

흡입연기의 침착 실험을 위한 충전층 폐모델 개발에 관한 연구

Development of Packed Bed Lung Model for the Deposition Studies of Fire Smoke

구재학

Jae-Hark Goo

우석대학교 소방안전학과

(2008. 4. 29. 접수/2008. 6. 2. 채택)

요약

화재에 의한 흡입연기의 중장기 인체 유해성은 흡입연기가 폐에 침착되는 양과 밀접한 관련이 있다. 연기의 폐 내 침착량을 구하기 위해서는 인체 실험이 불가능한 만큼 폐모델을 이용한 실험이 필요하나 실제 폐형태에서 나타나는 연속적으로 감소되는 분지관의 제작상 어려움으로 인하여 하위 세대에서는 모델 실험을 통한 침착 연구가 힘들다. 본 문제를 해결하기 위하여 이 연구에서는 아래로 갈수록 직경이 단계적으로 감소하는 구형 충전층을 이용한 폐모델을 개발하고 이를 폐침착 실험에 적용하였다. 실험장치는 각 입자크기별 호흡 패턴 변화에 따른 입자의 침착량을 측정하도록 구성되었으며 표준입자에 대한 실험값을 실제 폐에 대한 결과와 비교함으로써 개발된 폐모델의 타당성을 검증하였다. 이 폐모델은 화재시 발생하는 여러 가지 연기입자의 흡입에 의한 인체 피해 연구에 도움이 될 것으로 생각된다.

ABSTRACT

Adverse health effects of inhaled smokes are associated with the amount of the particles deposited in human lung. Lung model is needed to simulate smoke deposition because of the hardness of the in vivo deposition experiment. However, it is hard to realize the successively decreasing bifurcations in the model. In this work, an experimental lung model was developed to simulate the smoke deposition in the lung. Instead of bifurcating airways, the lung model was made of packed beds of which size decreased downwards. The experimental results using this model showed good agreements with existing results for real lung in the deposition characteristics. The model could be applied to the studies of health risk assessment of the inhaled smoke particles generated by fire.

Keywords : Smoke particle, Lung deposition, Lung model, Simulation, Packed beds

1. 서론

화재현장에서 인명피해의 80% 이상이 화염에 의한 직접적인 손상보다는 유독가스나 연기의 흡입에 의한 간접적인 손상에 의하여 발생되고 있다. 또한 최근 가연구조물 및 내장재의 다양화에 의하여 매연의 유독성이 증가하고 있으며, 이에 따라 흡입연기에 의한 폐손상에 따른 중·장기적인 인체 피해가 관심의 대상이 되고 있다.^{1,2)} 연기는 다양한 유독성 화합물을 포함한 10 μm 이하의 미연탄소입자군(soot particle)으로 이루어져 있는데 생성이력에 따라 이들의 입자구조, 크기

및 가스조성이 서로 다르게 나타난다.³⁾ Weibel의 폐형태모델(morphology model)에 따르면, 호흡기는 기관(trachea)에서 폐포(alveola)에 이르기까지 약 23세대(generation)의 연속적인 가지치기 구조를 갖는 분지관(bifurcating airway)으로 이루어져 있다.⁴⁾ 화재에 의해 발생된 연기는 호흡기에 유입되어 폐 내에서 이와 같은 연속적인 분지관을 지나면서 여러 침착 메커니즘에 의하여 표면에 침착/침전(deposition)되며 침착된 입자는 폐의 방어기제(defense mechanism)에 의하여 일부가 제거되고 나머지는 잔류하거나 흡수(absorption)되어 인체에 영향을 미치게 된다.^{5,6)} 흡입연기의 인체 피해 정도를 분석하기 위해서는 흡입된 연기입자의 호흡기 관내 전달, 침착, 제거, 탈착, 흡수 및 체내독성영향 등

E-mail: jaygoo@woosuk.ac.kr

에 대한 해석이 이루어져야 하는데, 이 중에서 각 발생원별 흡입연기에 따른 폐 내 침착량 산정이 1차적으로 중요한 요소이다. 그러나 연기의 유해성 때문에 직접적인 인체실험에 의한 침착량 산정이 어렵고 대신 무독성 표준입자의 폐침착 실험 데이터나 여러 가지 이론적 연구에 의한 침착량 산정 결과를 원용하여 사용하고 있다.^{7,8)}

폐 침착에 관한 연구는 크게 이론연구와 실험연구로 나뉜다. 이론연구 방법으로는 폐형태가 불규칙한 가지치기 구조로 되어 있고 입자의 형상 또한 불규칙하기 때문에 입자의 운동을 예측하여 침착량을 산정하는 데 어려움이 있다. 이런 문제의 해결책으로서 다양한 방법이 시도되고 있다. 불규칙한 폐형태에 대해서는 세대수가 증가하면서 분지관 크기가 일정하게 감소하는 연속적인 대칭 분지관으로 가정하여 이들 분지관에서의 입자 침착률로 전체 폐에서의 침착률을 예측하는 방법 등이 사용된다.⁹⁾ 또한 대기 중 불규칙한 형상의 오염 입자들에 대해서는 이들과 동등한 낙하 종단속도 (terminal velocity)를 갖는 구형으로 가정된 등가직경 (equivalent diameter)의 입자로 환산하여 이에 해당하는 입자의 침착량을 실제 입자의 폐 침착량으로 추정하는 등의 방식을 사용하고 있다. 그러나 중력 이외에 관성, 차단 및 확산 등 여러 복잡한 메카니즘을 가지는 폐 내 입자침착 현상 해석에서 이러한 등가직경 개념은 해석상 많은 오류를 내포하고 있다.⁵⁾ 실험연구 방법에는 인체실험과 모델실험이 있는데, 인체실험에서는 그 동안의 중요한 연구들이 인체에 무해한 표준 구

