

폐포가 달린 도관 내에서의 입자의 분산

이동엽*, 이진원**

DISPERSION OF AN AEROSOL BOLUS IN THE ALVEOLAR DUCT

DongYoub Lee*, JinWon Lee**

Key Words : Aerosol Bolus, Dispersion, Alveolar Duct, Effective Diffusivity,

Abstract

The dispersion of an aerosol bolus in acinus is analyzed numerically. Model geometry is a straight duct surrounded by an axisymmetric semicircular annulus which is expanding or contracting with breathing. Unsteady Navier-Stokes equation is solved by CFX-F3D, an FVM commercial code and the trajectory of massless particle is computed by Lagrangian method. For steady flow with no wall motion, mean velocity of aerosol bolus in alveolated duct is a little smaller than that in straight duct and dispersion in alveolated duct is comparable with the dispersion in straight tube. For expanding duct mean velocity of aerosol bolus approaches half of that in straight tube and effective diffusivity is smaller than that of straight tube. For contracting duct mean velocity of aerosol bolus becomes slightly larger than that in straight tube and effective diffusivity is comparable with the case of straight tube.

1. 서론

기관지 내에서의 입자분산 문제는 오염물질의 인체기관지 내 침전, 폐를 통한 투약, 불러스기술에서의 주요변수 해석 등에 매우 중요한 역할을 한다. 입자의 전달과 분산은 특히 기관지 내 국부적인 침전 양상에 큰 영향을 미치므로 정확한 분산모델을 얻는 것은 입자상 오염물질과 인체기관지 질병과의 역학관계를 밝히는 데 매우 중요하다.[1-3] 기관지 벽이 움직이지 않는 상태의 유동인 경우, 기관지분지모델을 이용하여 실험과 수치해석을 통하여 많은 연구자들이 입자분산모델을 제시하였다.[3-6] 그러나, 폐의 대부분의 부피를 차지하고 있는 소엽(acinus)의 경우 기관지에 폐포들이 달려있을 뿐만아니라 호흡하는 동안 팽창과 수축을 반복하며 폐포벽이 움직이고 있으므로 고정된 단순관을 이용하여 얻은 분산모델을 직접적으로 적용하기는 힘들다. 소엽에서의 물질전달에 대해 기존에 많은 연구가 있었으나, 폐포벽의 움직임을 고려하지 않거나 펙크릿수가 상대적으로 작은 경우에만 적용할 수 있거나 혹은 입자의 침전에 대한 결과만을 제시하였다.[7-9]

본 연구에서는 소엽내에서의 입자상 물질의 전달과 분산 문제에 적용할 수 있는 모델을 수립하기 위하여 팽창하거나 수축하고 있는 폐포가 달린 도관 내에서 유동장을 얻고 입자의 전달 속도와 분산을 구하여 단순직관의 경우와 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 계산 대상의 형상

형상모델은 직관 주위에 축대칭의 폐포로 둘러싸여 있고 $L_{cd}/d_c=1.2$, $d_b/d_c=0.8$ 그리고 opening half angle은 50° 이다.(그림1) 정상유동의 경우 위의 형상모델의 모양은 변하지 않으며 비정상유동의 경우에는 호흡유량 250ml/sec, 호흡주기 8sec일 때 소엽에서의 부피변화(약33%)와 전형적인 Womersley수 ($d_c/2 \cdot \sqrt{2\pi f/\nu}$)에 따라, 모델의 입구를 기준으로 형상모델 전체가 같은 비율로 팽창하거나 수축한다.

2.2 유동장과 입자 궤적의 계산

30개의 폐포에 대해 정상 혹은 비정상 유동장을 얻었다. 계산 대상의 입구는 일정한 유량을 만족하도록 Parabolic 형태의 유동속도를 주고 출구는 일정한 압력 조건을 주었다. 정상유동의 경우 Reynolds수 ($u_c \cdot d_c/\nu$) 0.01, 0.5, 2.0, 5.0 의 유동장을 얻었으며, 비정상유동의 경우 도관 입구를 기준으로 Reynolds수 0.0476, Womersley수 0.03의 유동장을 얻었다.

