

화재에 의한 흡입연기의 호흡기 내 침착에 관한 연구 Deposition of Inhaled Smoke Particles Produced by Fire

구재학†

Jae-Hark Goo†

우석대학교 소방안전학과
(2007. 4. 4. 접수/2007. 5. 30. 채택)

요약

호흡기 내에서 유해물질의 체내흡수 및 방어특성은 영역별로 다르며 흡입연기의 장·단기 인체 유해성은 연기의 호흡기 내 침착위치 및 침착밀도와 밀접한 관계를 가지고 있다. 이 연구에서는 미소부피 위치 추적법을 이용한 입자침착을 계산 기법을 사용하여 휴식 및 가벼운 운동에 해당하는 호흡조건별로 또한 구강 및 비강 호흡별로 각 입자크기에 대하여 호흡기 각 영역별로 단위 면적당 침착분율 등 침착 특성을 구하였다. 이 결과는 연기에 흡착된 유해물질의 체내 흡수량 산정 등에 이용되어 연기의 인체 유해성 판정에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

ABSTRACT

The absorption characteristics of hazardous materials onto human body and defense mechanism differ from each other region within the respiratory tracts, thus adverse health effects of inhaled smokes are associated with not only the concentration but also the location of the particles deposited. In this work, the deposition fraction per surface area and the deposition sites of the smoke particles in human respiratory tracts for each rest and light exercise conditions together with oral and nasal breathing were calculated by using segmental volume tracking method. The results would be used for deriving the amount of absorption of hazardous materials onto human body, thus contribute to the health risk assessments of inhaled fire smokes.

Keywords : Fire smoke, Smoke toxicity, Smoke particle, Smoke inhalation, Respiratory tracts, Lung, Particle deposition

1. 서론

1.1 화재 발생시 흡입연기의 인체 유해성

화재로 인한 장단기 인명피해 중 70% 이상이 연기 흡입에 기인하며 매년 이 비율이 증가하고 있는데 이는 최근 연기를 발생시키는 가연구조물과 내장재의 다양화에 따라 연기의 유독성이 증가하는 데에 상당부분 기인한다. 연기는 다양한 유독성 화합물을 포함한 10 μm 이하의 미연탄소입자군(soot particle)으로 이루어져 있는데 생성이력에 따라 입자구조, 크기 및 가스조성이 각기 다르게 나타난다.¹³⁾ 실제 화재시 발생하는 유독 연기의 흡입에 의한 피해 메커니즘은 여러 요인이 복합적으로 작용하여 해석이 용이하지 않으며 또한 생존

자의 상당수가 제대로 된 사후처리 및 관리를 받지 못하여 흡입연기 노출에 의한 장기적인 인체 영향이 상세히 알려져 있지 않다.⁸⁾ 따라서 화재연기의 유해성에 대한 표준 및 체계적인 대응지침을 마련하기 위해서는 화재 연기에 의한 인체 피해의 체계적인 분석과 예측이 선행되어야 한다.

2000년도에 시작된 SEFS(Sublethal Effects of Fire Smoke) 프로젝트에서는 이를 위하여 고려해야 할 사항들로 다음을 제시한다⁴⁾: 1. 연기에 의하여 심각한 피해를 유발하는 화재 시나리오를 정립한다, 2. 연기의 인체 유독성 및 탈출에 미치는 영향 등에 대한 데이터를 확보한다, 3. 화재피해 분석을 위하여 제품별 연기발생 데이터의 생성 방법을 개발한다, 4. 이들을 이용하여 화재안전에 관한 의사결정에 필요한 실질적 지침을 제시한다. 이 중 핵심이 되는 흡입연기에 의한

† E-mail: jaygoo@woosuk.ac.kr

인체피해 데이터 확보를 위해서는 많은 사항이 고려되어야 한다. 유독성 물질을 흡착한 흡입연기는 호흡기관을 통하여 하위 기관지까지 전달, 침착되어 폐포 등에 손상을 입히고 또한 인체에 흡수되어 인명 피해를 입힌다. 이와 같은 인명 피해의 정도를 평가 예측하기 위해서는 흡입된 연기입자의 호흡기관 내 전달, 침착, 제거, 탈착, 흡수 및 체내독성영향 등에 대한 해석이 이루어져야 한다.¹⁶⁾ 흡입연기에 의한 인체피해 중에서 특기할 만한 내용은 연기입자의 직경이 20 nm 정도의 초미세입자가 되면 일반적인 크기의 미세입자에서 볼 수 없던 간질조직(interstitium) 침투 등 새로운 메커니즘으로 인체에 대한 피해를 줄 수도 있다는 사실이다.⁴⁾

1.2 호흡기 구조

인간은 호흡기를 통하여 대기 중의 공기를 흡입함으로써 필요한 산소를 섭취한다. 이 호흡기는 Fig. 1에 나타난 것처럼 상부에 비강(nasal cavity) 또는 구강(oral cavity)과 더불어 인두부(pharynx)와 후두부(larynx)를 가지는 두부(head region; extrathoracic region; ET) 영역이 있고 중간에는 주기관(trachea) 및 기관지(bronchiole) 등으로 이루어진 기관/기관지(trachea-bronchiole; TB) 영역, 하부에는 가스교환이 일어나는 폐포(alveola; Alv.) 영역이 있다. 주기관지(main bronchi)에 의하여 분리된 폐(lung)는 오른쪽에 3개 왼쪽에 2개의 폐엽(lung lobe)을 가지고 있는데 외부의 공기를 이 폐엽의 말단에 위치한 폐포까지 전달하는 호흡도관(respiratory tracts)은

