

[Research Paper]

화재 및 호흡조건 변화에 따른 연기입자의 인체 호흡기 내 영역별 침착량 분석

구재학

우석대학교 소방방재학과 교수

Study on the Regional Deposition of Smoke Particles in Human Respiratory Tract under the Variation of Fire and Breathing Conditions

Jaehark Goo

Professor, Dept. of Fire and Disaster Prevention, Woosuk Univ.

(Received October 19, 2019; Revised November 19, 2019; Accepted November 19, 2019)

요 약

화재 시 발생하는 연기는 가스상 물질과 이들을 흡착한 미연탄소 등의 입자상 물질로 이루어져 있다. 연기 중 가스상 물질의 흡입에 의한 인체피해는 대부분 단기적으로 이루어지는 데 비하여 입자상 물질의 흡입에 의한 피해는 가스상의 흡착상태에 따라서 상대적으로 장기적으로 이루어진다. 입자상 물질이 호흡기벽에 침착하여 호흡기 및 순환기 계통에 영향을 미치는 것과 관련하여, 침착되는 연기입자의 양과 호흡기 내 침착위치는 인체피해 산정의 중요한 요소인데, 이들은 연소조건에 영향을 받는 크기 및 농도 등 입자상태와 함께 호흡조건에 영향을 받는다. 이 연구에서는 화재 시 발생하는 연기의 흡입에 의한 인체피해 연구와 관련된 호흡기 내 연기입자 침착특성 파악을 위하여 연료종류, 연소조건 및 호흡조건에 따라 호흡기 내 영역별로 침착되는 연기입자의 입경에 따른 개수 및 질량 농도를 구하였다. 또한 각 조건별로 흡입연기의 일정기간 동안 호흡기 내 질량 침착량을 대기환경 미세먼지 기준치와 비교 분석하였다.

ABSTRACT

Smoke generated in a fire consists of gaseous substances and particulate matter, such as unburned carbon that adsorbed the gases. Human injury caused by inhalation of gaseous substances present in smoke is mostly short-term, whereas damage caused by inhalation of particulate matter is relatively a long-term phenomenon depending on the state of the gas-phase adsorption. The amount and location of the deposited smoke particles are important factors in estimating the damage caused to humans, which are affected by the breathing conditions as well as particle conditions, such as the size and concentration affected by the combustion conditions. In this study, in order to understand the characteristics of the deposition of smoke particles in the respiratory tract related to the study of human smoke inhalation injury, the number and mass concentration of smoke particles deposited in different areas of the respiratory tract for different fuel types, combustion conditions and breathing conditions were calculated. In addition, the amount of mass deposition of smoke in the respiratory tract for a certain period of inhalation was compared with the atmospheric standard of fine dust.

Keywords : Smoke particle, Combustion condition, Respiratory tract, Breathing condition, Lung deposition

1. 서 론

화재에 의한 인명 피해는 상당부분 연기의 흡입에 의하여 이루어지는데 연기는 연소 시에 발생하는 가스상 물질

과 이들을 흡착한 미연탄소 등의 입자상 물질로 이루어져 있다. 연기입자는 초기에 유기증기 및 미연탄소로부터 핵 형성 및 응축 등의 단계를 통해서 직경 10~60 nm의 초기입자를 구성하고, 이들이 다시 응고, 집합 및 합체 등의 과정

†Corresponding Author, E-Mail: jaygoo@woosuk.ac.kr. TEL: +82-63-290-1428, FAX: +82-63-290-1478

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

을 거쳐서 일반적인 경우 500~5,000 nm 크기의 응집체로 성장하는 과정을 거치는데 이 과정에서 유독가스의 흡착이 동시에 이루어진다⁽¹⁻³⁾. 연기 중 가스상 물질은 흡입되어 단기간에 호흡기 벽을 통하여 순환기 계통으로 흡수되는데 비하여, 연기 중 입자상 물질은 호흡기벽에 침착하여 지속적으로 호흡기 및 순환기 계통에 영향을 미친다. 그러므로 연기 중 가스상 물질의 흡입에 의한 인체피해는 대부분 단기적으로 이루어지는데 비하여 입자상 물질의 흡입에 의한 피해는 가스상의 흡착상태에 따라서 상대적으로 장기적으로 이루어진다. 따라서 화재 시 연기에 노출된 피해자의 위급성 정도와 피난 후 회복되는 속도는 연기 중 가스상과 입자상 물질의 구성 상태에 영향을 받게 된다^(4,6).

인체 호흡기는 5개의 폐엽을 가지고 두부, 기관지 및 폐포영역으로 나뉘며 비강 또는 구강을 통해서 흡입된 공기는 인후두부를 통해서 주기관에 도달한다. Weibel⁽¹¹⁾의 호흡기모델에 따르면, 주기관에 도달한 공기는 폐포까지 대략 23번의 연속된 세대의 분기관을 통과하는데 0세대 이전을 두부영역(ET), 0세대에 해당하는 주기관과 1-16세대 기관지를 편의상 기관지영역(TB), 17-23세대를 폐포영역(Alv.)으로 구분한다^(11,12). 흡입된 공기 중 입자는 호흡기 내에서 공기를 따라 이동하면서 관성충돌, 중력침강 및 확산 등의 메카니즘으로 호흡기 벽에 침착하게 된다. 침착된 연기입자에 의하여 이루어지는 호흡기에 대한 직접적인 피해와, 탈착되어 호흡기 및 순환기에 흡수되는 유독가스에 의한 피해의 정도는 호흡기 표면의 민감도 및 흡수상태에 따라 폐내 영역마다 다르게 나타난다⁽¹³⁻¹⁵⁾.

입자상 물질이 호흡기벽에 침착하여 호흡기 및 순환기 계통에 영향을 미치는 것과 관련하여, 침착되는 연기입자의 양과 침착위치는 인체 피해산정에 있어서 중요한 요소이다. 호흡기 내 침착되는 입자의 양과 침착위치는 인체 활동상태 등에 따른 호흡조건 뿐만 아니라 화재 시 연료의 종류 및 연소조건 등에 따라 달라지는 입자 상태에도 영향을 받는다. 따라서 연기의 흡입에 의한 인체피해 연구를 위해서는 화재 시 연료종류, 연소조건 및 호흡조건 모두를 고려하여 연기입자의 호흡기 내 침착 특성을 파악하는 것이 중요하다⁽¹⁶⁻¹⁸⁾. 그동안 화재에 의한 가스상 물질의 흡입에 의한 인체피해에 관해서는 많은 연구가 진행된 반면에 화재 시 발생하는 입자상 물질에 의한 인체피해에 관한 연구는 상대적으로 미진했다. 화재 시 발생하는 연기 중 입자상

물질의 흡입은 대기 중 미세먼지의 흡입과 비교할 때 입자의 형태 및 구성 물질과 더불어 흡입농도 및 노출시간 등에서 큰 차이를 보이므로, 연기입자의 흡입에 의한 인체피해에 관해서는 일반 대기 중 입자상 물질과는 다른 별도의 체계적인 연구가 필요하다⁽⁷⁻¹⁰⁾.

이 연구에서는 화재 시 발생하는 연기의 흡입유해성 정량화 연구를 위해서, 연료종류 및 연소조건에 따라서 발생한 연기입자의 크기별 농도에 대하여 호흡조건에 따른 호흡기 내 영역별 침착입자의 개수 및 질량 농도를 구하였다. 또한 피해정도의 이해를 돕기 위하여 각 조건별 일정기간 흡입연기의 호흡기 내 질량 침착량을 대기환경기준에 따른 일정기간 미세먼지 질량 흡입량과 비교 분석하였다.

