



[Research Paper]

# 등속 튜브연소로 출구에서의 직접 샘플링 방법을 이용한 연기입자 입경분포 측정

구재학

우석대학교 소방방재학과 교수

## Measurement of the Size Distribution of Smoke Particles through Direct Sampling at the Exit of a Steady-State Tube Furnace

Jaehark Goo

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

(Received November 27, 2023; Revised December 4, 2023; Accepted December 5, 2023)

### 요 약

화재 조건에 따라 달라지는 연기 입자의 크기 분포는 화재 현장에서 발생하는 연기로 인한 거주자 및 소방관의 장단기 인명 피해의 주요 원인인 폐침전뿐만 아니라 화재 감지와 관련하여 소방 분야에서 중요한 연구 주제이다. 현재 연소 생성물의 성분, 농도 등의 특성은 ISO/TS 19700 방법을 이용하여 측정하는 경우가 많은데, 이 방법은 기상 물질에 주로 사용되며 측정의 어려움으로 이 방법을 이용한 입자상 물질에 대한 연구 결과는 많지 않고 그 결과는 연구자에 따라 많은 차이를 보인다. 입자상 물질의 특성 중 대표적인 것이 크기분포이며 이 측정값이 연소로 출구에서의 실제 분포와 다르게 나타나는 이유로서 중요한 것 중 하나는 냉각, 희석을 위해 설치된 혼합상자에서 입자의 충돌, 온도 변화, 체류시간 등의 인자에 의해서 이 크기분포 특성이 왜곡되기 때문으로 판단된다. 본 연구에서는 기존의 ISO/TS 19700 방법에 명시된 등속 튜브연소로 출구에서의 혼합상자를 직접 샘플링 방법으로 대체함으로써 혼합상자를 사용하는 경우와 직접 샘플링하는 경우의 입경분포 차이를 밝히고 해결책을 제시하였다. 이를 위하여 각 온도 및 당량비 변화에 따른 연소조건에서 발생한 연기 입자를 등속연소로 출구에서 직접 샘플링한 후 2단 희석장치를 거쳐 정전저압입팩터로 실시간 입경분포를 측정함으로써 혼합상자로 인한 입자 크기분포 왜곡을 최소화하였다.

### ABSTRACT

The size distribution of smoke particles, influenced by varying fire conditions, constitutes a significant research focus in the firefighting domain concerning fire detection and the impact on lung deposition which is a major contributor to both short- and long-term casualties among residents and firefighters. Currently, the ISO/TS 19700 method is commonly employed to measure characteristics of combustion products, including composition and concentration, primarily for gaseous substances. However, due to measurement challenges, limited research results exist on particulate substances using this method, and outcomes vary significantly among researchers. The particle size distribution which is the typical characteristics of particulate materials is crucial factor leading to discrepancies in measurements at the combustion furnace outlet. This distortion is influenced by factors such as particle collision, temperature changes, and residence time in the mixing chamber installed for cooling and dilution. This study unveils the disparity in particle size distribution between using a mixing chamber and direct sampling. A solution is proposed by replacing the mixing chamber at the outlet of the steady-state tube furnace specified in the existing ISO/TS 19700 method with a direct sampling approach. Smoke particles generated under combustion conditions at various temperatures and equivalence ratios were directly sampled at the furnace exit. These samples underwent a two-stage dilution process, and the real-time particle size distribution was measured using an electrostatic low-pressure impactor. This approach minimizes distortion of the particle size distribution attributable to the mixing chamber.

**Keywords :** Smoke particle, Size distribution, ISO/TS 19700, Steady-state tube furnace, Direct sampling

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

© 2023 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

## 1. 서론

화재 현장에서 발생하는 연기에 대한 각 화재 조건에서의 입자 발생 특성은 연기로 인한 거주자 및 소방관의 장단기 인체 피해의 주요 원인인 폐 침전뿐만 아니라 연기에 의한 화재 감지 등과 관련하여 소방 분야에서 중요한 연구 주제이다<sup>(1-4)</sup>. 연기와 관련된 미세먼지의 유해성과 관련하여, 최근에는 미세먼지의 양뿐만 아니라 크기가 인체에 중요한 영향을 미친다는 사실이 알려지면서 초미세먼지에 대한 관심이 높아지고 있다<sup>(1,2,5)</sup>. 이러한 미세먼지 중에 화석연료의 연소로 인한 연기입자가 많은 양을 차지하고 있으며, 이러한 입자가 인체에 피해를 주는 주요 경로인 폐침전은 이러한 입자의 크기 분포와 밀접한 관련이 있다<sup>(6-8)</sup>.

연소 생성물인 연기는 가스상 물질과 입자상 물질이 혼합된 형태로, 연소 직후 생성되는 고온의 가스상 물질과 미연탄소 등이 핵생성, 응축 등의 메커니즘을 통해 직경 10~60 nm의 초기 입자를 형성한 후 응고, 응집, 합체 등의 과정을 거치며, 보통 500~5,000 nm의 큰 응집체로 성장하기 때문에 연기 중에는 다양한 크기의 입자상 물질이 동시에 존재한다<sup>(9-11)</sup>. 현재 연소 생성물의 성분, 농도 등의 특성은 국제표준 방식인 ISO/TS 19700 방법<sup>(12)</sup>을 이용하여 측정하는 경우가 많다. 그러나 이 방법은 가스상 물질에 주로 사용되며 입자상 물질의 경우 특성 중 대표적인 것이 크기분포인데 측정의 어려움 등으로 연구 결과가 많지 않고 실험값이 연구자에 따라 많은 차이를 보이고 있으며 정확도에 대한 비교 검증이 쉽지 않다. 그 이유는 ISO/TS 19700 방법에서는 주로 가스상 물질의 성분 및 농도 측정에서 샘플링을 균일하게 하기 위하여 연소로 출구에 혼합상자(mixing chamber)를 설치하는데 이 방법에서 혼합상자의 크기와 혼합공기량만 규정되어 있고 입자상 물질의 입경분포 특성에 영향을 미치는 구체적인 혼합공기 온도, 희석 및 샘플링 방식 등이 규정되어 있지 않기 때문으로 판단된다<sup>(12,13)</sup>.