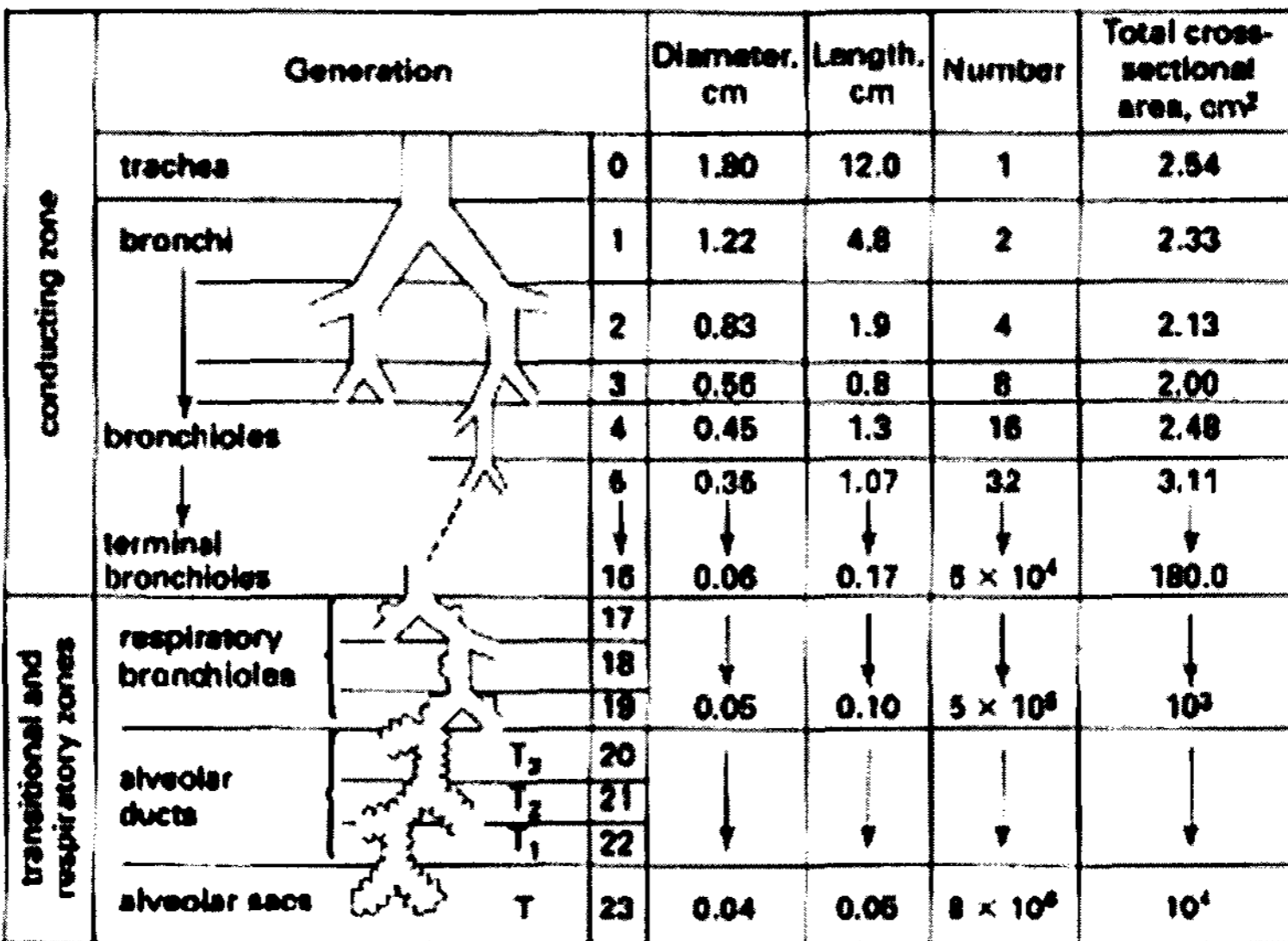
형입자를 사용하여 입자의 크기에 따른 침착 특성을 밝힘으로써 결과를 의학, 약학 등의 분야에서 활용하고 있다.¹⁰⁻¹²⁾ 그러나 화재시 발생하는 연기는 입자의 형상 등 물리 화학적 조성 들의 다양성을 고려할 때 표준입자와 침착 특성이 다르며 또한 이 연기는 인체 유해성을 고려할 때 직접적인 인체 실험에 많은 어려움이 있다. 이와 같은 이론해석 및 인체실험에서의 단점들을 해결하기 위하여 폐모델을 이용한 침착실험을 수행할 수 있다. 그러나 약 23번의 연속적으로 감소되며 분기되는 분지관은 하위세대로 내려갈수록 크기가 작아지고 숫자도 급격히 증가하여 제작상 어려움이 있다. 따라서 하위세대에서는 실험상 적용이 힘들어 분지관 모델에 대해서는 현재 상위 3-4세대까지만 침착량 측정 실험이 이루어지고 있다.¹³⁾

이 연구에서는 인체 폐에서 연기입자의 침착특성을 모사하는 데 있어서 이와 같은 이론연구, 인체실험 및 분지관 모델실험에서의 어려움을 극복하기 위하여 직경이 단계적으로 변하는 구형 충전층을 이용한 실험용 폐모델을 개발하고, 이를 폐침착 실험에 적용하여 개발된 폐모델의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 폐모델 개발

2.1 입자침착 메커니즘 분석

Weibel⁴⁾의 대칭 폐형태모델(morphology model)에 따르면 인체 호흡기는 Figure 1에 나타난 것과 같이 연속적인 가지치기 구조를 갖는 분지관으로 이루어져 있



	Generation	Diameter, cm	Length, cm	Number	Total cross-sectional area, cm ²	
conducting zone	trachea	0	1.80	12.0	1	2.54
	bronchi	1	1.22	4.8	2	2.33
		2	0.83	1.9	4	2.13
	bronchioles	3	0.56	0.8	8	2.00
		4	0.45	1.3	16	2.48
		5	0.36	1.07	32	3.11
6		0.26	0.85	64	3.92	
transitional and respiratory zones	terminal bronchioles	16	0.06	0.17	6×10^4	180.0
	respiratory bronchioles	17	↓	↓	↓	↓
		18	↓	↓	↓	↓
		19	0.05	0.10	5×10^6	10^3
	alveolar ducts	T ₂	20	↓	↓	↓
		T ₁	21	↓	↓	↓
	alveolar sacs	T	22	↓	↓	↓
		23	0.04	0.05	8×10^6	10^4

Figure 1. Weibel's dichotomous model for lung geometry.⁴⁾

는데, 이 분지관은 0세대로 정의되는 기관(trachea)에서 시작하여 1세대 주기관지(main bronchi)에서 좌우 폐로 나뉘어지고 11세대의 종말기관지(terminal bronchus)를 거쳐 16세대의 종말세기관지(terminal bronchioles)에 이른다. 이후 분지관은 호흡세기관지(respiratory bronchioles)들을 거쳐서 23세대의 허파파리주머니(alveolar sacs)에 도달하는 연속 분지 영역에서 벽면을 통하여 혈액과 가스교환을 하도록 구성되어 있다. 흡입연기는 공기가 유입 또는 토출되는 호흡이 이루어지는 동안 이와 같은 연속적인 분지관을 지나면서 관성충돌(inertial impaction), 중력침강(gravitational sedimentation), 차단(interception) 및 확산(diffusion) 등의 침착 메커니즘에 의하여 폐에 침전/침착(deposition)된다.^{5,6)}

이와 같은 연속 분지관에서 각 세대별로 같은 세대에 속한 분지관의 내부 단면적을 합하여 상위세대(기관방향 분지들)에서 하위세대(허파파리방향 분지들)까지 전체적인 분포를 보면, Figure 2에 나타난 것과 같이 단면적은 하위세대로 갈수록 급격히 증가하는 트럼펫모델로 나타낼 수 있다.¹⁴⁾ 원래 트럼펫모델은 폐 내부 단면적이 하위세대로 내려가면서 지수적으로 증가하는 특성을 갖는 각 세대별 전체 단면적 정보만 가지는 모델이며 내부에서 유동의 구체적인 분배와 관련된 폐형태에 대한 정보는 가지고 있지 않다.

