

## 대기오염 입자의 인체 호흡기내 비대칭 국부침전 특성에 관한 연구

### Study on the Asymmetric Regional Deposition of Airborne Pollutant Particles in the Human Respiratory Tract

구 재 학\* · 김 종 송<sup>1)</sup>

우석대학교 환경공학과, <sup>1)</sup>미국 환경보호국 국립보건환경연구소

(2003년 5월 27일 접수, 2003년 8월 16일 채택)

JaeHark Goo\* and Chong S. Kim<sup>1)</sup>

*Dep. of Environmental Engineering, Woosuk University, S. Korea*

<sup>1)</sup>*National Health and Environmental Effect Research Laboratory,  
US EPA, North Carolina, USA*

(Received 27 May 2003, accepted 16 August 2003)

#### Abstract

Particle deposition in human lungs was investigated theoretically by using asymmetric five-lobe lung model. The volumes of each of the five lobes were different, thereby forming an asymmetric lung structure. The tidal volume and flow rate of each lobe were scaled according to lobar volume. The total and regional deposition with various breathing patterns were calculated by means of tracking volume segments and accounting for particle loss during inhalation and exhalation. The deposition fractions were obtained for each airway generation and lung lobe, and dominant deposition mechanisms were investigated for different size particles. Results show that the tidal volume and flow rate have a characteristic influence on particle deposition. The total deposition fraction increases with an increase in tidal volume for all particle sizes. However, flow rate has dichotomous effects: a higher flow rate results in a sharp increase in deposition for large size particles, but decreases deposition for small size particles. Deposition distribution within the lung shifts proximally with higher flow rate whereas deposition peak shifts to the deeper lung region with larger tidal volume. Deposition fraction in each lobe was proportional to its volume. Among the three main deposition mechanisms, diffusion was dominant for particles  $< 0.5 \mu\text{m}$  whereas sedimentation and impaction were most influential for larger size particles. Impaction was particularly dominant for particles  $> 8 \mu\text{m}$ . The results may prove to be useful for estimating deposition dose of inhaled pollutant particles at various breathing conditions.

**Key words** : Air pollution, Particle deposition, Lung, Asymmetric ventilation, Regional deposition, Risk assessment

---

\* Corresponding author

Tel : +82-(0)63-290-1428, E-mail : jaygoo@woosuk.ac.kr

## 1. 서 론

대기오염의 심각성은 인체에 끼치는 영향과 항상 연관되어 생각되어야 한다. 이런 관점에서, 대기 중 오염입자가 인체에 얼마나 많은 영향을 미치는가 하는 문제는 폐에 흡입된 오염입자 중에서 얼마나 많은 양이 인체내부로 흡수되는가 하는 문제와 밀접한 관계를 맺고 있다(Brunekreef and Holgate, 2002; Pope *et al.*, 1995; Schwarz, 1994). 단순한 예로, 어느 유해한 물질이 대기 중에 현재 환경부에서 규제하는 환경 기준치 이하의 농도로 노출되어 있어도, 심한 운동으로 호흡수가 높은 사람이나 폐 질환으로 폐 형태가 왜곡된 사람에게는 기준치보다 많은 양이 폐에 침착 흡수되어 건강에 악영향을 줄 수 있다(Shiller-Scotland *et al.*, 1996; Kim, 1989; Kim *et al.*, 1988; Ito *et al.*, 1981). 즉, 오염 물질이 흡수되는 양은 오염 물질의 종류별로 오염환경에 노출된 사람의 호흡양식(breathing pattern) 또는 건강이나 연령과 관련된 폐형태(lung morphology)의 왜곡 정도 등 수 많은 변수에 따라 각기 다르게 나타나므로, 예상되는 피해의 정도는 각 상태에 따라 흡수되는 오염물질의 양을 고려하여 결정되어야 하는데, 이 흡수되는 양은 오염입자의 폐 내 침전량(deposition dose)과 더불어 침전위치(deposition site)에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Bascom and Kesavanathan, 1997; Stalhofen *et al.*, 1989; Heyder *et al.*, 1986, 1975). 따라서 대기 중 오염물질의 상태와 더불어, 인간의 호흡양식을 고려한 폐 침전 연구는 대기오염의 인체 유해성평가(health risk assessment) 분야에서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 그러나, 대기의 오염상태 자체 및 이 오염물질이 인체 순환기내에 유입된 이후의 영향에 관해서는 각기 독립적으로 많은 연구가 이루어진 반면, 이 두 연구간의 관계를 연결하여 대기오염이 인체에 미치는 유해성을 평가하는 데 중요한, 각 호흡양식 및 폐 형태 변화별 오염입자의 폐 내부 침전량, 특히 침전 위치에 관해서는 많은 특성들이 잘 알려져 있지 않다(Newman *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 1983; Brain and Valberg, 1979).

인간은 호흡기(respiratory system)를 통하여 대기 중의 공기를 흡입함으로써 필요한 산소를 섭취한다. 이 호흡기는 비강(nasal cavity) 또는 구강(mouth) 및

인두부(pharyngeal)와 후두부(laryngeal)로 이루어진 두부(head region; extrathoracic region; ET)를 거쳐서, 그 아래에 위치한 주기관(trachea)에서 폐포(alveola)에 이르기까지 약 23세대(generation)의 연속적인 가지치기 구조를 갖는 분기관(branching airway)으로 이루어져 있다(Weibel, 1963). Weibel의 대칭 폐 형태모델(symmetric lung morphology model)에 따르면, 분기관은 0세대로 정의되는 주기관에서 시작하여 1세대 분지에서 좌우 폐(lung)로 나뉘어지고 11세대의 종말기관지(terminal bronchus), 16세대의 종말 세기관지(terminal bronchiole), 23세대의 폐포낭(alveolar sacs) 등으로 구분되어지는데, 0세대에서 16세대까지는 기관/기관지(trachea-bronchiole; TB) 영역으로, 17세대 이상은 폐포(alveolar) 영역으로 크게 나뉜다. 그러나 실제 폐는 오른쪽에 3개 왼쪽에 2개의 각각 다른 크기의 독립된 구역 즉 폐엽(lung lobe)으로 분리되어 있고, 후두부에서 이 폐엽들에 도달하기 전에는 그림 1에 보이는 것과 같은 0세대에서 2~3세대까지의 비대칭분지(asymmetric bifurcations) 구조로 이루어진 기관도입부(LA: leading airway)가 있으며, 또한 이 기관도입부 끝에서 시작하는 5개 각각의 폐엽도 입구에서 폐포에 이르기까지 수많은 연속적인 비대칭 분기관으로 구성되어 있다(Sauret *et al.*, 2002; Yeh and Schum, 1980). 이런 분기관을 통하여 공기가 유입 또는 토출되는 현상인 호흡은, 횡경막(diaphragm)의 상하운동에 의하여 각 폐엽이 독립적으로 수축 또는 팽창을 함으로써 유도되는, 대기와 폐 내부의 압력차이에 의하여 이루어진다. 호흡이 이루어지는 동안, 대기 중 입자상 오염물질은 공기와 같이 유입되어 이 연속적인 분기관을 지나면서 관성충돌(inertial impaction), 중력침강(gravitational sedimentation), 차단(interception) 및 확산(diffusion) 등의 침전 메커니즘에 의하여 폐에 침전/침착(deposition) 및 흡수(absorption)된다(Chang and Pavia, 1989; Hinds, 1982).

