

[Research Paper]

다양한 화재조건에서 플라스틱 종류에 따른 연기입자의 크기분포 변화 측정

구재학[†] · 황철홍^{*}

우석대학교 소방안전학과, ^{*}대전대학교 소방방재학과

Measurement of the Size Distribution of Smoke Particles with Plastic Types Under Various Fire Conditions

Jaehark Goo[†] · Cheol-Hong Hwang^{*}

Dept. of Fire Protection and Safety, Woosuk Univ.

^{*}Dept. of Fire and Disaster Prevention, Daejeon Univ.

(Received November 2, 2017; Revised December 11, 2017; Accepted December 11, 2017)

요 약

화재발생 시에 대부분의 인명 피해는 연기에 의해 발생되는데, 최근 건축 내장재에서 차지하는 플라스틱의 양이 많아지며 발생하는 연기의 유독성이 점차적으로 증가되고 있다. 연기에 의한 인체피해의 상당부분은 흡입연기의 폐침전과 관련이 있으며, 연기입자의 크기분포는 폐침전 특성에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 플라스틱 종류에 따른 연기입자의 크기별 발생량 검토는 폐침전에 의한 인체피해 연구에 필수적으로 요구된다. 최근의 목재와 폴리프로필렌(PP)에 대한 연기입자의 발생특성 연구에서 PP의 연기입자 크기분포 특성이 몇 가지 측면에서 목재와는 확연히 다르게 나타났다. 이에 따라, 본 연구에서는 다른 플라스틱들도 연기입자 크기분포에서 PP와 같은 특성을 보이는지 알아보기 위해서 대표적인 4가지 플라스틱(LDPE, PA66, PMMA, PVC)에 대하여 연기입자 크기분포 측정실험을 수행하였다. 특정 조건에서 연소생성물을 균일하게 생성하고 분석하기 위하여 ISO/TS 19700 기준에 따른 등속튜브연소로를 이용하여 연소로의 온도와 산소공급량에 따라 다양한 화재조건에서 연기입자를 균일하게 발생시키고, 정전저압 임팩터를 사용하여 연기입자의 크기에 따른 개수농도를 실시간으로 측정하였다. 실험 결과 4가지 플라스틱의 연기입자 크기분포 특성은 여러 측면에서 PP와 유사하며 목재와는 확연히 다르게 나타났다.

ABSTRACT

Most fire victims succumb to smoke inhalation, and fire smoke toxicity from interior materials is increasing with increased use of plastics. Large amounts of hazardous effects of smoke are related to deposition of smoke particles in respiratory tracts, and deposition characteristics are influenced by size distribution of particles. Thus, it is essential to know the size distribution of smoke particles from plastics for hazard analysis of fire smoke. In a recent study, it has been shown that size distributions of smoke particles from PP are different from wood in many aspects. In order to know whether other plastics show the same characteristics as PP, size distributions of smoke particles from four plastic materials (LDPE, PA66, PMMA, and PVC) were measured in real time under each fire type with various temperature and oxygen supply. In this study, smoke particles from different plastics were generated uniformly by using steady-state tube furnace method provided in ISO/TS 19700. Their size distributions were measured by using an electrical low pressure impactor (ELPI). Results of measurements showed that size distributions of smoke particles from these four plastic materials were similar to those from PP in many aspects. However, they were distinctively different from those of wood.

Keywords : Fire Type, Smoke Particle, Soot, Plastics, Size Distribution, Tube Furnace, ISO/TS 19700

1. 서 론

현대사회에서 건축물의 대형화로 인하여 화재발생 시에

인명피해 규모가 증가하는데, 대부분의 인명 피해는 연기에 의해 발생된다. 이와 관련하여, 최근 건축 내장재에서 차지하는 플라스틱의 양이 많아지고 발생하는 연기의 유독

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

© 2017 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

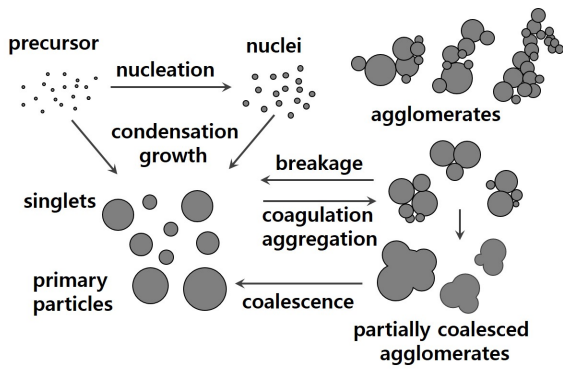


Figure 1. Formation of smoke particles.⁽⁶⁾

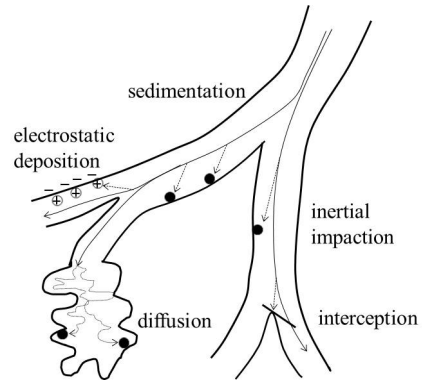


Figure 2. Mechanisms of lung deposition.