이 연구에서는 유동관 내부 빈 공간의 전체 단면적은 트럼펫모델을 따르면서 형상은 충전층으로 이루어진 폐모델을 구성함으로써 Weibel의 폐모델에 대한 하위 분지관에서의 분지 제작에 따른 문제점을 해결하고자 하였다. 즉 각 세대별 분지관 대신 분지관 크기에 대응하는 공극을 갖는 구형 충전제(filler), 즉 구슬(bead)을 사각덕트에 크기별로 층층이 장입한 충전층을 구성하고 이 공극을 통하여 유동이 이루어지도록 한 폐모델을 구성하였다. 하위 세대로 갈수록 각 세대별 분지

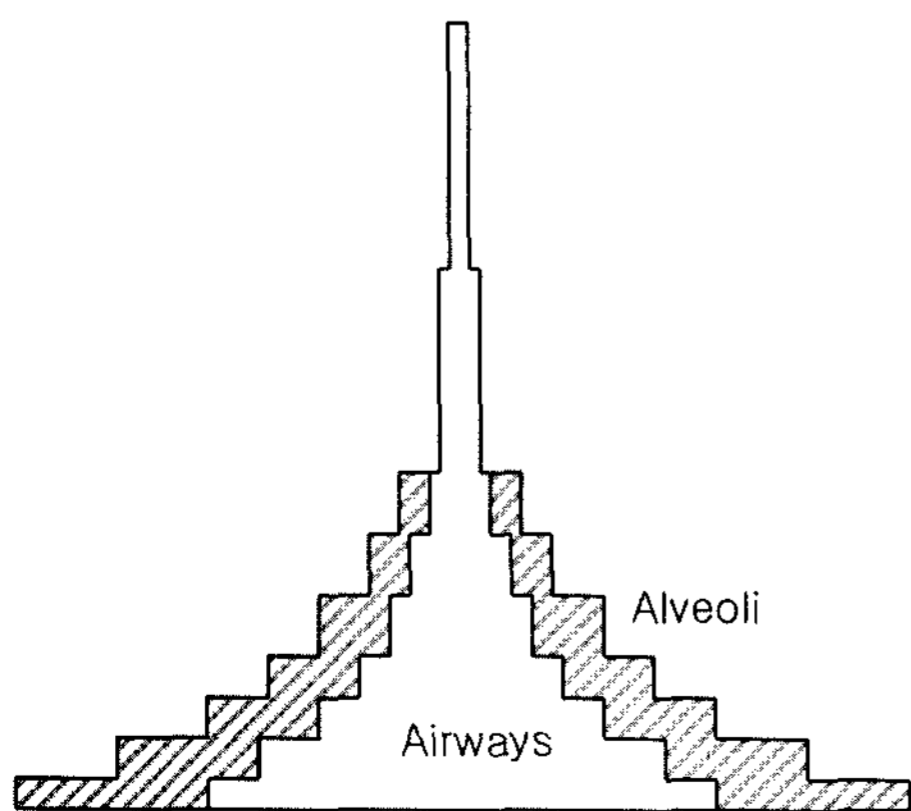


Figure 2. Theoretical trumpet model.¹⁴⁾

관의 크기가 줄어들고 분지 수가 많아지는 것은 충전제의 크기를 감소시키고 덕트의 단면적을 증가시킴으로써 반영하였다. 그러나 덕트의 단면적을 트럼펫모델에 나타난 그대로 분지관이 아닌 충전층에 적용하는 경우 하위세대에서의 급격한 단면적 팽창에 따라 유동의 적절한 분배가 이루어지지 않고 가운데로 쏠리는 현상이 나타날 수 있으며 또한 제작상 어려운 점도 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위한 수정모델을 만드는 데 있어서, 필요한 이론적인 근거를 확보하기 위하여 다음과 같이 폐 내부에서의 입자침착과 관련된 메커니즘을 분석하였다.

구강 호흡시 인체 폐 내에서의 입자 침착 특성은 미소부피 위치추적법을 이용한 입자침착률 계산 기법을 사용하여 Figure 3과 Figure 4에 보여 주었다.^{9,15)} 이 계산은 Goo¹⁵⁾가 제시한 것과 같이 폐엽 외형에 대해서는 Yeh 등¹⁶⁾이 제시한 5엽 비대칭 폐엽구조 및 각 부

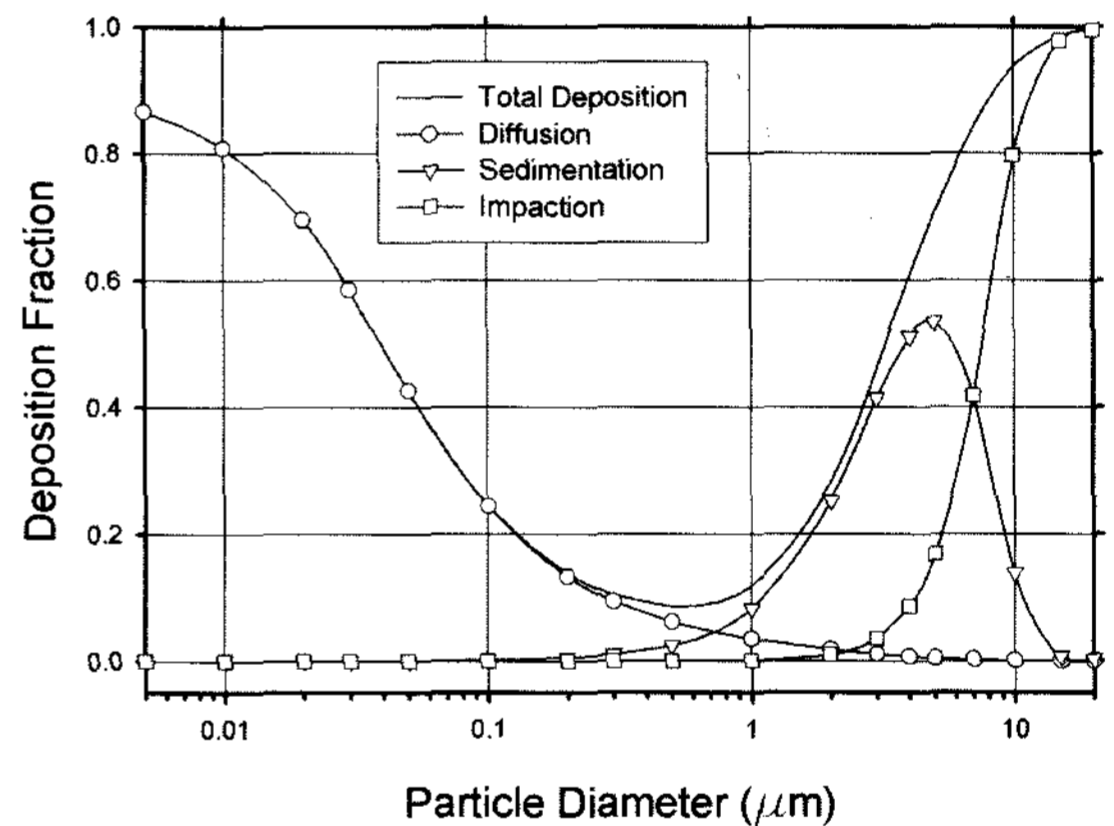


Figure 3. Effects of particle diameter for each deposition mechanism.