연기입자 측정에 관한 대부분의 선행연구에서는 다단임팩터(cascade impactor)와 중량측정법(gravimetric method) 등을 이용하여 PA6, PP, PVC 등의 개별 가연물에 대하여 입자를 포집한 후 입경별 중량농도 측정 등이 이루어졌다<sup>(14-17)</sup>. 그러나, 이후 Goo<sup>(18,19)</sup>는 목재(wood) 및 폴리프로필렌(PP)에 대하여 TEM을 이용한 형상 측정과 정전저압 임팩터를 이용한 실시간 입경별 개수농도 분포 측정을 실시하였다. ISO/TS 19700에서 명시된 방법을 이용한 연구 중 하나인 Goo<sup>(19)</sup>의 실험 과정을 통해서 보면 발생 입자의 입경분포 특성이 일정 크기로 정해진 혼합상자 안에서 혼합되는 과정에서 각기 다른 장치 구성에 따른 혼합방식, 희석온도 및 샘플링 이후의 희석방식 등의 변화에 따라 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 이 측정법에서 명시된 것만으로는 연소로 출구에서의 입자 크기 분포 특성을 표준화하여 나타낼 수 있다고 보기 어려운 문제가 있다.

이는 입자상의 생성 메커니즘이 가스상과 다르기 때문이다. 앞에 언급한 것과 같이 연소로에서 발생한 가스상 및 입자상

연소생성물은 핵형성, 응축, 응고, 집합 및 합체 등의 과정을 거쳐서 입자상의 응집체로 성장하면서 연속적으로 크기가 변한다. 따라서 연소로 출구에서 나온 고온의 연소생성물이 ISO/TS 19700에서 명시된 일정 크기의 혼합상자 안에서 다량의 희석공기와 혼합되고 체류하면서 입자상 물질의 입경분포 특성이 변하는 것은 쉽게 예상할 수 있다. 여러 연구에 의하여 입자상 물질의 희석과정에서 희석장치의 종류와 작동 조건에 따라서 희석 전후의 입자 분포 실험값에 많은 차이를 보이는 것이 알려져 있고 이에 따라 2단 희석장치 등 입자 분포 왜곡을 줄이기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다<sup>(20-24)</sup>. 현재의 방법으로는 연소 생성물이 연소로에서 배출되어 혼합기에서 공기와 혼합 및 냉각되고 샘플링된 후 희석기에서 다시 공기와 혼합 희석되어 입경 측정장치에 유입되는 동안, 입자상 물질의 입경 분포가 연소로에서의 연소조건뿐만 아니라 혼합, 희석 및 샘플링 등의 단계에서 온도, 지연시간 및 희석비율 등에 따라 왜곡된다. 따라서 연소로 출구에 혼합상자를 설치하는 경우 이곳에서 연소생성물이 체류하면서 다량의 공기와 혼합 및 희석되는 동안에 입자의 입경에 따른 개수농도 분포가 왜곡되어 연소로 출구에서의 분포와 다르게 나타나는 것으로 판단된다.

실제 화재 현장이나 연소 시에 발생하는 입자상 물질은 인체에 흡입되거나 감지기에 유입되기 전에 대기 중에 노출되어 희석되는 과정을 거치는데 이 과정은 각 환경에 따라 많은 차이를 보이며 발생 이후 변화 과정은 각 조건에 따라 달리 적용할 사항이다. 그러나 대부분 자연대류에 의한 상승 과정 중 대기에서의 확산현상과 연속된 플룸에 의한 완만한 냉각과정을 거치게 되기 때문에 ISO/TS 19700에서 사용되는 혼합상자에서 일어나는 단시간의 냉각 및 충돌혼합 상황과 다르다<sup>(1,2,12)</sup>. 따라서 혼합상자를 거치기 전의 기본적인 입경분포를 아는 것이 중요하기 때문에 혼합상자를 사용하지 않고 직접 샘플링하는 경우 기존의 연구 결과와 비교하여 어떻게 달라지는 가를 알기 위하여 본 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 혼합상자를 거치지 않고 연소로 출구에서 실시간으로 직접 샘플링을 수행하여 혼합상자 안에서 입자의 충돌, 온도 변화 및 체류시간 등으로 인한 입자 크기분포 왜곡을 피하였다. 측정 농도 범위에 맞추기 위한 희석을 위해서는 온도의 영향을 고려한 2단 희석장치(Dekati, eDiluter Pro)<sup>(25)</sup>를 이용하여 입자가 연소로 출구에서 직접 실시간으로 희석되어 입경 측정장치에 유입되도록 함으로써 입자 크기분포 왜곡을 최소화하였다. 가연물로서 목재에 대하여 각 온도 및 당량에 따른 연소조건에서 연기입자가 발생하도록 하였으며 정전저압 임팩터(Dekati, ELPI)<sup>(26)</sup>를 사용하여 입자크기에 따른 개수농도 분포를 측정하였다.

## 2. 연구방법

Figure 1은 ISO/TS 19700 방법<sup>(12)</sup>에 규정된 등속튜브연소로(steady-state tube furnace)<sup>(13,17)</sup> 주요 부분에 혼합상자(mixing

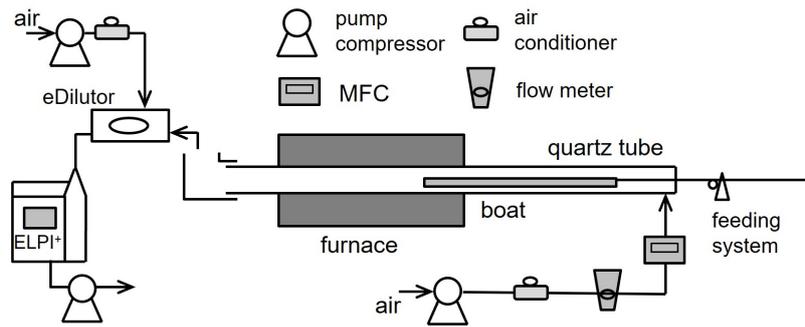


Figure 1. Experimental set up for the generation and measurement of smoke particles.