성이 증가하면서, 플라스틱 종류별 연기에 의한 인체 피해 특성이 소방안전 측면에서 중요한 요소가 되고 있다. 화재 시 인명피해 원인의 상당부분을 차지하는 연기는 가연물의 종류 및 화재조건에 따라 화학적 성분과 물리적 특성이 달라지는데, 이와 같은 연기의 발생 특성은 연기에 의한 인체 피해의 상당부분을 차지하는 흡입연기의 폐침전 연구에서 중요한 정보를 제공한다. 그러나 가연물의 화재조건에 따른 발생연기의 화학적 특성은 비교적 많은 연구가 진행된 반면에, 연기의 크기 분포 및 형상 등 물리적 특성은 상대적으로 연구가 미진하다.⁽¹⁻³⁾

화재 시 발생하는 연기에는 다양한 화학물질을 포함한 기체상과 더불어 입자형태의 고체상이 혼합되어 있다. 이때 고체상은 주로 미연탄소(unburned carbon)에 여러 유독가스를 포함한 가스가 흡착된 연기입자들로 이루어져 있다. 연기입자에 유독가스가 흡착되는 양상은 가스의 화학적 특성과 더불어 입자의 조성이나 크기 및 형상 등에 영향을 받는데, 이 입자들은 각 가연물의 화학적 조성과 화재 조건, 즉 연소로의 온도와 산소 공급량 등에 따라 구형 또는 불규칙 형태의 단일입자 또는 이들의 군집형태 등 다양한 크기와 형태의 물리적 특성을 가지게 된다. 유기증기(organic vapor) 및 미연탄소로부터 생성되는 연기입자는 화재 조건별로 Figure 1에 도시한 바와 같이 전구체(precursor)가 핵생성(nucleation) 및 응축(condensation) 등을 거쳐서 단구형(singlet)의 초기입자(primary particle)를 생성하고, 그 후 이들이 응고(coagulation), 집합(aggregation), 파손(breakage) 및 합체(coalescence) 등의 복합적인 과정을 거치면서 응집체(agglomerates)로 성장한다. 응축핵(nuclei)의 성장에 의해 형성되는 초기입자는 직경이 대략 10~60 nm인 구형이고 이들의 응집체로 이루어진 연기입자는 직경이 보통 0.5~5 μm인 사슬(chain) 또는 포도송이 구조를 가지며 화재조건에 따라 200 μm 이상까지도 성장한다.^(1,4-6)

화재연기는 주로 호흡기를 통하여 인체에 흡입되어 장·단기 피해를 야기한다. 연기 중 가스상은 흡입에 의하여 폐(lung)에 충전되어 기관지나 폐포(alveolar)를 통하여 혈관 등 인체에 흡수됨으로써 단기적으로 직접적인 피해를 일으

킨다. 반면에, 유독가스를 흡착한 입자상은 기관지 및 폐포 벽에 침전(deposition)되어 상대적으로 장기적인 피해를 일으킨다. 흡입된 연기입자는 인후두를 지나 기관(trachea)에서 폐포까지 약 23번의 분지관(bifurcation)을 지나면서 Figure 2에 도시된 바와 같이 입자의 크기 및 형태에 따라서 관성충돌, 중력침강, 확산 및 차단(interception) 등의 입자 침전 메커니즘에 의하여 호흡기 내에 침전된다. 호흡기 내부에 침전된 입자들은 제거 메커니즘에 의하여 청소되거나 인체에 흡수된다. 인체에 흡입되는 대부분의 입자상 물질들은 호흡기 내부의 다양한 영역에 침전되는데, 흡입에 의한 인체 피해를 예측하는 데 중요한 요소가 되는 독성물질 체내 흡수량은 입자의 호흡기 내 침전위치와 침전량의 영향을 받는다. 그런데 침전위치와 침전량이 입자의 크기 및 형태에 따라 정해지므로, 각 화재조건 및 물질별 연기의 크기와 형태는 폐침전의 여러 가지 특성을 결정하는 중요한 요소가 된다.⁽⁷⁻¹⁰⁾

연기입자는 수 나노미터에서 수십 마이크로미터까지의 넓은 범위에서 다양한 크기로 존재한다. 그러나 측정 기술적인 문제로 인하여 연기입자의 크기별 농도측정은 입자 크기별로 측정법을 달리하였으며, 이는 측정값의 연속성에 문제점을 가져왔다. 초기에는 대략 직경 0.3 μm 이상에서는 주로 임팩터를 사용하여 공기역학 입자경(aerodynamic diameter)이 측정되었다. 그러나 이후 임팩터의 기술적 발전으로 직경 0.01 μm 이상까지도 측정이 가능하게 되었으나, 아직 그 방식으로는 임팩터의 각 단계별 충돌판에 입자가 포집된 후에 이들 각각의 질량을 측정해야 하므로 실시간 분석에는 한계가 있었다. 정전저압 임팩터(electrical low pressure impactor, ELPI)는, 대략 직경 0.01 μm 이상의 측정 범위에서 Figure 3과 같이 충돌판에 접근하는 입자의 전하를 측정하는 전기적 방법을 이용하여 실시간으로 개수농도를 측정하도록 한 장치로, 시간에 따라 달라지는 발생연기의 크기분포 측정에 유용한 도구로 사용되고 있다.^(11,12)

여러 가지 다른 조건에서 발생하는 연기는 물리, 화학적 특성이 다르며 이들 특성을 파악하기 위하여 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 이러한 연구들은 온도, 연료 및 공

