

# 인체기관지내 이중 분지관에서의 입자침전 수치해석

정 문기, 구 재학, 이 진원<sup>o</sup>  
포항공대 기계과

Numerical Analysis of Particle Deposition  
in a Double Bifurcation of Human Lung airway

M.K. Chung, J.H. Goo and Jin W. Lee  
Dep't of Mech. Eng. Pohang Inst. of Sci. & Tech.

## 1. 서론

진폐증등 분진에 의한 질병의 예측과 호흡기에 관련된 질병의 치료를 위한 aerosolized drug delivery system의 설계를 위해서 흡입된 분진의 기관지내 침전량의 예측은 매우 중요하며, 특히 최근들어 크게 관심의 대상이 되는 protein등을 이용한 aerosol therapy에서는 흡입된 입자의 부위별 침전량이 정확히 예측되어야 한다.

인체기관지는 가장 일반적인 모델인 Weibel 모델[1]에 의하면 trachea로부터 alveola sac에 이르기까지 약 27번에 걸쳐 분지(bifurcation)가 형성되어 있는 분지계로 볼 수 있는데, 이제까지의 입자침전 모델에서는 모두 단일 분지(single branch)를 대상으로 하여 입자의 침전속도를 분지의 형상과 평균유동속도및 입자의 크기의 함수로 표현하였다.[2] 그러나 최근 Lee & God[3]는 엄밀한 수치해석을 통하여 분지관에서의 입자침전은 평균속도가 같아도 속도의 분포에 따라 매우 민감하게 변하며, 특히 3차원에서는 이차유동(secondary flow)이 매우 중요한 역할을 하는 것을 밝혔고, 동시에 한 세대 분지관의 출구에서의 속도가 매우 편향이 심한 분포를 가짐을 보였다. 이것은 이제까지의 침전모델로는 연속적인 분지의 연결인 기관지에서 입자의 침전분포를 예측할 수 없음을 의미하며, 따라서 다중분지의 침전을 해석하기 위한 첫 단계로서 이중분지(double bifurcation)에 대한 해석을 수행하고 그 결과를 단일분지모델의 예측과 비교하였다.

## 2. 해석 방법

입자의 침전이 기하학적 형상이나 유동조건들의 변화에 매우 민감하므로, 각 변수들의 영향을 폭 넓게 고찰할 수 있도록 수치해석을 해석방법으로 택하였으며, 공기유동을 먼저 Eulerian field에서 구한 후에,

이 유동장내에서의 입자의 거동을 Lagrangean 방법으로 추적하여 부착여부를 결정하였다.

이 때 공기유동의 지배방정식은 연속방정식(1)과 Navier-Stokes 방정식(2)이며,

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (2)$$

입자의 운동방정식은 입자에의 drag force가 유동과 입자의 상대속도에 비례한다는 Stokesian 모델을 무차원화하면 다음과 같이 쓰여진다.

$$St \frac{du_i^p}{dt} = \frac{C_d Re_p}{24} (u_i^f - u_i^p) \quad (3)$$

여기서 각 항들은 다음과 같이 정의된다.

$$St ; Stokes number (= \frac{\rho_p C_c U d_p^2}{18 \mu_f D})$$

$$Re_p ; local particle Reynolds number$$

$$= Re_{p,U} \left[ \sum (u_i^f - u_i^p)^2 \right]^{1/2}$$

$Re_{p,U}$ ; particle Reynolds number based on U

U; average fluid velocity at inlet

$u^p$ ; particle velocity, non-dimensionalized

$u^f$ ; non-dimensionalized fluid velocity

$\rho_f$ ; fluid density

$\mu_f$ ; fluid viscosity

$d_p$ ; particle diameter

공기저항계수  $C_d$ 는  $Re$ 에 따라 변하는 것으로 하였다 [4,5].