Table 1. Chemical Composition Analysis Table for the Wood Cubes Used (KOPTRI)<sup>(27)</sup>

Test Items	Nitrogen	Carbon	Hydrogen	Sulfur	Oxygen	Water Content	Ash
Test Methods	Elemental Analyzer	ISO 15512 (Method B2)	Ignition Loss Method (900 °C, 3 h)				
Detection Limits	0.05%	0.05%	0.05%	0.05%	0.05%	-	-
Test Results	Not Detected	47.22%	6.18%	Not Detected	43.90%	6.47%	< 0.1%

chamber)를 제외하고 발생 입자 크기분포 측정을 위한 입자 희석장치 및 입경 측정장치를 연결하여 구성한 실험장치 개념도이다. 등속류연소로는 원형 단면의 석영튜브가 연소로를 관통하여 설치되어 있고 별도의 석영보트가 가연물을 적재하여 석영튜브 안쪽을 통하여 연소로 내부로 들어가면서 연소가 이루어진다. 석영보트가 석영튜브 안에서 일정온도로 가열된 연소로를 그림의 우측에서 좌측으로 통과하는 동안 균일하게 적재된 가연물이 연소로 내로 정해진 속도로 이동하면서 일정 속도의 연소가 이루어지게 된다. 그림의 석영튜브 오른쪽 부분에서는 일정유량의 공기가 공급되고 연소생성물은 석영튜브 왼쪽 출구로 배출되도록 구성되어 있다. 연소로는 가열부길이 600 mm, 총길이 700 mm에 최대 가열온도가 1,100 °C인 전기 연소로이며 석영튜브는 총길이 985 mm, 외경 48.0 mm, 두께 1.5 mm의 원형 단면이고 석영보트는 총길이 800 mm에 단면이 호(arc) 형상으로 앞뒤가 막혀 있고 끝부분에 이동을 위한 고리가 달려있다.

목재(wood)가 가연물로 사용되었다. 사용된 목재는 백양목이며 화학성분은 Table 1과 같다. 성분분석은 한국고분자시험 연구소(KOPTRI)에 의뢰하여 진행하였다<sup>(27)</sup>. 목재(wood) 시편은 균일한 연소가 이루어지도록 각 변이 4 mm인 육면체(cube)로 가공하여 석영보트에 25 mg/mm의 길이 당 질량 개념의 탑재밀도(loading density)로 균일하게 실려서 인덕션모터(DKM, 9IDG3-200FP)에 의해서 40 mm/min의 이동속도 또는 1 g/min의 질량 이동속도로 연소로 내부로 공급된다. 연소를 위한 공기는 입구인 오른쪽에서 석영튜브 내부로 화재조건에 해당하는 당량비(equivalence ratio)에 따라 정해지는 2~20 L/min의 연소공기유량(Qp)으로 공급된다. 연소로가 설정된 온

도에 도달하고 입자 측정장치가 안정되면 보트를 연소로 안으로 일정 속도로 밀어 넣기 시작하고 발생한 입자를 연소로 끝에 위치한 석영튜브 출구에서 직접 샘플링하여 희석기를 거친 다음 입경분포를 측정하였다.

원래의 ISO/TS 19700 기준에 따르면 연소로 출구에서 나오는 입자는 비교적 큰 용량(310 mm × 310 mm × 340 mm)의 혼합상자에서 일정시간 체류하면서 연소조건에 따른 일정량의 청정공기로 혼합, 냉각 및 희석된 다음 샘플링되고 그 후 입자 측정기의 농도 범위에 맞추어 연구자에 따라 추가로 1단 희석기(Dekati, DAD-100) 등을 사용하여 희석이 이루어졌다<sup>(19)</sup>. 서론에서 언급한 것과 같이 연소로에서 발생한 입자가 이 혼합상자에서 체류하면서 혼합, 냉각 및 체류 되는 과정에서 입자의 크기별 농도분포가 왜곡되므로 본 연구에서는 연소로 출구에서 혼합상자를 거치지 않고 연기입자를 직접 샘플링하도록 구성하였다. Figure 2는 연소로 출구에서 직접 샘플링하는 부분에 대한 실험장치 사진을 보여준다. 연소로 출구에서 직접 샘플링된 입자는 2단 희석기(Dekati, eDiluter Pro)<sup>(25)</sup>를 거친 다음 정전저압입팩터(Dekati, ELPI<sup>+</sup>)<sup>(26)</sup>를 이용하여 입자크기에 따른 실시간 개수농도 측정이 이루어지도록 구성하였다.

2단 희석기(Dekati, eDiluter Pro)에서는 입자 왜곡을 최소화하기 위하여 희석기 1단에서는 유입되는 입자와 같은 온도의 청정공기를, 2단에서는 상온의 청정공기를 주입한다. 청정공기 압력은 5 bar에 맞추고, 희석비는 1단과 2단에서 각각 설정하게 되어 있다. 1단에서 공급되는 희석용 청정공기 온도(Tset)는 연소로 출구 샘플링 위치에서 열전대(Fluke, 80PK-1 bead probe)를 사용하여 측정된 값을 적용하였다. 청정공기 공급을 위해서 에어유닛(PARKER, P32) 및 HEPPA필터(PALL,



Figure 2. Photo of the direct sampling of particles at the exit of the furnace.

Table 2. Particle Diameters for Each Stage and Channel of ELPI (Dekati, ELPI+)<sup>(26)</sup>

Number	<i>i</i>	1	2	3	4	5	6	7
Channel	$d_i (\mu\text{m})$	0.0099	0.0213	0.0389	0.0718	0.1209	0.2018	0.3153
Number	<i>i</i>	8	9	10	11	12	13	14
Channel	$d_i (\mu\text{m})$	0.4825	0.7599	1.2258	1.9453	3.0777	5.1485	8.1118

12144)를 사용하였다. 유량 측정을 위하여 면적유량계(KFM, PA-20)를 사용하였으며 교정용으로 MFC (KOFLOC, 3660A, 20SLM)와 Readout (MJ Technics, MR300)으로 구성된 질량유량계를 사용하였다.