2. 연구 방법

앞에 설명한 것과 같이 연기입자의 호흡기 침착 특성은 흡입되는 입자의 특성에 영향을 받는다. 화재발생 시 가연물의 종류 및 연소상태에 따라 발생하는 연기입자들의 호흡기 내 침착 특성을 알아보기 위하여서는 이 조건에 적합한 연기입자 발생 실험결과가 필요하다. 이 연구에서는 연소물질과 연소조건 변화별 입경에 따른 개수농도분포에 관한 측정 데이터로서, 공인된 ISO/TS 19700⁽²¹⁾에서 제시하는 등속튜브연소로 방식을 사용한 Goo⁽¹⁹⁾의 측정결과를 이용하였다. 이 측정 실험에서는 연소로를 통과하는 원형 석영튜브 안에 가연물을 균일하게 적재한 보트를 일정한 속도로 밀어 넣고, Table 1에 주어진 일정온도의 연소로와 일정 유량의 공기공급 조건을 맞춤으로써 온도와 산소공급량 조건에 따른 4가지 표준화된 화재단계(Fire stage)에서 연소생성물을 얻었다. 이 연구에서는 4가지 화재단계를 화재조건 또는 연소조건으로 설정하였으므로 편의상 화재단계, 화재조건 및 연소조건을 혼용하여 사용한다. 참고로, 이 실험방식에서는 Table 1에 정해진 것과 같이 1단계(S1b)에 비하여 2단계(S2)에서 상대적으로 연소온도가 높고 산소공급이 많은 조건에서 연소가 이루어진다. 연소로에서 생성된 가스상 물질과 미연탄소 등은 석영튜브를 지나 하단에 설치된 혼합상자에서 공기와 혼합되는 동안 서론에서 언급한 입자생성 과정을 거친다. 생성된 입자의 입경에 따른 개수농도분포는 정전저압입력(ELPI⁺)를 이용하여 측정되었다^(20,22,23).

호흡기모델 및 침착량 계산과 관련되어 그동안 많은 연

Table 1. Fire Conditions for Different Fire Stages Based on the ISO/TS 19700⁽²¹⁾

Fire Stage	S1b	S2	S3a	S3b
Fire Type	Non-flaming: Oxidative Pyrolysis	Well-ventilated Flaming	Under-ventilated Flaming: Small Localized Fires	Under-ventilated Flaming: Post-flashover Fires
Temperature (°C)	350	650	650	825
Q_p (L/min)	2	-	-	-
Equivalence Ratio (ϕ)	-	< 0.75	2 ± 0.2	2 ± 0.2

Table 2. Breathing Parameters for Different Activities⁽¹⁵⁾

Activities	Breathing Parameters			
	Minute Ventilation (liter/min)	Breathing Frequency (1/min)	Tidal Volume (ml)	Flow Rate for Each Inhale and Exhale (ml/s)
Sleep	7.5	12	625	250
Sitting	9	12	750	300
Light Exercise	25	20	1250	833
Heavy Exercise	50	26	1923	1667

구가 이루어져 왔다^(15,24-26). 이 연구에서 침착량 계산에는 Weibel⁽¹¹⁾의 대칭분지관 모델에 Yeh와 Schum⁽²⁵⁾의 5엽비대칭 폐엽모델을 적용한 5엽분지관 모델을 사용하였다^(27,28). 폐의 형태 데이터는 Weibel 모델에서 폐 부피가 4800 ml인 경우의 각 세대에서의 값을 사용하였고, 기능적 잔기량(FRC)은 3500 ml가 되도록 하고 이에 비례하여 각 세대에서의 분지관 부피가 정해지도록 폐 형태 값을 조정하였다. 호흡기침착에서 침착량은 호흡조건에 따라 달라진다. 여기에서는 활동상태와 두부호흡상태에 따라 호흡조건을 정하는데, 활동상태는 Table 2와 같이 ICRP⁽¹⁵⁾에서 정의한 수면상태(Sleep), 앉은상태(Sitting), 가벼운운동상태(Light exercise) 및 심한운동상태(Heavy exercise)로 나누고 두부호흡상태는 구강호흡상태(Mouth breathing) 및 비강호흡상태(Nasal breathing)로 나누었다. 각 활동상태에서는 호흡량(Tidal volume)과 분당호흡량(Minute ventilation)이 정의되고 이에 따라 호흡빈도(Breathing frequency)와 흡입과 토출시의 유량(Flow rate)이 정해진다. 예를 들어 앉은상태에 해당하는 활동상태 경우 분당호흡량 9 liter/min을 호흡량 750 ml로 나눈 호흡빈도 12 cycle/min 또는 이의 역수인 호흡주기 5 s 동안 호흡량 750 ml에 해당하는 부피의 공기가 호흡기를 통하여 흡입되고 토출된다.

입자침착량 계산은 5엽분지관 모델에 대하여 미소부피 위치추적법을 이용하여 이루어졌다⁽²⁸⁾. 계산 방법은 Goo⁽²⁸⁾에서 자세히 설명되었으며 대략적인 개념은 다음과 같다. 흡입 시 호흡량(Vt)가 호흡기 입구에서 흡입되면 각 분지 세대 부피가 팽창하면서 공기가 이동하며, 공기가 이동하는 동안 임의의 j세대에서 있던 공기가 k세대로 이동하는데 이에 해당하는 이동 부피를 V_{jk}로 나타내고 이 부피가 흡입되는 동안 i세대를 지나면서 침착시키는 침착분률(Deposition fraction)을 DFI_{ijk}라고 정의하면,

$$DFI_{ijk} = V_{jk} \times C_{i-1} \times E_i / V_t$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 C_{i-1}은 i-1 세대에서의 입자 농도로 호흡기 입구에 대한 상대 개수 농도비이며, E_i는 i세대에서의 입자 침착효율이다. 한 번의 호흡주기 동안 흡입침착분률(DFI)과 토출침착분률(DFE) 각각에 대하여 i세대를 지나가는 모든 j와 k에 대하여 합을 구하면 i세대에서의 침

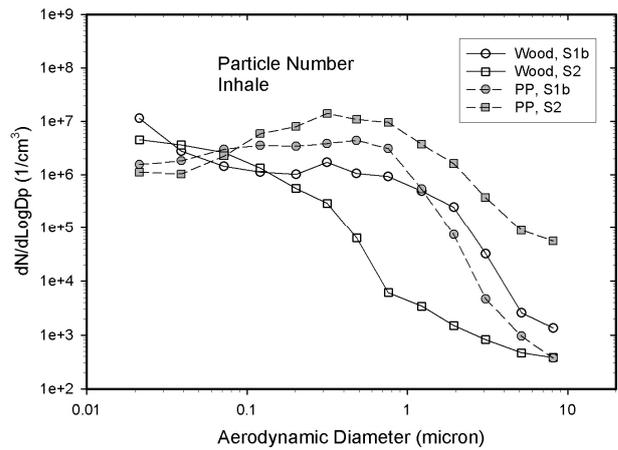


Figure 1. Geometric number concentrations of smoke particles for each material and fire stage.⁽¹⁹⁾

착분률을 구할 수 있고, 이에 대하여 모든 i에 대하여 합을 구하면 총 침착분률을 구할 수 있게 된다. 입자 침착효율은 각 침착메카니즘, 즉 확산, 중력침강 및 관성충돌별 침착효율의 합산식으로 나타나며, 이 연구에서는 Yeh와 Schum⁽²⁵⁾의 연구와 기존의 타 연구를 종합하여 Goo⁽²⁸⁾에 정리되어 있는 식을 사용하였다^(15,24,29,30).

