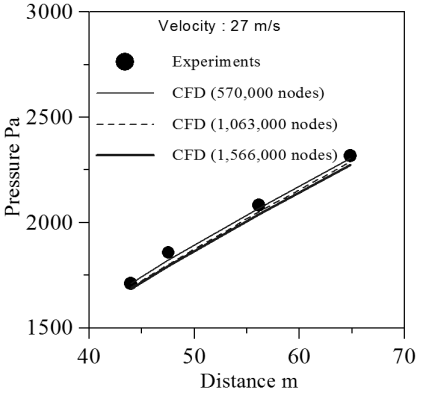
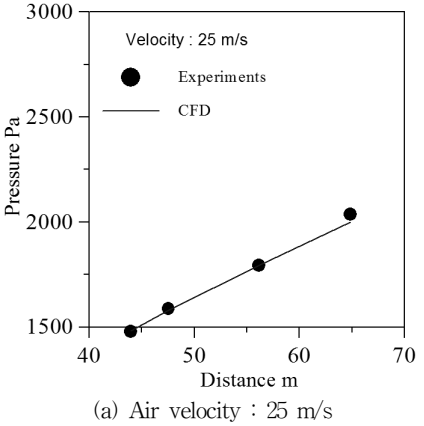


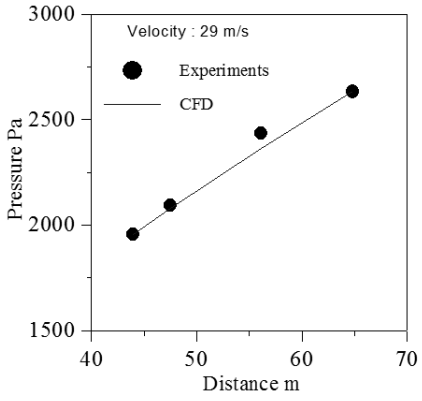
Fig. 5 Comparisons of pressure loss between experiments and numerical simulation according to node numbers (except the node number of cyclone and turbo blower)

4.2 곡관 및 직관부에서의 압력특성

관로이송 시뮬레이터의 곡관에서의 압력손실 특성을 검토하기 위하여 Fig. 4의 곡관부분을 이용하였다.



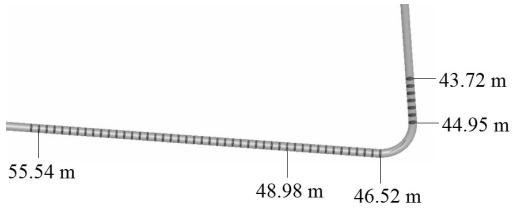
(a) Air velocity : 25 m/s



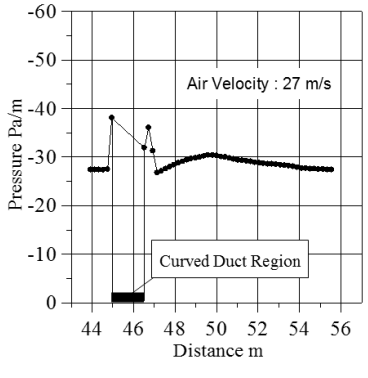
(b) Air velocity : 29 m/s

Fig. 6 Comparisons of pressure loss between experiments and numerical simulation (except the node number of cyclone and turbo blower)

Fig. 7(a)에 나타냈듯이 곡관부 주위에 총 52개 위치에서 압력을 측정하였다. Fig. 7(a)에서 압력위치 옆의 숫자는 관 입구에서부터에서의 거리를 나타낸다. 본 계산에서 사용한 곡관부의 곡률반경은 1000 mm이며, 관 내경은 204.5 mm이다. 각 압력측정 위치에서 단위 길이당 압력분포를 Fig. 7(b)에 나타내었다. 그림에서 굵은 실선 영역은 곡관부분 영역임을 의미한다.



(a) Pressure check positions



(b) Pressure distributions

Fig. 7 Pressure distributions along curved duct

Fig. 7(b)에서 알 수 있듯이, 곡관부 영역에서 압력값이 급격히 상승함을 알 수 있다. 즉 곡관부 후류 영역에서는 일시적으로 감소하다가 재상승 후에 이송관 직경의 44배의 하류까지 서서히 압력이 감소한다.

압력손실의 DB구축 시, 곡관부의 압력은 곡관부 상류측으로 1D(D: 이송관 내경)에서 하류측 3D까지로 하였으며, 이 영역에서는 압력손실의 변동이 2% 이내에서 안정된 값을 갖는다.