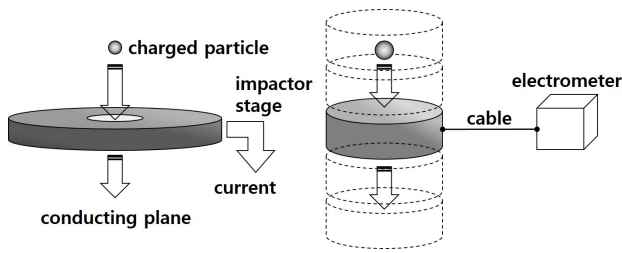


Figure 3. ELPI operating principle.⁽¹²⁾

기공급 등이 서로 다른 실험 조건에서 이루어져서 상호 비교분석 및 검증을 위한 국제표준방법 채택의 필요성이 제기되었다. 이에 따라, 정해진 조건에서 연소생성물 분석을 위한 방법으로서 등속튜브연소로 방식(steady state tube furnace method)이 관심을 받게 되었으며, 이 기준은 ISO/TS 19700⁽¹³⁾에 기술되어 있다. 일반적인 구획화재의 경우 정해진 가연물이 초기, 성장기 및 최성기 등의 화재성장 과정을 거치는 동안 연기의 특성이나 발생량이 변하므로, 특정 화재조건에서 연소생성물을 균일하게 생성하고 분석하는 데 어려움이 있다. 그러나 등속튜브연소로를 이용하면 일정한 속도로 연료와 공기를 공급함으로써, 특정 화재조건에서 균일한 연소생성물을 발생시킬 수 있다. 이와 같은 장점으로 인해, 이를 이용한 많은 연구결과가 도출되었고 최근에는 이들 결과의 검증을 위한 상호검증리그(round-robin test)가 이루어지기도 하였다. 그러나 이들 등속튜브연소로 방식을 이용한 대부분의 연구들은 가스상 생성물질에 초점을 두고 있으며, 호흡기 침전과 관련된 입자상 생성물질에 대한 연구는 부족한 실정이다.⁽¹³⁻¹⁶⁾

목재와 폴리프로필렌(PP)에 대한 연기입자의 발생특성에 관한 최근의 연구에서 PP의 연기입자 크기분포 특성이 몇 가지 측면에서 목재와는 확연히 다르게 나타났다.⁽¹⁸⁾ 이에 따라, 본 연구에서는 다른 플라스틱들도 연기입자 크기분포에서 PP와 같은 특성을 보이는지 알아보기 위해서 대표적인 4가지 플라스틱(LDPE, PA66, PMMA, PVC)를 대상으로 연기입자 크기분포 측정실험을 수행하였다. 고려된 4가지 플라스틱은 최근 유럽과 북미의 관련 연구팀들이 참

가한 상호검증리그⁽¹⁵⁾에서 테스트물질로 선정한 재료들로서, 향후 본 연구의 비교검증이 용이하도록 선정되었다. 특정 조건에서 연소생성물을 균일하게 생성하고 분석하기 위하여 ISO/TS 19700 기준에 따른 등속튜브연소로를 이용하여 다양한 화재조건에서 연기입자를 균일하게 발생시켰다. 또한 전체 입자크기 영역에서 실시간 연속적인 농도측정 결과를 얻기 위하여, 정전저압 임팩터를 사용하여 연기입자의 크기에 따른 개수농도를 측정하였다. 이와 같은 방법으로, 다양한 화재조건에 해당되는 연소로의 온도 및 당량비(equivalence ratio) 조건에서 각 가연물별 연기입자의 크기에 따른 개수농도를 실시간으로 측정하고 크기분포 변화를 분석하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서는 연소생성물 분석에 관한 국제표준 방식인 ISO/TS 19700에 제시된 등속튜브연소로 방식이 적용되었다. 이 방식은 연소로(furnace)를 통과하는 석영튜브(quartz tube) 안으로 공기와 연료를 각각 일정한 속도로 공급함으로써 균일한 연소생성물을 발생시키고, 튜브 내에서 발생한 연소생성물은 혼합상자(mixing chamber)로 나와서 일정량의 공기에 희석되어 실제상황과 유사한 연기 상태를 만들어 배출되도록 되어 있다. 이 실험에서 연소로는 기존의 입자형상 측정실험에서 제작한 장치를 이용하였으며, 입자크기별 개수농도 측정 장치인 정전저압 임팩터를 추가적으로 구성하였다.^(13,17,18)

Figure 4는 본 실험에서 사용된 등속튜브연소로와 정전저압 임팩터를 이용한 연기입자 측정 실험장치의 개념도이다. 등속튜브연소로는 연소로, 석영튜브, 석영보트(quartz boat), 보트추진시스템(feeding system), 혼합상자 및 공기공급 장치로 구성되어 있다. 원형단면의 석영튜브가 연소로를 통과하도록 되어 있고 연소로 안쪽에 위치한 부분의 석영튜브 안에서 석영보트 위의 가연물이 연소된다. 석영보트는 가연물 시편을 담아 석영튜브 안쪽을 통하여 연소로에 공급하는 기능을 하며, 보트 추진시스템은 이 석영보트를 등속으로 연소로 내부로 밀어 넣는 역할을 한다. 연소로

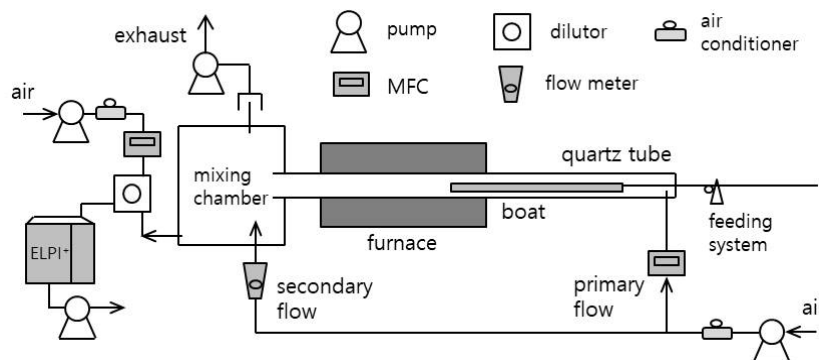


Figure 4. Experimental set up for the steady state tube furnace and ELPI system.