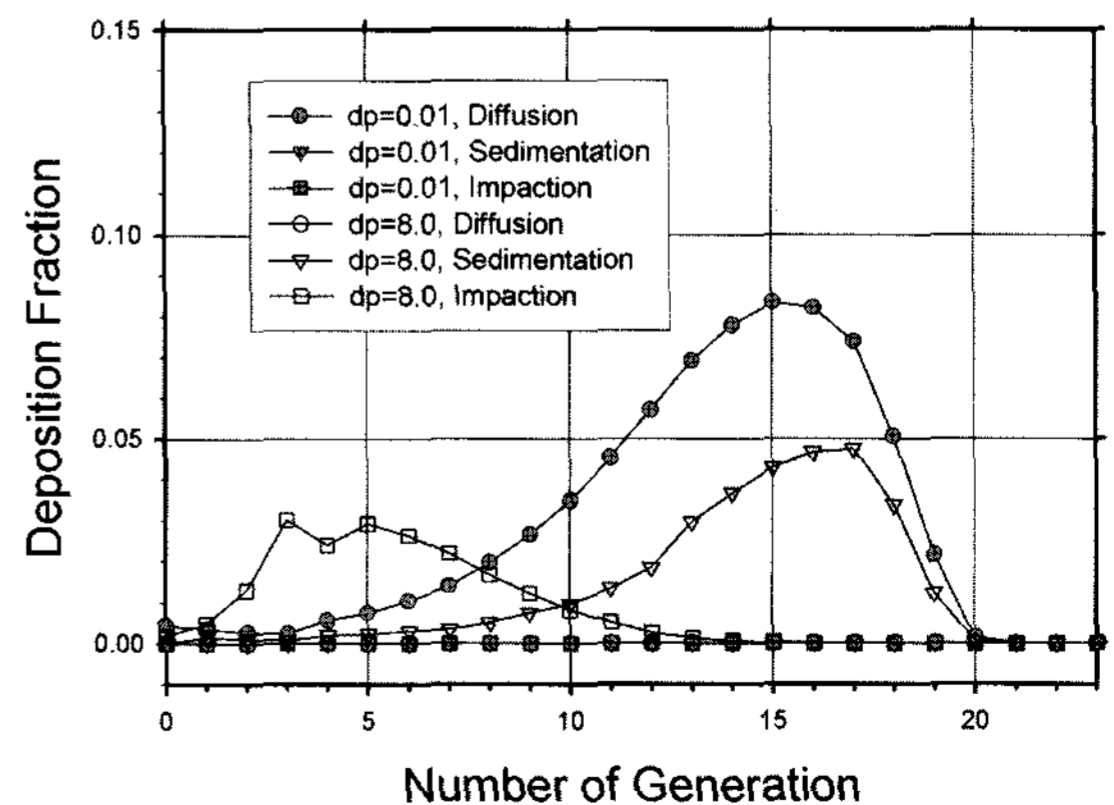


Figure 4. Generational distribution of deposition sites for each deposition mechanism and particle diameter.

폐 데이터를 사용하고 폐엽 내부의 분지관에 대해서는 Weibel⁴⁾의 대칭모델을 사용하는 혼합 폐형태모델을 적용하여 이루어졌다. 정상호흡 상태에서 날숨(exhalation) 시 폐에 남은 부피를 기능적 잔기용량(FRC: functional residual capacity)이라고 하는데, 일반적으로 이 기능적 잔기용량에서 일정량의 흡입과 토출량을 나타내는 호흡량(tidal volume)과 유동속도(flow rate)로 인체의 호흡 패턴을 구현할 수 있다. 입자의 침착률은 기본 호흡조건인 호흡량 500 ml, 유량 250 ml/s에 대하여 계산되었다. 각 침착 메커니즘에 따라서 Figure 3은 입자 크기별 침착량을, Figure 4는 기관 이하 각 세대별 침착량을 보여주고 있다. Figure 3에서 보면 0.3 μm 이하의 작은 입자는 주로 확산에 의하여 침착이 이루어지며 1 μm 이상의 입자는 중력에 의하여 침착이 이루어지는 것을 알 수 있다. 관성 충돌은 8 μm 이상의 크기에서 지배적으로 나타나는데 호흡기의 경우 인후두부를 포함한 두부 영역에서 큰 입자가 관성에 의해서 1차로 침착이 되고 나머지가 기관 영역으로 유입된다. 이와 같은 각 메커니즘별 지배적인 영역은 호흡조건에 따라 다소 변화가 일어난다. 즉 유량이 증가하면 관성 영역이 확대되고, 호흡량이 증가하면 확산 및 중력 영역이 증가한다. Figure 4에서 보면 확산 및 중력에 의한 침착은 주로 하위세대에서 이루어지며 관성에 의한 침착은 주로 상위세대에서 이루어진다. 흡입시 상위세대에서 하위세대로 일정 유량의 공기가 흐르는데, 상위분지에서는 단일관의 단면적은 큰 반면 세대 내 분지관의 수가 적어서 전체 단면적이 작기 때문에 유속이 높아서 관성충돌이 지배적이다. 그러나 하위세대에서는 기관분지의 수가 증가하여 단면적이 증가하므로 유속이 감소하는데, 이에 따라 미세 분지관 내에서 체류시간이 증가하여 중력침착 및 확산이 지배적으로 나타난다. Figure 4에서 입자크기로 볼 때 관성 영향이 큰 영역인 8 μm 인 경우 관성충돌에 의한 침착의 대부분이 11세대 이전에서 나타나는 것으로 보아, 일반적으로 12세대 이후 하위분지에서는 중력 및 확산이 지배적이므로 이 영역에서는 체류시간이 입자의 침착에 있어서 가장 중요한 변수가 됨을 알 수 있다.

2.2 충전층 폐모델 개발

이와 같은 상위세대와 하위세대에서의 지배적인 침착 메커니즘 분석 결과를 바탕으로 하여 다음과 같은 수정모델을 만들었다. 즉, 상위세대 분지에서는 전체 단면적을 원래 값으로 고정시켜서 유속을 원래 폐모델과 동일하게 함으로써 유로의 크기와 속도가 중요한 관성충돌을 모사한다. 반면에 12세대 이후 하위세대 분

