

IA1) 5-엽(葉) 인체 폐 모델에서의 흡입입자 침전해석

Theoretical Analyses of Particle Deposition in a Five-lobe Compartment Human Lung Model

구재학

인하대학교 환경공학과

1. 서론

공기중의 오염 입자가 인체에 얼마나 많은 영향을 미치는가는 흡입된 입자 (inhaled particles) 중에서 얼마나 많은 양이 폐 (lung)에 침전되는가와 밀접한 관계가 있다. 또한 정상 및 비정상 (diseased) 폐에서, 흡입된 입자의 침전 위치와 침전양 (deposition site and dose)은 입자의 크기와 호흡 양식 (breathing pattern)에 따라 큰 차이를 보이며, 이런 차이는 흡입오염입자 (inhaled pollutant particles)에 의한 건강 위험도 평가 (health risk assessment) 및 흡입용 약물 (inhaled drug aerosols)의 치료효과 (therapeutic effects) 평가 등에 큰 영향을 미친다. 사람의 폐는 5개의 각각 다른 크기의 독립된 구역 즉 폐엽 (lobes)으로 나누어져있고, 각 폐엽에 침전되는 입자의 양은 서로 같지가 않으며 각 폐엽 들의 부피 (lobar volume) 및 각 폐엽 들 사이의 유동분포 (flow distribution) 등에 영향을 받는다. 그러나 지금까지 대부분의 폐 입자침전 (particle deposition) 해석연구 들은, 연속적인 분지관 (successive bifurcations) 으로 이루어진 하나의 구역 (single compartment)으로 단순화된 폐형태 모델 (lung morphological model)을 해석 대상으로 삼고 있다. 본 연구에서는 5-엽 폐모델 (five-lobe compartment lung model)에 대한 흡입입자 침전해석 모델을 개발하여 각 폐엽 별 입자침전 (lobar deposition) 및 단위 면적 당 침전양 (surface dose) 등을 구하였다.

2. 연구 방법

폐에서의 입자 침전을 해석하기 위하여서는, 폐형태 모델 (lung morphological model) 및 호흡 유동 분포 모델 (flow distribution model)이 필요하다. 본 연구에서는 Yeh (Yeh and Schum, 1980) 의 폐엽 부피자료 (lobar volume data) 와 Weibel (Weibel, 1963)의 대칭성 폐형태 자료(symmetric lung morphological data)를 바탕으로 5-엽 폐 모델 (five-lobe compartment lung model)을 구성하였다. 이 모델에서는 각 폐엽 들 (lobes)이 기관지 유도관 (leading airways)의 2-3 번 째 분지 세대 (bifurcating generation) 에 연결되어 있다 (그림 1). 정상 흡입상태 (normal breathing conditions)에서 흡입된 공기는 각 폐엽 들의 부피에 비례하여 나누어진다 (부피비율 RU: RM: RL: LU: LL= 0.15: 0.08: 0.30: 0.16: 0.31). 또한 폐질환에 의한 비정상 상태 (abnormal lung conditions)를 모사하기 위하여 각 폐엽으로 들어가는 유동분포를 임의로 설정하는 비정상 유동분포 (abnormal flow distributions)를 포함하였다. 각 폐엽에서의 기관지형태 (airway morphology)는 Weibel 의 대칭모델을 따르되 기관지 크기는 각 폐엽 들의 부피에 비례하여 조정이 되도록 하였다. 각 폐엽으로 들어가는 유량은 다르지만, 폐엽 내부에서는 분지관 (bifurcation)에서 대칭적으로 유량이 분포되도록 하였다. 이 폐형태 및 유동분포 모델을 기반으로 각 폐엽의 분지세대에 침전되는 입자의 양을 다음과 같이 구하였다.