는 용량이 5 kW, 사용온도는 최대 약 1,000 °C이며 발열체로는 Kantal A-1이 사용되었다. 연소로 본체는 폭은 300 mm이며, 총 길이는 700 mm이다. 여기서 선단과 후단에 각각 50 mm의 단열부분을 제외하면 순수 가열부의 길이는 600 mm이다. 이 연소로 안에 외경 48 mm, 두께 1.5 mm, 총 길이 1,685 mm인 석영튜브가 중심을 통과하도록 배치되어, 900 mm가 연소로 입구 쪽으로, 85 mm가 연소로 출구 쪽으로 나와 있다. 석영튜브 오른쪽 끝에서 부터는 1,200 mm의 연료공급시스템이 설치되어 석영보트를 연소로 밖에서 안으로 일정 속도로 밀어 넣어주는 기능을 한다. 연소생성물은 혼합상자에 모여서 공기와 혼합되도록 구성되어 있는데 혼합상자는 5 mm 두께의 무정전처리된 폴리카보네이트(PC) 재질로 구성되어 있고, 내부 치수는 폭과 깊이가 모두 310 mm, 높이는 340 mm이다. 혼합상자에서 연소로와 접하는 면과 이 면에 접하는 상부면 일부의 내부는 내열을 위하여 스테인레스 판을 붙였다. 연소로 출구쪽 석영튜브는 혼합상자 안쪽으로 들어가 있고, 석영튜브와 혼합상자 사이의 단열을 위하여 유리솜(glass wool)이 사용되었다. 석영보트는 단면이 호(arc) 형상의 길이가 800 mm인 앞뒤가 막혀있는 용기이며, 가이드레일 위에 있는 금속봉에 연결되어 인덕션모터(DKM Motor, 9IDG3-200FP)에 의하여 정격 속도 40 mm/min로 석영튜브의 입구 쪽에서 연소로 안쪽으로 밀어 넣어진다. 연료는 균일한 연소가 이루어지도록 직경 약 5 mm의 팻렛(pallet) 형태의 시편으로 제작되며, 석영보트 길이 당 25 mg/mm의 탑재밀도(loading density)로 이 석영보트에 균일하게 실려서 1 g/min의 속도로 석영튜브의 입구(그림 우측) 쪽에서 연소로 내부로 공급된다.

연소시스템에는 연료와의 반응을 위한 1차 공기(primary flow)와 연소생성물 냉각 및 농도 조절을 위한 2차 공기(secondary flow)가 공급된다. 1차 공기는 석영튜브 내부로

입구 쪽에서 당량비로 정해지는 화재조건에 따라 2~20 L/min의 유량으로 불어 넣어주고, 2차 공기는 출구 쪽 혼합상자 안으로 1차 공기와의 총 합이 50 L/min의 유량이 되도록 공급한다. 공기 공급에는 온도와 압력보정을 위하여 질량유량계 MFC(KOFLOC, 3660A)와 Readout (MJ Technics, MR300)을 사용하였다. 보조 유량계로서는 면적유량계(KFM, PA-20)를 사용하였고, 청정공기 공급을 위해서 에어유니트(PARKER, P32), 실리카겔 및 HEPPA 필터(PALL, 12144)를 사용하였다. 연소생성물은 석영튜브의 출구 부분에 연결된 혼합상자로 들어가서 2차 공기와 혼합되어 냉각 및 희석된 다음 일부가 분석을 위하여 채집되고, 나머지는 배출시스템에 의하여 외부로 배출된다. 혼합상자로부터 채집된 입자는 정전저압 임팩터에서의 입구 유량 10 L/min에 맞추어 농도가 측정에 적당하도록 중간에 희석기(diluter)에서 청정공기로 희석하여 사용하였다. 희석비는 8.3배로 설정하였다. 측정결과는 희석비를 감안하여 혼합상자 내부의 입자 농도에 대한 값으로 표기하였다.

화재조건은 Table 1에 나타난 것과 같이 ISO/TS 19700⁽¹³⁾ 기준에 따라서, 연소로 온도(T)와 당량비(equivalence ratio, ϕ) 조건에 따라 1단계(S1b), 2단계(S2), 3단계(S3a) 및 4단계(S3b)로 구분된다. 당량비(ϕ)는 아래 식으로 정의되며, 여기서 \dot{m}_f 는 연료의 질량유량, \dot{m}_{o_2} 는 산소의 질량유량, 하첨자 $sto.$ 는 완전연소를 위한 양론혼합비 상태를 의미한다.^(13,14)

$$\phi = \frac{\dot{m}_f / \dot{m}_{o_2}}{(\dot{m}_f / \dot{m}_{o_2})_{sto.}} \quad (1)$$

이 실험에서는 선행연구^(17,18)에서와는 달리 각 가연물에 대한 이론적 산소요구량(stoichiometric oxygen demand)인 $(m_{o_2} / m_f)_{sto.}$ 는 Purser⁽¹⁵⁾의 자료를 적용하였다. 이를 이용하

Table 1. Conditions for Each Fire Type Based on the ISO/TS 19700

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. Calculated Primary Air Flow Rates (Q_p) for each Material

Materials	$(m_{o_2} / m_f)_{sto.}$ from Reference ⁽¹⁵⁾	Q_p (lpm)			
		S1b	S2 ($\phi = 0.7$)	S3a ($\phi = 2.0$)	S3b ($\phi = 2.0$)
PMMA	1.92	2 (given)	9.2	3.2	3.2
LDPE	3.42	2 (given)	16.3	5.7	5.7
PA6.6	2.33	2 (given)	11.1	3.9	3.9
PVC	1.28	2 (given)	6.1	2.1	2.1



Figure 5. Setting aluminum foils on ELPI stages.