연소조건은 ISO/TS 19700 기준에 따른 분류를 확장하여, 연소로 온도(T) 조건을 800 °C, 600 °C, 400 °C로 하고 각각의 온도에 대하여 다음 식(1)로 정의되는 당량비(equivalence ratio,  $\phi$ ) 값을 적용하였다.

$$\phi = \left( \frac{\dot{m}_{fuel}}{\dot{m}_{oxygen}} \right) / \left( \frac{\dot{m}_{fuel}}{\dot{m}_{oxygen}} \right)_{stoich.} \quad (1)$$

여기서  $\dot{m}_{fuel}$ 는 연료의 질량유량,  $\dot{m}_{oxygen}$ 는 산소의 질량유량, 하첨자 *stoich.*는 완전연소를 위한 양론 혼합비 상태를 의미한다<sup>(12)</sup>. 실험에 사용된 시료의 화학분석결과(Table 1)와 본 실험 조건을 이용하여 급기과잉과 급기부족 상태에 해당하는 각각의 당량비( $\phi$ ) 0.5와 2.0에 대하여 석영튜브 입구로 공급되는 실제 연소공기유량(Qp)은 ISO/TS 19700 방법에 따라 각각 9.1 L/min 및 2.3 L/min을 사용하였다<sup>(12,13,27)</sup>. 정전저압임팩터(Dekati, ELPI<sup>+</sup>)를 이용한 입자직경에 따른 개수농도분포 측정에서 사용된 각 채널(channel)에서의 입자 직경은 Table 2와 같다. 이 장치에서 사용된 입자 직경은 유체 중에서 입자의 입자와 같은 하강속도를 가지는, 물에 대한 비중 1인 구형입자의 직경으로 정의되는 공기역학적 입자직경(aerodynamic particle diameter)을 사용하였다<sup>(9)</sup>. 여기서  $d_i$ 는 *i*번째 채널에 해당되는 입자의 공기역학적 직경이다. 임팩터 각 단계(stage)별 충돌판

(impactor)에 알루미늄 포일(foil)을 붙이고, 입자의 재비산(reentrainment)을 방지하기 위하여 그리스(impactor foil grease, Dekati, AG-10)를 도포하였다<sup>(26)</sup>.

### 3. 연구결과

#### 3.1 연소조건에 따른 입자 발생 및 측정

정해진 온도로 가열된 연소로 입구에 가연물을 실은 보트가 대기하고 있다가 연소로 안으로 출발하는 시각으로부터 입자 크기별 개수농도 측정이 시작되었다. 보트가 출발에서부터 연소로에 완전히 들어가는 데는 약 20 min이 소요된다. 출발 전 대기상태에서부터 연소로 고열의 영향에 의하여 입자의 발생이 시작되는데, 출발 후 온도와 당량비에 따라 약 2~4 min 정도 후에 착화가 되고 이후 본격적인 화염에 의하여 입자가 발생한다. Figure 3에서는 특정한 연소조건에서 연소로 입구 및 연소로 내부에서의 연소 상황을 보여준다.

Figure 4는 각 연소로 온도(T) 및 당량비( $\phi$ )별 연소공기유량(Qp)에 해당하는 연소조건에서 발생 입자의 시간에 따른 입경별 개수농도(number concentration) 변화에 대한 정전저압임팩터(Dekati, ELPI<sup>+</sup>)로 측정된 데이터를 보여준다. 그림에 나타난 5개의 선은 정전저압임팩터 각 채널에 대응하는 입자크기로, 그림의 CH1, CH3, CH5, CH7, CH9은 Table 1에 나타난 각 채널에 해당하는 공기역학경에 대응하며 각각 0.0099  $\mu\text{m}$ , 0.0389  $\mu\text{m}$ , 0.1209  $\mu\text{m}$ , 0.3153  $\mu\text{m}$ , 0.7599  $\mu\text{m}$ 를 나타낸다. 그림의 수직축 농도는 1 입방 센티미터( $\text{cm}^3$ ) 당 개수농도이며, 각 시각에서의 10 s 평균값에 대한 시간에 따른 변화를 나타낸다.



Figure 3. Typical fire flames of wood cubes: Inlet part (Left) and inside (Right) of the furnace.