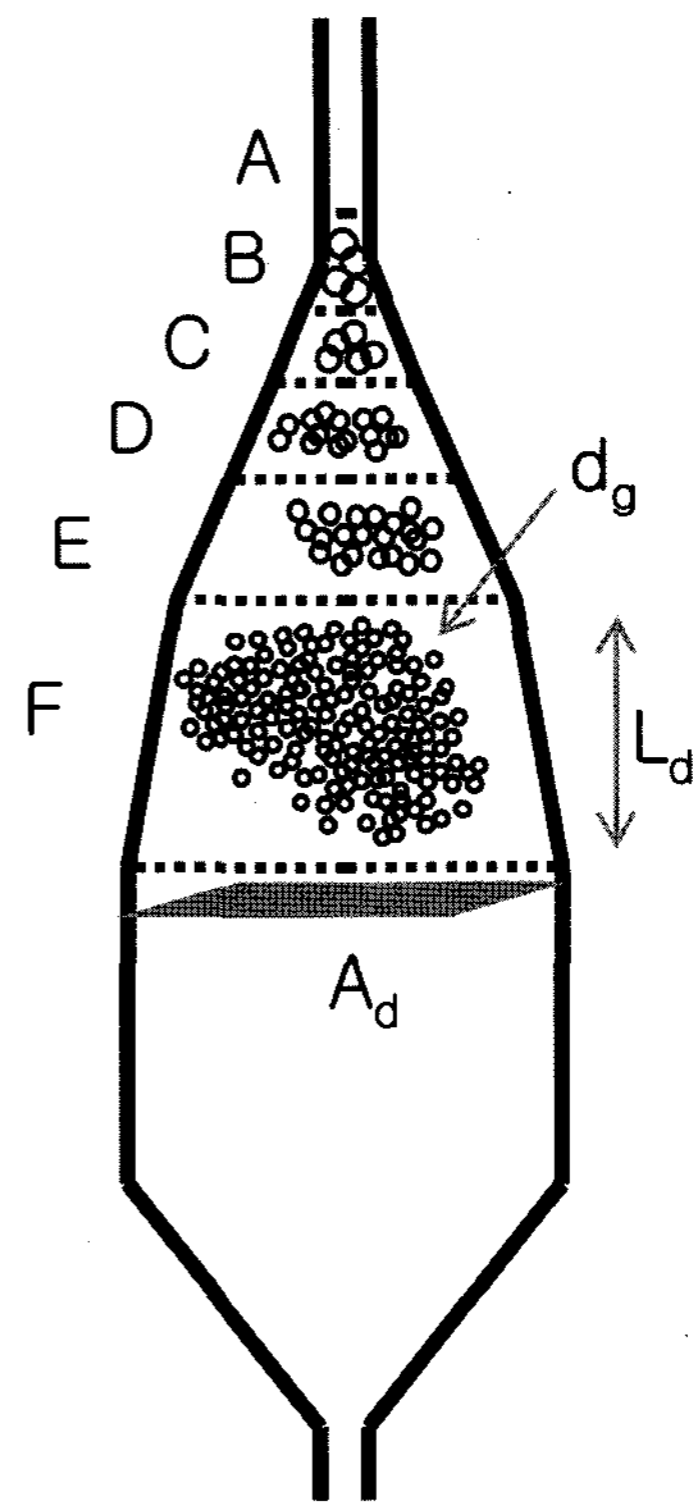


Figure 5. Schematic diagram of packed bed lung model.

지에서는 전체 단면적을 원래 값에서 줄임으로써 유동의 급격한 확산을 막고, 대신 길이를 증가시켜서 유속은 증가하는 반면 체류시간은 동일하도록 만들어 중력 침착 및 확산에 의한 침착량을 동일하게 한다. 단, 이와 같은 수정에 있어서 각 세대별 충전제의 크기는 전체 단면적의 감소와 관계없이 각각 원래의 값을 사용함으로써 유로의 크기는 일정하게 유지한다. Figure 5는 이와 같은 방법으로 구성된 충전층 폐모델의 개요도(schematic diagram)이다. 총 23세대의 폐를 A에서 F까지 6개의 섹션으로 나누어 각 섹션은 몇 개의 세대를 같이 포함하도록 하였고, 각 섹션에는 공급 크기가 그 섹션에 포함된 세대의 분지관들의 평균 크기와 같도록 서로 다른 크기의 충전제를 채워 넣었다.

Table 1은 Weibel 모델⁴⁾에 나타난 원래의 폐 데이터에 대한 대표값들과 이를 바탕으로 개발된 충전층 폐모델에 대한 각 치수 결정과정을 보여주는 계산표이다. 표에서 세대(G)는 각 섹션에 포함된 여러 세대 묶음을 보여주고 대표분지직경(d)은 각 섹션에 속한 세대들 분지직경의 대표값을 나타낸다. 각 섹션에 대한 평균유속(V)은 Weibel 모델에서 각 섹션에 있는 분지관의 길이를 합한 값(ΣL)과 체류시간을 합한 값(Σt)으

Table 1. Data sheet for modified trumpet model (for Q = 1 liter/s)

Section	A	B	C	D	E	F
Generation (G)	0-1	2-4	5-11	12-15	16-19	20-23
Typical Airway diameter: d (mm)	12.2	5.6	1.86	0.74	0.5	0.43
Sectional airway length: ΣL (mm)	167.6	39.3	47.6	10.3	5.22	2.62
Sectional residence time: Σt (ms)	41.6	8.84	34.18	59.88	223.1	1,230
Total cross sectional area of airway ΣA (cm ²) = $Q \times \Sigma t / \Sigma L$	2.48	2.2	7.18	58.1	434.8	4,762
Cross sectional area of duct A_d (cm ²) = $\Sigma A / \epsilon$	6.2	5.5	18	145	1,087	11,904
Adjusted cross sectional area of duct A_d^* (cm ²)	-	5.4	17	30	113	208
Adjusted length of duct: L_d^* (mm) = $\Sigma L \times A_d / A_d^*$	-	40	50	50	50	150
Diameter of glass beads: d_g (mm)	-	10	5	4	3	2

로부터 계산된다. 이 평균유속과 주어진 유량(Q)을 이용하여 각 섹션에서 분지관의 총단면적(ΣA)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Sigma A = Q/V = Q \times \Sigma t / \Sigma L \quad (1)$$

이 표에서는 편의상 유속 등 모델의 물리량을 유량(Q)이 1 liter/s인 경우에 해당되는 값들로 나타내었다. 동일 유량에서 체류시간은 충전층 폐모델을 둘러싼 덕트의 각 섹션에서의 단면적(A_d)에 길이(L_d)를 곱한 값에 비례하고, 이 값은 각 섹션에 대한 덕트의 부피가 된다. 따라서 충전층모델에서 각 섹션에서의 공극 부피를 해당 섹션에서의 원 분지관 부피($\Sigma A \times \Sigma L$)와 같이 놓은 아래 식 (2)은 각 섹션에서 충전층모델이 Weibel 모델에서와 같은 체류시간을 얻는 조건식이 된다. 각 섹션에서의 공극 부피는 덕트의 부피($A_d \times L_d$)에 구형 충전제의 공극률($\epsilon=0.4$)을 곱하여 얻을 수 있다.

$$A_d \times L_d \times \epsilon = \Sigma A \times \Sigma L \quad (2)$$

상위세대는 유속이 입자침착에 중요한 영향을 미치는 관성충돌 영역이므로 유속을 같게 하기 위해서 위 식에서 덕트의 길이를 분지관 길이의 합과 같다고 놓고

$$L_d = \Sigma L \quad (3)$$

다음과 같이 덕트의 단면적을 구한다.

$$A_d = \Sigma A / \epsilon \quad (4)$$

하위세대는 체류시간의 영향을 주로 받는 확산 및 중력의 영역이므로 식 (2)를 만족하는 조건에서 유동

의 분배를 고려하여 덕트의 단면적과 길이를 정하면 된다. 즉 (3) 및 (4) 식으로부터 구한 값으로부터 단면적을 줄이는 대신 (줄인 값을 A_d^* 로 표기) 이에 맞추어 아래 (5) 식에 따라 덕트의 길이를 증가시킴으로써 (증가시킨 값을 L_d^* 로 표기) 급격한 단면적의 증가를 피할 수 있다.

$$L_d^* = \Sigma L \times A_d / A_d^* \quad (5)$$

구형 충전제의 직경(d_g)은 각 섹션별로 충전층모델에서 공극 단면의 유효직경이 분지관의 대표직경(d)과 유사한 값을 선택해서 직경 2-10 mm의 구형 충전제를 단면적이 5-200 cm²되는 각 섹션의 덕트에 채워 넣어서 모델을 제작하였다. Figure 6은 실제 제작된 수정 트럼펫모델의 사진을 보여준다.