지금까지 대부분의 폐 입자침전 해석연구 및 모델 실험들은 후두부 이후에서 균일하게 대칭으로 23번 나뉘어지는 하나의 구역(single compartment)으로 단순화된 폐 형태모델을 연구 대상으로 삼고 있다(Goo and Kim, 2003; Lazaridis *et al.*, 2001; Martonen and Katz, 1993; Gerrity *et al.*, 1979). 그러나 오염입자의 폐 침전 문제와 관련하여, 정상 및 비정상 폐(abnor-

mal lung)에서 입자의 침전 위치와 침전량은 호흡양식에 영향을 받고(Kim and Jaques, 2000; Kim and Hu, 1998; Heyder *et al.*, 1986, 1975), 또한 단일 분지관(single bifurcation)에서의 입자 침전 실험결과 극부침전(local deposition) 양상은 좌우 출구에서의 비대칭적인 유동분포(asymmetric flow distribution)에 의하여 확연히 달라지는 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 1994, 1983). 따라서 위에 언급한 바와 같이 실제 폐가 비대칭분지로 이루어진 기관 도입부 및 독립된 5개의 폐엽(5-lobes)으로 나뉘어져 있음을 감안한다면, 비대칭 분지에 의하여 나타나는 기관도입부에서의 입자 침전 양상은 대칭 모델에 의하여 추정되는 것과 같이 단순하게 좌우 대칭적이지는 않을 것임을 알 수 있다. 또한 각 폐엽에 대해서도, 각각의 위치에 따라서 횡경막에 의하여 가해지는 압력이 다르고, 폐엽 자체의 탄성 및 내부 분지관의 크기에 따른 유동저항들도 다르게 되므로, 각 폐엽에 유입되는 공기의 유량 및 유속이 서로 다르게 나타난다. 그러므로, 유동의 영향을 받는 입자의 침전 특성은 자연적으로 각 폐엽별로 다르게 나타날 것임을 예측할 수 있다(Chang and Yu, 1999). 따라서 연속적인 분지관으로 이루어진, 하나의 구역으로 단순화된 폐 형태모델을 해석 대상으로 삼고 있는 지금까지 대부분의 폐 입자 침전해석 연구들은, 오염입자의 유해성 평가에 필수적인, 입자들의 극부적인 침전위치 관련 정보제공에 문제점을 가지고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하고자, 비대칭 5엽 폐모델(asymmetric 5-lobe lung model)을 사용하여, 인체 호흡기에서의 각 폐엽 및 분지세대에 대한 입자의 침전량과 침전위치를 각 호흡양식별로 이론해석 방법을 사용하여 밝히고자 한다.

## 2. 연구방법

폐에서의 입자 침전을 해석하기 위해서는, 인체와 유사한 폐형태 모델(lung morphological model) 및 호흡 유동분포 모델(flow distribution model)이 필요하다. 본 연구에서 폐형태 모델로서, 폐엽 외형에 대해서는 현재까지의 5엽 모델 중 가장 구체적인 폐형태 자료를 제공하는 Yeh and Schum(1980)이 제시한 5엽 비대칭 폐엽구조 및 각 부피 데이터를 사용하

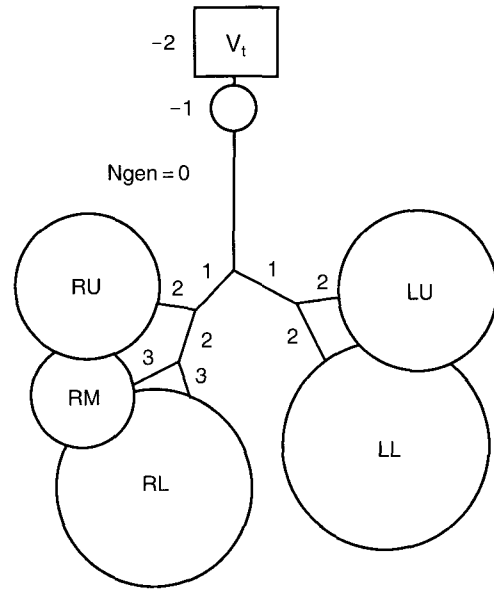


Fig. 1. Schematics of five-lobe compartment lung model. Each lobe is attached to the end of the 2nd or 3rd generation of the airways.

고, 폐엽 내부의 분지관에 대해서는 대칭 모델 중 가장 보편적으로 통용되고 있는 Weibel(1963)의 대칭 모델을 사용하는, 혼합 모델을 독자적으로 적용하였다. 이 모델은 그림 1과 같이 각 폐엽의 부피비가 순서대로 각각 0.15, 0.08, 0.30, 0.16, 0.31인 우상(RU), 우중(RM), 우하(RL), 좌상(LU), 좌하(LL) 5개의 독립된 폐엽이 기관도입부(LA)의 2~3번째 세대에 연결된 구조로 되어 있다. 여기서  $N_{gen}$ 은 세대번호를 나타내며  $N_{gen} = -1$ 은 구강/후두부를  $N_{gen} = -2$ 는 호흡량에 해당하는 구강/후두부 앞에 놓인 가상의 부피를 의미한다.