면, 각 화재조건에 따라 정해진 당량비(ϕ)에 대하여, 표준 상태에서 1차 공기유량(Q_p)은 다음 식을 이용하여 Table 2와 같이 구할 수 있다.

$$Q_p (L/min) = 3.341 \frac{(m_{o_2}/m_f)_{sto.}}{\phi} \cdot \dot{m}_f (g/min) \quad (2)$$

연소로가 설정된 온도에 도달하면 3 min 후에 가연물이 균일하게 탑재된 길이 800 mm의 보트를 연소로 안으로 일정 속도로 밀어 넣기 시작하였다. 다음으로, 화염 및 연기

발생과 혼합기 안에서의 입자 상태가 안정된 10 min 후부터 채집라인을 연결하여, 보트가 연소로 안으로 끝까지 들어가기 전 일정 시간 동안 연기입자를 측정장치로 공급하였다. 보트삽입 및 채집라인 연결 시간 등은 혼합상자 안의 시간에 따른 입자 농도변화 등을 모니터링하여 최적의 값으로 정하였다.⁽¹⁸⁾ 정전저압 임팩터를 이용하여 입자크기에 따른 실시간 개수농도를 측정하여 데이터를 저장한 다음, 측정 결과 표시는 일정 구간에 대한 시간 평균값을 이용하였다. Figure 5는 정전저압 임팩터 측정을 위한 준비과정의 한 예로서, 임팩터 각 단계별 충돌판에 알루미늄 포일(foil)을 붙이고 입자의 재비산을 방지하기 위하여 그리스(impactor foil grease, DEKATI, AG-10)를 도포한 사진이다.⁽¹²⁾

3. 실험 결과

연기입자 측정에 관한 대부분의 선행 연구에서는, 다단 임팩터(cascade impactor) 및 중량측정법(gravimetric method) 등을 이용하여 PA6, PP 및 PVC 등 개별 가연물에 대하여 입자를 포집한 후 입경측정이 이루어졌다.⁽¹⁹⁻²⁰⁾ 그러나 최근에 Goo^(17,18)에 의하여 TEM을 이용한 형상측정과 더불어 정전저압 임팩터를 이용한 실시간 입경측정이 목재(wood)와 폴리프로필렌(PP)에 대하여 이루어졌다. 입경측정의 특징적인 결과로서, 목재에서는 입자직경이 대략 0.1 μm 보다 큰 영역에서는 화재조건 S1b에서, 이보다 작은 영역에서

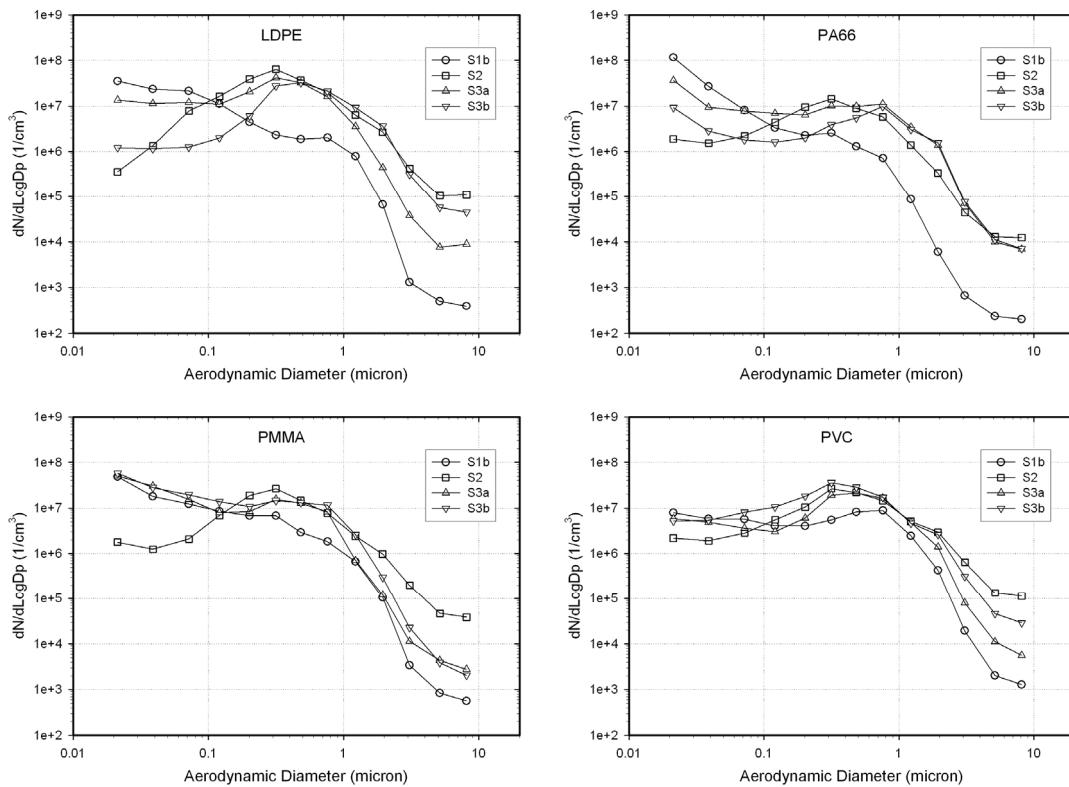


Figure 6. Comparison of geometric number concentrations of smoke particles for different materials: LDPE (upper, left); PA66 (upper, right); PMMA (lower, left); and PVC (lower, right).

는 화재조건 S2에서 상대적으로 많은 개수농도의 연기가 발생되었다. 반면에 PP에서는 이와 반대의 경향을 보이고 있음이 관찰되었다. 이와 같이 PP가 목재와 다른 경향을 보이는 것이 PP만의 특성인지 아니면 일반적인 플라스틱의 특성인지를 확인하기 위하여, 본 연구에서는 4종의 플라스틱(LDPE, PA66, PMMA, PVC)에 대하여 각 화재조건에서 입경에 따른 연기입자 농도분포측정 실험을 수행하였다.