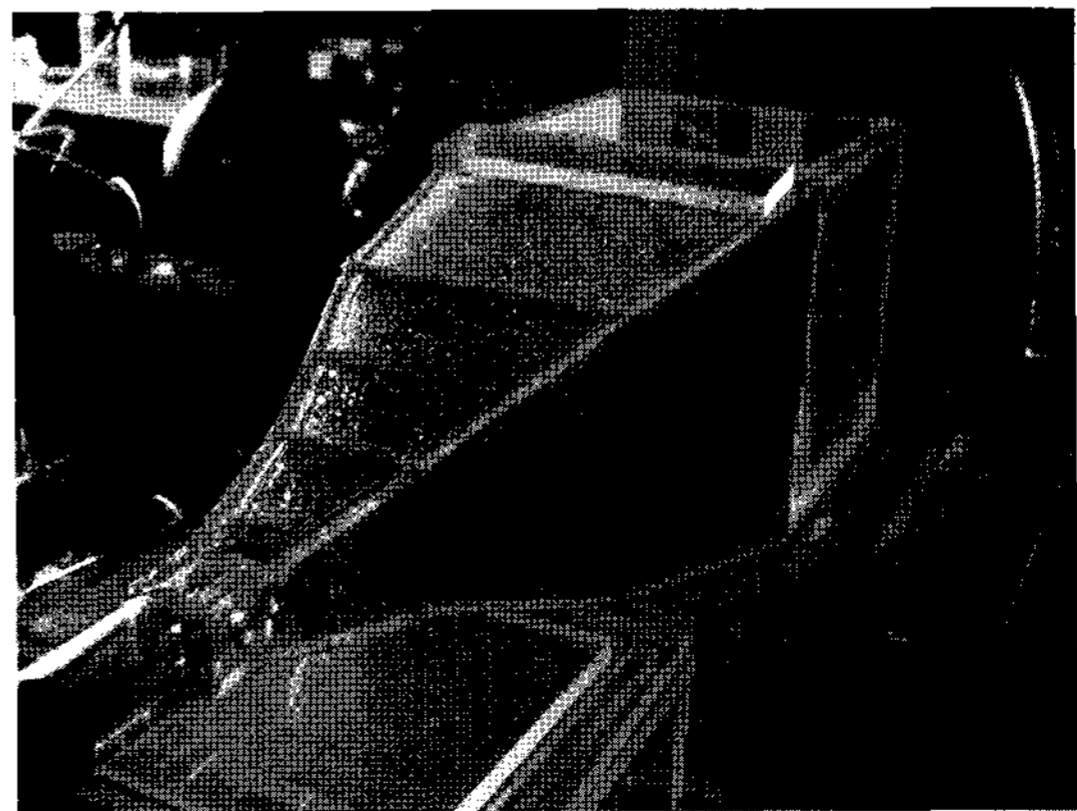


Figure 6. Photograph of the packed bed lung model developed in this work.

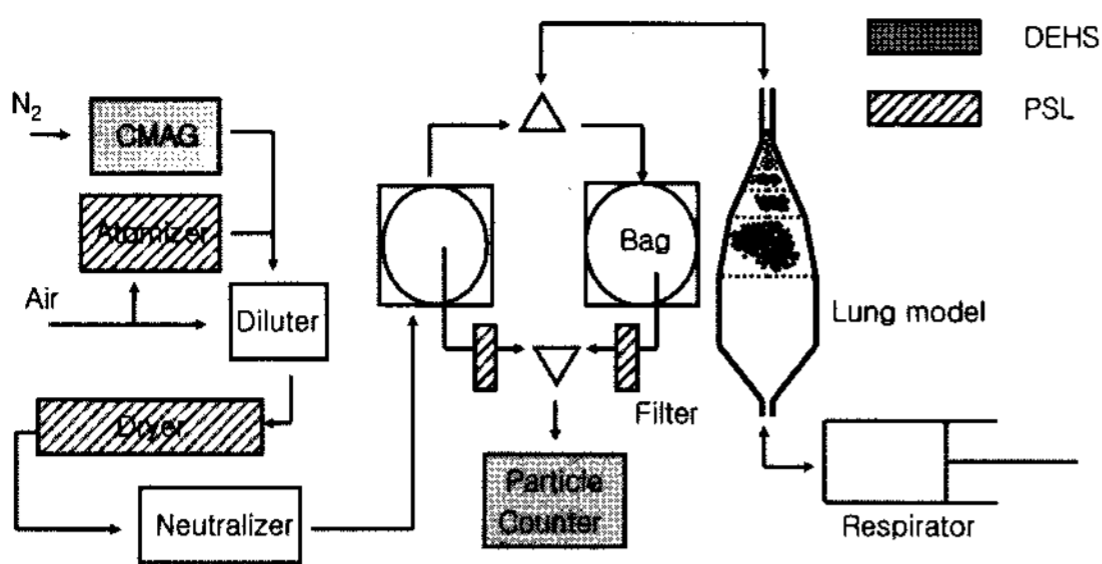


Figure 7. Experimental setup for the measurement of particle deposition by using packed bed lung model.

3. 충전층 폐모델의 검증

3.1 입자침착 실험장치 구성

Figure 7은 충전층 폐모델을 사용한 입자침착 실험 장치의 구성을 보여주는 개략도이다. 실험장치는 입자 발생부, 유동제어부, 입자측정부 및 폐모델부로 구성되어 있다. 실험에는 DEHS(Di-Ethyl-Hexyl-Sebacate) 및 PSL(Polystyrene Latex) 두 가지 입자가 사용되었다. 각각의 입자에 대하여 실험에 사용된 장비들은 개략도에서 DEHS 입자에 대하여서는 안이 채워진 블록으로, PSL 입자는 사선표시 블록으로 표시되었고 나머지 부분은 공통으로 사용되는 장비를 나타낸다.

입자발생부에서는 다음 두 가지 방법을 사용하여 실험용 입자를 발생시켰다. 첫째, DEHS 입자발생을 위하여 응축단분산 입자발생장치(CMAG: TSI, Model 3475)를 이용하였다. 약 $1-8 \mu\text{m}$ 크기의 DEHS 입자를 대략 $10^6 \text{ particles/cm}^3$ 의 농도로 발생시켜서 농도희석 장치(diluter)를 사용하여 원하는 농도로 희석하였다. 둘째, PSL 입자발생을 위하여 Atomizer(TSI, Model 9302)를 사용하였다. 입자직경이 0.1, 0.3, 0.7, 1.0, 2.0, $3.0 \mu\text{m}$ 인 PSL 입자를 사용하였다. 표준 시판용 1% 구형 형광입자(Duke Scientific Co., Green Fluorescent Microsphere)를 100-200 ml 증류수에 2-3방울 떨어뜨려서 발생시킨 다음 청정공기로 농도를 희석하였다. 수분 제거를 위하여 외통에 실리카겔을 장입한 확산건조 장치(Diffusion dryer)를 사용하였다. 청정공기발생을 위하여 청정공기공급기(Filtered air supply: TSI, Model 3074B)를 사용하였다. 두 가지 방법에 의하여 발생된 각각의 입자는 이온화장치(Ionizer: NRD, Staticmaster Model 2U500)를 이용하여 제작된 전기중화장치(Neutralizer)를 거쳐서 전기적으로 중화되어 흡입백(bag)으로 유입되도록 하였다.