Fig. 8은 곡관 하류단면(Fig. 7(a)에서 46.52 m 지점)에서의 2차 흐름 속도벡터와 단면유속 분포를 나타낸다. 즉 압력손실 분포가 상대적으로 큰 곡관 하류에는 곡관 내측방향으로 강한 2차 흐름이 존재하며, 곡률안쪽방향으로 속도분포의 편심이 발생함을 알 수 있다.

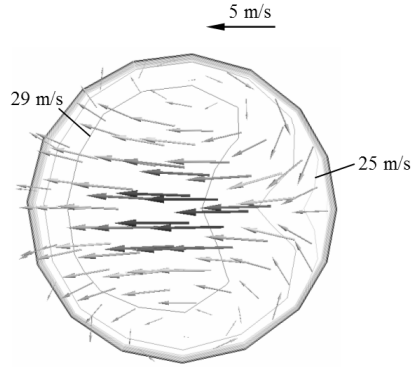


Fig. 8 Velocity contours (contour interval : 2 m/s) and secondary velocity vectors at the length of 46.52 m from waste inlet

Fig. 9는 곡관에서 공기 이송속도에 대한 압력손실을 나타낸다. 유속 및 관 조도가 증가할수록 압력손실은 증가함을 알 수 있다.

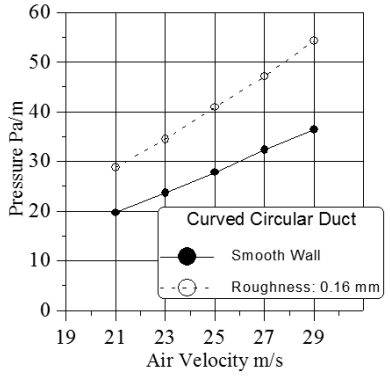


Fig. 9 Pressure loss for curved circular duct

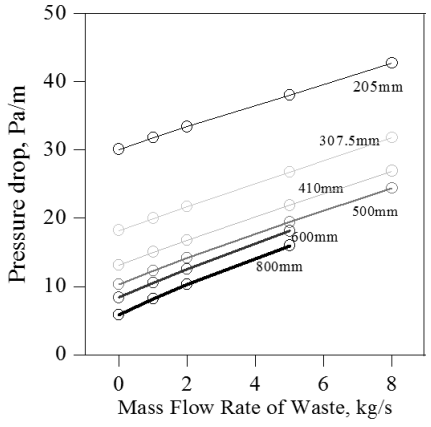


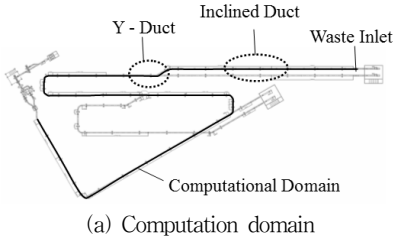
Fig. 10 Pressure loss for straight duct according to mass flow rate of waste (Vair = 27.5m/s)

Fig. 10은 직관에서 관경과 쓰레기 질량유량에 따른 압력손실 분포를 나타낸다. Fig. 10의 횡축에 나타낸 질량유량 0는 공기 단독에 대한 압력손실을 의미한다. 질량유량에 대한 쓰레기의 모델링 시에 쓰레기 밀도는 675 kg/m^3 으로 하였다.[2] 관경이 400 mm 이상에서는 관경에 따른 압력손실이 작음을 알 수 있다.

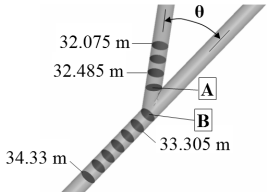
4.3 합류관(Y자관) 및 경사관 압력특성

관로이송 시뮬레이터의 합류관의 압력손실 특성은 Fig. 11(a)의 굵은실선 부분의 관로를 이용하여 해석하였다. Fig. 11(b)에서 압력체크 위치 옆의 숫자는 공기흡입구에서의 길이를 의미하며, 합류관 사이의 각도(θ)는 30도이다. 먼저 합류관부 전후에서의 압력특성을 검토하기 위하여, 합류관 상류측은 상류측 끝단면("A")에서 3D까지를, 하류측은 하류측 시작면("B")에서 6D까지 영역을 설정하였다.

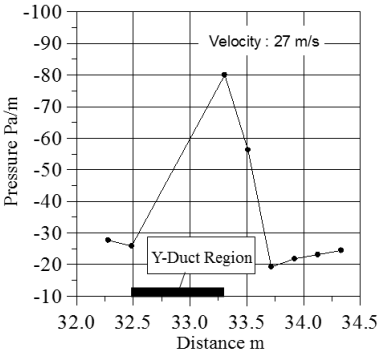
Fig. 11(c) 는 구간별 단위길이 당 압력손실을 나타낸다. 그림에서 합류관 "A" 및 "B" 단면 전후의 1D 영역을 합류관 영역으로 하여, 굵은 실선으로 나타내었다.