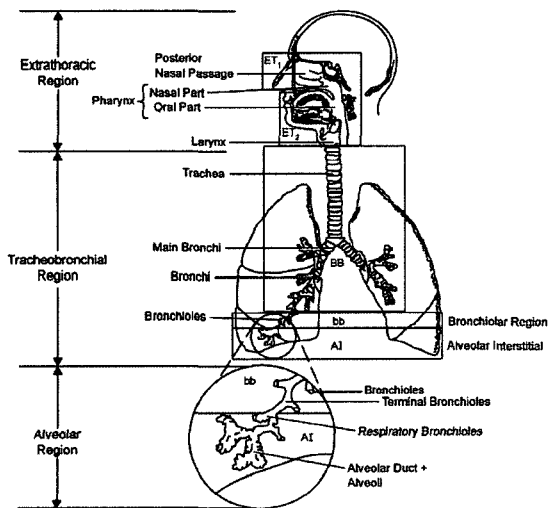


Fig. 1. Diagrammatic representation of respiratory tract regions in humans.¹⁶⁾

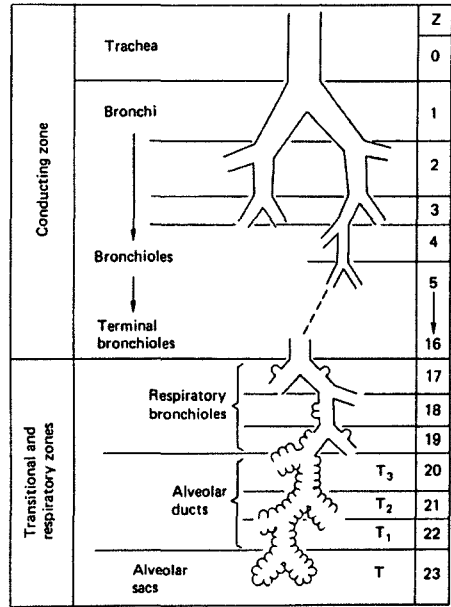


Fig. 2. Bifurcating model of human respiratory tracts.¹⁷⁾

주기관에서 폐포에 이르기까지 약 23세대(generation)의 연속적인 가지치기 구조를 갖는 분지관(bifurcating airway)으로 이루어져 있다.¹⁷⁾

Weibel의 대칭 폐형태 모델(morphology model)에 따르면, Fig. 2에 나타난 바와 같이 분지관은 0세대로 정의되는 주기관에서 시작하여 1세대 주기관지에서 좌우 폐로 나뉘어지고 11세대의 종말기관지(terminal bronchus), 16세대의 종말 세기관지(terminal bronchiole), 23세대의 폐포낭(alveolar sacs) 등으로 구성되어 있다. 여기서 0세대에서 16세대까지는 공기를 이송하는 기능을 하는 영역으로서 기관/기관지(TB) 영역으로, 17세대 이상은 도관 벽을 통하여 가스교환이 일어나기 시작하는 영역으로서 편상 폐포(Alv.) 영역으로 부른다. 그러나 실제 폐는 오른쪽에 3개 왼쪽에 2개의 각각 다른 크기의 폐엽(lung lobe)으로 분리되어 있는 비대칭 구조를 가지고 있기 때문에, 후두부에서 이 5개의 폐엽들에 도달하기 전에는 0세대에서 2~3세대까지의 비대칭 분지 구조로 이루어진 기관도입부(leading airway; LA)가 있다. 또한 이 기관도입부 끝에서 시작하는 5개 각각의 폐엽도 입구에서 폐포에 이르기까지 수많은 연속적인 비대칭 분지관으로 구성되어 있다.^{14,18)}

1.3 연기의 흡입 및 침착

화재에 의해 발생된 연기는 호흡기에 유입되어 연속적인 분지관을 지나면서 관성충돌(inertial impaction),

중력침강(gravitational sedimentation), 차단(interception) 및 확산(diffusion) 등의 침착 메커니즘에 의하여 폐의 표면에 침착/침전(deposition)된다. 연기가 침착되면 폐는 이들을 제거하기 위한 방어기제(defense mechanism)를 작동시키는데, 연기입자의 침착된 위치 및 침착밀도에 따라서 이 방어기제를 피해서 유독물질이 인체에 흡수(absorption)되어 영향을 미치는 정도가 달라진다.^{2,9)} 침착된 연기입자에 흡착되어 있던 유독물질이 흡수되는 양은 각 개별 화학물질의 연기입자에 대한 흡착 및 탈착 메커니즘과도 밀접한 관계가 있다. 가스의 흡착 과정에서는 흡착제 역할을 하는 입자표면에 있는 불포화 상태의 흡착 가스가 주변의 가스와 상호작용을 통하여 포화되어 가는데 이 과정에는 화학적 또는 물리적 흡착과정이 개입된다. 각 유독가스별 입자에 대한 흡착 및 탈착 특성에 관해서는 많은 연구가 이루어져 있기 때문에 화재시 발생하는 유독가스나 연기에 의한 피해를 예측하기 위한 모델을 개발하는 데 있어서는 연기입자의 호흡기관 내 이송 및 침착과 관계된 거동 파악이 중요한 문제라고 볼 수 있다.⁴⁾ 이와 같은 연기입자의 이송 및 침착은 각 연기의 성분, 형태 및 크기 분포뿐만 아니라 연기에 노출된 사람의 호흡양식(breathing pattern) 또는 건강이나 연령과 관련된 폐형태(lung morphology) 등 수많은 변수에 따라 각기 다르게 나타난다. 화재에 의한 유독물질의 흡수 후 체내에서의 독성 영향에 관해서는 비교적 잘 알려져 있다. 그러나 흡입 연기의 호흡기 피해 및 체내 흡수량 해석과 직접적인 관련이 되는 연기입자의 침착위치와 단위 면적당 침착량 등의 정보를 제공해 줄 수 있는 흡입연기의 호흡기 내 거동에 관해서는 깊은 연구가 이루어지지 못하고 있다.¹⁶⁾

이 연구에서는 화재시 발생하는 연기 및 유독가스의 흡입에 의한 인체 영향을 파악하기 위하여 유독물질의 전달 매개체로서의 연기입자에 대하여 인체 호흡기 내 침착위치 및 단위 면적당 침착량을 입자크기 및 각 호흡조건별로 이론적인 방법을 통하여 해석하였다.

2. 연구방법

2.1 호흡기 모델링

폐에서의 입자 침착을 해석하기 위해서는 인체와 유사한 폐형태 모델 및 호흡 유동분포 모델이 필요하다. 이 연구에서는 폐형태 모델로서, 폐엽 외형에 대해서는 현재까지의 5엽 모델 중 가장 구체적인 폐형태 자료를 제공하는 Yeh and Schum¹⁸⁾이 제시한 5엽 비대칭 폐엽구조 및 각 부피 데이터를 사용하고, 폐엽 내

부의 분지관에 대해서는 대칭모델 중 가장 보편적으로 통용되고 있는 Weibel¹⁷⁾의 대칭모델을 사용하는, 혼합모델을 독자적으로 적용하였다.⁶⁾ 이 모델은 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. 이 모델에서 세대번호 -1은 두부(ET)를 세대번호 -2는 호흡량에 해당하는 두부 앞에 놓인 가상의 부피를 의미한다.

