

CT15)

샘플링 싸이클론의 성능해석

Performance Analysis of a Sampling Cyclone

김철한 · 이진원

포항공과대학교 환경공학부

1. 서론

싸이클론에 관한 연구는 그 내부의 복잡한 유동특성으로 인하여 실험에 의존하는 부분적인 모델이 있을 뿐, 완전한 예측모델이 정립되어 있지 않은 상태이며, 최근 들어 컴퓨터의 눈부신 발달과 함께 상용 패키지를 이용한 전산유체역학(CFD)이 값싸고 효율적인 방법으로 대두되고 있으나, 이 또한 부분적으로만 성공을 거두었다(Griffiths and Boysan, 1996). 그러나, 최근 벽면 경계층 내의 입자 운동 특성을 고려한 새로운 모델이 제시되어 Stairmand식의 산업용 싸이클론에 대하여 집진효율 예측을 훌륭히 수행해 내었는바(Kim and Lee, 1997), 본 연구에서는 이를 샘플링 싸이클론에 적용하여, 기존의 여러 모델과 경계층 내의 입자운동 특성을 고려한 새로운 모델에 의한 결과를 비교하여 그 타당성을 검증해 보았다.

2. 연구 방법

싸이클론 내부에서 입자제거의 원동력인 원심력을 일으키는 접선방향의 속도는 원통형 위쪽 출구의 연장선을 경계로 하여 반경방향 위치 R 에 따라 증가하다가, $R^n(n=0.5\sim 0.9)$ 의 비율로 감소한다. 이러한 경향은 싸이클론 외벽근처의 경계층 영역에 도달할 때까지 유지되다가 경계층 영역에서 급격히 0의 값으로 감소하며, 경계층 영역 내에서 원심력은 접선속도의 제곱에 비례하므로 더욱 급격히 감소한다. 한편 난류특성은 경계층 내에서 동적침투를 주어 입자의 집진에 중요한 역할을 하므로, 이러한 경계층과 난류특성을 적절히 고려하기 위해서 싸이클론을 중심부와 경계층 영역으로 구분하여 모델링을 실시하였다.

중심부에서 반경방향의 속도구배는 완만하므로 입자의 평균계속은 입자의 이동속도가 그 지점의 속도에 대한 정상이동속도와 같다는 가정 하에 경계층 영역에 유입되는 평균입자유속은 난류 확산에 관계없이 정확히 예측된다고 보았다.

경계층 영역 내에서의 입자의 집진속도는 원심력에 의한 항과 난류확산에 의한 항의 합으로 나타낼 수 있으며 원심력에 의한 집진속도는 입자의 비평형상태의 운동에 의하여 유발되므로 난류에 의한 확산과 원심력을 동시에 고려하여 Monte-Carlo법과 Lagrangian법을 사용하여 추정될 수 있다. 그러나 이 방법은 수많은 입자의 궤적을 계산해야하므로 많은 시간과 노력이 필요하며 조건이 바뀔 때마다 계산을 반복해야하는 단점이 있으므로, 본 연구에서는 수많은 입자운동의 모사를 통하지 않고 원심력에 의한 입자의 집진속도를 경계층 내의 적당한 위치 y_c^+ 에서의 평형이동속도로 가정하는 단순한 모델을 사용하였다. y_c^+ 는 무차원 관성특성시간 τ^+ 에 선형적으로 비례하면서 무차원 경계층 영역두께 δ^+ 보다는 작은 값으로 가정하였다($y_c^+ = \min(C_y \tau^+, \delta^+)$). 싸이클론처럼 선회하면서 하강하는 유동장에 대해 경계층 내에서의 정확한 속도분포는 알려져 있지 않지만, 회전 성분이 없는 평판이나 관내유동에서의 경계층 구조와는 다른 특성을 가지리라고 쉽게 예상할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 이에 대한 자세한 정보가 없으므로 잘 알려진 평판유동에서의 떠받침을 적용하여 싸이클론 내의 경계층을 묘사하였으며, 무차원 경계층 영역두께 δ^+ 값으로 평판 유동에서 널리 사용되는 30의 값을, 비례상수 C_y 값은 100을 사용하였다. 보다 자세한 내용은 경계층 효과를 고려한 모델에 관한 기존 논문(Kim and Lee, 1997)에 자세히 나와 있다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 샘플링 싸이클론에 대한 실험 결과(Kim and Lee, 1990)와 Barth(1956), Leith and Licht(1972), Iozia and Leith(1989)의 여러 실험적 모델, Griffiths and Boysan(1996)에 의한 CFD계산 결과, 그리고 경계층 특성을 고려한 모델에 의한 계산 결과를 보여주고 있으며 경계층 효과를 고려한 모델이 실험 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

그림 2는 집진 효율을 입자들이 사이클론을 빠져 나가기까지 필요한 시간과 벽면까지 이동하는데 필요한 시간의 비, $d^2 V_i$ 에 대하여 나타냈을 때, Griffiths and Boysan의 계산값을 제외한 기존의 실험적 모델들은 모두 유량에 관계없이 하나의 효율곡선으로 합쳐지는 것을 보여주고 있으며, 그림 3은 경제층 효과를 고려한 모델이 Griffiths and Boysan의 계산결과보다 이러한 집진효율 특성을 더 잘 일치하고 있음을 보여준다.