유동제어부에서는 회전모터의 축에 부착된 원판에 왕복피스톤이 봉(connecting rod)으로 연결된 형태로 구

성된 호흡모사장치(respirator)를 이용하여 충전층 폐모델에 정현파형의 왕복 유동을 발생시켰다. 흡입과정에서는 흡입백 안에 있는 공기가 입자와 같이 폐모델 안으로 유입되고 반대로 토출과정에서는 폐모델 안에 침착되고 남은 입자가 토출백으로 들어가도록, 왕복유동의 위상에 맞추어 유동 방향이 자동으로 바뀌게 공기압밸브를 사용하여 제어부를 구성하였다. 호흡모사에는 흡입량(tidal volume) 및 유량(flow rate) 두 변수를 사용하였으며, 원판에 연결되는 봉의 위치를 조절하여 흡입량을 제어하고, 모터의 회전속도를 조절하여 유량을 제어하였다.

입자측정부에서는 흡입백 및 토출백 안에 있는 각각의 입자 농도를 측정하고 차이를 구하여 각 호흡 조건에서 각 입자 크기별 침착률을 계산하였다. 첫째, DEHS 입자에 대해서는 입자계수장치(Particle counter: Aerosol Spectrometer: GRIMM, Model 1.108)를 사용하여 입자의 농도를 측정하였다. 둘째, PSL 입자에 대해서는 47 mm 유리필터(glass filter: Whatman)를 사용하여 포집한 입자의 농도를 구하였다. 입자가 포집된 필터를 30 ml의 초산에틸(ethyl acetate)에 침전시킨 다음 초음파세척기(Ultrasonic cleaner: JAC, Model 2010P)를 사용하여 형광물질을 추출하였다. 이 용액을 거름종이(Nucleopore filter)로 걸러서 유리필터 성분을 제거하고 형광광도측정기(Luminescence spectrometer: Perkin Elmer, Model LS45B)로 형광광도를 측정하여 입자의 농도를 구하였다.

3.2 입자침착량 결과 비교

개발된 충전층 폐모델의 타당성을 검토하기 위하여 구형표준입자를 사용한 실험값을 이론 해석값 및 인체 실험 결과와 비교하였다. Figure 8은 폐에 대한 각 호흡조건에서의 각 입자 크기별 총침착률을 나타내 주는 그림이다. 각 호흡조건별로 선으로 나타낸 데이터는 비교를 위하여 분지관 폐모델에 대하여 Goo¹⁵⁾가 사용한 방법으로 계산된 이론 해석값을 나타내고 검은색 삼각형 기호로 나타낸 데이터는 미국환경보호국(USEPA)에서 인체에 무해한 입자를 사용하여 인체실험(in vivo)을 통하여 얻은 실험값^{17,18)}을 나타낸다. 원 및 사각기호로 나타낸 데이터는 이 실험에서 얻은 충전층 폐모델에 대한 실험값이다. 회색 기호는 DEHS 입자에 대한 실험값을, 하얀색기호는 PSL입자에 대한 실험값을 나타낸다. 정상호흡조건인 호흡량(tidal volume: Vt) 500 ml 및 유량(flow rate: Q) 250 ml/s에서의 총 침착률 결과는 실선, 역삼각형 및 원기호로 나타냈다. 여기서 침착률은 호흡시 유입된 입자에 대한 토출되지 않

고 폐모델 내부에 남은 입자수의 비를 말한다. 이 호흡조건에서 입자직경 $0.3 \mu\text{m}$ 이하에서는 확산이 지배적이어서 입자직경이 작아질수록 침착률이 증가하고 반면 $8 \mu\text{m}$ 이상에서는 관성충돌이 우세하여 입자직경이 커질수록 침착률이 증가한다. 그 사이의 범위인 $1-5 \mu\text{m}$ 에서는 중력이 중요한 침착 메커니즘이다. 전체 침착률로 볼 때 입자직경 $0.1-1 \mu\text{m}$ 범위에서는 세 가지 메커니즘이 모두 약하게 영향을 미치므로 전체적인 침착률이 30% 이하로 작게 나타난다. 정상호흡에 비하여 호흡량이 1000 ml 로 높아진 경우($Q=250 \text{ ml/s}$, 점선, 정삼각형 및 사각기호)에는 입자가 폐모델 하위 방향으로 깊숙이 침투하여 체류시간이 많아지므로 확산 및 중력 침강이 지배적인 $5-8 \mu\text{m}$ 이하인 입자크기 영역에서 침착률이 증가한다.

그림에서 충전층 폐모델에 대한 실험값이 분지관 폐모델에 대한 이론 해석치 및 인체실험치에 대하여 보이는 정량적인 차이는 연구대상이 된 각 폐모델 및 실제 폐들의 물리적인 형상의 차이 이외에, 입자응집, 정전기, 재비산(reentrainment) 및 전달손실 등으로부터 기인하는, 일반적인 입자발생 및 측정 실험에서 나타나는 오차들에 상당 부분 영향을 받은 것으로 판단된다. 실험에서 DEHS입자가 이론 및 인체실험치와 비교적 오차가 많이 나는 데에는 PSL입자가 고체인 반면 DEHS 입자는 액체로서 입자들 간의 응집 등에 의한 입자직경이 변화가 큰 것이 여러 요인 중 하나로 생각된다. 또한 DEHS입자에 비하여 PSL입자가 낮은 침전률을 보이는 데에는 재비산 등의 영향이 있는 것으로 사료된다. 이와 같은 DEHS입자 및 PSL입자를 사용한 충전층 폐모델에서의 실험데이터를 종합하여 볼 때 이 연구에서 개발된 충전층 폐모델은 어느 정도의 편차를 보이고는 있으나 실제 폐에서의 입자 침착 특성을 비

교적 잘 모사해 주는 것으로 판단된다.

4. 결 론

화재시 발생하는 연기에 의한 인체피해 분석에 중요한 연기의 폐 내 침착률을 알기 위해서는 인체 실험이 어려운 만큼 모델을 이용한 입자침착 실험이 필요하다. 인체 폐 내 입자침착 연구에서는 일반적으로 약 23세대의 연속적인 분지관 개념을 가지는 Weibel의 폐형태 모델이 사용되고 있으나, 연속적으로 감소되는 분지관의 제작상 어려움으로 인하여 하위 세대에서는 모델실험을 통한 침착 연구가 힘들다. 이 문제를 해결하기 위하여 이 연구에서는 충전층을 이용한 실험용 폐모델을 개발하고 표준입자에 대한 침착특성을 이론 및 인체 실험치와 비교함으로써 타당성을 검증하였다. 이 폐모델은 화재시 발생하는 각 발생원별 연기입자 등 인체 실험이 불가능한 입자의 흡입에 의한 인체 피해 연구에 도움이 될 것으로 생각된다. 개발된 충전층 폐모델에 대한 연구의 특징은 다음과 같다.