3. 결과 및 고찰

3.1 가연물 및 화재조건에 따른 흡입입자 특성

이 연구에서는 연구방법에서 언급한 것과 같이 각 연소물질에 대하여 연소조건(화재조건)별 입경에 따른 개수농도분포에 관한 공인된 데이터로서, ISO/TS 19700⁽²¹⁾에서 제시하는 방식을 사용한 측정결과를 이용하였다. Figure 1은 Goo⁽¹⁹⁾에 의하여 등속튜브연소로 및 정전저압입팩터(ELPI)를 이용하여 측정된 가연물 및 화재조건(화재단계)별 발생 연기입자의 공기역학 직경에 따른 기하학적 개수농도분포를 나타내는 그림이다.

연기입자 발생 및 측정은 가연물로는 목재(Wood) 및 폴리프로필렌(PP)과 더불어 다양한 플라스틱에 대하여, 화재조건은 Table 1의 4가지 화재조건에 대하여 이루어졌는데 여기서는 변화가 특징적으로 나타나는 1단계(S1b)와 2단계

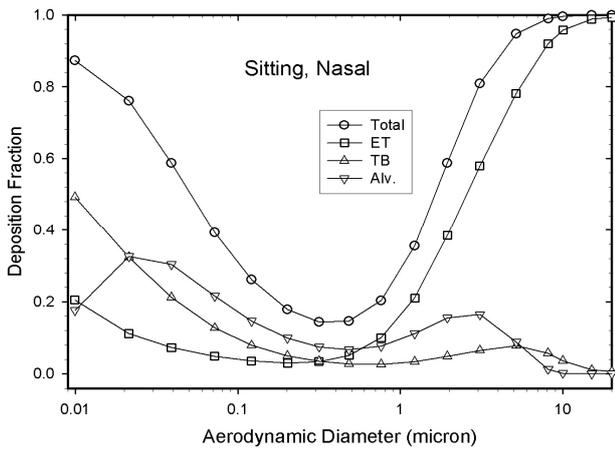


Figure 2. Comparison of deposition fractions among three different regions of respiratory tract in the condition of sitting and nasal breathing: symbols stands for Total (○), Extrathoracic region (□), Tracheobronchial region (△), and Alveola region (▽).

(S2) 화재조건에서 목재와 PP에 대하여 비교하였다^(19,20). 입자직경이 대략 0.1 μm 보다 큰 영역에서, 목재에서는 화재 조건 S1b에 비하여 상대적으로 연소온도가 높고 산소공급이 많은 화재조건 S2에서 상대적으로 적은 개수농도의 연기가 발생되는 반면에, PP에서는 화재조건 S1b에 비하여 화재조건 S2에서 상대적으로 많은 개수농도의 연기가 발생되는 것을 볼 수 있다⁽¹⁹⁾. 호흡기 영역별 연기입자 침착은 입자 크기에 영향을 받고 또 침착된 연기입자의 크기에 따른 개수농도 분포는 인체유해성과 관련된 침착입자의 총 표면적농도 및 질량농도에 영향을 주므로 발생연기 입자의 개수농도분포는 중요한 의미를 가진다.

3.2 입자 크기에 따른 호흡기 영역별 침착 특성

흡입연기입자의 호흡기 내 영역별 침착량은 각 입자크기에 따라서 흡입된 연기입자의 농도에 침착분률 및 분당 호흡량을 곱한 값에 비례한다. 따라서 호흡기 영역별 침착량을 알기 위해서는 각 호흡조건에서 입자크기에 따른 영역별 침착분률 계산 결과가 필요하다^(24,25). 호흡조건은 활동상태 및 호흡기 입구상태를 반영하는데, 활동상태는 Table 2에 나타난 것과 같이 ICRP⁽¹⁵⁾에서 정의한 상태 중 특징적인 비교를 위하여 앉은상태와 심한운동상태를 비교하였고, 호흡기입구상태는 두부에서 비강호흡상태와 구강호흡상태를 비교하였다. 각 호흡조건에서 입자직경에 따른 호흡기 내 영역별 흡입입자에 대한 침착분률은 Goo⁽²⁸⁾의 비대칭 5엽 폐모델을 이용한 수치계산법을 사용하여 구하였다. 영역별 계산은 Weibel 모델에 따른 23개 각 분지세대에서의 침착분률을 계산한 다음, 이로부터 두부영역(ET), 기관지영역(TB) 및 폐포영역(Alv.)에 대한 각각의 침착분률을 구하였다.

Figure 2는 기준호흡조건으로서 앉은상태(Sitting)에서의 비강호흡상태(Nasal breathing)를 의미하는 앉은상태 비강호

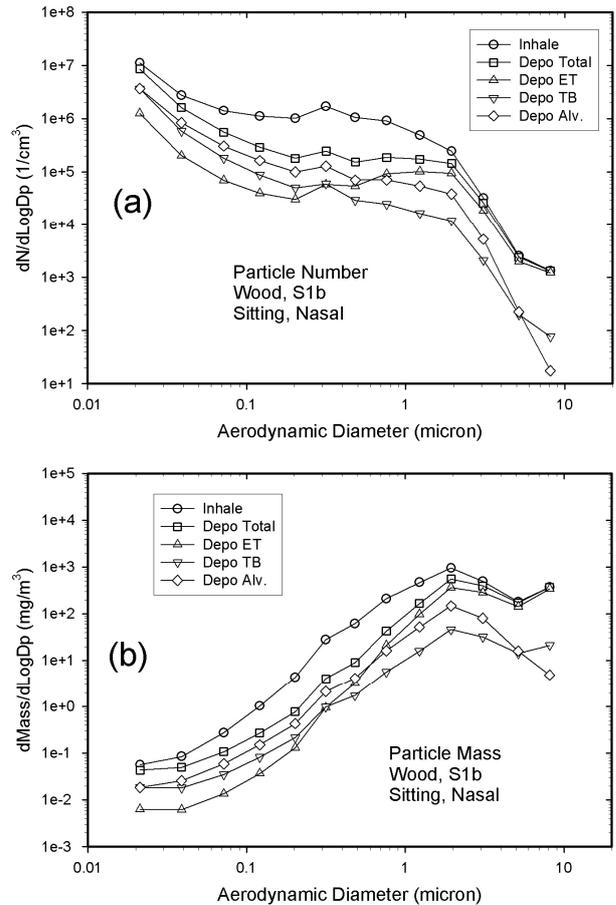


Figure 3. Geometric concentrations of smoke particles for: number (a); and mass (b): comparison between inhaled (○ symbols), deposited on the whole (□ symbols), and deposited on each region (△, ▽, ◇ symbols) of respiratory tract for wood at the fire stage of S1b in the condition of sitting and nasal breathing.

흡 조건에서 입자직경에 따른 호흡기 내 두부영역(ET), 기관지영역(TB), 폐포영역(Alv.) 및 영역총합(Total)에 대한 입자 침착분률을 나타내었다. 침착분률(Deposition fraction)은 한 번의 호흡주기에서 흡입입자 수에 대한 호흡 및 토출동안의 호흡기 내 침착입자 수의 비율이다.