이 모델에서 각 폐엽 내부에서의 각 세대별 분지관 크기 값은 Weibel의 대칭 모델에서의 값을 각 폐엽 내 분지관의 총 부피가 각 폐엽의 부피에 비례하도록 확대/축소하여 적용하였다. 이 연구에서 사용된 호흡 유동분포 모델에서는 호흡량(tidal volume)에 해당하는 흡입된 공기가 각 폐엽들의 부피(lobar volume)에 비례하여 나누어지도록 하였다.³⁾ 또한 이 모델에서는 각 폐엽들이 모두 같은 호흡 시작점 및 주기를 갖고 폐엽간 유동이 없는 경우를 상정하여, 흡입되는 총유량(flow rate)이 폐엽의 부피비에 비례하여 각 폐엽으로 나누어 흐르도록 정하였다. 이와 같이 구성된 폐형태 모델 및 유동분포 모델 상에서, 흡입 및 토출되는 공기에 포함된 입자들의 침착량을 기관도입부 및 각 폐엽에 대해서 각 세대별로 독립적으로 구하였다. 각 세대에서의 입자 침착량은 각 입자 크기에 대하여 각 침착 메커니즘별로 구하였으며, 이 값들로부터 각 폐엽에서의 침착률 및 총 침착률 등을 구하였다. 비대칭 폐엽 모델에서의 침착률 계산을 위해서, 좌우의 부피가 다른 2구역 폐 모델에 대하여 좌폐부피 및 우폐부피 각각의 부피로 별도의 대칭 좌폐 모델 및 대칭 우폐 모델을 가정하였다. 그 다음, 좌측 폐에서의 침착량을 계산할 때는 대칭 좌폐 모델을 사용하고 우측 폐에서의 침착량을 계산할 때는 대칭 우폐 모델을 사용하였다. 이와 같은 방법을 연속적으로 적용함으로써 비대칭 5엽 폐 모델에서의 입자 침착량을 대칭 폐 모델에서의 침착 계산법을 이용하여 구하였다.⁶⁾

2.2 입자 침착량 계산

대칭 폐 모델에서는 동일 세대에 속한 모든 분지관은 분지형상 및 유동 조건이 동일하다고 가정하므로 침착특성도 서로 동일하다. 호흡에 따라서 각 분지 세대별 내부 공기의 부피가 변화하는 개념을 Fig. 3에 나타내었다. 흡입 시 호흡량(V_R)이 호흡기 내로 유입되면 각 세대별 점선으로 되어 있던 부피가 팽창하여 실선으로 되며 그 동안 각 세대에서 있던 공기가 다른 세대로 이동한다. 여기서 V_{jk} 는 j 세대에서 k 세대로 이

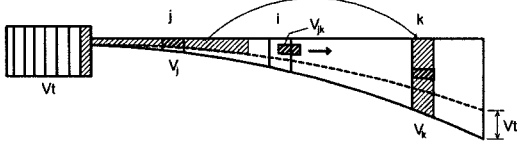


Fig. 3. Schematic of breathing model showing a series of airway generations and expanding lung volume.

동하는 미소부피를 의미하는데 이와 같은 각 미소 부피의 이동경로를 추적하면 이 안에 있던 입자들의 침착량을 구할 수 있다. 즉 \$j\$ 세대에서 \$k\$ 세대로 이동하는 입자의 단위부피 \$V_{jk}\$에 의하여 한번의 호흡주기 동안 \$i\$ 세대를 지나가면서 침착시키는 침착량을 모든 \$j, k\$에 대해서 구할 수 있다. 다음으로 모든 \$j, k\$에 대한 값을 합하여 \$i\$ 세대에서의 국부 침착량을 구할 수 있고 또한 모든 \$i\$ 세대에 대한 이들 국부 침착량을 합하여 총 침착량을 구할 수 있다.^{5,6)} 여기서 대기 중에서 호흡량 안에 포함되어 있던 입자 수에 대한 특정 위치에 침착되는 입자수의 비율을 침착분율(deposition fraction)이라고 정의한다. 흡입시 부피 \$V_{jk}\$ 안에 포함되어 있다가, \$j\$ 번째 세대에서 \$k\$ 번째 세대로 흡입하는 동안 \$i\$ 세대에 침착되는 침착분율은 다음 식으로 계산된다.

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

여기서 \$C_{i-1}\$는 \$i-1\$ 세대에서의 입자 농도인데 입자 농도는 호흡기 입구에서의 초기값에 대한 상대적인 입자 수 농도비로 표시된다. \$\eta_i\$는 \$i\$ 세대에서의 입자 침착효율(deposition efficiency)이며 각 침착 메커니즘별 침착효율 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 침착효율은 단일 세대의 대칭 원형분지관에 대한 식을 사용하며, 각 메커니즘별 입자침착효율은 다음의 식들을 사용하였다.^{10,11,18)}

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

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

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

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

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

각 메커니즘별 침착효율은, 각 세대에서의 분지관 크기, 분지관 형상, 유동속도 및 입자직경 등의 영향을 받는데, 이 연구에서 이들 값 계산을 위한 각 \$i\$ 번째 세대 분지관 기준부피로는 Weibel의 대칭 폐형태 모델 자료에서 기능적 잔기량(functional residual capacity; FRC)이 4800 ml에 해당하는 데이터 값을 이용하였다. 이 값을 기준으로, 각 세대 분지관 부피 값은 각 폐형태 조건에 상응하는 FRC에서의 부피에 비례하도록 조절되었다. 이 값을 사용하면 위 식들에 사용된 각 침착 메커니즘별 침착효율 매개변수는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

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

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

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

여기서 아래첨자 \$i\$는 분지세대 번호를 나타내며, \$L\$은 분지관 길이, \$D\$는 입자확산계수, \$u\$는 분지관내 유속, \$d\$는 분지관 직경, \$g\$는 중력가속도, \$C_c\$는 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), \$Q\$는 유량을 나타낸다. 이 연구에서는 구강 및 비강 호흡 두 가지 경우에 각각 구강/인후두부 또는 비강/인후두부에서의 침착효율을 고려하여 확산 및 관성충돌 각각에 대하여 흡입 및 토출시 모두 다음의 침착 효율식을 사용하였다.¹⁵⁾

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

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

$$P_D = 1 - \exp(-18Q^{-1/8} D^{1/2}) \quad (\text{비강호흡})$$

$$P_I = 2 - (3.0 \times 10^{-4} d_a^2 Q + 1)^{-1} - (3.5 \times 10^{-8} (d_a^2 Q)^{1.7} + 1)^{-1} \quad (\text{비강호흡})$$

이 연구에서 사용된 입자직경(\$d_a\$)은 입자의 공기역학경(aerodynamic diameter)을 말한다.