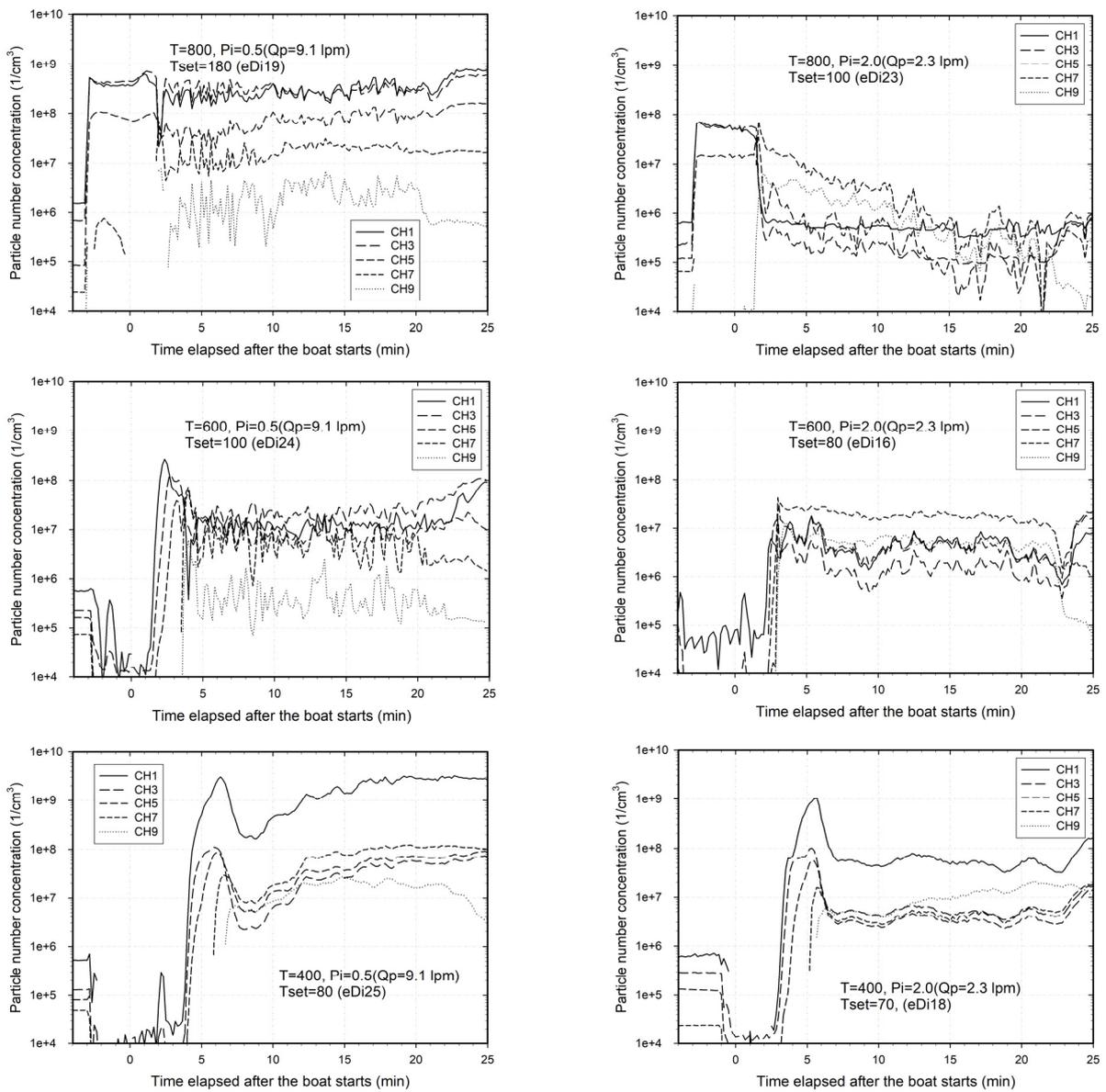


Figure 4. Variation of number concentrations of smoke particles with time for each fire condition: a)  $T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Q_p = 9.1 \text{ lpm}$ ,  $T_{set} = 180 \text{ }^\circ\text{C}$  (Upper left); b)  $T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Q_p = 2.3 \text{ lpm}$ ,  $T_{set} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  (Upper right); c)  $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Q_p = 9.1 \text{ lpm}$ ,  $T_{set} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  (Middle left); d)  $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Q_p = 2.3 \text{ lpm}$ ,  $T_{set} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  (Middle right); e)  $T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Q_p = 9.1 \text{ lpm}$ ,  $T_{set} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  (Lower left); f)  $T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Q_p = 2.3 \text{ lpm}$ ,  $T_{set} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$  (Lower right).

시간에 따라 변화하는 정전저압입팩터의 채널별 입자 농도에 대하여 보트 출발( $t = 0 \text{ min}$ ) 후부터 멈추기( $t = 20 \text{ min}$ ) 전까지 연소초기 급격한 변화를 거친 후부터 시간 평균치로 입경별 입자수 농도 분포를 구하였다. 2단 희석기(Dekati, eDiluter Pro)에서의 희석비(DF)는 1단에서 5배, 2단에서 5배, 총 25배로 설정하였다. 1단에서의 희석온도( $T_{set}$ )는 각 연소조건에 따라 연소 시 출구에서 열전대(Fluke, 568, 80PK-1 probe)로 측정된 연소생성물 온도 값과 동일한 값으로 Figure 4에 나타난 것과 같이 설정하였다. 연소로 입구에 보트가 대기상태로 있다가 출발하는데 대기상태에서도 공기가 공급되고 연소로 온도의 영향을 받기 때문에 연소조건에 따라서 보트 출발 전에도 입자농도가 다양하게 나타난다. 연소로 온도 800 °C, 600 °C, 400 °C 각각에 대하여 보트 출발 후 대략 1 s, 2 s, 4 s 정도 후에 착화되기 시작하며 입자발생 농도가 착화 후 초기 불안정 구간을 거치게 된다. 초기 불안정 구간은 온도가 낮을수록 길어지며 변화폭도 증가한다.

Figure 5는 각 연소로 온도 및 당량비에 해당하는 연소조건에서 보트 위 가연물의 연소 후 모습을 보여주는 사진이다. 마지막 사진은 연소 전의 목재 시편 모습이다. 보트 왼쪽이 연소로에 들어가는 시작 부분이고 오른쪽이 끝부분이다. 40 mm/min의 이동속도로 연소로 안으로 20 min 전진한 후 동일 연소로 상태를 유지한 상태에서 같은 속도로 후진한 후의 사진이다. 연소로 온도 800 °C에서는 대부분이 연소가 되고 400 °C에서는 일부가 연소하지 않고 남아있다. 오른쪽 끝부분에 잔류물이 있는 것은 보트 오른쪽 끝부분은 연소로 안쪽으로 깊이 들어가지 않고 끝부분에서 정지하고 빠져나오기 때문이다. 잔류물이 많고 적음은 연소로 열기가 미치는 범위 및 시간과 관련이 있

며 연소로 온도 800 °C에서 열기가 가장 끝부분까지 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 연소로 온도 400 °C에서  $Q_p = 9.1 \text{ lpm}$  경우가  $Q_p = 2.3 \text{ lpm}$ 인 경우보다 잔류물의 양이 많은 것은 높은 연소공기유량( $Q_p$ )에 따른 빠른 유속으로 인하여 열기가 오른쪽 끝부분으로 미치는 영향이 적기 때문으로 파악된다.