주어진 유동장 내에서 입자들(massless particles)의 궤적은 식(1)을 적분하여 얻는다.

$$dX/dt = V(X,t) \quad X(t=0)=X_0 \quad (1)$$

형상모델의 입구에 충분한 숫자의 입자를 균일하게 위치시킨 후에 시간에 따른 각 입자의 위치로부터 입자들의 평균위치와 분산을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\langle x \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad \sigma_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)^2}{N} \quad (2)$$

* 포항공과대학교 기계공학과, road@postech.ac.kr

** 포항공과대학교 기계공학과, jwlee@postech.ac.kr

3. 결과 및 고찰

3.1 정상상태유동에서의 입자분산

도관과 폐포의 운동이 없는 경우에 도관 내에서의 유동은 단순직관의 유동과 큰 차이가 없으며 단지 폐포가 달린 영역을 지날 때 평균속도가 작아지며 폐포 내에서 재순환 영역이 생긴다. 그리고 도관과 폐포의 운동이 있는 경우와는 달리 직관에서 출발한 유선이 폐포 안으로 침투하지 못한다.

같은 시간에 대해 폐포가 달린 도관의 입자 평균위치($\langle x \rangle$)와 단순직관의 입자 평균위치($\langle x \rangle_s$)를 비교했을 때, 모든 Reynolds수에 대해($Re = 0.01, 0.5, 2.0, 5.0$) $\langle x \rangle / \langle x \rangle_s \cong 0.8$ 로서 폐포가 달린 경우 입자들의 운동속도가 단순직관의 경우보다 느려진다는 것을 알 수 있다. 이는 폐포가 달린 부분에서 유동속도가 느려지기 때문이며 속도가 느려지는 비율이 거의 일정한 이유는 Reynolds수의 변화가 유동장에 큰 영향을 미치지 않기 때문이다. 같은 위치($\langle x \rangle$)에 대해 폐포가 있는 경우와 없는 경우의 입자 분산을 비교했을 때, 본 연구에서 고려한 모든 Reynolds수에 대해 $\sigma_x^2 / \sigma_{x,s}^2 \cong 1$ 이었다. 이 결과로부터 기관지모델에 움직임이 없는 경우에는 직관에 폐포가 달려있다하더라도 입자분산에 큰 영향을 주지 않는다는 사실을 알 수 있다.

3.2 비정상상태에서의 입자분산

도관과 폐포 벽이 팽창하거나 수축하는 경우에는 벽의 운동이 없는 경우보다 유선이 복잡해지고 Reynolds수와 Womersley수에 따라 유동장이 달라지게 된다. 직관의 벽 근처에서 출발한 유선들은 폐포 안으로 침투하여 벽으로 붙게되고 Reynolds수가 작아질수록 Womersley수가 커질수록 폐포 안으로 침투하는 유량이 많아진다. 폐포 벽으로 붙지 않고 폐포를 지나친 유선들은 팽창의 경우 점차 도관 벽 방향으로 이동하게 되고 수축의 경우 도관의 중심으로 이동하게 된다.

입자의 이동속도는 팽창의 경우 직관에 비해 점차 느려지고, 수축의 경우 직관에 비해 빨라진다. 팽창이나 수축의 경우 모두 폐포는 평균속도가 느려지는 한 요인이 된다. 팽창의 경우에는 벽 방향으로 서서히 이동하는 유선에 의해 이러한 경향이 가속되지만, 수축의 경우에는 중심으로 이동하는 유선 때문에 입자들이 상대적으로 속도가 빠른 영역으로 이동하게 되어 이러한 경향이 약화되며 일정 시간이 흐른 이후에는 오히려 직관의 경우보다 이동속도가 빨라지게 된다. 위치($\langle x \rangle$)에 따른 입자분산은 팽창의 경우에는 직관의 경우보다 점차 커지며 수축의 경우에는 점차 작아진다. 팽창의 경우에 분산이 커지는 것은 시간이