2.3 호흡양식

흡입입자의 침착량과 침착위치 등 호흡기 내 거동은 호흡양식에 따라 다른 특성을 보이는데, 이 연구에서는 호흡양식을 Table 1에 나타난 바와 같이 휴식상태(resting)와 가벼운 운동상태(light exercise) 두 가지로 나누어 살펴보았다. 휴식상태는 호흡량(tidal volume)

Table 1. Breathing patterns for different activities, resting and light exercise

Activities	Breathing parameters		
	Minute ventilation (liter/min)	Breathing frequency (1/min)	Tidal volume (ml)
Resting	7.5	12	625
Light exercise	25	20	1,250

625 ml를 호흡주기(breathing frequency) 12 cycle/min로 호흡하는 상태로 이는 분당 호흡량(minute ventilation) 7.5 liter/min에 해당하며, 가벼운 운동상태는 호흡량(tidal volume) 1,250 ml를 호흡주기(breathing frequency) 20 cycle/min로 호흡하는 상태로 이는 분당 호흡량(minute ventilation) 25 liter/min에 해당하는 호흡 상태이다.¹⁶⁾ 또한 입과 코에서의 입자의 침착 양상이 다르게 나타나므로 호흡양식을 입으로 호흡하는 경우의 구강호흡(oral breathing)과 코로 호흡하는 경우의 비강호흡(nose breathing)으로 나누어 특성을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 입자크기별 침착 특성

연기입자의 침착위치별 침착량을 입자의 크기에 따라 분석하였다. 여기서 언급하는 침착분율(deposition fraction)은 총 흡입입자 수에 대한 침착입자 수의 비를 의미한다. 따라서 연기의 호흡기 입구농도가 같은 경

우 호흡기 내 침착량은 침착분율과 호흡량의 곱에 비례한다. 우선 이 연구에서 사용한 모델의 검증을 위하여 Fig. 4에 나타난 바와 같이 휴식상태에서 구강호흡인 기본호흡 조건에서 호흡기 내 전체 및 폐포 내 침착분율을 기존의 입자침착 모델인 ICRP(LUDEP) 모델 및 MPPD(Yeh-Schum 5-lobe) 모델 값과 비교하였다.¹⁶⁾ 그림에서 실선 및 점선은 각각 전체 및 폐포 침착분율에 대하여 이 연구에서 사용한 침착 모델을 이용한 결과이다. 마름모기호는 전체 침착분율, 삼각형 기호는 폐포침착율에 대한 타 모델 계산값으로 검은색 기호는 ICRP 모델, 흰색 기호는 MPPD 모델을 이용한 값이다. 0.05 μm 이하 폐포침착 및 5 μm 이상 전체 침착에서

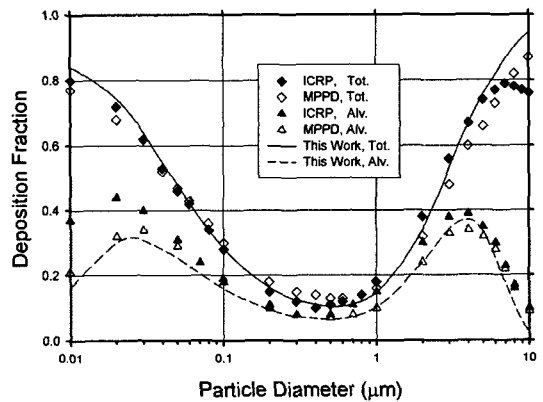


Fig. 4. Comparison of the results from this work with those from other works for total and alveola deposition fractions.

Table 2. Deposition fraction contributions by each of three different deposition mechanisms vs. particle diameter(PDIA) are shown. Also, lobar deposition fractions for leading airways (LA) and five different lobes are represented

PDIA (μm)	Deposition Mechanisms			Leading Airways and 5 Lobes						Total
	DIF	SED	IMP	LA	RU	RM	RL	LU	LL	
0.005	0.889	0.000	0.000	0.229	0.102	0.053	0.198	0.105	0.203	0.889
0.01	0.842	0.000	0.000	0.123	0.112	0.059	0.212	0.115	0.220	0.842
0.03	0.641	0.000	0.000	0.050	0.100	0.052	0.156	0.103	0.180	0.641
0.05	0.479	0.001	0.000	0.034	0.079	0.041	0.109	0.081	0.134	0.479
0.1	0.281	0.002	0.000	0.021	0.049	0.025	0.060	0.050	0.078	0.283
0.3	0.110	0.013	0.000	0.010	0.022	0.011	0.025	0.022	0.033	0.123
0.5	0.072	0.032	0.000	0.007	0.019	0.010	0.021	0.019	0.028	0.104
1	0.041	0.105	0.001	0.005	0.026	0.014	0.033	0.027	0.042	0.147
3	0.012	0.486	0.033	0.029	0.085	0.044	0.134	0.087	0.153	0.531
5	0.005	0.588	0.163	0.120	0.102	0.053	0.182	0.104	0.195	0.756
7	0.002	0.451	0.412	0.290	0.091	0.046	0.167	0.093	0.178	0.865
10	0.001	0.151	0.795	0.588	0.058	0.027	0.100	0.059	0.115	0.947

서로 차이점을 보이기는 하지만 전체적으로 이 연구에서 사용된 모델의 결과값은 비교하는 다른 2가지 모델의 결과값과 유사한 경향을 보임을 알 수 있다. 또한 각 영역별 침착해석 특성은 여러 그룹의 실험값들^{1,7,12,15} 과도 잘 일치한다.⁶⁾

각 입자크기에 따른 침착 메커니즘별 침착분율은 Table 2에 나타난 바와 같이 확산(DIF), 중력침강(SED) 및 관성충돌(IMP)로 나누어 볼 수 있다. 휴식상태에서 구강호흡인 기본호흡조건에서 침착분율을 나타낸 표의 값을 보면, 입자직경 0.5 μm 이하에서는 확산이 지배적이고 8 μm 이상에서는 관성충돌이 우세하며, 그 사이 범위인 1~5 μm 에서는 중력이 중요한 침착 메커니즘이다. 전체 침착분율로 볼 때 입자직경 0.1~1 μm 범위에서는 세 가지 메커니즘이 모두 약하게 영향을 미치므로 전체적인 침착분율이 30% 이하로 낮게 나타난다. 휴식상태에 비하여 가벼운 운동상태에서는 호흡량 증가 및 분당 호흡량의 증가 효과가 복합적으로 작용한다. 같은 분당 호흡량에서 호흡량이 증가하면 이에

따른 체류시간의 증가로 전체적으로 모든 입자크기에서 침착분율이 증가한다. 이는 작은 입자에서는 확산에 의한 침착이 증가하고 큰 입자에 대해서는 중력침강의 영향이 증가하기 때문이다. 또한 같은 호흡량에서 분당 호흡량이 증가하면 체류시간이 감소하므로 전체적으로 작은 입자는 침착분율이 감소하나 아주 큰 입자는 침착분율이 증가한다. 이는 확산과 중력침강 영향은 감소하나 큰 입자에 대한 관성충돌의 영향이 증가하기 때문이다.