### 3.2 연소조건에 따른 발생입자 특성

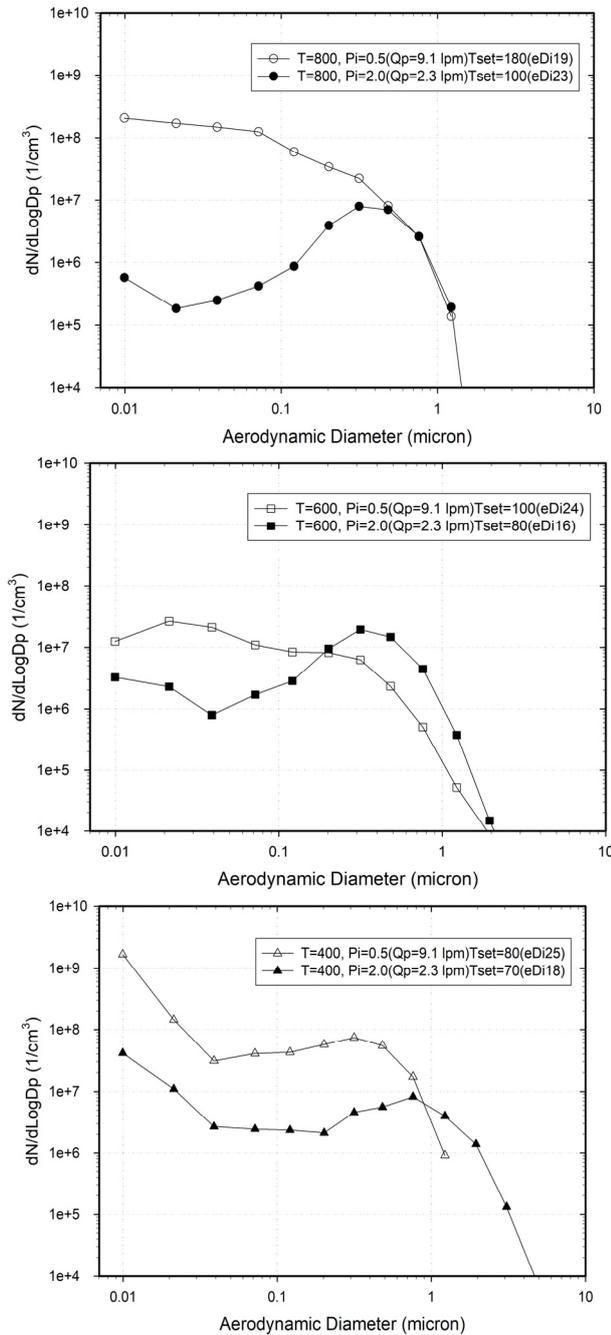
#### 3.2.1 각 연소조건에서 발생입자의 입경별 평균 개수 농도

Figure 6은 목재(wood)에 대하여 각 연소조건에서 발생하는 연기입자의 입경에 따른 기하학적 개수농도분포(geometric number concentration)<sup>(9)</sup>를 보여준다. 본 연구에서 정전저압입팩터(Dekati, ELPI+)를 이용한 측정에서 얻어진 입자직경은 측정장치의 고유특정상 공기역학적 입자직경을 나타낸다. 입자의 개수농도는 연소로 안으로 보트가 출발한 후 시간에 따라서 변화하는데 Figure 6에 나타난 값은 Figure 4에 보이는 시간에 따른 농도 변화 값이 초기 불안정한 구간을 거친 후 계산된, 시간에 대한 평균값을 나타낸다. 연소로 온도 800 °C, 600 °C, 400 °C 각각에 대하여 2 min, 5 min, 8 min 후부터 보트 정지까지 농도의 시간에 대한 평균값을 구하였다.

Figures 6(a), 6(b), 6(c)는 온도가 높은 순서로 각각 800 °C, 600 °C, 400 °C에서 각 당량비(equivalence ratio,  $\phi$ ) 조건에서 측정된 공기역학입자경에 대한 기하학적 개수농도를 보여준다. 그림에서 편의상 입자직경 0.1  $\mu\text{m}$  이하를 작은입자, 1  $\mu\text{m}$  이상은 큰입자, 그 사이를 중간입자로 구분하여 분석하였다. 800 °C, 2.3 lpm의 경우는 개수농도가 초반에 일정 시간 감소를 보이며, 이 연소조건에서는 2 min 후 10 min 동안의 평균



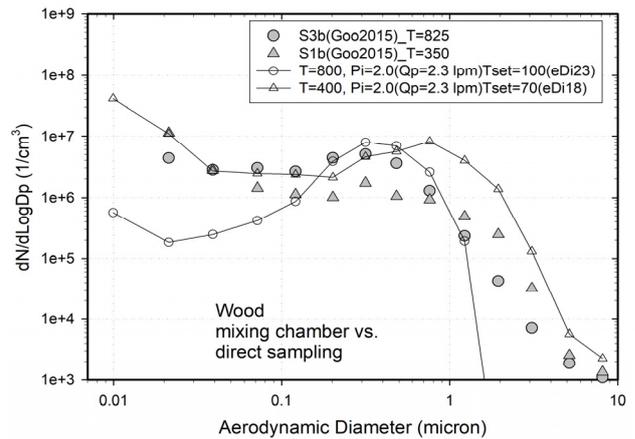
**Figure 5.** Wood cubes on the boat after combustion for each fire condition in order from top to bottom: a)  $T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Q_p = 9.1 \text{ lpm}$ ; b)  $T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Q_p = 2.3 \text{ lpm}$ ; c)  $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Q_p = 9.1 \text{ lpm}$ ; d)  $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Q_p = 2.3 \text{ lpm}$ ; e)  $T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Q_p = 9.1 \text{ lpm}$ ; f)  $T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Q_p = 2.3 \text{ lpm}$ ; g) before combustion.



**Figure 6.** Comparison of geometric number concentrations of smoke particles vs. aerodynamic particle diameter for each fire condition: a)  $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Upper); b)  $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Middle); c)  $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Lower).

값을 취하여 나타내었다. 이 연소조건에서 나타나는 감소 현상은 온도가 높고 공기 공급이 제한되어서, 작은 입자들이 발생하고 중간단계를 거쳐서 큰 입자로 발달 또는 소멸하는 과정에 고온과 불완전 연소가 복합된 것과 함께 시간의 증가에 따른 연소생성물 진로상의 고온으로 가열된 보트의 길이 증가가 영향을 미쳐서 나타나는 현상으로 판단된다<sup>(12-14)</sup>.

Figure 6에서 보면, 각 온도에서 공통으로, 연소공기유량

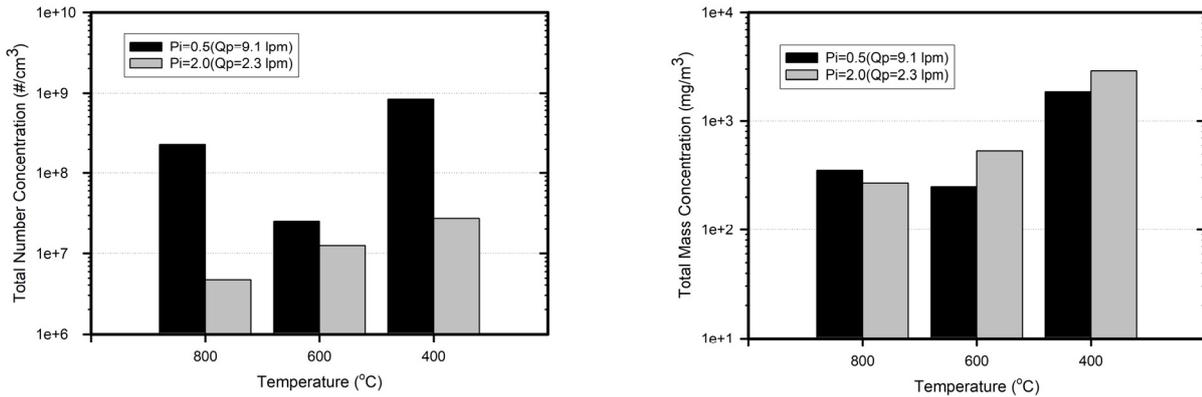


**Figure 7.** Comparison of the results using direct sampling with previous studies for the geometric number concentrations of smoke particles.