이 모델에서 각 폐엽 내부에서의 각 세대별 분지관 크기는 Weibel의 대칭 모델에서의 값을 각 폐엽 내 분지관의 총 부피가 각 폐엽의 부피에 비례하도록 확대/축소하여 적용하였다. 이 연구에서 사용된 호흡 유동분포 모델에서는 호흡량( $V_t$ : tidal volume)에 해당하는 흡입된 공기가 각 폐엽들의 부피(lobar volume)에 비례하여 나누어지도록 하였다(Chang and Yu, 1999). 또한 이 모델에서는 각 폐엽들이 모두 같은 호흡 시작점 및 주기를 갖고 폐엽간 유동이 없는 경우를 상정하여, 흡입되는 총유량(Q: flow

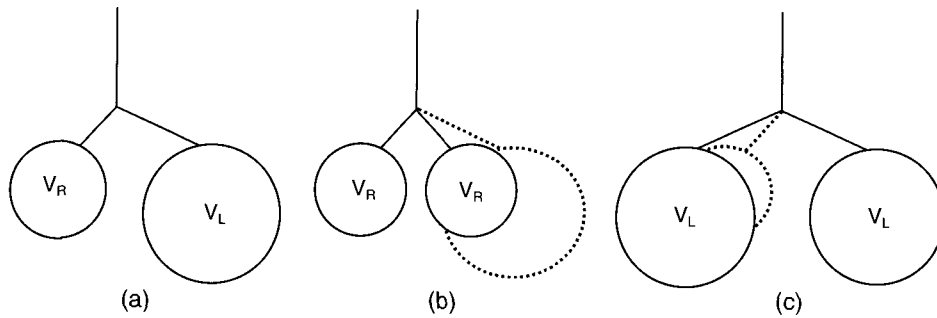


Fig. 2. The method for using symmetric lung model for calculating the particle deposition in an asymmetric lung model: asymmetric model (a); calculation for right compartment (b); calculation for left compartment (c).

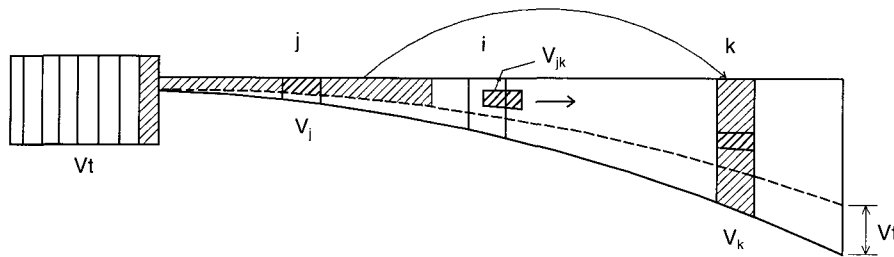


Fig. 3. Schematic of breathing model showing a series of airway generations and expanding lung volume. During inhalation, the tidal volume ( $V_t$ ) enters into the lung and the lung volume expands from the dotted line to the solid line. Here, a volume segment  $V_{jk}$  is referred to a volume element moving from the  $j$ -th generation to the  $k$ -th generation.

rate)이 폐엽의 부피비에 비례하여 각 폐엽으로 나뉘어 흐르도록 정하였다. 이와 같이 구성된 폐형태 모델 및 유동분포모델 상에서, 흡입 및 토출되는 공기에 포함된 입자들의 침전량을 기관도입부 및 각 폐엽에 대해서 각 세대별로 독립적으로 구하였다. 각 세대에서의 입자 침전량은 각 입자 크기에 대하여 각 침전 메커니즘별로 구하였으며, 이 값들로부터 각 폐엽에서의 침전량 및 총 침전량 등을 구하였다.

비대칭 폐엽 모델에서의 침전률 계산을 위해서, 그림 2-a와 같이 좌우의 부피가 다른 2구역 폐 모델에 대하여 우폐부피 ( $V_R$ ) 및 좌폐부피 ( $V_L$ ) 각각의 부피로 별도의 대칭 우폐모델(그림 2-b) 및 대칭 좌폐모델(그림 2-c)을 가정하였다. 그 다음, 우측 폐에서의 침전을 계산할 때는 대칭 우폐모델을 사용하고 좌측 폐에서의 침전을 계산할 때는 대칭 좌폐모델을 사용하였다. 이와 같은 방법을 연속적으로 사용하여, 그림 1과 같은 비대칭 5엽 폐모델에서의 입자 침전

량을 대칭 폐 모델에서의 침전 계산법을 이용하여 구하였다.

대칭 폐모델에서는 동일 세대에 속한 모든 분지관은 분지형상 및 유동 조건이 동일하다고 가정하므로 침전량도 서로 동일하다. 따라서 국부 침전량을 구하기 위해서는 각 세대별 입자 침전량만 구하면 된다. 즉 그림 3에 나타난 바와 같은  $j$ 세대에서  $k$ 세대로 이동되는 입자의 단위부피  $V_{jk}$ 에 대하여, 한번의 호흡주기 동안  $i$ 세대에 침전되는 입자의 침전량을 구하여 모든  $i, j, k$ 에 대해서 계산값을 구하는 방법을 사용함으로써,  $i$ 세대에서의 국부 침전량 및 총 침전량을 구할 수 있다(Goo and Kim, 2003). 각  $i$ 번째 세대 단일 분지관의 형상 및 크기는 분지관 길이 ( $L_i$ ), 분지관 직경 ( $d_i$ ), 분지각 ( $\theta_i$ ) 및 중력방향 기울기 ( $\phi_i$ )로 정의된다. 본 연구에서 이들 값 및 각  $i$ 번째 세대 분지관 기준부피로는 Weibel의 대칭 폐형태 모델자료에서 기능적 잔기량(FRC: functional residual capac-

ity)이 4,800 ml에 해당하는 데이터 값을 이용하였다. 이 값을 기준으로, 각 세대 분지관 부피 값은 각 폐 형태 조건에 상응하는 FRC에서의 부피에 비례하도록 조절되었다.