휴식 및 구강호흡 상태에서 각 폐엽별 침착분율은 앞의 Table 2에 나타난 바와 같다. 각 폐엽에는 구강인후두부를 포함하는 기관도입부(LA)에서 확산 및 관성충돌에 의하여 작은 입자와 큰 입자의 상당부분이 제거되고 남은 입자가 유입되는데, 유입된 입자들의 각 폐엽에서의 각 호흡조건에 따른 입자크기별 침착특성은 총 침착분율의 일반적인 특성을 따른다. 또한 각 폐엽별 총 침착분율은 대략적으로 폐엽 부피에 비례하여 나타나며, 큰 폐엽 부피를 가진 좌하(LL) 및 우하(RL)

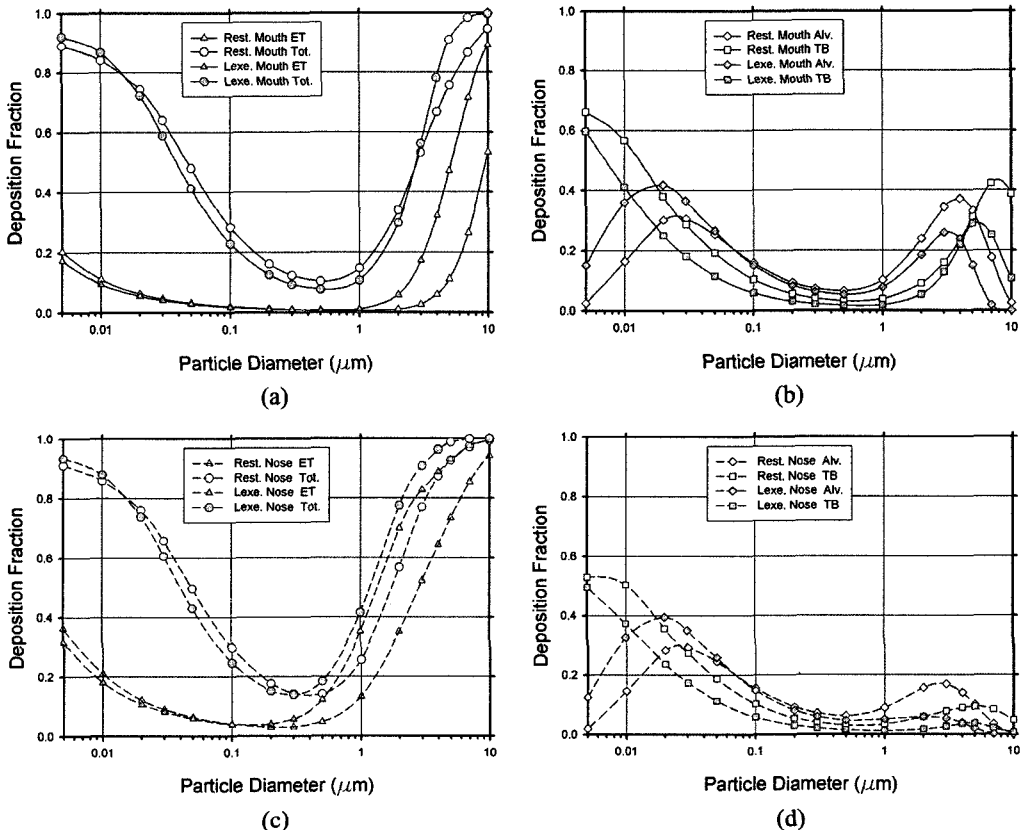


Fig. 5. Comparison of deposition fractions among three different regions: ○ Total, △ extrathoracic region, ◇ Alveola region, □ Tracheobronchial region.

폐엽에서의 침착분율은 높게 나타나고, 부피가 작은 우중(RM) 폐엽에서의 침착분율은 낮게 나타난다. 특히 비강호흡일 경우 및 운동상태일 경우에는 기관도입부에서 제거되는 양이 많으므로 각 폐엽에서의 침착분율이 상대적으로 감소한다.

호흡상태별 호흡기 내 입자 침착분율을 두부영역(ET), 기관/기관지영역(TB) 및 폐포영역(Alv.)으로 나누어 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 각기 다른 기호는 각기 다른 영역 즉, 삼각형은 두부영역, 마름모는 폐포영역, 사각형은 기관/기관지 영역의 침착분율을 나타낸다. 또한 원 기호는 각 영역에 대한 총 침착분율을 나타낸다. 다음의 Fig. 5, 6, 8에 나타난 그래프상에서 각 기호에 대하여 흰색 기호는 휴식상태(Rest), 검은색 기호는 가벼운 휴식상태(Lex)를 나타내고 실선은 구강호흡 조건(Mouth), 점선은 비강호흡 조건(Nose)을 나타낸다. Fig. 5(a),(b)에서는 구강호흡 조건에서 휴식상태와 가벼운 운동상태에서의 침착분율 비교를 나타내 준다. 원기호로 나타난 총 침착분율을 보면, 앞서 설명한 바와 같이 가벼운 운동상태에서는 휴식상태에 비하여 분당 호흡량과 호흡량이 동시에 증가하는 영향의 결과

로, 전체적으로 침착분율이 감소하나 아주 작은 입자와 아주 큰 입자에서 침착분율이 더 크게 나타남을 알 수 있다. 삼각형으로 나타난 두부영역에서는 체류시간의 영향을 크게 받지 않고 큰 입자들이 관성충돌의 영향을 주로 받아, 가벼운 운동상태에서는 큰 입자에서 침착분율이 크게 나타난다. 사각형으로 나타난 기관/기관지 영역에서는 분당 호흡량 증가에 따른 체류시간 감소의 영향을 주로 받아 침착분율이 떨어진다. 또한 관성의 영향을 받는 큰 입자도 이미 상위영역에서 침착되어 하위영역에는 도달할 수 없으므로 침착분율이 떨어진다. 폐포영역에서는 깊이 도달한 입자만이 침착할 수 있으므로 호흡량 증가에 따른 체류시간 증가의 영향을 주로 받아 작은 입자에서 침착분율이 증가한다. Fig. 5(c),(d)에서는 비강호흡 상태에서 휴식상태와 가벼운 운동상태에서의 침착분율 비교를 나타내 준다. 비강호흡 상태에서는 Fig. 5(a),(b)에 나타난 구강호흡 상태와 비교하여 두부영역에서의 침착분율이 크게 나타나는데, 특히 분당 호흡량 증가에 따른 관성침착율의 증가에 의하여 가벼운 운동상태일 때 침착분율이 상당히 크게 나타난다. 기관/기관지 영역 및 폐포영역