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \quad Re_p < 0.1$$

$$= \frac{24}{Re_p} (1 + 0.0916 Re_p) \quad 0.1 < Re_p < 5.0$$

$$= \frac{24}{Re_p} (1 + 0.158 Re_p^{2/3}) \quad 5.0 < Re_p < 1,000$$

또한 Cunningham slip correction factor는 Hinds[6]에 따라 다음의 식을 이용하였으며, 여기서 P는 압력이다.

$$C_c = 1 + \frac{2}{P d_p} [6.32 + 2.01 \exp(-0.1095 P d_p)]$$

유동의 해석에는 잘 알려진 유한요소(FEM) 코드인 FIDAP(미국 Fluid Dynamics사, Evanston, IL)을 이용하였으며, 입자의 거동은 4차 Runge-Kutta법을 이용하여 자체 개발한 프로그램을 이용하여 해석하였다. 입자추적에서 중요한 점은 입자가 유동계산에서 사용된 격자점의 사이에 있을 때 입자위치에서의 유동속도의 예측이며, 본 연구에서는 벽면근처에서의 입자궤적을 보다 정확히 예측할 수 있도록 quadratic interpolation을 이용하였다.

해석모델은 그림 1에 보이는 바와 같은 45°의 대칭분지를 기준으로 하였으며, 2차원과 3차원을 모두 고려하여, 2차원에서는 단면이 0.8의 비율로 축소되는 것으로 하고 3차원에서는 분지점의 형상변화에 대한 자세한 자료의 부족으로 인하여 단면변화가 없는 일정단면분지를 택하였다. 입구에서는 완전 발달된 속도분포를 가정하고 출구에서는 Neumann 조건을 부과하였으며, 입구에서의 입자의 속도는 유동의 속도와 같다고 가정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 유동특성

1차 분지의 영향으로 인하여 1차 분지관의 출구부에서는 속도가 아래방향으로 많이 편향되어 있고 따라서 유동과 입자의 대부분이 아랫방향의 분지로 향하게 된다.(그림 2) 즉 기하학적으로 대칭인 분지에서도 유동은 대칭이 아니며 따라서 입자의 침전에도 많은 영향을 미친다. 주 유동이 편향된 것과 함께 주목해야 할 다른 하나의 특징은 1차 분지관내의 유동의 발달에 의하여 2차 분지의 입구부에서는 윗 방향의 속도성분이 유발된다는 것이다. 3차원 분지에서는 주유동부가 훨씬 더 아랫벽면에 가까이 편향되어 있지만 이차유동의 영향으로 인하여 고속부의 크기가 2차원에 비하여 훨씬 축소되어 있고 동시에 2차 분지

내에서 빠른 속도로 균일화된다. 1차분지와 2차분지 모두에서 이차유동의 세기는 상당히 커 분지점 직후의 계순환영역의 축소와 입자의 기동에 결정적인 영향을 미친다.

#### 3.2 입자의 거동

2차원 분지와 3차원 분지내의 입자의 궤적은 이차유동의 유무에 의하여 매우 큰 차이를 보인다. 2차원에서는 입자의 궤적이 잘 구분되어, 외벽 근처에서 출발한 입자는 윗쪽의 2차분지로 들어가고 중심부에서 출발한 입자는 아랫쪽으로 들어가며, 입자의 크기나 유동속도에 따라 상대적인 양만이 차이가 있는 반면, 3차원분지에서는 입자의 크기와 유동속도에 따라 일정점에서 출발한 입자가 윗쪽으로 가기도 하고 아랫쪽으로 가기도 하며, 외벽 근처에서 출발한 입자는 반경의 3배밖에 되지 않는 길이를 운동하는 동안에 거의 한 바퀴의 선회를 하는 것이 관찰된다.(그림 2)

#### 3.3 입자 침전효율

이상과 같은 계산을 통하여 이중분지 전체에 대한 입자침전효율을 구한 결과, 2차원 분지의 경우에는 단중분지에 기초한 이론모델을 이용하여 이중분지의 입자침전을 계산하면 대칭분지에 있어서는 모든 입자에 대하여 낮은 효율을 주며 비대칭분지에 대하여는 높은 효율을 준다는 것을 알 수 있다.(그림 3) 그러나 3차원 대칭분지의 경우에는 입자의 크기가 크면 높은 효율을 예측하지만 작은 입자에 대해서는 낮은 효율을 예측하며, Stokes number가 0.01-0.1사이인 respirable aerosol에서는 약 2배정도의 차이를 보인다.(그림 4)

### 4. 결론

이중분지에 대한 공기유동 및 입자궤적의 수치해석을 통하여 단중분지에 기초한 이론적모델의 예측이 2차원과 3차원 모두에서 상당히 오차가 큼을 보였으며, 따라서 부유입자의 침전부위별 침전량의 예측을 위해서는 다중분지에 대한 직접 해석 및 실험이 필요함을 입증하였다.