Figure 6은 4종의 각 가연물질에 대하여, 화재조건별 발생 연기입자의 직경에 따른 기하학적 개수농도분포를 보여준다. 본 연구에서 정전저압 임팩터(ELPI)를 이용한 측정에서 얻어진 입자 직경은 측정장치의 고유특성상 공기역학 입자경(aerodynamic diameter)을 나타낸다. ELPI에는 각 입경에 대응하는 여러 개의 충돌판 단계와 추가로 1개의 가장 작은 입경에 해당하는 필터(filter) 단계가 있는데, 여기서는 입경별 데이터 측정에 있어서 필터 단계에서의 침전 데이터는 제외하고, 나머지 충돌판 단계에서 얻어진 데이터에 대응하는 13개 입경에서의 값만 사용하였다. 실험한 결과 4가지 플라스틱에 대하여 화재조건 S1b와 화재조건 S2를 비교하면, 입자직경 0.1 μm 근처를 기준으로 이보다 큰 영역에서는 화재조건 S2에서, 이보다 작은 영역에서는 화재조건 S1b에서 상대적으로 많은 개수농도의 연기가 발생된다. 이는 Goo(18)실험의 PP에 대한 실험결과와 일치한다. 또한 화재조건 S3a와 화재조건 S3b의 경우는, Figure 6에서 보는 것과 같이 PA66에서 약간의 예외가 있지만, 대

략적으로 입자크기에 따른 개수농도가 이들 화재조건 S1b와 화재조건 S2 사이에 위치한다. PA66는 화재조건 S3a와 화재조건 S3b 경우에 입자직경 1~3 μm 근처에서 화재조건 S2 경우보다 좀 더 많은 개수농도의 연기를 발생한다.

Figure 7은 각 화재조건에 대하여, 가연물질 변화에 따른 발생 연기입자의 기하학적 개수농도 분포를 보여준다. 그림에서 보듯이 같은 화재조건에서는 약간의 차이가 있지만, 가연물질의 종류에 따라 대략적으로 비슷한 경향의 기하학적 개수농도 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 즉 화재조건 S1b의 경우, 입자직경 0.1 μm 이하에서는 높은 개수농도를 유지하고, 입자직경 1 μm 이상에서는 다른 화재조건에 비하여 상대적으로 낮은 개수농도를 나타낸다. 이로 인하여, PVC에서 약간의 예외를 보이지만, 입자크기가 증가하면서 개수농도가 단순 감소하는 분포 특성을 보인다. 또한 화재조건 S2에서는 모든 가연물질에 대하여 입자직경 0.3 μm 근처를 기준으로 가운데가 볼록한 단순산형의 개수농도 분포를 나타낸다. 화재조건 S3a에서는 개수농도가 입자직경 0.3 μm 근처에서 산형을 보이고 또한 입자직경 0.1 μm 이하에서 다시 증가하는 이중산형 분포를 나타낸다. 화재조건 S3b에서는 화재조건 S2의 산형구조와 화재조건 S3a의 이중산형구조 중간정도에 해당하는 개수농도 분포를 나타낸다.

Figures 6과 7에 나타난 기하학적 개수농도 분포를 입자 직경에 대하여 적분하면 Figure 8의 왼쪽 그림과 같이 모든

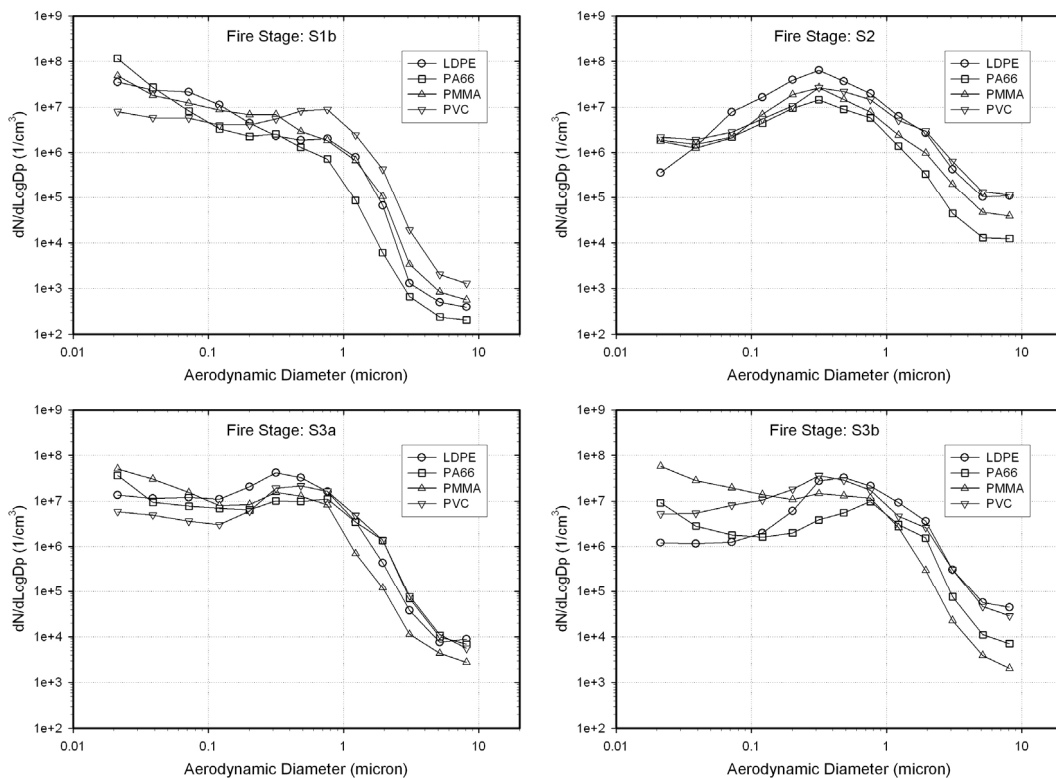


Figure 7. Comparison of geometric number concentrations of smoke particles for different fire stages: S1b (upper, left); S2 (upper, right); S3a (lower, left); and S3b (lower, right).