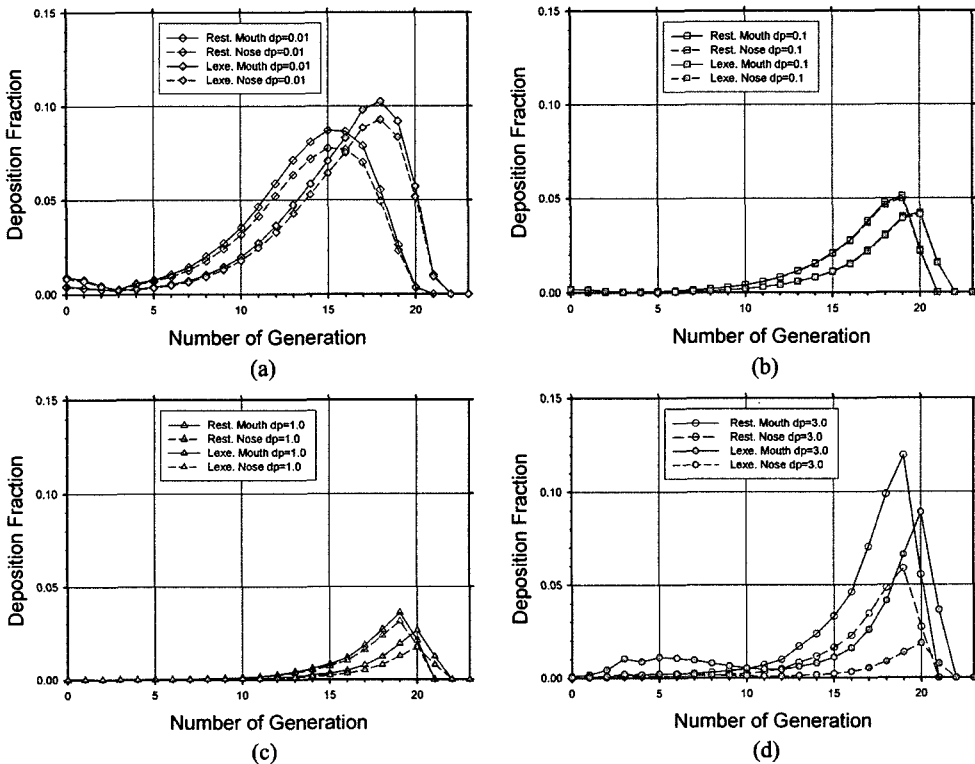


Fig. 6. Generational deposition fractions showing the effects of breathing patterns and particle sizes: (a) $dp = 0.01 \mu\text{m}$, (b) $dp = 0.1 \mu\text{m}$, (c) $dp = 1.0 \mu\text{m}$, (d) $dp = 3.0 \mu\text{m}$.

역에서의 침착분율 특성은 구강영역에서의 특성과 크게 차이가 나지 않으나 비강에서 비교적 큰 입자들이 상당부분 침착되므로 하위영역에서의 침착분율이 작게 나타난다.

3.2 위치별 침착 특성

각 호흡상태에서의 각 세대별 침착분율을 입자직경 0.01, 0.1, 1.0, 3.0 μm 별로 각각 별도의 Fig. 6(a), (b), (c), (d)에 나타내었다. 세대별 침착분율은 같은 세대에 속하는 모든 폐엽 및 기관도입부에서의 침착분율을 합한 값이다. 입자직경 0.01 μm 에서는(Fig. 6(a)) 하위세대에서 침착이 주로 확산에 의하여 일어나는데, 가벼운 운동상태(검은 기호)에서는 휴식상태(흰색 기호)와 비교할 때 분당 호흡량 증가에 의한 체류시간의 감소에 의하여 16세대 이전 상위세대에서는 침착분율이 감소하나 종말세기관지(17세대) 이후 하위세대에서는 높은 호흡량에 의한 체류시간의 증가 및 깊은 침투의 영향으로 침착이 증가함을 알 수 있다. 또한 비강호흡일(점선) 경우는 구강호흡(실선)과 비교할 때 비강에서의 침착에 의하여 하위세대로 침투하는 양이 줄어서 전체적으로 침착분율이 감소하는 특성도 함께 볼 수 있다. 입자직경이 0.1, 1.0 μm 에서는(Fig. 6(b),(c)) 모든 메커니즘의 영향이 작게 작용하여 전체적인 침착분율이 작게 나타난다. 입자직경 3.0 μm 에서는(Fig. 6(d)) 중력의 영향이 지배적으로 나타나서 하위세대에서 침착이 주로 일어난다. 이 경우 가벼운 운동상태(검은 기호)에서는 종말기관지(11세대) 이후 하위세대에서의 침착분율이 감소하는데, 이는 분당 호흡량 증가에 의한 관성충들의 영향으로 이전 상위세대에서 많은 양을 침착시켜서 유입량이 줄어들고 체류시간 감소로 중력효과가 감소하기 때문이다. 또한 호흡량 증가에 의하여 최대 침착세대의 위치가 하위세대로 이동하는 것을 함께 볼 수 있다. 세대별 침착분율 그래프가 입자직경 0.01 μm 의 경우 입자직경 3.0 μm 에 비하여 완만한 곡선형태로 나타나는데 이는 확산이 지배적인 입자직경 0.01 μm 의 경우 흡입 토출시 입자를 분기관 내 경계층에 확산시켜서 입자의 세대간 분포가 원활히 이루어지기 때문이다.

3.3 단위 면적당 침착량

흡입연기에 의한 인체피해 영향을 연기입자에 흡착된 독성물질의 체내 흡수량 관점에서 본다면 입자가 침착된 위치에서 단위 표면적당 얼마나 많은 양의 입자가 침착 되었는지가 흡입연기의 유해성 평가에 중요한 요소가 될 수 있다. Fig. 7에서는 휴식상태(Res)와 가벼운 운동상태(Lexe) 2가지의 경우 각 세대별로 해

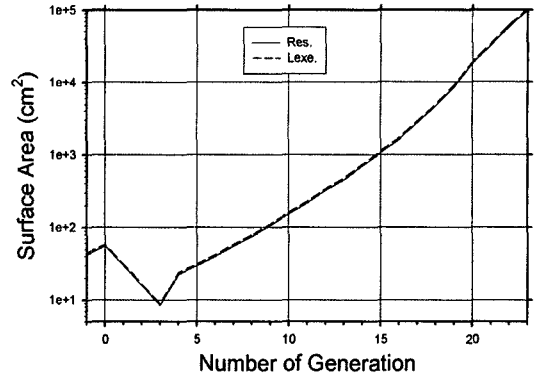


Fig. 7. Generational surface areas of inner airway walls.