대기 중에서 호흡량( $V_t$ ) 안에 포함되어 있던 입자수에 대한 특정위치에 침전되는 입자수의 비율을 침전분률(deposition fraction)이라고 정의한다. 흡입시 부피  $V_{jk}$  안에 포함되어 있다가,  $j$ 번째 세대에서  $k$ 번째 세대로 흡입하는 동안  $i$ 세대에 침전되는 침전분률은 다음 식으로 계산된다.

$$DF_{ijk}^I = V_{jk} \cdot C_{i-1} \cdot \eta_i / V_t$$

여기서  $C_{i-1}$ 는  $i-1$ 세대에서의 입자 농도이고  $\eta_i$ 는  $i$ 세대에서의 입자 침전효율(deposition efficiency)이다. 여기서 입자 농도는 호흡기 입구에서의 초기값에 대한 상대적인 개수 농도비로 표시된다. 흡입시  $i$ 세대에서의 국부 침전분률( $DF_i^I$ ) 및 총 침전분률( $DF^I$ )은 다음 식에 나타난 바와 같이 침전분률을 합산하는 시퀀스를 이용하여 구할 수 있다.

$$DF^I = \sum_{i=-1}^{23} DF_i^I = \sum_{i=-1}^{23} \sum_{k=23}^{-2} DF_{ik}^I = \sum_{i=-1}^{23} \sum_{k=23}^{-2} \sum_{j=k}^{-2} DF_{ijk}^I$$

흡입시와 같은 방법으로, 토출시의 침전분률들은 다음의 합산 시퀀스에 의하여 구한다.

$$DF^E = \sum_{i=-1}^{23} DF_i^E = \sum_{i=-1}^{23} \sum_{j=-2}^{23} DF_{ij}^E = \sum_{i=-1}^{23} \sum_{j=-2}^{23} \sum_{k=j}^{23} DF_{ijk}^E$$

한번의 호흡주기동안 이루어진  $i$ 세대에서의 총 침전분률( $DF_i$ )은 다음과 같이 흡입 및 토출시의 침전분률들을 더하여 구한다.

$$DF_i = DF_i^I + DF_i^E$$

각  $i$ 세대 분지관에서의 입자 침전효율( $\eta_i$ )은, 각 세대에서의 분지관크기, 분지관형상, 유동속도 및 입자직경 등의 영향을 받는 각 침전 메커니즘별 침전 효율 즉, 확산( $P_D$ ), 중력침강( $P_S$ ) 및 관성충돌( $P_I$ )의 합산식에 의하여 다음과 같이 결정된다.

$$\eta_i = P_D + P_S + P_I - P_D P_S - P_S P_I - P_I P_D + P_D P_S P_I$$

여기서, 각 침전효율은 단일 세대의 대칭 원형분지관에 대한 식을 사용하며, 각 메커니즘별 입자침전효율은 다음과 같다(Kim and Fisher, 1999; Kim *et al.*, 1989; Yeh and Shum, 1980).

$$P_D = 1 - 0.819e^{-7.315y_D} - 0.0976e^{-44.61y_D} - 0.0325e^{-114y_D} - 0.0509e^{-79.31y_D^{2/3}} \quad (\text{층류영역})$$

$$P_D = 2.828y_D^{1/2} (1 - 0.314y_D^{1/2}) \quad (\text{난류영역})$$

$$P_S = 1 - \exp(y_S)$$

$$P_I = 1 - (16.6 \times |y_I|^{2.043} + 1)^{-1} \quad (\text{흡입시})$$

$$P_I = 0.6 \times \{1 - (16.6 \times |y_I|^{2.043} + 1)^{-1}\} \quad (\text{토출시})$$

여기서 각 침전 메커니즘별 침전효율 매개변수는 다음 식으로 나타난다.

$$y_D = 2L_i D / u_i d_i^2$$

$$y_S = -2g C_c \rho_p d_p^2 L_i \cos\phi / 9\pi \mu u_i d_i$$

$$y_I = Stk = C_c \rho_p d_p^2 u_i / 18\mu d_i$$

여기서 아래첨자  $i$ 는 분지세대번호( $N_{gen}$ )를 나타내며,  $L$ 은 분지관 길이,  $D$ 는 입자확산계수,  $u$ 는 분지관 내 유속,  $d$ 는 분지관 직경,  $g$ 는 중력가속도,  $C_c$ 는 커닝햄 미끄럼 보정계수(Cunningham slip correction factor),  $\rho_p$ 는 입자밀도,  $d_p$ 는 입자직경,  $\phi$ 는 중력방향 기울기,  $\mu$ 는 점성계수,  $Stk$ 는 스톡스수(Stokes number)이다. 본 연구에서는 구강 호흡을 가정하였으며, 구강 호흡시 구강/인후두부(Extrathoracic region)에서의 침전효율은 확산 및 관성충돌에 대하여 각각 다음의 침전 효율식을 사용한다(Stahlhofen *et al.*, 1989).

$$P_D = 1 - \exp(-9Q^{-1/8} D^{1/2})$$

$$P_I = 1 - (3.5 \times 10^{-8} (d_a^2 Q)^{1.7} + 1)^{-1}$$

여기서  $d_a$ 는 입자의 공기역학경(aerodynamic diameter),  $Q$ 는 유량을 나타낸다.

### 3. 결과 및 고찰

호흡기내에서 입자의 침전량 및 침전 위치를 각 입자크기 및 호흡양식에 따라 구하였다. 호흡양식은 호흡량(tidal volume:  $V_t$ ) 및 유량(flow rate:  $Q$ ) 두 가지 변수의 변화에 따라 다르게 나타내었다. 다음에 언급되는 침전분률은 총 흡입 입자수에 대한 침전된 입자수의 비율 의미한다.

각 호흡양식에 대하여, 각 입자 크기별로 계산된 총 침전분률(그림 4) 및 기관/기관지영역 침전분률(그림 5)을 실험결과와 비교하여 나타내었다. 여기서 총 침전분률은 모든 영역에서의 침전분률 합을 의미

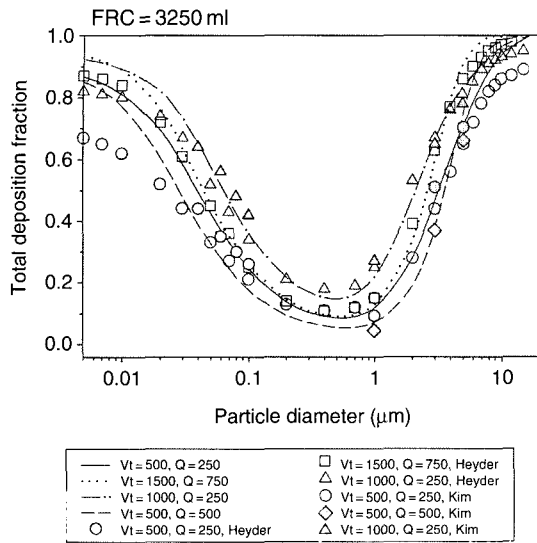


Fig. 4. Comparison of the results for total deposition fractions with experimental data. Lines represent the present theoretical results and symbols represent the experimental data obtained with different breathing patterns.