1) 실제 폐형태에서 나타나는 연속 분지관으로 이루어진 폐모델에 대하여 하위 세대에서의 미세 분지관 제작에 따른 문제점을 해결하기 위하여 내부 유로의 총 단면적은 트럼펫모델을 따르면서 형상은 구형 충전층으로 이루어진 폐실험모델을 개발하였다. 이 모델은 각 세대별 분지관 대신 분지관 크기에 대응하는 공극을 갖는 구형 충전층을 사각덕트에 크기별로 층층이 장입한 충전층을 형성하여 유동이 이루어지도록 구성하였다. 하위 세대로 갈수록 각 세대별 분지관의 크기가 줄어들고 분지 수가 많아지는 것은 충전층의 직경을 감소시키고 덕트의 단면적을 증가시킴으로써 반영하였다.

2) 하위세대에서의 급격한 단면적 팽창에 따라 유동의 적절한 분배가 이루어지지 않고 가운데로 집중되는 현상을 해결하기 위하여 세대별 단면적을 수정하였다. 즉 상위세대 분지에서는 전체 단면적을 원래 값으로 고정시켜서 유속을 원래 폐와 동일하게 함으로써 관성충돌을 모사하였다. 반면에 12세대 이후 하위세대 분지에서는 전체 단면적을 원래 값에서 줄임으로써 유동의 급격한 확산을 막고, 그 대신 길이를 증가시켜서 유속은 증가하는 반면에 체류시간은 동일하도록 만들어 중력침강 및 확산에 의한 침착률이 변하지 않도록 하였다.

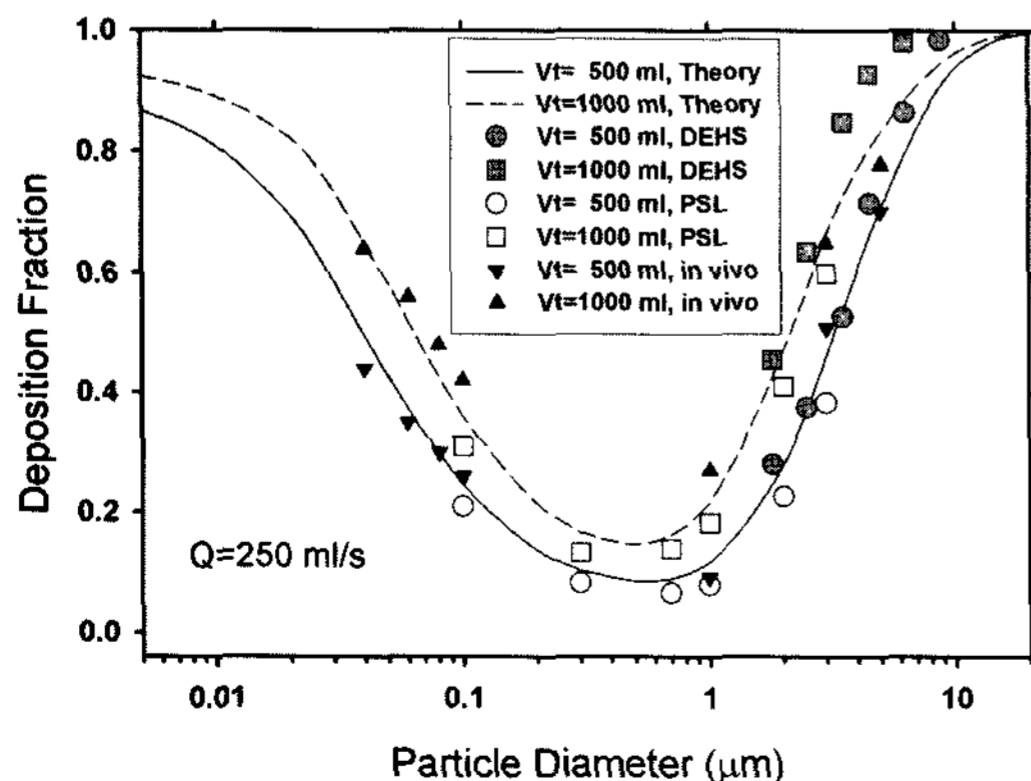


Figure 8. Comparison of total deposition fractions with existing results.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지역대학우수과학자 육성지

원연구(D00463: R05-2003-000-11649-0) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. I.R. Hill, "Reaction to Particles in smoke", *Toxicology*, Vol.115, pp.119-122(1996).
2. H.P. Witschi and J. D. Brain (ed.), "Toxicology of Inhaled Materials: General Principles of Inhalation Toxicology (Handbook of Experimental Pharmacology)", Springer-Verlag, New York(1985).
3. G.W. Muholland, "Smoke Production and Properties", *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd Edition, 2/258-268(2002).
4. E.R. Weibel, "Morphometry of the Human Lung", Academic Press Inc., Springer-Verlag, New York (1963).
5. W.C. Hinds, "Aerosol Technology", John Wiley & Sons, Inc., New York(1982).
6. H.K. Chang and M. Paiva, "Respiratory Physiology: an Analytical Approach", Marcel Dekker, Inc. New York(1989).
7. R.G. Gann, J.D. Averill, K.M. Butler, W.W. Jones, G.W. Mulholland, J.L. Neviasser, T.J. Ohlemiller, R.D. Peacock, P.A. Reneke and J.R. Hall, Jr., "International Study on the Sublethal Effects of Fire Smoke on Survivability and Health(SEFS): Phase I Final Report", NIST Technical Note 1439(2001).
8. USEPA, "Air Quality Criteria for Particulate Matter", EPA/600/P-99/002a-bF, USEPA, RTP, NC(2004).
9. J.H. 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).
10. W. Stahlhofen, G. Rudolf and A.C. James, "Intercomparison of Experimental Regional Aerosol Deposition Data", *J. Aerosol Medicine*, Vol.2, pp.285-308(1989).
11. R.B. Schlesinger, D.E. Bohning and T.L. Chan, "Particle Deposition in a Hollow Cast of the Human Tracheobronchial Tree", *J. Aerosol Sci.*, Vol.8, pp.429-445(1977).
12. C.S. Kim and S.C. Hu, "Total Respiratory Tract Deposition of Fine Micrometer-sized Particles in Healthy Adults: Empirical Equations for Sex and Breathing Pattern", *J. Appl. Physiol.*, Vol.101, pp.401-412(2006).
13. C.S. Kim and D.M. Fisher, "Deposition Characteristics of Aerosol Particles in Sequentially Bifurcating Airway Models", *Aerosol Sci. Technol.*, Vol.31, 198-220(1999).
14. D.B. Taulbee and C.P. Yu, "A Theory of Aerosol Deposition in the Human Respiratory Tract", *J. Appl. Physiol.*, Vol.38, pp.77-85(1975).
15. J.H. Goo, "Deposition of Inhaled Smoke Particles Produced by Fire", *J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol.21, No.1, 64-73(2007).
16. 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).
17. C.S. Kim and S.C. Hu, "Regional Deposition of Inhaled Particles in Human Lungs: Comparison between Men and Women", *J. Appl. Physiol.* Vol.84, pp.1834-1844(1998).
18. P.A. Jaques and C.S. Kim, "Measurement of Total Lung Deposition of Inhaled Ultrafine Particles in Health Men and Women", *Inhalation Toxicology*, Vol.12, pp.715-731(2000).