당세대에 속한 모든 분기관의 총 내부 표면적을 나타낸다. 분기관 모델에서 세대 수가 하나 증감함에 따라 분기관의 수는 2배씩 증가한다. 주기관(0세대)에서 3세대까지는 세대 번호가 증가함에 따른 분기관 수의 증가에 비하여 각 분기관의 크기감소가 크므로 표면적이 줄어 들지만 하위세대에서는 분기관 수가 급격히 증가하여 그림에서 보는 바와 같이 23세대에서는 3세대에 비하여 대략 10,000배의 표면적을 가지게 된다.

단위면적당 입자침착율을 각 세대별로 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 서로 다른 기호는 서로 다른 입자 크기를 나타낸다. Fig. 8(a),(b)에서는 구강호흡(실선)에서 휴식상태(흰색 기호)와 가벼운 운동상태(검은색 기호)에서의 단위 면적당 입자 침착분율 비교를 나타내 준다. 앞서 Fig. 6에서 설명한 침착분율이 종말 세기관지(17세대) 근처에서 상대적으로 높은 값을 보이는 데 비하여 단위 면적당 침착분율 변화는 종말기관지(11세대) 근처까지 상대적으로 높은 값에서 완만한 변화를 보여주고 이후 하위세대에서 급격함 감소를 보여준다. 단위 면적당 입자 침착분율이 특징적으로 크게 나타나는 곳이 있는데, 입자직경이 0.01 μm 인 경우에 가벼운 운동상태에서는 기관도입부(LA)에서, 휴식상태에서는 기관도입부 이후 종말세기관지 이전 영역에서 크게 나타난다. 또한 입자직경 3.0 μm 인 경우에는 가벼운 운동상태에서 종말기관지 이전에 높은 단위 면적당 입자 침착분율을 보인다. 비강호흡 상태(점선)에서는 Fig. 8(c),(d)에서 나타난 바와 같이 비강을 포함하는 두부영역에서의 증가가 특징적으로 나타나고 나머지 부분은 구강호흡 상태와 비교하여 같거나 낮은 값을 갖는다.

입자에 흡착된 독성물질의 호흡기 내벽 접촉에 따른 체내 흡수 정도는 여러 가지 요소, 즉 입자크기, 침착위치 및 단위 면적당 침착량 등의 영향을 받는다. 일반적으로 알려진 바와 같이 입자가 작아지면 비표면적이 커

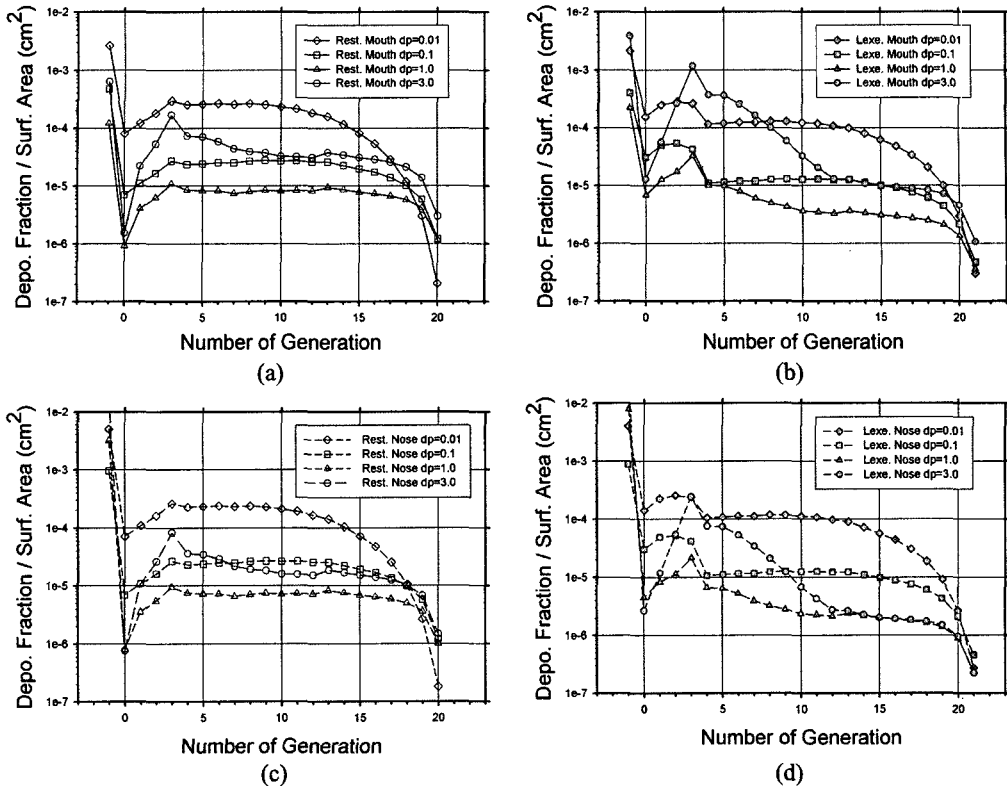


Fig. 8. Comparison of deposition fractions for unit surface area(cm^2) among different particle sizes: \diamond $dp = 0.01 \mu\text{m}$, \square $dp = 0.1 \mu\text{m}$, \triangle $dp = 1.0 \mu\text{m}$, \circ $dp = 3.0 \mu\text{m}$.

저서 흡착 및 탈착량이 많아지고 체내 흡수량이 많아진다. 침착위치 측면에서는 하위세대로 갈수록 표면이 연약하여 침투가 용이하고 가스교환이 일어나는 종말세 기관지 이하에서는 매우 효과적으로 흡수가 일어난다. 또한 단위 면적당 침착량이 많아지면 경계면에서의 농도차가 커져서 확산을 증가시킨다. 따라서 Fig. 8에 나타난 자료를 종합하면 종말세 기관지 이하에서는 단위 면적당 입자 침착량이 많지 않지만 침투력이 좋아서 체내 흡수량이 많고 기관/기관지 영역에서는 확산이 지배적인 작은 입자가 흡·탈착력이 우수하고 단위면적 당 침착량이 많아서 흡수조건이 좋다. 또한 관성충돌이 지배적인 큰 입자는 7세대 이전 상위 세대에서 가벼운 운동상태에서 특징적으로 많은 침착이 이루어지는데 이들은 일반적으로 섬모운동 및 점액운동에 의하여 제거되어 흡수량이 많이 줄어드는 것으로 알려져 있다.