한다. 두 그림에서 선으로 나타난 것은 계산 값이고 기호로 나타난 것은 실험값이다. 표준 호흡양식 ( $V_t = 500$  ml,  $Q = 250$  ml/s)에서의 침전분률은 실선 및 원형 기호로 나타내었다. 이와 비교하여 높은 호흡량 조건 ( $V_t = 1,000$  ml,  $Q = 250$  ml/s)에서의 침전분률은 일점쇄선으로, 높은 유량 조건 ( $V_t = 500$  ml,  $Q = 500$  ml/s)에서의 침전분률은 파선으로 나타내었다. 점선 부분은 호흡량과 유량 모두 높은 조건 ( $V_t = 1,500$  ml,  $Q = 750$  ml/s)에서의 침전분률을 나타낸다. 일정한 유량에서 호흡량이 증가하면, 입자가 기관지 내부로 깊이 침투하고 또한 분기관 내에서의 체류시간이 길어지므로, 작은 입자에 효과적인 확산 및 큰 입자에 효과적인 중력 침강에 의한 침전이 모두 증가한다. 따라서 그림 4에서와 같이, 표준 호흡양식과 비교하여 높은 호흡량 조건에서는, 총 침전분률이 모든 입자 크기에서 고르게 상승한다(실선과 일점쇄선 비교). 반면에 일정한 호흡량에서 유량이 높아지면, 체류시간이 짧아져서 침강 및 확산에 의한 입자 침전이 감소하지만, 유속의 증가에 의하여 큰 입자가 영향을 많이 받는 관성충돌 양의 급격한 증가로, 침전분률 곡선 오른쪽 부분의 경사가 커진다(실선과 파선 비

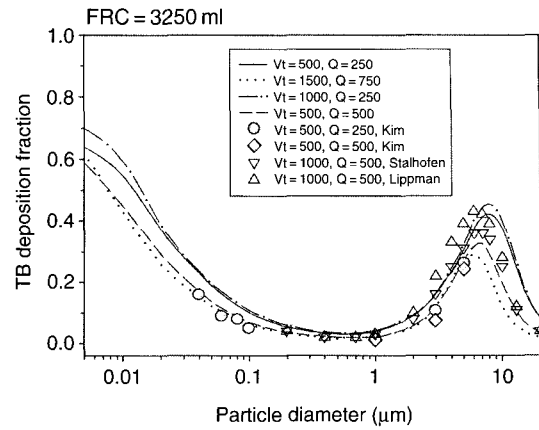


Fig. 5. Comparison of present theoretical results for tracheobronchial deposition with experimental data. Lines represent the present results and symbols represent the experimental data.

교). 호흡량과 유량 모두 높은 조건에서는, 위의 두 가지 현상이 복합적으로 나타나서, 중간 크기의 입자에 대해서는 침전분률의 증가가 없으나 작은 입자와 큰 입자 영역에서는 침전분률의 증가를 보인다(실선과 점선 비교).

세대별 침전분률을 구강/인후두부 영역, 기관/기관지 영역 및 폐포 영역으로 나누어 실험치와 비교하였다. 각 영역에서 호흡양식에 따른 입자크기별 침전분률 특성은 각기 다른 영역에 위치하는 특성을 개별적으로 반영하나, 전체적인 경향은 총 침전분률에 나타난 특성을 따른다. 각 영역 중에서 기관/기관지 영역에서의 침전분률을 그림 5에 대표적으로 나타냈다. 입자크기가  $8\mu\text{m}$  이상인 큰 입자는 구강/인후두부에서 관성충돌에 의하여 상당량이 침전되므로 뒤에 오는 영역에 유입되는 양이 감소하기 때문에, 기관/기관지 영역에서의 침전분률은 떨어진다. 호흡량이 증가함에 따라서 나타나는 확산 및 중력 침강에 의한 침전량의 증가는 폐의 깊은 영역 즉 폐포영역에 치중하므로, 그림과 같이 기관/기관지 영역에서는 호흡량을 증가시키는 데 따른 침전분률 증가의 영향은 나타나지 않는다. 유량을 증가시키면, 총 침전량에서의 변화 특성과 같이, 작은 입자영역에서는 체류시간이 짧아짐에 따라 침전분률이 감소되나, 큰 입자영역에서는 관성충돌 양의 증가로 입자 크기에 따른 침전분률이 급격한 증가양상을 보인다. 그러나 다만

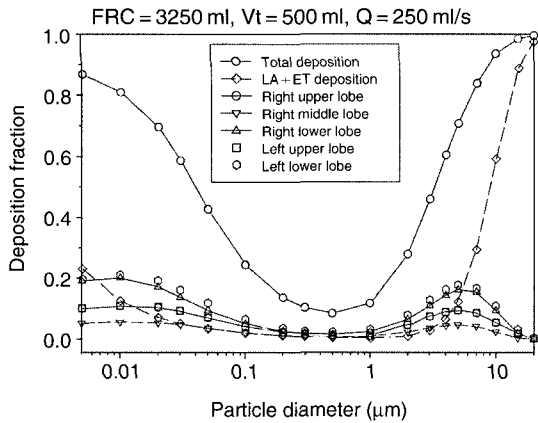


Fig. 6. Comparison of total lobar deposition fractions among five different lobes at a normal breathing condition. The total lung deposition as well as deposition fractions for leading airway (LA) and extrathoracic region (ET) are also shown.

5 $\mu$ m 이상의 큰 입자영역에서는 위에서 언급한 것처럼 유입되는 양이 적어지므로 침전분률은 더욱 낮게 나타난다. 이와 같은 이론 해석에 의한 침전 특성은 그림 4와 5 모두에서 보는 것처럼, 여러 그룹의 실험값들(Kim and Jaques, 2000; Kim and Hu, 1998; Stalhofen *et al.*, 1989; Heyder *et al.*, 1986; Chan and Lippmann, 1980; Lippmann, 1977)과 잘 일치한다.