Figure 3에서는 Figure 1에 나타난 특성의 연기입자가 호흡되는 경우 이들의 입자직경에 따른 호흡입자(○ 기호), 호흡기 내 총 침착입자(□ 기호) 및 각 영역별 침착입자들에 대한 개수농도(Figure 3(a))와 질량농도(Figure 3(b))를 보여준다. 즉 목재의 화재조건 S1b에서 발생한 연기입자가 호흡되었을 때 앉은상태 비강호흡조건에서 호흡기 내 두부(△ 기호), 기관지(▽ 기호) 및 폐포(◇ 기호) 영역에 침착한 연기입자에 대하여 Figure 3(a)에서는 공기역학경에 따른 기하학적 개수농도분포를, Figure 3(b)에서는 기하학적 질량농도분포를 보여준다. 각 입자직경에 따라서 흡입된 개수 및 질량농도에 대한 각 영역별 침착 입자의 개수 및 질량농도 비율은 Figure 2에 나타난 침착분률 값에 따른다.

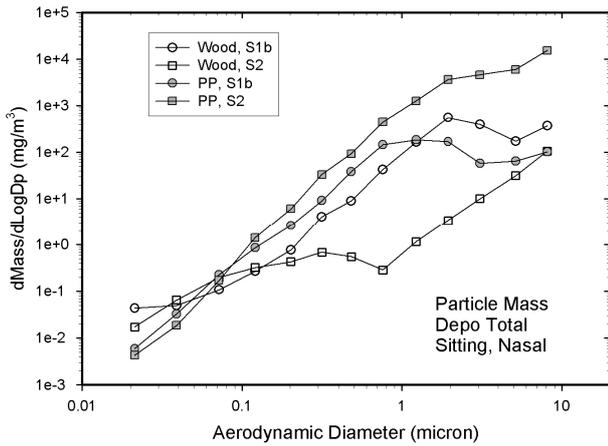


Figure 4. Geometric mass concentrations of smoke particles deposited on the whole respiratory tract for each material and fire stage in the condition of sitting and nasal breathing.

특징적인 것은 개수농도는 작은입자에서 절대적으로 크고 입경이 증가하면서 감소하나 질량농도는 질량이 입경의 3 제곱에 비례하기 때문에 작은입자에서 작고 입경이 증가하면서 커진다는 것이다.

Figure 4는 Figure 3(b)에 나타난 것과 같은 앉은상태 비강호흡조건에서의 총침착입자에 대한 질량농도분포를 각 연소물질 및 화재조건에 대하여 같이 보여준다. 입자직경이 증가하면서 질량농도가 증가하는데 0.5~1 μm 구간에 비하여 1~10 μm 구간에서는 화재조건 S1b에서 목재가 PP보다 질량침착량이 많아진다. 연소물질 및 화재조건에 따른 입경별 총 질량침착량 순서는 호흡된 개수농도 순으로 나타남을 알 수 있다.

Figure 3에 나타난 것과 같은 입경에 따른 기하학적 개수 및 질량농도분포를 입경에 대하여 적분하면 각 조건에서 호흡기 내 영역별 침착된 총 개수 및 질량농도를 구할 수 있다. Figure 5(a)는 Figure 3(a)에 나타난 앉은상태 비강호흡조건에서 기하학적 개수농도분포를 13개 모든 입자 직경에 대하여 적분하여 구한 각 영역별 침착 개수농도를 각 가연물 및 화재조건별로 보여준다. Figure 5(b)는 같은 방법으로 Figure 3(b)에 나타난 기하학적 질량농도분포로부터 구한 각 영역별 침착 질량농도이다.

영역별 침착 개수농도 분포인 Figure 5(a)를 보면 각 가연물 및 화재조건별 호흡기 영역합은 전체 흡입개수가 높으면서, 동시에 흡입개수가 높은 입경크기에서 침착분률이 높은 경우 높게 나타난다. 각 물질 및 화재조건에서 영역별 침착개수농도 순이 폐포, 기관지, 두부 순인 것은 Figure 1과 같이 흡입개수농도가 높은 0.8 μm 이하 영역에서 Figure 2에서와 같이 침착분률이 입경평균으로 볼 때 폐포, 기관지, 두부 순이기 때문이다. 그러나 여기서 PP의 화재조건 S2에서 두부에서 침착개수농도 값이 높게 나타나는 것은 Figure 2와 같이 두부에서 침착분률이 높에 나타나는 1 μm 이상 영

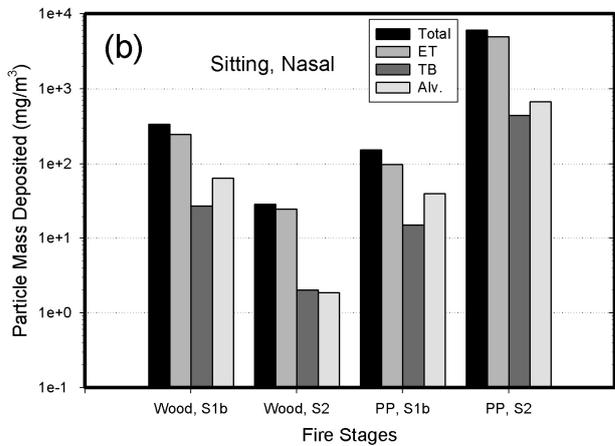
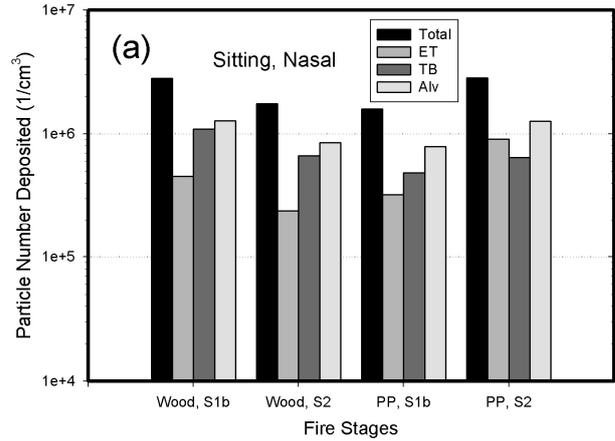


Figure 5. Number and mass concentrations of particles deposited on each region of respiratory tract for each material and fire stage in the condition of sitting and nasal breathing: number (a); mass (b).

역에서 Figure 1과 같이 PP의 화재조건 S2에서 개수농도가 높기 때문이다.

영역별 침착 질량농도 분포인 Figure 5(b)를 보면 영역총합은 Figure 4에서 보이는 것과 같은 질량이 큰 1 μm 이상 영역에서의 침착 질량농도분포 순으로 나타난다. 또한 개수농도분포와 다르게 영역들 중에서 두부에서 질량침착농도가 높게 나타나는 것은, 두부에서 침착분률이 높게 나타나는 1 μm 이상 영역에서 침착 개수농도는 작으나 질량이 크기 때문이다.

3.3 호흡조건에 따른 영역별 침착특성 변화

Figure 5에 나타난 것과 같은 각 가연물 및 화재조건에 따른 영역별 침착량 특성이 활동상태 및 입구호흡상태 변화에 따라 어떻게 변하는지를 알아보기 위하여 이들 변화에 따른 입경별 침착분률 및 세대별 침착분률을 계산하여 각각 Figure 6과 Figure 7에 나타내었다. Figure 6(a)는 앉은상태 구강호흡조건, Figure 6(b)는 심한운동상태 구강호흡조건에 대한 각 영역별 입경에 따른 침착분률을 보여준다.