4. 결 론

화재시 발생하는 연기의 흡입에 의한 인체피해 정도

는 연기의 호흡기 내 침착위치 및 단위 면적당 침착량과 밀접한 관계가 있다. 이 연구에서는 이의 정량적인 해석을 위하여 흡입 연기입자의 인체 호흡기 내 침착위치 및 단위 면적당 침착분율을 입자크기 및 각 호흡조건별로 이론적인 방법을 통하여 해석하여 다음의 결과를 얻었다. 입자에 흡착된 독성물질의 호흡기 내벽 접촉에 따른 체내 흡수 정도는 이 연구에서 제시한 침착위치별 단위 면적당 침착분율을 침착 위치에서 내벽 상태에 따른 흡수의 용이성과 함께 고려하여 판단하여야 한다.

1) 대부분의 연기입자 크기를 포함하는 입자직경 $5 \text{ nm} \sim 10 \mu\text{m}$ 영역에서 침착분율을 계산한 결과 휴식상태 호흡조건에서 입자직경 $0.5 \mu\text{m}$ 이하에서는 주로 확산, $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 에서는 중력, $8 \mu\text{m}$ 이상에서는 관성충돌에 의하여 침착분율이 상대적으로 높게 나타난다. 그러나 입자직경 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 범위에서는 세 가지 메커니즘이 모두 약하게 영향을 미치므로 전체적인 침착분율이 30% 이하로 낮게 나타난다.

2) 가벼운 운동상태에서는 휴식상태에 비하여 호흡

량 증가에 따른 모든 입자크기에서의 침착분율 증가와 더불어 분당 호흡량의 증가에 따른 확산/중력 영역에서의 침착분율 감소 및 관성충돌영역에서의 침착분율 증가 효과가 복합적으로 작용한다. 이에 따라 입자직경 0.01 μm 의 경우에는 종말세기관지(17세대) 이전 상위세대에서는 침착분율이 감소하나 이후 하위세대에서는 침착이 증가한다. 또한 입자직경 3.0 μm 의 경우에는 종말세기관지(11세대) 이전 세대에서는 침착분율이 증가하는 반면 이후 하위세대에서의 침착분율은 감소한다.

3) 비강호흡 상태에서는 구강호흡 상태와 비교하여 인후두부 상위 영역에서는 주로 가벼운 운동상태일 때 침착분율이 상당히 크게 나타나며 기관/기관지 영역 및 폐포 영역에서는 침착분율이 작게 나타난다.

4) 단위 면적당 침착분율은 주기관에서 종말기관지 근처까지 상대적으로 높은 값에서 완만한 변화를 보여 주고 이후 하위세대에서 급격한 감소를 보여준다. 입자직경이 0.01 μm 인 경우에 가벼운 운동상태에서는 기관도입부에서, 휴식상태에서는 기관도입부 이후 종말세기관지 이전 영역에서 크게 나타난다. 또한 입자직경 3.0 μm 에서는 가벼운 운동상태의 경우 종말기관지 이전 세대에서 높은 단위 면적당 입자침착분율을 보인다.

참고문헌

1. T.L. Chan and M. Lippmann, "Experimental Measurement and Empirical Modeling of the Regional Deposition of Inhaled Particles in Humans", *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, Vol. 41, pp.399-409(1980).
2. H.K. Chang and M. Paiva, "Respiratory Physiology: An Analytical Approach", Marcel Dekker, Inc. New York(1989).
3. Y.H. Chang and C.P. Yu, "A Model of Ventilation Distribution in the Human Lung", *Aerosol Sci. and Technol.*, Vol. 30, pp.309-319(1999).
4. R.G. Gann *et al.*, "International Study on the Sublethal Effects of Fire Smoke on Survivability and Health: Phase I Final Report", NIST Technical Note 1439(2001).
5. J. Goo and C.S. Kim, "Theoretical Analyses of Particle Deposition in Human Lungs Considering Stochastic Variations of Airway Morphology", *J. Aerosol Sci.*, Vol. 34, No. 5, pp.585-602(2003).
6. J. Goo and C.S. Kim, "Study on the Asymmetric Regional Deposition of Airborne Pollutant Particles in the Human Respiratory Tract", *J. KSAE*, Vol. Vol. 19, No. 5, pp.551-560(2003a).
7. J. Heyder, *et al.*, "Total Deposition of Aerosol Particles in the Human Respiratory Tract for Nose and Mouth Breathing", *J. Aerosol Sci.*, Vol. 6, pp.311-328(1975).
8. I.R. Hill, "Reaction to Particles in Smoke", *Toxicology*, Vol. 115, pp.119-122(1996).
9. W.C. Hinds, "Aerosol Technology", John Wiley & Sons, Inc, New York(1982).
10. C.S. Kim, A.J. Iglesias, and L. Garcia, "Deposition of Inhaled Particles in Bifurcating Airway Models: II. Expiratory Deposition", *J. Aerosol Medicine*, Vol. 2, pp.15-27(1989).
11. C.S. Kim and D.M. Fisher, "Deposition Characteristics of Aerosol Particles in Sequentially Bifurcating Airway Models", *Aerosol Sci. Technol.* Vol. 31, pp.198-220(1999).
12. C.S. Kim and P.A. Jaques, "Respiratory dose of Inhaled Ultra Fine Particles in Healthy Adults", *Phil. Trans. Royal. Soc. Lond. A*, Vol. 358, pp.2693-2705(2000).
13. G.W. Muholland, "Smoke Production and Properties", *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd Edition, 2/258-268(2002).
14. V. Sauret *et al.*, "Study of the Three-dimensional Geometry of the Central Conducting Airways in Man Using Computed Tomographic(CT) Images", *Journal of Anatomy*, Vol. 200, No. 2, pp.123-134 (2002).
15. W. Stahlfhofen, G. Rudolf, and A.C. James, "Intercomparison of Experimental Regional Aerosol Deposition Data", *J. Aerosol Medicine*, Vol. 2, pp.285-308(1989).
16. USEPA, "Air Quality Criteria for Particulate Matter", EPA/600/P-99/002a-bF, USEPA, RTP, NC(2004).
17. E.R. Weibel, "Morphometry of the Human Lung", Academic Press Inc., Springer-Verlag, New York (1963).
18. H. Yeh and G.M. Schum, "Models of Human Lung Airways and Their Application to Inhaled Particle Deposition", *Bulletin Math. Biology*, Vol. 42, pp.461-480(1980).