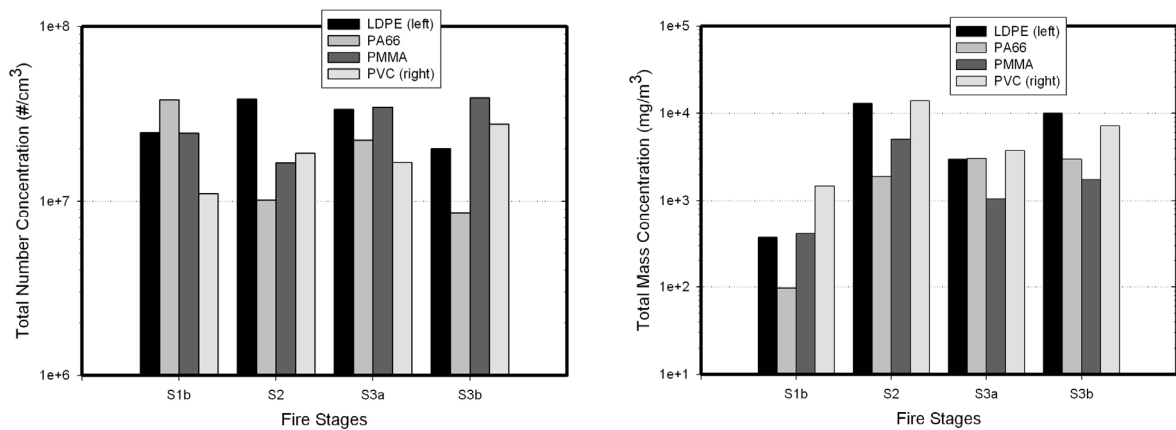


Figure 8. Total summation of the concentrations for all the particle diameters: total number concentration (left); total mass concentration (right).

입자직경에서 입자 개수를 더한 총 개수농도(total number concentration)를 구할 수 있게 되고, 이로부터 Figure 8의 오른쪽 그림과 같이 총 질량농도(total mass concentration)를 구할 수 있게 된다. 여기서 구한 총 개수농도 및 질량농도는 Figures 6과 7에 나타난 13개 입자직경에 대한 데이터를 모든 입자직경에 대하여 적분한 값으로부터 계산되었다. 실재하는 연기입자는 Goo^(17,18)의 실험에서 측정된 TEM 사진에서 보이는 것과 같이 각 가연물질 및 화재조건에 따라 모양과 비중이 다르다. 그러나 이 연구에서 질량농도는, 연기입자가 비중이 1이고 구형을 가정한 공기역학적 모델입자에 해당하는 비중과 형상을 갖는다고 가정하고 ELPI에서 측정된 각 입경별 개수농도를 이용하여 구하였다.

Figure 6의 각 물질별 개수농도에서 보는 것과 같이 각 화재조건에 따른 농도분포 곡선이 대략적으로 입자직경 0.1~0.3 μm 근처에서 교차하므로, 모든 입경에 대하여 더한 총 개수농도는 Figure 8에 나타난 것과 같이 각 화재조건에 대하여 큰 차이가 나지 않고 각 가연물질 간에도 대략 비슷한 값을 갖는다. 반면에 총 질량농도는 Figure 8에 나타난 것과 같이 각 화재조건에 따른 값이 비슷하지 않고 특히 화재조건 S1b에서 작은 값을 갖는다. 이는 Figure 7의 화재조건 S1b 곡선에서 설명한 것처럼 입자 크기가 증가하면서 개수농도 분포곡선이 단순 감소하므로 Figure 6에서와 같이 모든 가연물에 있어서 작은 입자에서는 개수농도가 가장 크고 큰 입자에서는 개수농도가 가장 작기 때문에 나타나는 현상이다. 즉 화재조건 S1b에서, 작은 입자는 개수가 많지만 큰 입자는 개수가 적기 때문에 질량이 입경의 3제곱에 비례하는 것을 고려하면 Figure 8에서와 같이, 총 개수농도는 화재조건에 따라 비슷하지만 총 질량농도는 현저히 작게 나타난다.

Figure 8에 나타난 것처럼, 화재조건 S1b에서 PVC의 경우에 각 가연물질 중에서 총 개수농도는 최저이나 총 질량농도는 최대이다. 이는 Figure 7에 나타나는 것과 같이 입경에 따라 단순 감소하는 화재조건 S1b에서의 분포에서도

PVC가 다른 가연물질에 비하여 입경이 작은 쪽에서 작은 개수농도를, 큰 입자에서는 큰 개수농도를 나타내기 때문이다. 반대로 화재조건 S3b에서 PMMA의 경우에 각 가연물질 중에서 총 개수농도는 최대이나 총질량농도는 최소이다. 이는 Figure 7에 나타나는 것과 같이 화재조건 S3b에서의 분포에서 PMMA가 다른 가연물질에 비하여 입경이 작은 쪽에서 큰 개수농도를, 입경이 큰 쪽에서는 작은 개수농도를 나타내기 때문이다. 화재조건 S2 경우 PA66는 총 개수농도와 총 질량농도 모두 최소이다. 이는 Figure 7에서 보는 것과 같이 PA66의 경우 산형의 개수농도 분포에서 전체 입자 크기 영역에서 개수농도가 모두 작게 나타나기 때문이다.

Figure 8에 나타난 것과 같이, 각각의 화재조건에서 가연물질에 따른 총 개수농도 순서는 Figure 7의 화재조건별 개수농도분포에서 각 곡선이 최대값을 가지는 근처 영역에서의 가연물질별 개수농도 분포 순서와 대략적으로 일치한다. 이는 로그 그래프의 특성상, 개수농도가 큰 영역에 해당하는 입자크기에서의 입자수가 개수농도가 작은 영역에서의 입자 수에 비하여 월등히 크므로, 합을 구하면 작은 영역에서의 입자 수 값이 무시되기 때문에 나타나는 현상이다.

4. 결 론

최근의 목재와 폴리프로필렌(PP)에 대한 연기입자의 발생특성 연구에서 PP의 연기입자 크기분포 특성이 몇 가지 측면에서 목재와는 확연히 다르게 나타났다.⁽¹⁸⁾ 이에 따라, 본 연구에서는 다른 플라스틱도 연기입자 크기분포에서 PP와 같은 특성을 보이는지 알아보기 위해서 대표적인 4가지 플라스틱(LDPE, PA66, PMMA, PVC)에 대하여 연기입자 크기분포 측정실험을 수행하였다. 실험 결과 4가지 플라스틱의 연기입자 크기분포 특성은 여러 측면에서 PP와 유사하며 목재와는 다르게 나타났다. 4가지 플라스틱의 입자발생 특성은 다음과 같다.