#### 참고문헌

- [1] Weibel, E. R. (1963). *Morphometry of the Human Lung*. Academic Press, New York.
- [2] Cai, F. S., and Yu, C. P. (1988). Inertial and

Interceptional Deposition of Spherical Particles and Fibers in a Bifurcating Airway. *Journal of Aerosol Science* 19, 679-688.

- [3] Jin W. Lee and J.H. Goo(1992), Numerical Simulation of Air Flow and Inertial deposition of Particles in a Bifurcating Channel of Square Cross Section, *J. Aerosol Medicine* 5(3)
- [4] Sartor, J.D. and Abbot, C.E., *J. Appl. Meteorol.* 14 (1975)
- [5] Serafini, J.S. (1954) NACA Report 1159
- [6] Hinds, W. C. (1982). *Aerosol Technology*. John Wiley

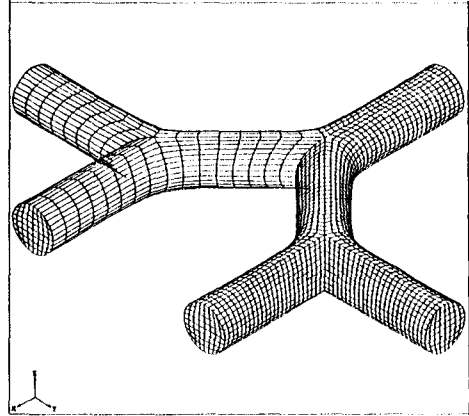
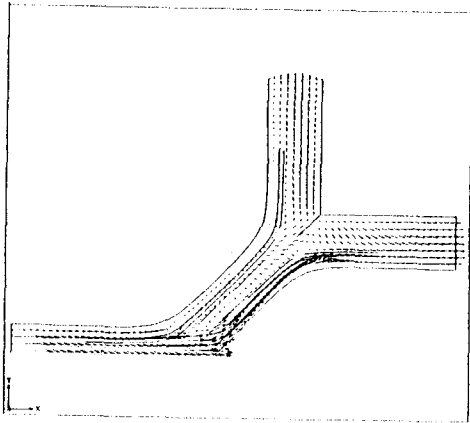
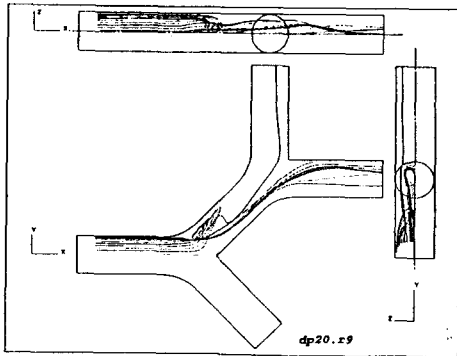


그림 1. 계산모델



(a)



(b)

그림 2 3차원 이중분지의 중앙단면 속도장(a) 및 입자궤적(b) 계산예

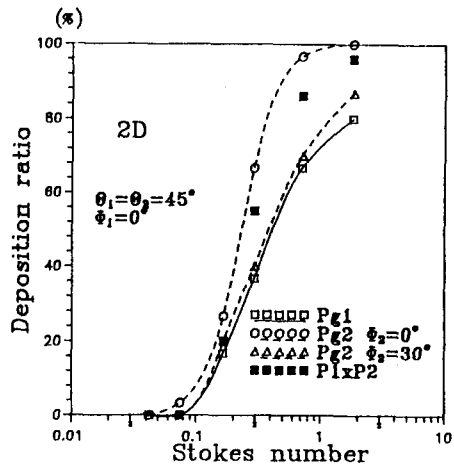


그림 3. 2차원 이중분지의 입자침전효율

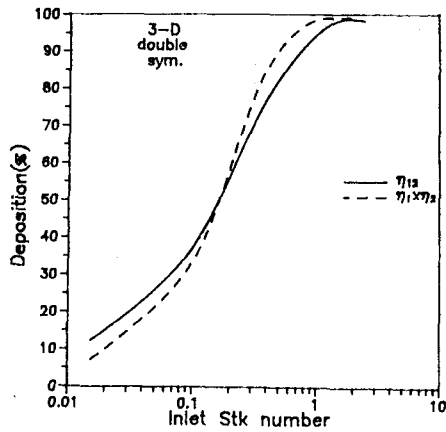


그림 4. 3차원 이중분지의 입자침전효율