( $Q_p$ )이 줄어들어 당량비가 커지면 즉 급기부족( $\theta = 2.0$ )이 되면 급기과잉( $\theta = 0.5$ )에 비해서 작은입자( $0.1\text{ }\mu\text{m}$  이하) 범위의 입자농도는 낮아지고 큰입자( $1\text{ }\mu\text{m}$  이상) 범위의 입자농도는 높아진다. 이는 급기부족에 의한 2가지 요소 즉, 불완전 연소로 인한 미연탄소 발생량 증가와 체류시간 증가에 따라서 작은입자가 큰입자로 성장하는 것 때문으로 판단된다<sup>(1,2,9,28)</sup>. 급기부족 상태( $\theta = 2.0$ )에서 각 온도에서의 값을 비교해 보면 온도가 높아짐에 따라 작은입자와 큰입자 범위에서는 입자농도가 감소하는데 반하여 중간입자 범위에서는 오히려 입자농도가 증가하여 전체입자에 걸쳐 농도분포 기울기가 커짐을 알 수 있다. 이는 동일한 급기부족 상태에서 온도가 높아지면 미연탄소 발생량 감소가 이루어지고, 작은입자들이 성장하지만, 큰입자까지는 성장하지 못하기 때문으로 판단된다<sup>(1,2,9,28)</sup>.

본 연구에서의 직접샘플링 방법에 따른 측정값을 기존의 혼합상자를 이용한 측정값과 비교하였다. Figure 7은 ISO/TS 19700에 따른 기존의 연구결과<sup>(19)</sup> 중 본 연구의  $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\theta = 2.0$  및  $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\theta = 2.0$  연소조건과 가장 유사한, 화재단계 S3b ( $T = 825\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\theta = 2.0$ ) 및 S1b ( $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $Q_p = 2\text{ lpm}$ ) 조건에서 측정된 결과와의 비교를 보여준다.

고온인 경우로서 원형기호로 표시된 본 연구  $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\theta = 2.0$  연소조건과 화재단계 S3b를 비교하면, 화재단계 S3b 실험 경우에는 연소로 출구에서 나온 고온의 연소생성물이 혼합상자에서 다량의 희석공기에 의하여 혼합 냉각되면서 응축에 의해서 작은입자의 농도가 증가하고 이들이 혼합상자 안에서 중간크기 입자들과 혼합되고 성장한다<sup>(19,28)</sup>. 따라서 혼합상자를 거친 측정값인 그림의 S3b 입경분포가 본 연구의 연소로 출구 측정값인  $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\theta = 2.0$  연소조건에서의 입경분포보다 입자크기에 따른 농도가 균일해지면서 큰입자의 농도가 증가하는 것으로 나타난다. 다음으로 저온인 경우로서 세모기호로 표시된 본 연구  $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\theta = 2.0$  연소조건과 화재단계 S1b를 비교하면, 고온인  $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\theta = 2.0$  연소조건에서 나타나는 혼합상자 안에서의 응축에 의한 입자 증가 효과



**Figure 8.** Summation of the number concentrations for all particle diameters: (a) total number concentration (Left); (b) total mass concentration (Right).

보다는 다량의 희석공기와 혼합되면서 충돌 및 체류시간 증가에 따른 입자 감소 효과가 더 커진다<sup>(19,28)</sup>. 따라서 혼합상자를 거친 측정값인 그림의 S1b 입경분포를 보면 본 연구의 연소로 출구 측정값인 T = 400 °C,  $\theta = 2.0$  연소조건에서의 입경분포보다 중간입자와 큰입자에서 농도가 적게 나타난다.

### 3.2.2 각 연소조건별 발생입자의 총 개수 및 질량 농도

Figure 6에 나타난 그래프의 수직축 기하학적 개수농도 값을 수평축 입자직경에 대하여 적분하면 Figure 8(a)와 같이 모든 입자직경에서의 입자개수를 더한 총 개수농도(total number concentration)를 구할 수 있다. 이 결과로부터 입경과 밀도를 고려하면 Figure 8(b)와 같이 각 연소조건에서의 총 질량농도(total mass concentration)를 구할 수 있게 된다. Figure 6에서 설명한 것과 같이, 급기부족상태( $\theta = 2.0$ ) 일 때는 급기과잉상태( $\theta = 0.5$ )와 비교하여 모든 온도에서 작은입자 개수는 줄어 들고 큰입자 개수는 증가하는데, 작은입자 개수의 감소 폭이 훨씬 크기 때문에 총 개수농도는 Figure 8(a)와 같이 급기부족상태( $\theta = 2.0$ ) 일 때 모든 온도에서 작게 나타난다. 입자의 질량은 큰입자 개수의 변화에 많은 영향을 받게 되기 때문에, 총 질량농도는 Figure 8(b)와 같이, 급기부족상태( $\theta = 2.0$ ) 일 때는 급기과잉상태( $\theta = 0.5$ )와 비교하여 작은입자의 개수가 큰 폭으로 감소하더라도 큰 입자의 개수가 증가하게 되므로, 각 온도에서 큰 차이가 나지 않는다.

## 4. 결론

연소조건에 따른 입자상 물질의 입경에 따른 개수농도 분포 측정값은 연소조건인 연료의 상태, 온도 및 공기량 조건뿐만 아니라 입경분포 측정 조건인 혼합상자 등을 사용한 혼합 및 냉각방식과 측정 농도범위를 맞추기 위한 희석기 안에서의 온도 및 희석비 등 많은 변수가 복합적으로 작용하여 나타나는 결과로써 측정 조건의 변화에 따라서 많은 차이를 보인다. ISO/TS 19700에서는 연소로 출구에서 혼합상자의 크기와 혼

합공기량만 규정되어 있고 입자상 물질에 대한 구체적인 혼합 공기 온도와 혼합, 희석 및 샘플링 방식이 규정되어 있지 않기 때문에 각 연구자의 입경분포 결과는 측정 방식에 따른 혼합상자 안에서의 입자 왜곡 정도에 따라서 다양하게 나타났을 것으로 추정된다.