여기서 보여주는 총 침전분률과 영역별 침전분률에 대한 기존 실험값과의 비교검증은, 각 폐엽별 침전에 대한 체계적인 실험데이터가 없는 현 상황에서, 본 연구에서 특징적으로 밝히고자 하는 각 폐엽 및 분지세대별 침전해석 결과에 대한 간접적인 검증으로서 의미를 가진다.

그림 6은 표준 호흡양식에서 입자크기에 따른 각 폐엽별 침전분률을 나타낸다. 입자직경 5 $\mu$ m 이상의 큰 입자는 관성충돌에 의하여, 또한 0.03 $\mu$ m 이하의 입자는 확산에 의하여 그림과 같이 구강/인후부(ET) 및 기관도입부(LA)에서 상당량이 제거되고, 남은 입자들이 각 폐엽으로 유입된다. 따라서 5 $\mu$ m 이상 큰 입자와 0.03 $\mu$ m 이하의 작은 입자에 대한 폐엽에서의 침전은 전체적으로 낮게 나타난다. 그림에서 나타난 것처럼 폐엽에서의 침전량은 대략적으로 폐엽 부피에 비례하여 나타나며, 큰 폐엽 부피를 가진 좌하(LL) 및 우하(RL) 폐엽에서의 침전분률은 높게 나타

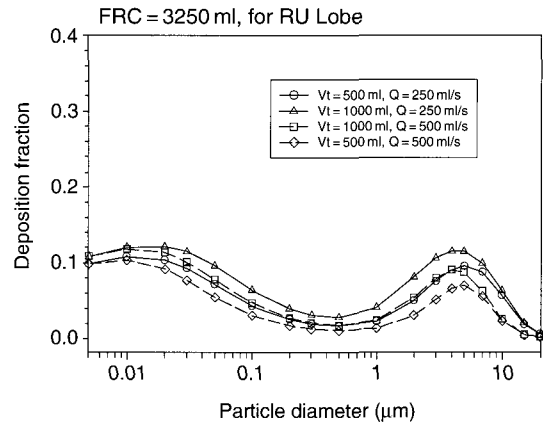


Fig. 7. Variation of lobar deposition fractions with different breathing patterns for right upper lobe.

나고, 부피가 작은 우중(RM) 폐엽에서의 침전분률은 낮게 나타난다.

그림 7은 각 폐엽 중 대표적으로 우상(RU) 폐엽에서 각 호흡양식에 따른 입자 침전분률 변화를 나타내었다. 그림에서 예로 보는 것처럼, 각 단일 폐엽에서 각 호흡양식 변화에 따른 입자 크기별 침전특성은, 기관도입부에 주로 침전되는 입자직경 5 $\mu$ m 이상 또는 0.03 $\mu$ m 이하의 입자를 제외하고는, 그림 4에 나타난 총 침전분률에 대한 특성과 같은 경향을 갖는다.

그림 8은 각 호흡양식에 따른 호흡기 전 영역에서의 침전 메커니즘별 침전분률을 나타낸다. 각기 다른 기호로 표시된 각 호흡양식에서 파선은 확산, 실선은 중력침강, 점선은 관성충돌에 의한 입자 침전을 나타낸다. 원형 기호로 표시된 표준 호흡양식에서의 침전분률 곡선들에서 알 수 있는 것처럼, 입자직경 0.5 $\mu$ m 이하에서는 확산이 지배적이고 8 $\mu$ m 이상에서는 관성충돌이 우세하며, 그 사이 크기에서는 중력이 중요한 침전 메커니즘이다. 입자직경 0.1~1 $\mu$ m 범위에서는 세가지 메커니즘이 모두 약하게 영향을 미치므로 전체적인 침전분률이 적게 나타난다. 마름모 꼴 기호로 표시된 높은 유량조건 곡선에서 보는 것처럼, 유속이 증가하면 체류시간의 감소에 따라서 확산과 중력침강이 모두 감소하므로 확산이 지배적인 입자크기 범위에는 큰 변화가 없다. 그러나 이 경우 관성충돌에 의한 침강이 증가하므로, 관성충돌이 지배적인 입자크기는 입자직경 4 $\mu$ m 이상으로 범위가 증가한다. 세모

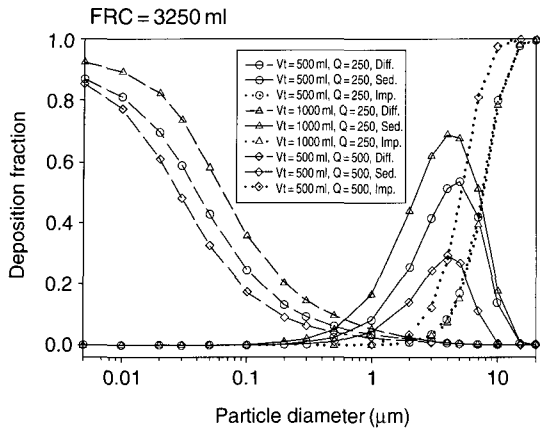


Fig. 8. Deposition contributions by each of three different deposition mechanisms, diffusion (dashed lines), sedimentation (solid lines) and impaction (dotted lines) vs. particle size.

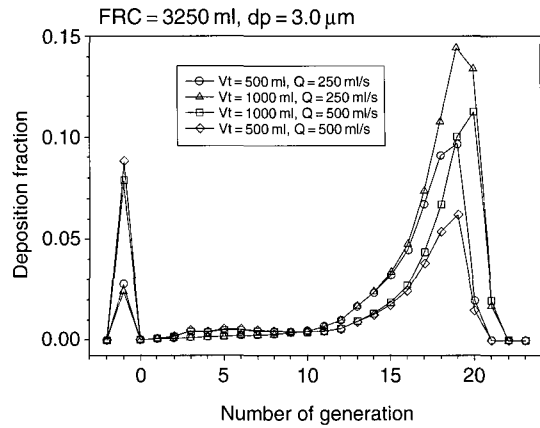


Fig. 10. Generational deposition fractions showing the effects of breathing patterns.