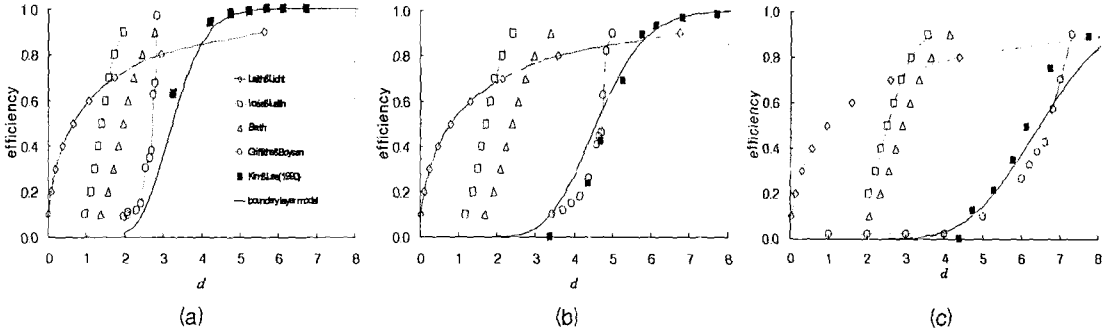


Fig. 1. Calculated and measured collection efficiencies for Kim and Lee (1990) cyclone II-1 as a function of particle size at different flowrates: (a) 18.4 lpm, (b) 12.4 lpm, (c) 8.8 lpm.

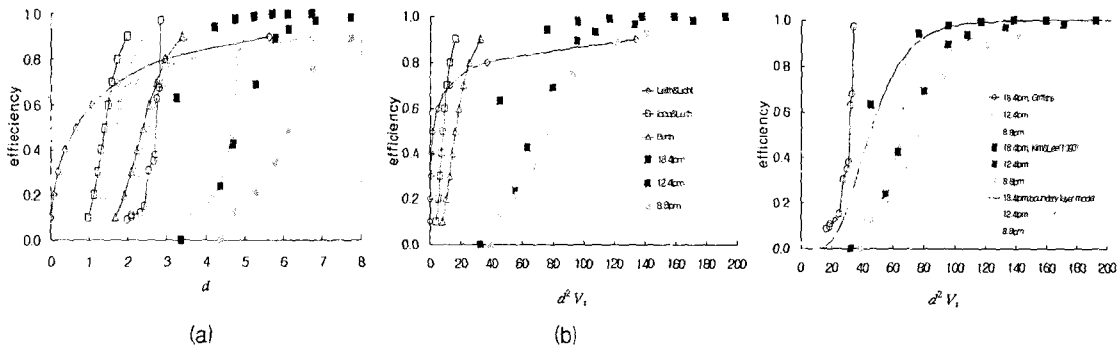


Fig. 2. Experimental data and results from other models (a) as a function of particle size, (b) as a function of $d^2 V_i$;

Fig. 3. Experimental data, results from Griffiths and Boysan's CFD and from the boundary layer characteristic model as a function of $d^2 V_i$;

참고 문헌

- Barth, W. (1956) Berechnung und Auslegung von Zyklonabscheidern auf Grund neuerer Untersuchungen, Brennst. Wärme Kraft., Vol.8, 1-9
- Griffiths, W. D. and F. Boysan (1996) Computational Fluid Dynamics (CFD) and Empirical Modelling of the Performance of a Number of Cyclone Samplers, J. Aerosol Sci., Vol.27, 281-304
- Iozia, D. L. and D. Leith (1989) Effect of Cyclone Dimensions on Gas Flow Pattern and Collection Efficiency, Aerosol Sci. Technol., Vol.10, 491-500
- Kim, J. C. and K. W. Lee (1990) Experimental Study of Particle Collection by Small Cyclone, Aerosol Sci. Technol., Vol.12, 1003-1015
- Kim, W. S. and J. W. Lee (1997) Collection efficiency Model Based on Boundary-Layer Characteristics for Cyclones, AIChE J., Vol.43, 2446-2455
- Leith, D. and W. Licht (1972) Collection Efficiency of Cyclone Type Particle Collectors-A New Theoretical Approach, AIChE Symp. Ser., Vol.68, 196-206