

PE12) 저 누드센 영역에서의 복합 유체구의 유동장

Flow Field across Multiple Fluid Sphere in the Low Knudsen Number Regime

정창훈 · ¹⁾이규원

경인여자대학 산업·환경공학부, ¹⁾광주과학기술원 환경공학과

1. 서론

대기 중 분진을 제거하는 방식으로 여과 이론을 적용할 수 있는 경우는 섬유 여과기, 입자상 여과기, 액적에 의한 습식 세정기 그리고 기포를 이용한 분진 제거 방법 등을 들 수 있다. 이러한 여과 원리를 이용한 집진 설비를 설계하는데 있어, 액적 또는 기포 주위의 유동장을 정확히 파악하는 것은 매우 중요하다. 특히, 포집구의 크기가 작아지고 화학적으로 반응성을 갖는 고온의 함진가스가 유입되는 경우 및 저압에서 운영되는 경우에 누드센수(Knudsen number)의 영향을 무시할 수 없는데 이러한 영역을 저 누드센 영역(low Knudsen number regime)이라고 한다 (Lee et al., 1978). 본 연구에서는 Jung and Lee(1998)의 유체 포집구에 관한 유동장을 저 누드센 영역으로 확대하여, 포집구 표면에서의 입자 미끄러짐을 고려하였을 경우의 유동장을 해석적으로 구하였다.

2. 유동장

셀 모델을 적용한 복합 유체구에서의 포집구 내, 외부에서의 가스의 미끄러짐을 고려한 경계조건은 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$V_r^i = V_r^o = 0, \quad V_\theta^o + C_m \frac{\lambda}{\mu^i} \sigma_{r\theta}^i = V_\theta^i + C_m \frac{\lambda}{\mu^o} \sigma_{r\theta}^o, \quad \sigma_{r\theta}^i = \sigma_{r\theta}^o \quad \text{at } r=a. \quad (1a)$$

$$V_r = V \cos \theta, \quad \omega = \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} - \frac{\partial V_r}{r \partial \theta} = 0 \quad \text{at } r=b. \quad (1b)$$

여기서 V_r 과 V_θ 는 각각 동경방향(radial)과 원주방향의 속도성분, a 는 포집구의 반경, b 는 주변 포집구의 영향을 고려한 가상의 반경, C_m 은 가스의 운동이론에 의해 제안된 미끄러짐 계수, μ 는 가스의 점성도, λ 는 가스의 평균 자유행정(mean free path)이다. 또 첨자 i 와 o 는 각각 기포의 내부와 외부, $\sigma_{r\theta}$ 는 유체구에서의 전단응력(shearing stress)을 의미한다. 만일 입자의 미끄러짐을 고려하지 않는다면, 누드센 수가 0으로 갈 것이므로, 동경방향의 경계조건은 내, 외부의 속도가 같게 된다($V_\theta^o = V_\theta^i$). 이는 유체구의 유동장을 나타낸 이전의 연구결과와 동일하다(Jung and Lee, 1998). 경계조건인 식(1a,b)을 유동장의 식(2a)에 적용하면, 유체구의 내, 외부를 흐르는 유동장은 가스의 미끄러짐효과를 고려하였을 경우, 식(2b)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi^o = \left(\frac{A}{r} + Br + Cr^2 + Dr^4 \right) \sin^2 \theta, \quad \Psi^i = (Yr^2 + Zr^4) \sin^2 \theta \quad (2a)$$

$$A = \frac{Va^3 \left[2\alpha \left(1 - 3C_m \frac{\lambda}{a} \right) + \sigma \left(5 - 2\alpha + 6\alpha C_m \frac{\lambda}{a} \right) \right]}{20 \left[R \left(1 - 3C_m \frac{\lambda}{a} \right) + \sigma \left(K + 3C_m \frac{\lambda}{a} R \right) \right]}$$

$$B = \frac{-Va \left[2 \left(1 - 3C_m \frac{\lambda}{a} \right) + 3\sigma \left(1 + 2C_m \frac{\lambda}{a} \right) \right]}{4 \left[R \left(1 - 3C_m \frac{\lambda}{a} \right) + \sigma \left(K + 3C_m \frac{\lambda}{a} R \right) \right]}$$