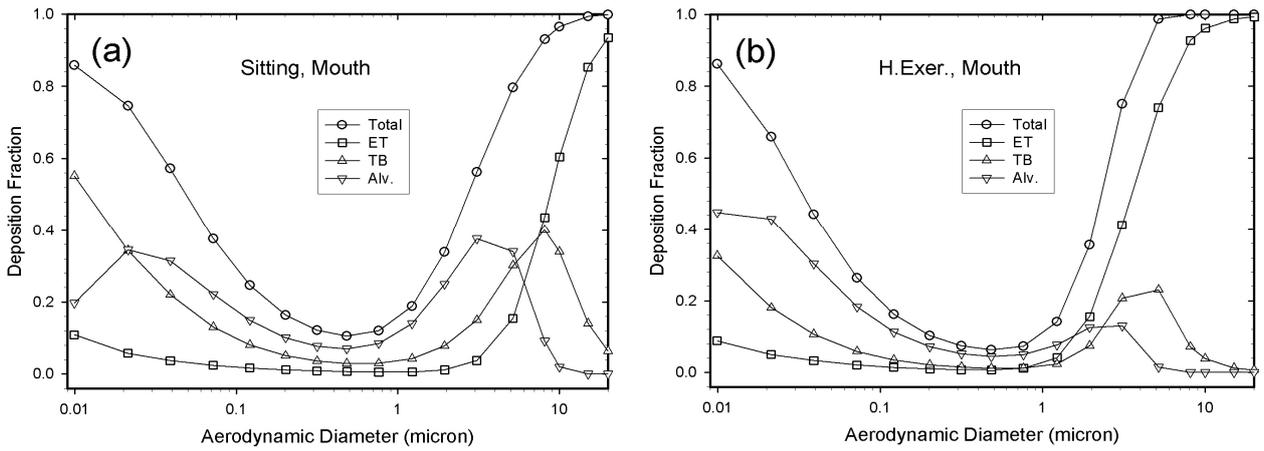


Figure 6. Comparison of deposition fractions among three different regions of respiratory tract in the condition of: sitting and mouth breathing (a); heavy exercise and mouth breathing (b); symbols stands for Total (○), Extrathoracic region (□), Tracheobronchial region (△), and Alveola region (▽).

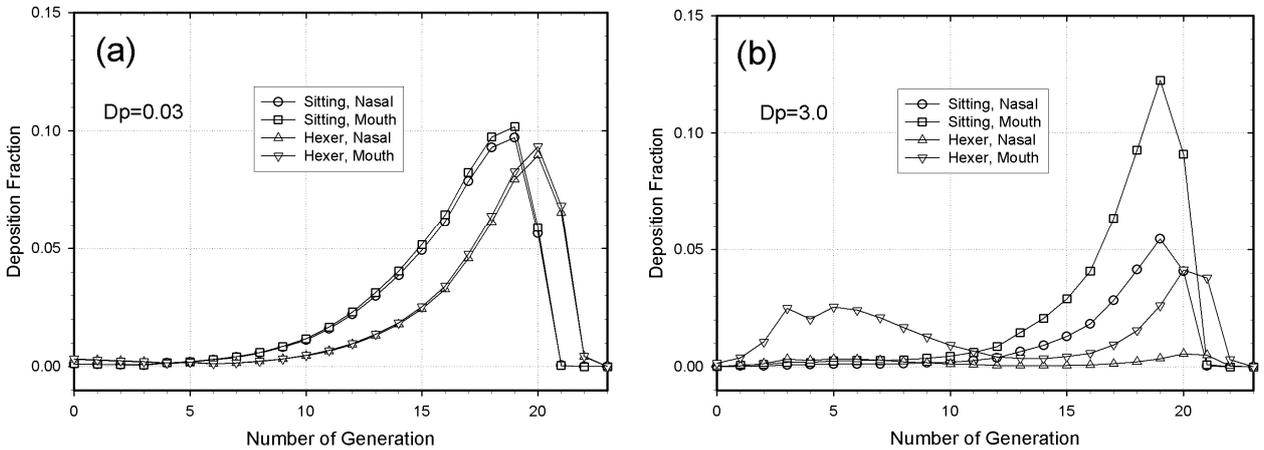


Figure 7. Generational deposition fractions showing the effects of breathing conditions and particle sizes: $dp = 0.03 \mu m$ (a); $dp = 3.0 \mu m$ (b).

Figure 6(a)에 나타난 앉은상태 구강호흡조건에 대하여 입자크기에 따른 호흡기 영역별 침착특성은 다음과 같다. 즉 입자직경 $8 \mu m$ 이상에서는 주로 관성충돌에 의하여 두부영역에 침착되고, $1\sim 5 \mu m$ 에서는 주로 중력에 의하여 하부기관지 및 폐포영역에 침착되며, 입자직경 $0.5 \mu m$ 이하에서는 주로 확산에 의하여 하부기관지 및 폐포영역에 침착된다. 그러나 $0.1\sim 1 \mu m$ 범위에서는 세 가지 침착 메커니즘의 절대적인 값이 작아서 총 침착분률이 10~30% 정도로 작은 값을 갖는다.

Figure 2와 Figure 6(a)로부터 앉은상태에서 구강호흡상태와 비강호흡상태를 비교해 보면 비강호흡상태에서는 호흡량 및 호흡주기가 동일한 상태에서 비강에서의 침착만 추가되며, 영역별 침착분률 변화 특성을 보면 다음과 같다. 확산에 의하여 하부기관지 및 폐포에 침착이 주로 일어나는 입자직경 $0.5 \mu m$ 이하에서는 영역별 침착분률에 큰 변

화가 없다. 비강호흡상태에서는 $1 \mu m$ 이상 입자영역에서는 입자 크기에 따라 급격히 증가하는 관성충돌의 영향에 의하여 두부영역에서 높은 침착분률을 나타내고, 이에 따른 하위 영역으로의 유입량 감소로 인하여 기관지 및 폐포에서의 침착분률은 감소한다.

Figure 6(a)와 Figure 6(b)로부터 구강호흡상태에서 앉은상태와 심한운동상태를 비교하면, 심한운동상태에서는 Table 2에 나타난 것과 같이 호흡량증가 및 호흡주기감소가 동시에 작용하여 체류시간 감소 및 유속증가가 나타나며 이로 인하여 중력 및 확산 효과는 감소하고 관성충돌 효과는 증가한다. 이에 따른 호흡기 영역별 심한운동상태에 따른 침착분률 변화 특성은 각 활동상태 및 입구호흡상태 변화에 따른 세대별 침착분률을 나타내는 Figure 7의 도움을 받아 다음과 같이 3가지 입자크기 범위로 나누어 분석할 수 있다.