입자침전을 위한 유동분포에서, 호흡유량 (tidal volume)은 각 분지세대의 기관지 부피 (airway volume)에 해당하는 단위 부피 (volume elements)로 나뉘어지고 이 단위 부피 들의 이동이 추적되었다. j 세대 (j -th generation)에서 k 세대로 이동되는 단위부피 V_{jk} 에 대하여, 흡입주기 (inspiratory period) 동안 i 세대에 침전되는 입자의 침전율 (deposition fraction)은 다음과 같이 정의된다.

$$DF_{ijk} = V_{jk} C_{i-1} e_i / V_t \quad (1)$$

여기서, C_{i-1} 는 $i-1$ 세대에서의 입자 농도, e_i 는 i 세대에서의 입자 침전효율 (particle deposition

efficiency)이며 V_t 는 호흡유량이다. 같은 방법으로 배출 (expiratory) 주기 동안의 침전율을 구하고, 모든 i, j, k 에 대해서 계산값을 합하면 i 세대 및 총 침전율 (total deposition fraction)을 구할 수가 있다. 여기서 i 세대에서의 침전효율 e_i 은 3가지 입자침전 메카니즘, 즉 관성 (inertial impaction), 침강 (sedimentation) 및 확산(diffusion)의 합이며 Yeh (Yeh and Schum, 1980) 의 식을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

각 입자 크기에 대하여 각 폐엽과 세대별 침전 및 단위 면적당 침전량 (surface dose)을 휴식 (quiet resting) 및 심한 운동 (heavy exercise) 상태를 포함하는 각 호흡양식에서 구하였다. 결과의 예로서, 그림 2에 대표적인 정상호흡상태 (normal breathing condition, $V_t=500$ ml, $Q=250$ ml/s) 에서 각 폐엽 별 입자 침전율 (deposition fraction)을 나타내었다. 큰 부피를 가지는 좌우 아래쪽 폐엽 (Right Lower and Left Lower lobes)에서의 입자 침전율은 다른 폐엽에 비하여 높다. 7 micron 이상의 입자영역에서는 주로 기관지 유도관 (leading airways)에 관성에 의하여 침전되기 때문에 각 폐엽에 침전되는 율은 적다. 또한 같은 호흡 상태에서 총 침전율과, 폐포영역 (alveolar) 및 기관지영역 (tracheobronchial) 등으로 나누는 국부 침전율 (local deposition fraction)을 실험치와 비교하였다. 총 침전율은 Kim (Kim and Hu, 1998)의 실험치와 잘 일치하였으며 국부 침전율도 좋은 결과를 보여주었다. 비정상 폐상태 (diseased lung conditions)에서 각 폐엽으로의 유동 분포가 바뀌는 경우 (abnormal flow distributions)에는 특정 폐엽 위치에서 단위 면적당 입자 침전율 (surface dose)이 과도하게 나타났다.

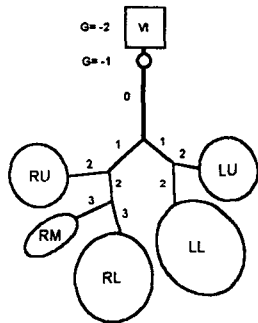


Fig. 1. Schematics of five-lobe compartment lung model

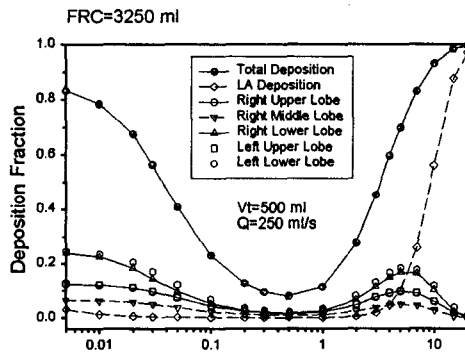


Fig. 2. Comparison of lobar deposition at typical normal breathing condition

4. 결론

5-엽 폐침전 모델 (five-lobe compartment lung deposition model)을 개발하여, 여러 유동분포 (flow distribution)에서 입자 침전율을 계산하였다. 본 모델을 이용함으로써 단일 대칭 침전모델 (single compartment lung deposition model)에서 구할 수 없던 각 폐엽 (lobe) 별로 지역적 국부적 침전량 (regional and local dose)을 정확하게 구할 수 있게 되었다. (본 연구는 미환경보호국 (USEPA)의 지원으로 수행되었습니다. 그러나 본문 내용이 이 기관의 공식적인 의사를 반영하지는 않습니다.)

참고 문헌

Kim, C. S. and S. Hu (1998) Regional deposition of inhaled particles in human lungs: comparison between men and women, *J. Appl. Physiol.* Vol. 84, 1834-1844.
 Yeh, H. and G. M. Schum (1980) Model of human lung airways and their application to inhaled particle deposition, *Bulletin of Mathematical Biology*, Vol. 42, 461-480.
 Weibel, E. R. (1963) *Morphology of the lung*, (Academic Press Inc., Springer-Verlag, New York).