(a) Computation domain



(b) Pressure check positions



(c) Pressure distributions

Fig. 11 Pressure distributions along Y- duct

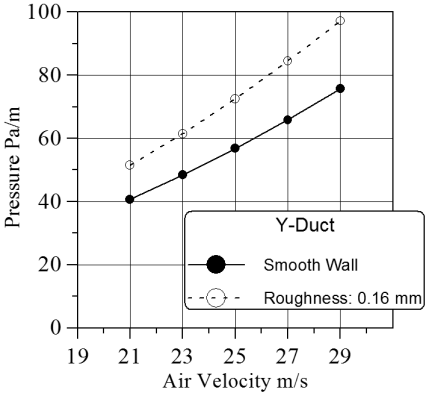


Fig. 12 Pressure loss for Y- duct

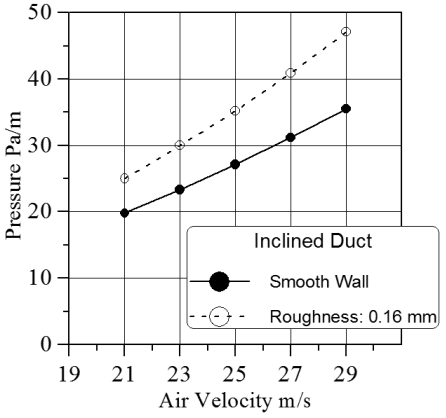


Fig. 13 Pressure loss for inclined duct

합류관에서의 압력손실은 합류관 영역을 지나면서 큰 값을 갖으며, 합류관 하류 첫 단면("B")에서부터 5D까지는 압력이 상대적으로 직관보다 크게 나타남을 알 수 있다. 합류관부의 압력은 곡관부와 같이 합류관부 상류측 1D에서 하류측 3D까지로 하여 정리하면 큰 오차 없이 데이터베이스를 확보할 수 있다.

Fig. 12는 합류관부의 광역 관로이송 시뮬레이터에서 유속 및 조도에 따른 압력특성을 나타낸다. 합류관의 분기점 상류 1D에서 하류측 3D위치에서의 압력차이며, 유속이 증가할 수록 조도에 대한 압력차가 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 13은 관로이송 시뮬레이터에서 유속 및 조도에 따른 경사관부의 압력특성을 나타낸다. 경사관부는 Fig. 11(a)에 나타냈으며, 본 시뮬레이터 경사관의 각도는 1.6도이다.

5. 결 론

본 연구에서는 생활폐기물 이송관의 형상에 따른 압력손실을 평가하기 위하여 다양한 관로형상을 갖는 관로이송 시뮬레이터를 제작, 실험 및 수치해석 방법으로 압력손실 특성과 내부유동장 특성을 상세히 고찰하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 세 종류의 계산격자에 따른 압력손실의 비교평가를 통하여, 생활폐기물 이송관의 압력손실 해석 시에는 격자수가 570,000 노드 이상으로 하면 전체영역에서 최대 2% 이내의 오차를 나타내며, 실험값과도 잘 일치함을 알 수 있었다.

2) 직관의 압력손실은 투입쓰레기의 질량유량의 증가와 함께 선형적으로 증가하며, 관경이 400 mm이상에서는 관경에 따른 압력손실이 상대적으로 작음을 알 수 있었다.

3) 이송관의 곡관부에서 압력손실의 DB구축 시, 곡관부의 압력은 곡관부 상류측으로 1D(D: 이송관 내경)에서 하류측 3D까지로 설정하여 평가하면, 압력손실의 변동이 2% 이내에서 안정된 값을 갖음을 알 수 있었다.

4) 합류관(Y자관)부의 압력손실도 곡관부와 같이 합류관부 상류측 1D에서 하류측 3D까지로 하여 정리하면 관경에 따라 큰 오차 없이 데이터베이스를 확보할 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 지원을 받아서 수행하였습니다. 공동 연구기관인 (주)신성엔지니어링에도 감사드립니다.

참고문헌

(1) Jang, C.-M., Kim D.-W., and Lee, S.-Y., 2008, "Performance Characteristics of Turbo Blower in a Refuse Collecting System According to Operation Conditions," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 22, pp. 1896~1901.
(2) 장춘만, 이상윤, 서상호, 2007, "쓰레기 관로이송 시스템의 관로 압력강하 평가방법," 유체기계저널, Vol. 10, No. 4, pp. 55~60.
(3) CFX-11 Manual, 2007년.