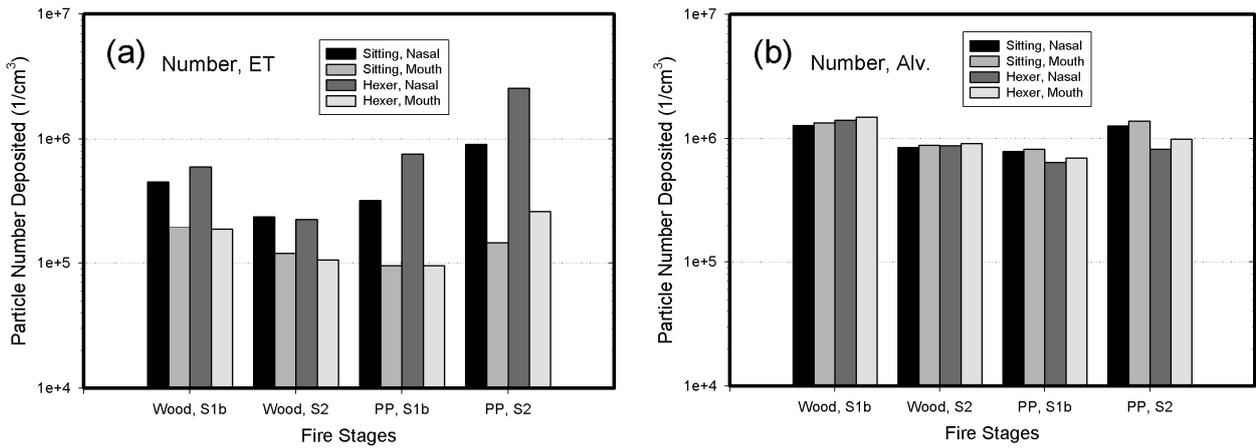


Figure 8. Number concentrations of particles deposited on each region of respiratory tract for each material, fire stage, and breathing condition: extrathoracic region (a); alveola region (b).

첫 번째로 주로 관성충돌에 의하여 두부영역에서 침착되는 입자직경 8 μm 이상에서는 유속증가에 따른 관성충돌의 영향이 지배적으로 나타나서 두부에서 대부분 침착되고 기관지 및 폐포에서는 유입량 감소로 침착분률이 감소한다.

두 번째로 주로 중력에 의하여 하부기관지 및 폐포영역에 침착되는 1~5 μm에서 보면, 두부영역에서는 유속증가에 따른 관성충돌에 의하여 증가한다. 또한 이 입자크기영역에 해당하는 3 μm에 대한 세대별 침착분률을 나타내는 Figure 7(b)를 같이 보면, 기관지 영역에서는 0~10 세대에 해당하는 상부기관지에서는 유속증가에 따른 관성충돌에 의하여 증가하지만 11~16세대에 해당하는 하부기관지에서는 체류시간감소에 따른 중력효과와 감소가 같이 작용하여, 기관지 전체에서의 침착분률은 Figure 6에서와 같이 약간 증가한다. 폐포영역에서는 Figure 7(b)와 같이 호흡량증가에 따른 침투깊이 증가에 의하여 침착분률 증가가 발생하나 유입량감소 및 체류시간 감소에 따른 중력효과 감소가 커서, 폐포전체에서의 침착분률은 Figure 6에서와 같이 감소된다.

세 번째로 확산에 의한 하부기관지 및 폐포에 침착이 주로 일어나는 입자직경 0.5 μm 이하에서의 침착분률 변화는 다음과 같다. 즉 17세대 이상의 폐포영역에 대한 침착 특성은 Figure 7(a)에 나타난 것과 같이 0.03 μm에서는 체류시간 감소에 의한 상부쪽에서 감소 및 호흡량증가에 따른 침투깊이 증가에 의한 증가에 의하여 침착분률이 서로 상쇄되어 거의 비슷하지만, Figure 6에서와 같이 0.1 μm에서는 약간 감소한다. 또한 11~16 세대에 해당하는 하부기관지 영역에서는 Figure 7(a)에 나타난 것과 같이 0.03 μm에서 체류시간 감소효과에 의하여 침착분률이 감소하며, 0.1 μm에서도 Figure 6에서와 같이 침착분률이 감소한다.

Figure 8에서는 Figure 3(a)와 같은 기하학적 개수농도분포를 모든 입자 직경에 대하여 적분하여, 각 운동상태 및 입구호흡상태에 따른 호흡기 각 영역별 총 침착 개수농도

를 각 가연물 및 화재조건에 대하여 구하였다. Figure 8(a)는 두부에서, Figure 8(b)는 폐포에서의 총 침착 개수농도이다.

Figure 8(a)에 나타난 두부에서의 침착은 Figure 2와 Figure 6에서 알 수 있는 것과 같이 1 μm 이상의 큰 입자에서 주로 이루어지며 또한 입구호흡 상태 비교에서는 비강호흡상태에서 높게 나타난다. 따라서 침착된 개수농도가, 물질 및 화재조건별 비교에서는 이들 큰 입자영역에서 입자들의 흡입 개수농도 순으로 나타내며, 호흡조건별 비교에서는 비강호흡상태에서 높게 나타남을 알 수 있다.

Figure 8(b)에 나타난 폐포에서의 침착은, Figure 2와 Figure 6에서 설명한 것과 같이 1~5 μm에서는 주로 중력에 의하여, 입자직경 0.5 μm 이하에서는 주로 확산에 의하여 이루어진다. Figure 1에 나타난 것과 같이 1~5 μm에서는 흡입입자의 절대개수가 적어 영향을 미치지 못하고, 확산에 의한 침착분률이 비교적 크게 나타나는 0.2 μm 이하에서 총 흡입 입자수는 각 물질 및 화재조건별로 큰 차이가 나지 않는다. 또한 이 0.2 μm 이하 영역에서 폐포영역 침착은 입구호흡상태에 큰 영향을 받지 않으므로 Figure 8(b)에 나타난 것과 같이 폐포영역에서는 두부영역에 비하여 각 조건에 대한 침착 개수농도에 큰 변화가 없다.

3.4 대기환경 기준 질량침착량 비교

Figure 9는 1분간 화재연기에 노출되었을 경우의 각 가연물 및 화재조건에 대한 노출자의 각 활동상태 및 입구호흡상태별 호흡기 내 질량침착량이다. Figure 3(b)와 같은 기하학적 질량농도분포를 모든 입자 직경에 대하여 적분한 다음, 각 활동상태에 따른 분당호흡량을 고려하여 1분 동안 해당 입자농도 환경에서 호흡하였을 경우 침착된 입자의 총 질량을 구하였다. 앉은상태 경우 9 liter/min, 심한운동상태 경우 50 liter/min의 분당호흡량을 적용하였다. Figure 9(a)는 영역별 총합에 대한, Figure 9(b)는 두부에 대한, Figure 9(c)는 기관지에 대한, Figure 9(d)는 폐포에 대한 질량침착량이다.