흐름에 따라 폐포 안으로 이동하여 폐포 안에서 머무르는 입자의 양이 증가하게 되고 또한 반경방향 속도분포의 변화가 상대적으로 급격한 벽 쪽으로 입자들이 이동하기 때문이며, 수축의 경우에 분산이 작아지는 것은 반경방향 속도분포의 변화가 상대적으로 작은 도관의 중심으로 입자들이 이동하기 때문이다. 입자의 이동시간 혹은 이동속도와 분산을 이용하여 유효확산계수(D_{eff})를 입자의 평균위치에 따라 그래프로 나타내보면 그림1과 같다.

$$D_{eff} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d\sigma_x^2}{dt} \quad (9)$$

팽창의 경우 입자분산이 직관의 경우보다 크지만 이동속도가 느리기 때문에 다시말해 이동시간이 커지기 때문에 유효확산계수는 직관의 경우보다 작게된다.

4. 결론

인체기관지 중 팽창하거나 수축하고 있는 소엽(acinus) 내에서 입자의 전달과 분산을 관찰하기 위해 축대칭의 폐포로 둘러싸인 도관 내에서의 입자 전달속도와 분산을 구하여 단순직관의 경우와 비교했으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 형상의 움직임이 없는 경우, 폐포가 달린 도관 내에서의 입자 이동속도는 직관의 경우보다 조금 작았으며 분산은 거의 같았다.
- (2) 도관과 폐포가 팽창하는 경우, 직관에 비해 입자의 전달속도는 점차 느려지고 분산은 점차 커졌다.
- (3) 도관과 폐포가 수축하는 경우, 직관에 비해 입자의 전달속도는 점차 빨라졌으나 분산은 작아졌다.

참고문헌

- [1] Anderson P.J. & Dolovich M.B., Aerosols as diagnostic tools, *J. Aerosol Sci.*, 7 (1994), pp.77-88.
- [2] Engel L.A. & Paiva M., Gas mixing and distribution in the lung, New York : Marcel Dekker, (1985)
- [3] Sarangapani R. & Wexler A.S., The role of dispersion on particle deposition in human lung airways, *Toxicol. Sci.*, 54 (2000), pp.229-236
- [4] Lee J.W. et al, Dispersion of an aerosol bolus in a double bifurcation, *J. Aerosol Sci.*, 31 (2000), pp.491-505
- [5] Lee D.Y. & Lee J.W., Dispersion during exhalation of an aerosol bolus in a double bifurcation, *J. Aerosol Sci.*, 32 (2001), pp.805-815
- [6] Lee D.Y. & Lee J.W., Dispersion of aerosol bolus during one respiration cycle in a model of lung airways, *J. Aerosol Sci.*, In Print
- [7] Federspiel W.J. & Fredberg J.J., Axial dispersion in respiratory bronchioles and alveolar ducts, *J. Appl. Physiol.*, 64 (1988), pp.2614-2621
- [8] Tsuda A. et al, Axial dispersion of inert species in alveolated channels, *Chemical Eng. Sci.*, 46 (1991), pp.1419-1426
- [9] Tsuda A. et al, Effects of alveolated duct structure on aerosol kinetics (1), *J. Appl. Physiol.*, 76 (1994), pp.2497-2509

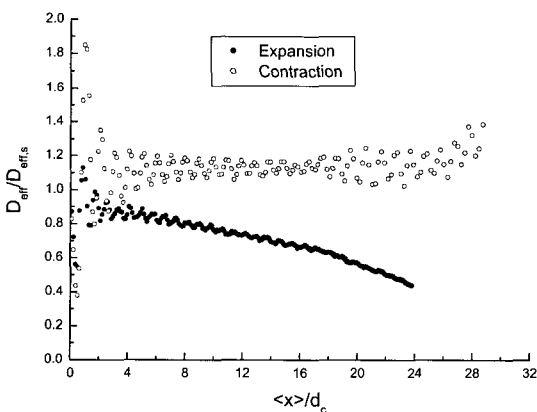


Figure 1 : Effective diffusivity for alveolated tube which is expanding or contracting