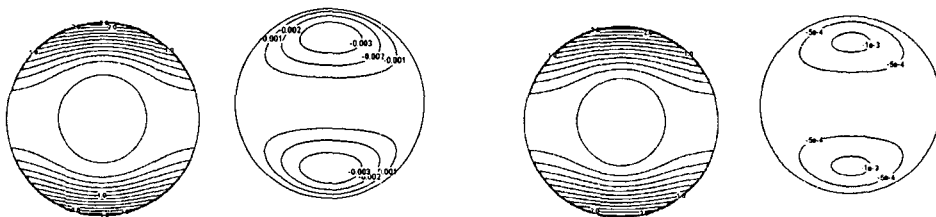
$$C = \frac{V \left[2 \left(1 - 3C_m \frac{\lambda}{a} \right) + \sigma \left(2 + \alpha + 6C_m \frac{\lambda}{a} \right) \right]}{4 \left[R \left(1 - 3C_m \frac{\lambda}{a} \right) + \sigma \left(K + 3C_m \frac{\lambda}{a} R \right) \right]}, \quad D = \frac{-Va \left[2 \left(1 - 3C_m \frac{\lambda}{a} \right) + 3\sigma \left(1 + 2C_m \frac{\lambda}{a} \right) \right]}{20a^2 \left[R \left(1 - 3C_m \frac{\lambda}{a} \right) + \sigma \left(K + 3C_m \frac{\lambda}{a} R \right) \right]}$$

$$Y = \frac{-V(1-a)}{4\left[R\left(1-3C_m\frac{\lambda}{a}\right) + \sigma\left(K+3C_m\frac{\lambda}{a}R\right)\right]}, \quad Z = \frac{V(1-a)}{4a^2\left[R\left(1-3C_m\frac{\lambda}{a}\right) + \sigma\left(K+3C_m\frac{\lambda}{a}R\right)\right]} \quad (2b)$$

여기서 σ 는 기포 내부와 외부의 점성도의 비 ($= \frac{\mu^i}{\mu^o}$)로 정의한다. 고체 포집구의 경우, 포집구 내부의 점성도는 무한대에 수렴하므로, 포집구 내부와 외부의 점성도 비(σ)는 무한대(∞)가 된다. 이 경우, 식(2)는 Lee et al.(1978)의 고체구의 유동장에 수렴됨을 알 수 있다. 입자의 미끄러짐이 고려되지 않는 연속 영역의 경우, $C_m\frac{\lambda}{a}$ 의 값은 0이 된다. 식(2)의 누드센수에 0을 대입하게 되면, 연속영역에서의 복합 유체구에서의 유동장으로 표현될 수 있다. 입자 표면에서 완전 미끄러짐(perfect slip)이 일어나는 경우, 항력과 유동장은 기포의 유동장과 동일하다. 결국 포집구 내부의 유동장은 미끄러짐의 효과를 무한대로 취하게 되면 0으로 수렴하는데, 이는 포집구 표면에서의 완전 미끄러짐에 의하여 외부 유동과 내부 유동이 단절되어 내부 유동이 발생하지 않는 것으로 해석할 수 있다. 즉 포집구 외부와 내부의 점성도 비가 작아질수록 포집구 내부의 2차 유동은 강화되고, 포집구 외부의 미끄러짐이 강화될수록, 포집구의 크기가 작아질수록 포집구 내부의 2차 유동은 약화된다고 볼 수 있다. 그림1은 물방울인 경우, 누드센 값을 다르게 주었을 때 속도장의 변화를 나타낸 것이다. 그림1에서 볼 수 있듯이, 누드센 값이 증가하면, 포집구 표면에서의 미끄러짐이 발생하는 관계로 포집구의 표면에서 속도가 증가되는 것을 볼 수 있다. 이는 포집구가 유체구일 때, 유체구 표면에서의 유동장의 경향과 비슷하다.

3. 결 론

본 연구에서는 Jung and Lee(1998)의 복합 유체 포집구에서의 유동장을 확장하여 포집구 표면의 미끄러짐을 고려한 저 누드센 영역의 복합 유체 포집구 시스템에서의 유동장을 해석적으로 구하였다. 유동은 비압축적 유체가 정상상태에서 축 대칭으로 흐를 때를 가정하였다. 구하여진 해석적인 식은 고체, 기포, 그리고 유체구에 대하여 포집구 표면의 미끄러짐을 포함한 모든 경우의 유동장을 모사 할 수 있었다. 모사결과 저 누드센 영역의 경우, 고체 포집구는 포집구의 표면에서 미끄러짐이 발생하여 유동장이 포집구에 더욱 가까워지는 것을 알 수 있었다. 포집구 표면에서의 미끄러짐 효과를 무한대로 취하는 완전 미끄러짐 조건에서 포집구의 유동장은 기포의 유동장과 동일한 결과를 보였다.



(a) outer and inner sphere ; Kn=0 (b) outer and inner sphere ; Kn=0.5
Fig. 1. Comparison of the streamline for water droplet in different Knudsen number.

감사의 글

본 연구는 2003년도 경인여자대학 학술지원연구에 의하여 지원되었습니다.

참고 문헌

- (1) Jung, C. H., and K. W. Lee, 1998, Filtration of fine particles by multiple liquid droplet and gas bubble systems, *Aerosol Sci. and Tech.*, 29, 389-401.
- (2) Lee, K. W., L. D. Reed, and J. A. Gieseke, 1978, Pressure drop across packed beds in the low Knudsen number regime, *J. Aerosol Sci.*, 9, 557-565.