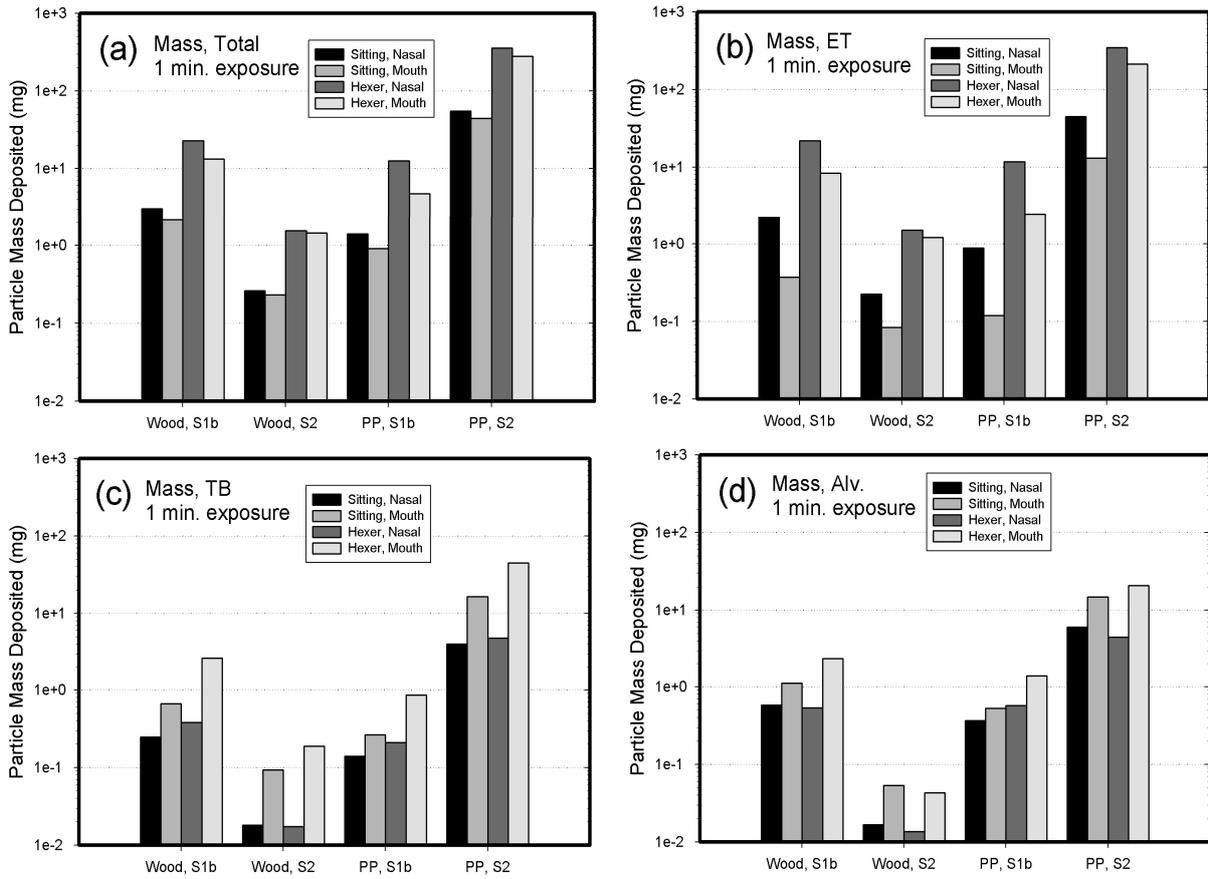


Figure 9. Mass of particles deposited on each region of respiratory tract for 1 min exposure to fire smoke: comparison between each material, fire stage, and breathing condition: regional total (a); extrathoracic region (b); tracheobronchial region (c); alveolar region (d).

Figure 9에서 침착량에 대한 전반적인 경향을 보면, 물질 및 연소조건별 전반적 침착량은 Figure 1에 제시된 질량이 큰 입자의 개수농도 순서 즉 (PP, S2) > (Wood, S1b) > (PP, S1b) > (Wood, S2) 순으로 나타난다. 또한 비강호흡상태일 때, 두부영역에서는 침착량이 크지만 폐포영역에서는 통과되어 들어온 입자만 침착할 수 있기 때문에 전반적으로 침착량이 적다. 흡입농도 및 침착분률과 더불어 분당호흡량 차이에 의하여 동일시간 즉 1분 동안의 유입부피가 차이가 나므로 앉은상태일 때보다 심한운동상태일 때 추가로 침착량이 증가한다.

Figure 9(a)에서 각 조건에서 호흡기 내 총 질량침착량은 대략 0.2~300 mg의 변화를 가진다. 참고로 PM10의 일평균 대기환경기준 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 앉은상태 호흡조건에서의 분당호흡량 9 l/min을 적용할 때 하루 24시간 동안 최대 침착량은 침착분률을 100%로 가정할 때 1.3 mg이다. 이는 대기환경기준 최대값에서 1일 동안 흡입하는 연기입자 총질량의 0.15~231배가 각 물질, 연소조건, 활동상태 및 입구호흡상태에 따라 단 1분 동안에 호흡기에 침착된다는 의미이다. 즉 이 연구에서 다루는 범위에서 각 조건에 따라 총 질량침착량은 약 1500배 정도의 변화를 보인다.

호흡기 내 섬모운동이나 점액운동 등에 의한 입자 제거와 표면의 흡수용이성 등이 호흡기 내 영역별로 다르므로 침착된 입자에 의한 인체 유해도는 침착 영역별로 다르게 나타난다. 이런 측면에서 총침착량보다 중요한 의미를 갖는 것은 영역별 침착량이고 이 중 인체유해성과 관련하여 많은 관심을 받는 것이 폐포영역에 대한 침착량이다. Figure 9(d)에 나타난 폐포영역 침착량은 대략 0.01~20 mg의 값을 가진다. 폐포에 침착되는 입자는 주로 중력에 의하여 침착되는 입경 1~5 μm 및 주로 확산에 의한 입경 0.5 μm 이하로 주로 이루어져 있다. Figure 3(b) 경우의 예를 보면 침착된 질량의 상당량은 입경 1~5 μm 인 입자가 차지하지만 개수는 0.5 μm 이하에서 절대 다수를 차지하므로 최근 문제가 되는 PM2.5 기준 초미세먼지의 인체 유해성과 관련하여 Figure 9(d)에 나타난 각 조건에 따른 폐포에서의 연기입자 침착량은 중요한 의미를 가진다.

4. 결론

1) 이 연구에서는 화재 시 발생하는 연기의 흡입에 의한 인체피해 연구를 위해서, ISO/TS 19700에서 제시하는 등속

튜브연소로 방식을 사용하여 연료종류(Wood, PP) 및 연소 조건(S1b, S2)에 따라서 발생한 연기입자의 크기별 농도에 대하여, 호흡조건으로서 활동상태(앉은상태, 심한운동상태) 및 두부호흡상태(구강호흡, 비강호흡)에 따른 호흡기 내 영역(두부, 기관지, 폐포)별 입자 크기에 따른 침착입자의 개수 및 질량 농도를 구하였다. 또한 각 조건별 흡입연기의 일정기간 호흡기 내 질량 침착량을 대기환경기준에 따른 일정기간 미세먼지 질량 흡입량과 비교 분석하였다.

2) 호흡조건에 따른 영역별 침착특성 변화를 보면 두부에서의 침착은 1 µm 이상의 큰 입자에서 주로 이루어지며 비강호흡에서 높게 나타난다. 폐포에서의 침착은 1~5 µm에서는 주로 중력에 의하여, 입자직경 0.5 µm 이하에서는 주로 확산에 의하여 이루어지는데, 1~5 µm에서는 흡입입자의 절대개수가 적어 많은 영향을 미치지 못하고, 확산에 의한 침착분율이 비교적 크게 나타나는 0.2 µm 이하에서는 총 흡입입자 수는 다른 입자크기영역에 비하여 상대적으로 각 물질 및 화재조건별로 큰 차이가 나지 않는다. 또한 이 0.2 µm 이하영역에서 폐포영역 침착률은 입구호흡상태에 큰 영향을 받지 않으므로 폐포영역에서는 두부영역에 비하여 각 조건에 대한 침착개수 농도 변화가 작다.

3) 일정기간 화재연기에 노출되었을 경우, 물질 및 연소 조건별 전반적 침착량은 질량이 큰 입자의 개수농도 순서 즉 (PP, S2) > (Wood, S1b) > (PP, S1b) > (Wood, S2) 순으로 나타난다. 또한 비강호흡상태일 때, 두부영역에서는 침착량이 크지만 폐포영역에서는 통과되어 들어온 입자만 침착할 수 있기 때문에 전반적으로 침착량이 적다.