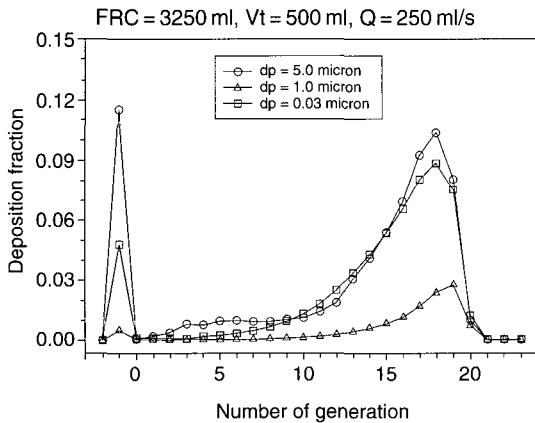


Fig. 9. Generational deposition fractions showing the effects of particle size.

기호로 표시된 침전분률 곡선에서 보는 바와 같이, 호흡량이 증가함에 따라서는 각 메커니즘에 따른 지배적인 입자크기 범위의 변화는 거의 없고 단지 확산 및 중력의 증가에 따라서 표준 호흡양식에 비하여 8 μm 이하 범위에서의 침전분률이 전반적으로 증가한다.

그림 9는 표준 호흡양식에서 각 입자크기에 따른 각 세대별 침전분률을 나타낸다. 세대별 침전분률은 같은 세대에 속하는 모든 폐엽 및 기관도입부에서의 침전분률을 합한 값이다. 중력 및 관성이 지배적인

입자직경 5 μm (원형기호)에 대하여, 그림에서 구강/인후부(-1세대) 및 상위세대에서는 관성충돌에 의해서, 하위세대에서는 중력침강에 의하여 침전분률이 높게 나타난다. 확산이 지배적인 0.03 μm (삼각형기호)에서는 구강/인후부 및 하위세대에서의 침전분률이 높게 나타난다. 입자직경 1 μm (사각형기호)에서는 중력이 지배적이기 때문에 분지관의 직경이 작고 유속이 느린 하위세대에서의 침전량이 높게 나타나, 세가지 메커니즘 모두 약하게 영향을 미치므로 전체적인 침전량은 적다.

그림 10은 특정입자크기(3 μm)에서 각 호흡양식 변화에 따른 각 세대별 침전분률의 변화 특성을 나타낸다. 표준 호흡양식(원형기호)에 비하여 호흡량만 증가하면(삼각형기호), 유속에 영향을 받는 관성 충돌이 중요한 침전 메커니즘인 상위세대에서는 침전분률의 변화가 거의 없고, 대신 흡입이 깊어짐에 따른 효과로서 종말세기관지(17세대) 이후 하위세대의 침전량이 증가한다. 유량만 증가하면(마름모기호), 관성충돌에 의하여 구강/인후두부를 포함한 상위세대에서의 침전량은 증가하고, 체류시간 감소에 따른 확산 및 중력침강 침전의 감소로 종말세기관지(11세대) 이후 하위세대에서의 침전분률은 감소한다.

#### 4. 결 론

비대칭 5엽 폐 모델을 사용하여 대기중 입자의 호



흡기내 침전량 및 침전위치 특성을 해석하였다. 흡입 및 토출시에 연속적으로 농도가 변하는 미소부피를 이용하여, 각 입자크기 및 호흡양식에서 호흡기내 정량적인 입자 침전분률을 각 분지세대 및 폐엽별로 구하였다. 이를 통하여 호흡량 500 ml, 유량 250 ml/s 인 표준 호흡양식을 기준으로 다음과 같은 입자 침전특성을 알아냈다.

1) 각 개별 분지관에서 입자의 침전양상은 비대칭 폐형태 및 비대칭 유동의 영향으로 좌우대칭이 되지 않으며, 이로 인하여 동일 세대에서 단일 분지관내 침전양은 각 폐엽별로 다르게 나타난다. 그러나 각 폐엽별 침전분률은 폐엽별 부피에 대체적으로 비례한다.

2) 입자 크기별 총 침전분률은, 호흡량이 1,000 ml로 늘어나면 입자 크기에 따라서 6~20% 정도 균일하게 증가하고, 유량이 500 ml/s로 증가하면 입경 0.5  $\mu\text{m}$  이하에서는 최대 10% 정도까지 감소하지만 그 이상 입경 크기에서는 최대 10% 정도까지 증가한다.

3) 호흡양식 변화에 따른 각 입자크기에서의 폐엽별 침전 특성은, 기관도입부에서 관성충돌 및 확산에 의하여 상당량이 제거되는 5  $\mu\text{m}$  이상 및 0.03  $\mu\text{m}$  이하의 입자직경 범위를 제외하고는, 총 침전분률 변화 특성을 따른다.

4) 입자직경 0.5  $\mu\text{m}$  이하에서는 확산이, 8  $\mu\text{m}$  이상에서는 관성충돌이 지배적이다. 또한 유량이 500 ml/s로 증가함에 따라서는, 확산이 지배적인 영역의 변화는 없으나 관성충돌이 지배적인 영역은 4  $\mu\text{m}$  이상으로 범위가 증가한다.

5) 중력 및 관성이 지배적인 입자직경 5  $\mu\text{m}$  이상의 입자는, 상위세대에서는 주로 관성충돌에 의해서, 하위세대에서는 주로 중력침강에 의하여 침전이 된다. 또한 확산이 지배적인 0.03  $\mu\text{m}$  이하 입자는 하위세대에서 침전이 주로 이루어진다.

6) 유량이 증가하면 상위세대에서의 침전분률은 증가하지만 하위세대에서의 침전분률은 감소한다. 그러나 호흡량이 증가하면 상위세대에서의 침전분률은 변화가 없고 하위세대에서의 침전분률은 증가한다. 이로써 입자직경 3  $\mu\text{m}$ 인 경우, 하위세대 중 최대값을 갖는 세대에서의 침전분률은 유량이 500 ml/s로 증가하면 35% 정도 감소하지만 호흡량이 1,000 ml로 증가하면 50% 정도 증가한다.

본 연구는 이론연구로 수행되었으며, 현재 5엽 비

대칭 폐엽 모델에 대한 실험을 통한 입자침전 연구를 수행하고 있다.