본 연구를 통하여 혼합상자를 사용하는 경우 직접 샘플링 방법을 사용하는 경우와 입경분포에서 차이를 보이는 것을 실험을 통하여 양적으로 밝혔다. 이 차이는 혼합상자를 사용하는 경우에 발생하는, 냉각에 의한 입자 응축과, 혼합에 의한 입자 크기별 농도의 평준화 현상, 충돌 및 체류시간 증가에 따른 입경 변화 현상 때문으로 판단된다. 따라서 향후 표준화된 입경분포 측정을 위해서는 입자상 물질에 대하여 이와 같은 혼합, 희석 및 샘플링 방식이 상세하게 규정되어야 할 것으로 판단된다. 특히 입경분포 왜곡을 최소화하기 위하여 가스상 물질 측정 방식과 분리하여 입자상 물질 측정에서는 혼합상자 대신에 본 연구와 같이 연소로 출구에서 직접 샘플링 방식을 사용하는 것을 해결책으로 제시한다.

## 후 기

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업비 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2019R1F1A1040925). 이 논문을 위한 실험에 많은 도움을 주신 한국기계연구원 한방우 박사님께 감사드립니다.

## 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. Bölling, 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). <https://doi.org/10.1186/1743-8977-6-29>.
3. W. Dong, X. Sheng, S. Wang and T. Deng, "Experimental Study on Particle Size Distribution Characteristics of Aerosol for Fire Detection", *Applied Sciences*, Vol. 13, No. 9, 5592 (2023). <https://doi.org/10.3390/app13095592>.
  4. G. P. Horn, D. Madrzykowski, D. L. Neumann, A. C. Mayer and K. W. Fent, "Airborne Contamination During Post-fire Investigations: Hot, Warm and Cold Scenes", *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, Vol. 19, No. 1, p p. 35-49 (2022). <https://doi.org/10.1080/15459624.2021.2002343>.
  5. J. Mertens, H. Lepaumier, P. Rogiers, D. Desagher, L. Goossens, A. Duterque, E. Le Cadre, M. Zarea, et al., "Fine and Ultrafine Particle Number and Size Measurements from Industrial Combustion Processes: Primary Emissions Field Data", *Atmospheric Pollution Research*, Vol. 11, No. 4, pp. 803-814 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.01.008>.
  6. H. K. Chang and M. Paiva, "Respiratory Physiology: An Analytical Approach", Marcel Dekker, Inc., New York (1989).
  7. 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). <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2010.12.040>.
  8. L. Nicolaou, M. Fandiño-Del-Río, K. Koehler and W. Checkley, "Size Distribution and Lung-deposited Doses of Particulate Matter from Household Exposure to Biomass Smoke", *Indoor Air*, Vol. 31, pp. 51-62 (2021). <https://doi.org/10.1111/ina.12710>.
  9. S. K. Friedlander, "Smoke, Dust and Haze: Fundamentals of Aerosol Dynamics", Oxford Univ. Press, Oxford (2000).
  10. K. M. Butler and G. W. Mulholland, "Generation and Transportation of Smoke Components", *Fire Technology*, Vol. 40, No. 2, pp. 149-176 (2004). <https://doi.org/10.1023/B:FIRE.0000016841.07530.64>.
  11. G. W. Mulholland, "Smoke Production and Properties", *SFPE Handbook Fire Protection Engineering*, pp. 258-268 (2002).
  12. ISO/TS 19700, "Controlled Equivalence Ratio Method for the Determination of Hazardous Components of Fire Effluents" (2006).
  13. N. D. Marsh, R. G. Gann and M. R. Nyden, "Smoke Component Yields from Benchscale Fire Tests: 2. ISO 19700 Controlled Equivalence Ratio Tube Furnace", *NIST Technical Note 1761* (2013).
  14. 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). <https://doi.org/10.1002/fam.946>.
  15. 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). <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.07.002>.
  16. A. A. Stec, J. Readman, P. Blomqvist, D. Gylestam, D. Karlsson, D. Wojtalewicz and B. Z. Dlugogorski, "Analysis of Toxic Effluents Released from PVC Carpet under Different Fire Conditions", *Chemosphere*, Vol. 90, No. 1, pp. 65-71 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.07.037>.
  17. 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). <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.10.002>.
  18. 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). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2014.28.1.044>.
  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). <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.08.008>.
  20. J. Lyyränen, J. Jokiniemi, E. I. Kauppinen, U. Backman, and H. Vesala, "Comparison of Different Dilution Methods for Measuring Diesel Particle Emissions", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 38, No. 1, pp. 12-23 (2004). <https://doi.org/10.1080/02786820490247579>.
  21. S. Ushakov, H. Valland, J. B. Nielsen and E. Hennie, "Effects of Dilution Conditions on Diesel Particle Size Distribution and Filter Mass Measurements in Case of Marine Fuels", *Fuel Processing Technology*, Vol. 118, pp. 244-253 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.09.008>.
  22. D. H. Shin, C. G. Woo, K. J. Hong, H. J. Kim, Y. J. Kim, G. Y. Lee, S. N. Chun and J. H. Hwang, "Development of a New Dilution System for Continuous Measurement of Particle Concentration in the Exhaust from a Coal-fired Power Plant", *Fuel*, Vol. 257, 116045 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116045>.
  23. I. V. Dyakov, B. Bergmans, F. Idczak, J. Blondeau, S. Bram, J. Cornette, T. Coppieters, F. Contino et al., "Intercomparative Measurements of Particle Emission from Biomass Pellet Boiler with Portable and Stationary Dilution Devices", *Aerosol*

- Science and Technology, Vol. 55, No. 6, pp. 665-680 (2021).  
<https://doi.org/10.1080/02786826.2021.1888865>.
24. Mariam, M. Joshi, A. Khan and B. K. Sapra, "Improving the Accuracy of Charge Size Distribution Measurement using Electrical Low Pressure Impactor", *Particulate Science and Technology*, Vol. 40, No. 3, pp. 290-295 (2022).  
<https://doi.org/10.1080/02726351.2021.1943731>.
25. Dekati Ltd., "ELPI<sup>+</sup> User Manual Ver. 2.3", Finland (2018).
26. Dekati Ltd., "eDiluter Pro User Manual, Ver. 1.4", Finland (2020).
27. KOPTRI, "Test Sample: Koptri-22-03-02179-01 (wood)", Test Report No. 22-01782, Seoul, Korea (2022).
28. 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).  
<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2005.07.005>.