1. 실험한 결과 4가지 플라스틱에 대하여 화재조건 S1b

와 화재조건 S2를 비교하면, 입자직경 0.1 μm 근처를 기준으로 이보다 큰 영역에서는 화재조건 S2에서, 이보다 작은 영역에서는 화재조건 S1b에서 상대적으로 많은 개수농도의 연기가 발생된다. 이는 기존의 목재와 반대경향을 보이는 PP에 대한 실험결과와 일치한다. 또한 화재조건 S3a와 화재조건 S3b의 경우는, 개수농도가 대략적으로 이들 화재조건 S1b와 화재조건 S2 사이에 위치한다.

2. 동일 화재조건에서는 약간의 차이가 있긴 하나 4가지 플라스틱 전체에 대하여 대략적으로 비슷한 경향의 기하학적 개수농도 분포를 보인다. 즉 화재조건 S1b에서는 입자 크기가 증가하면서 개수농도가 단순 감소하는 분포 특성을 보인다. 화재조건 S2에서는 입자직경 0.3 μm 근처를 기준으로 가운데가 볼록한 단순산형의 개수농도 분포를 가진다. 화재조건 S3a에서는 개수농도가 입자직경 0.3 μm 근처에서 산형을 보이고 또한 입자직경 0.1 μm 이하에서 다시 증가하는 이중산형 분포를 보인다. 화재조건 S3b에서는 화재조건 S2의 산형구조와 화재조건 S3a의 이중산형구조 중간정도에 해당하는 개수농도 분포를 보인다.

3. 모든 입자직경에서 입자 개수를 더한 총 개수농도는 각 화재조건에 대하여 큰 차이가 나지 않고 각 가연물질 간에도 대략 비슷한 값을 갖는다. 반면에 총 질량농도 분포는 각 화재조건에 따른 값이 비슷하지 않고 특히 화재조건 S1b에서 작은 값을 갖는다. 이는 화재조건 S1b에서 입자 크기가 증가하면서 개수농도 분포곡선이 단순 감소하여 작은 입자에서는 개수농도가 다른 화재조건보다 크지만 큰 입자에서는 작게 나타나기 때문이다.

References

1. 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: Phase I Final Report", NIST Technical Note 1439 (2001).
2. A. K. Bølling, J. Pagel, K. E. Yttri, L. Barregard, G. Sallsten, P. E. Schwarze and C. Boman, "Health Effects of Residential Wood Smoke Particles: The Importance of Combustion Conditions and Physicochemical Particle Properties", Particle and Fibre Toxicology, Vol. 6, pp. 29-48 (2009).
3. T. Hertzberg and P. Blomqvist, "Particles from Fires: a Screening of Common Materials Found in Buildings", Fire and Materials, Vol. 27, No. 6, pp. 295-314 (2003).
4. S. K. Friedlander, "Smoke, Dust and Haze: Fundamentals of Aerosol Dynamics", Oxford Univ. Press, Oxford (2000).
5. K. M. Butler and G. W. Mulholland, "Generation and Transportation of Smoke Components", Fire Technology, Vol. 40, No. 2, pp. 149-176 (2004).
6. R. B. Diemer Jr. and J. H. Olson, "Bivariate Moment Methods for Simultaneous Coagulation, Coalescence and Breakup", Journal of Aerosol Science, Vol. 37, No. 3, pp. 363-385 (2006).
7. E. R. Weibel, "Morphometry of the Human Lung", Academic Press Inc., Springer-Verlag, New York (1963).
8. W. C. Hinds, "Aerosol Technology", John Wiley & Sons, Inc., New York (1982).
9. H. K. Chang and M. Paiva, "Respiratory Physiology: an Analytical Approach", Marcel Dekker, Inc., New York (1989).
10. R. F. Phalen, "Inhalation Studies: Foundations and Techniques", 2nd Edition, Informa Healthcare, New York (2009).
11. J. Goo, "Development of the Size Distribution of Smoke Particles in a Compartment Fire", Fire Safety Journal, Vol. 47, No. 1, pp. 46-53 (2012).
12. Dekati Ltd., "ELPI USER MANUAL Ver. 1.14", Finland (2011).
13. ISO/TS 19700, "Controlled Equivalence Ratio Method for the Determination of Hazardous Components of Fire Effluents", (2006).
14. T. R. Hull and K. T. Paul, "Bench-scale Assessment of Combustion Toxicity: a Critical Analysis of Current Protocols", Fire Safety Journal, Vol. 42, No. 5, pp. 340-365 (2007).
15. 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).
16. P. Blomqvist, T. Hertzberg, H. Tuovinen, K. Arrhenius and L. Rosell, "Detailed Determination of Smoke Gas Contents using a Small-scale Controlled Equivalence Ratio Tube Furnace Method", Fire and Materials, Vol. 31, No. 8, pp. 495-521 (2007).
17. J. Goo, "Studies on the Morphology of Smoke Particles for Each Type of Fire by Using Steady State Tube Furnace", Fire Science and Engineering, Vol. 28, No. 1, pp. 44-51 (2014).
18. 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).
19. J. Rhodes, C. Smith and A. A. Stec, "Characterisation of Soot Particulates from Fire Retarded and Nanocomposite Materials, and Their Toxicological Impact," Polymer Degradation and Stability, Vol. 96, No. 3, pp. 277-284 (2011).
20. A. A. Stec et. al., "Analysis of Toxic Effluents Released from PVC Carpet under Different Fire Conditions," Chemosphere, Vol. 90, No. 1, pp. 65-71 (2013).