## 감사의 글

본 연구는 2001년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2001-002-E00169)에 의하여 수행되었습니다. 연구지원 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- Bascom, R. and J. Kesavanathan (1997) Differential susceptibility to inhaled pollutants: effects of demographics and diseases, *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 4, Issues 3-4, 323-330.
- Brain, J. and P.A. Valberg (1979) State of the art-Deposition of Aerosol in the Respiratory Tract, *American Review of Respiratory Disease*, 120, 1325.
- Brunekreef, B. and S.T. Holgate (2002) Review-Air pollution and health, *The Lancet*, 360, Issue 9341, 1233-1242.
- Chang, H.K. and M. Paiva (1989) *Respiratory Physiology: an analytical approach*, Marcel Dekker, Inc. New York.
- Chang, Y.H. and C.P. Yu (1999) A model of ventilation distribution in the human lung, *Aerosol Sci. and Technol.*, 30, 309-319.
- Chan, T.L. and M. Lippmann (1980) Experimental measurement and empirical modeling of the regional deposition of inhaled particles in humans, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 41, 399-409.
- Gerrity, T.R., P.S. Lee, F.J. Hass, A. Marinelli, P. Werner, and R.V. Rourenco (1979) Calculated deposition of inhaled particles in the airway generations of normal subjects, *J. Appl. Physiol.*, 47, 867-873.
- Goo, J. and C.S. Kim (2003) Theoretical Analyses of Particle Deposition in human Lungs Considering Stochastic Variations of Airway Morphology, *J. Aerosol Sci.*, 34(5), 585-602.
- Heyder, J., L. Armbruster, J. Gebhart, E. Grein, and W. Stahlhofen (1975) Total deposition of aerosol particles in the human respiratory tract for nose and mouth breathing, *J. Aerosol Sci.*, 6, 311-328.
- Heyder, J., J. Gebhart, G. Rudolf, C.F. Schiller, and W. Stahlhofen (1986) Deposition of particles in the human

- respiratory tract in the size range 0.005~15  $\mu\text{m}$ , *J. Aerosol Sci.*, 17, 811-825.
- Hinds, W.C. (1982) *Aerosol Technology*, John Wiley & Sons, Inc, New York.
- Ito, H., Y. Ishii, H. Maeda, G. Todo, K. Torizuka, and G.C. Smaldone (1981) Clinical observation of aerosol deposition in patients with airway obstruction, *Chest*, 80, 837-840.
- Kim, C.S., L.K. Brown, G.G. Lewars, and M.A. Sackner (1983) Deposition of aerosol particles and flow resistance in mathematical and experimental airway models, *J. Appl. Physiol.*, 55, 154-163.
- Kim, C.S., G.A. Lewars, and M.A. Sackner (1988) Measurement of total lung aerosol deposition as an index of lung abnormality, *J. Appl. Physiol.*, 64(4), 1527-1536.
- Kim, C.S. (1989) Aerosol deposition in the lung with obstructed airways, *J. Aerosol Medicine*, 2, 111-120.
- Kim, C.S., A.J. Iglesias, and L. Garcia (1989) Deposition of inhaled particles in bifurcating airway models: II. expiratory deposition, *J. Aerosol Medicine*, 2, 15-27.
- Kim, C.S., D.M. Fisher, D.J. Lutz, and T.R. Gerrity (1994) Particle deposition in bifurcating airway models with varying airway geometry, *J. Aerosol Science*, 25, 567-581.
- Kim, C.S. and S.C. Hu (1998) Regional deposition of inhaled particles in human lungs: comparison between men and women, *J. Appl. Physiol.*, 84, 1834-1844.
- Kim, C.S. and D.M. Fisher (1999) Deposition characteristics of aerosol particles in sequentially bifurcating airway models, *Aerosol Sci. Technol.*, 31, 198-220.
- Kim, C.S. and P.A. Jaques (2000) Respiratory dose of inhaled ultra fine particles in healthy adults, *Phil. Trans. Royal. Soc. Lond. A*, 358, 2693-2705.
- Lazaridis, M., D.M. Broady, O. Hov, and P.G. Georgopoulos (2001) Integrated exposure and dose modeling and analysis system: 3. Deposition of inhaled particles in the human respiratory tract, *Environ. Sci. Technol.*, 35, 3727-3734.
- Lippmann, M. (1977) Regional deposition of particles in the human respiratory tracts, In: Lee, D.H.K. *et al.*, ed., *Handbook of physiology-Reaction to environmental agents*, Am. Physiol. Soc., Bethesda, MD., 213-232.
- Martonen, T.B. and I.M. Katz (1993) Deposition patterns of aerosolized drugs within human lungs: effects of ventilatory parameters, *Pharmaceutical Res.*, 10, 871-878.
- Newman, S.P., I.R. Wilding, and P.H. Hirst (2000) Human lung deposition data: the bridge between in vitro and clinical evaluations for inhaled drug products, *International Journal of Pharmaceutics*, 208, Issues 1-2, 49-60.
- Pope, C.A., D.W. Dockery, and J. Schwartz (1995) Review of epidemiological evidence of health effects of particulate air pollution, *Inhal. Tox.*, 7, 1-8.
- Sauret, V., P.M. Halson, I.W. Brown, J.S. Fleming, and A.G. Bailey (2002). Study of the three-dimensional geometry of the central conducting airways in man using computed tomographic (CT) images, *Journal of Anatomy*, 200(2), 123-134.
- Schiller-Scotland, C.F., J. Gebhart, D. Hochrainer, and R. Siekmeier (1996) Deposition of inspired aerosol particles within the respiratory tract of patients with obstructive lung disease, *Toxicology Letters*, 88, Issues 1-3, 255-261.
- Schwarz, J. (1994) Air pollution and daily mortality: a review and meta-analysis, *Environ. Res.*, 64, 36-52.
- Stahlhofen, W., G. Rudolf, and A.C. James (1989) Intercomparison of experimental regional aerosol deposition data, *J. Aerosol Medicine*, 2, 285-308.
- Yeh, H. and G.M. Schum (1980) Models of human lung airways and their application to inhaled particle deposition, *Bulletin Math. Biology*, 42, 461-480.
- Weibel, E.R. (1963) *Morphometry of the human lung*, Academic Press Inc., Springer-Verlag, New York.