4) 이 연구에서 주어진 ISO/TS 19700에 따른 연기발생 조건에서 1분간 연기입자에 노출되었을 경우 이 연구의 조건범위에서 호흡기 내 총 질량 침착량은 대략 0.2~300 mg으로 약 1500배 정도의 변화를 보인다. 이는 미세먼지, 즉 PM10의 일평균 대기환경기준에서 하루 24시간 동안 최대 흡입량 1.3 mg과 비교하여 보면, 대기환경기준 최대값에서 1일 동안 흡입하는 연기입자 총질량의 0.15~231배가 각 물질, 연소조건, 활동상태 및 입구호흡상태에 따라 단 1분 동안에 호흡기에 침착된다는 의미이다.

5) 1분간 폐포영역 침착량은 이 연구의 조건 범위에서 대략 0.01~20 mg의 값을 가진다. 침착된 질량의 상당량은 입경 1~5 µm 인 입자가 차지하지만 개수는 0.5 µm 이하에서 절대 다수를 차지하므로, 최근 문제가 되는 PM2.5 기준 초미세먼지의 인체 유해성과 관련하여 특히 많은 관심을 받는 폐포영역에 대하여, 이 연구에서 구해진 각 조건에 따른 연기입자 침착특성은 중요한 의미를 가진다.

후 기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2019R1F1A1040925).

References

1. S. K. Friedlander, "Smoke, Dust and Haze: Fundamentals of Aerosol Behavior", Oxford Univ. Press, Oxford (2000).
2. G. W. Mulholland, "Smoke Production and Properties", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, Sec. 2, Chapter 13, pp. 258-268 (2002).
3. K. M. Butler and G. W. Mulholland, "Generation and Transportation of Smoke Components", Fire Technology, Vol. 40, pp. 149-176 (2004).
4. W. B. LI, "Internal Dosimetry - A Review of Progress", Jpn. J. Health Phys., Vol. 53, No. 2, pp. 72-99 (2018).
5. C. A. Pope III, "Epidemiology of Fine Particulate Air Pollution and Human Health: Biologic Mechanisms and Who's at Risk?", Environmental Health Perspectives, Vol 108, Supp. 4, pp. 713-723 (2000).
6. B. Giechaskiel, B. Alföldy and Y. Drossinos, "A Metric for Health Effects Studies of Diesel Exhaust Particles", Journal of Aerosol Science, Vol. 40, pp. 639-651 (2009).
7. USEPA, "Air Quality Criteria for Particulate Matter", EPA/600/P-99/002a-bF, USEPA, RTP, NC, USA (2004).
8. R. G. Gann, J. D. Averill, K. M. Butler, W. W. Jones, G. W. Mulholland, J. L. Neviasser, T. J. Ohlemiller, R. D. Peacock, et al., "International Study on the Sublethal Effects of Fire Smoke on Survivability and Health (SEFS): Phase I Final Report", NIST Technical Note 1439 (2001).
9. T. Hertzberg and P. Blomqvist, "Particles from Fires - a Screening of Common Materials Found in Buildings", Fire and Materials, Vol. 27, pp. 295-314 (2003).
10. J. Goo, "Development of the Size Distribution of Smoke Particles in a Compartment Fire", Fire Safety Journal, Vol. 47, pp. 46-53 (2012).
11. E. R. Weibel, "Morphometry of the Human Lung", Academic Press Inc., Springer-Verlag, New York (1963).
12. H. K. Chang and M. Paiva, "Respiratory Physiology: an Analytical Approach", Marcel Dekker, Inc., New York (1989).
13. W. C. Hinds, "Aerosol Technology", John Wiley & Sons, Inc., New York (1982).
14. C. Chio and C. Liao, "Assessment of Atmospheric Ultrafine Carbon Particle-induced Human Health Risk Based on Surface Area Dosimetry", Atmospheric Environment, Vol. 42, pp. 8575-8584 (2008).
15. ICRP, "Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection: a Report of a Task Group of the International Commission on Radiological Protection", Oxford, UK: Elsevier Science Ltd. (ICRP Publication 66; Annals of the ICRP: Vol. 24, pp. 1-482) (1994).

16. T. C. Carvalho, J. I. Peters and R. O. Williams III, "Influence of Particle Size on Regional Lung Deposition - What Evidence is There?", *International Journal of Pharmaceutics*, Vol. 406, pp. 1-10 (2011).
17. K. Oravisjarvi, M. Pietikainen, J. Ruuskanen, A. Rautio, A. Voutilainen and R. L. Keiski, "Effects of Physical Activity on the Deposition of Traffic-related Particles into the Human Lungs in Silico", *Science of the Total Environment*, Vol. 409, pp. 4511-4518 (2011).
18. J. Rissler, E. Swietlicki, A. Bengtsson, C. Boman, J. Pagels, T. Sandstrom, A. Blomberg and J. Lundahl, "Experimental Determination of Deposition of Diesel Exhaust Particles in the Human Respiratory Tract", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 48, pp. 18-33 (2012).
19. J. Goo, "Study on the Real-time Size Distribution of Smoke Particles for each Fire Stage by Using a Steady-state Tube Furnace Method", *Fire Safety Journal*, Vol. 78, pp. 96-101 (2015).
20. J. Goo and C. H. Hwang, "Measurement of the Size Distribution of Smoke Particles with Plastic Types Under Various Fire Conditions", *Fire Science and Engineering*, Vol. 31, No. 6, pp. 8-15 (2017).
21. ISO/TS 19700, "Controlled Equivalence Ratio Method for the Determination of Hazardous Components of Fire Effluents" (2006).
22. J. A. Purser, D. A. Purser, A. A. Stec, C. Moffatt, T. R. Hull, J. Z. Su, M. Bijloos and P. Blomqvist, "Repeatability and Reproducibility of the ISO/TS 19700 Steady State Tube Furnace", *Fire Safety Journal*, Vol. 55, pp. 22-34 (2013).
23. C. V. Gulijk, J. C. M. Marijnissen, M. Makkee, J. A. Moulijn and A. Schmidt-Ott, "Measuring Diesel Soot with a Scanning Mobility Particle Sizer and an Electrical Low-pressure Impactor: Performance Assessment with a Model for Fractal-like Agglomerates", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 35, pp. 633-655 (2004).
24. W. Hofmann, "Modelling Inhaled Particle Deposition in the Human Lung—A Review", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 42, pp. 693-724 (2011).
25. 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).
26. J. Goo and C. S. Kim, "Theoretical Analyses of Particle Deposition in Human Lungs Considering Stochastic Variations of Airway Morphology", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 34, pp. 585-602 (2003).
27. J. Goo and C. S. Kim, "Study on the Asymmetric Regional Deposition of Airborne Pollutant Particles in the Human Respiratory Tract", *J. of KOSAE*, Vol. 19, No. 5, pp. 551-560 (2003).
28. J. H. Goo, "Deposition of Inhaled Smoke Particles Produced by Fire", *Fire Science and Engineering*, Vol. 21, No. 1, pp. 64-73 (2007).
29. C. S. Kim and D. M. Fisher, "Deposition Characteristics of Aerosol Particles in Sequentially Bifurcating Airway Models", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 31, pp. 198-220 (1999).
30. C. P. Yu and C. K. Diu, "Total and Regional Deposition of Inhaled Aerosols in Humans", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 14, pp. 599-609 (1983).