



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

복사열 조건에 따른 플라스틱 가연물의
연기입자와 광소멸 특성에 대한 실험적 연구



2025년 8월

국립부경대학교 대학원

건축 · 소방공학부 (소방공학전공)

이 선 효

공학석사 학위논문

복사열 조건에 따른 플라스틱 가연물의
연기입자와 광소멸 특성에 대한 실험적 연구

지도교수 전 준 호

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2025년 8월

국립부경대학교 대학원

건축 · 소방공학부 (소방공학전공)

이 선 효

이선희의 공학석사 학위논문을 인준함.

2025년 8월 22일



위 원 장 공학박사 이 치 영 (인)

위 원 공학박사 성 민 호 (인)

위 원 공학박사 전 준 호 (인)

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	v
Abstract	vii
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 동향	3
1.3 연구 목적	5
제 2 장 연구 이론 및 실험	6
2.1 연구 이론	6
2.1.1 미세/나노입자의 광소멸	6
2.1.2 미세/나노입자 크기 분포 특성	7
2.2 실험 장치 및 방법	9
2.2.1 실험 장치	9
2.2.1.1 소규모 광학 장치	9
2.2.1.2 연기밀도 시험기-입자 분석 장치	10
2.2.2 실험 방법	14
2.2.3 실험 조건	16
제 3 장 실험 결과	18
3.1 입자 크기별 광소멸	18
3.2 연기입자 크기 분포	22

3.2.1 PC 연기입자 크기 분포	22
3.2.2 PMMA 연기입자 크기 분포	28
3.2.3 PVC 연기입자 크기 분포	34
3.3 특정 광학 밀도	42
3.4 연기입자 크기별 광소멸 기여도	48
제 4 장 결 론	57
Reference	59
Appendix	63



List of Tables

Table 2.1 Experimental conditions in this study	17
Table 3.1 Temporal variation in particle number fraction by size under different heat flux conditions for PC	27
Table 3.2 Temporal variation in particle number fraction by size under different heat flux conditions for PMMA	33
Table 3.3 Temporal variation in particle number fraction by size under different heat flux conditions for PVC	40
Table 3.4 Time-resolved mode particle diameter and particle diameter with maximum number growth rate for PC	52
Table 3.5 Time-resolved mode particle diameter and particle diameter with maximum number growth rate for PMMA	53
Table 3.6 Time-resolved mode particle diameter and particle diameter with maximum number growth rate for PVC	54
Table 3.7 Ratio of total particle number and size-weighted particle number increase to specific optical density increase under 40 kW/m^2	55
Table A.1 Increase rate of PC particle number over time for each particle size range under 20 kW/m^2	64
Table A.2 Increase rate of PC particle number over time for each particle size range under 30 kW/m^2	65
Table A.3 Increase rate of PC particle number over time for each particle size range under 40 kW/m^2	66
Table A.4 Increase rate of PMMA particle number over time for each particle size range under 20 kW/m^2	67

Table A.5 Increase rate of PMMA particle number over time for each particle size range under 30 kW/m ²	68
Table A.6 Increase rate of PMMA particle number over time for each particle size range under 40 kW/m ²	69
Table A.7 Increase rate of PVC particle number over time for each particle size range under 20 kW/m ²	70
Table A.8 Increase rate of PVC particle number over time for each particle size range under 30 kW/m ²	71
Table A.9 Increase rate of PVC particle number over time for each particle size range under 40 kW/m ²	72



List of Figures

Figure 2.1 Size distribution characteristics of aerosols.	8
Figure 2.2 Layout of the experimental setup.	12
Figure 2.3 The principle of differential mobility analyzer and condensation particle counter. 13	
Figure 3.1 Total number and size distribution of Polystyrene particles during experiment.	20
Figure 3.2 Light transmittance with particle size range.	21
Figure 3.3 PC smoke particle size distribution under 20 kW/m ²	24
Figure 3.4 PC smoke particle size distribution under 30 kW/m ²	25
Figure 3.5 PC smoke particle size distribution under 40 kW/m ²	26
Figure 3.6 PMMA smoke particle size distribution under 20 kW/m ²	30
Figure 3.7 PMMA smoke particle size distribution under 30 kW/m ²	31
Figure 3.8 PMMA smoke particle size distribution under 40 kW/m ²	32
Figure 3.9 PVC smoke particle size distribution under 20 kW/m ²	37
Figure 3.10 PVC smoke particle size distribution under 30 kW/m ²	38
Figure 3.11 PVC smoke particle size distribution under 40 kW/m ²	39
Figure 3.12 IR spectra of the PVC surface after exposure to a radiant heat flux of 30 kW/m ² at different duration: 180 s, 410 s and 928 s.	41
Figure 3.13 Specific optical density of PC, PMMA and PVC under 20, 30 and 40 kW/m ² . 44	
Figure 3.14 O ₂ and CO concentration of PC under 20, 30 and 40 kW/m ²	45
Figure 3.15 O ₂ and CO concentration of PMMA under 20, 30 and 40 kW/m ²	46
Figure 3.16 O ₂ and CO concentration of PVC under 20, 30 and 40 kW/m ²	47
Figure 3.17 IR spectra of smoke particles generated from PC, PMMA, PVC and Raman	

spectrum of PMMA-derived smoke particles. 56



Experimental Study on the Characteristics of Smoke Particles and Light Extinction
from Plastic Combustion under Radiative Heat Conditions

Seonhyo Lee

Division of Architectural and Fire Protection Engineering,
The Graduate School, Pukyong National University

Abstract

Smoke generated during a fire reduces the visibility of evacuees and delays evacuation. The mechanism of light interaction changes depending on the size of smoke particles, which significantly affects light extinction. Therefore, analyzing the relationship between dynamic changes in particle size distribution and optical extinction during fires is essential for ensuring evacuation safety. In this study, the optical transmittance of particles by size was measured to identify trends, and the characteristics of smoke particles and specific optical densities under fire conditions were analyzed. The results showed that the optical transmittance decreased as the size of polystyrene particles increased. Combustion experiments under various heat flux conditions (20, 30, 40 kW/m²) and fuel types (PC, PMMA, PVC) revealed time-dependent growth and distribution changes in particles. When particle diameters exceeded approximately 450 nm, their contribution to optical extinction showed signs of overestimation, highlighting the limitations of simple size-based interpretations.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

화재 시 발생하는 연기는 피난 상황에서 피난자의 가시거리를 감소시켜 피난을 지연시키고, 생존 가능성을 현저히 낮춘다. 연기가 시야를 가리면 피난자의 방향 감각이 저하되고, 장애물과의 충돌이나 경로 이탈로 인해 피난 시간이 증가한다. 그 결과, 연기 내 유독가스 흡입량이 늘어나 감각기관 및 호흡기관에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 실제로 화재 사망자의 절반 이상이 연기 흡입에 의한 질식으로 보고되고 있다⁽¹⁾. 따라서 연기로 인한 시야 저하 현상을 정량적으로 분석하는 것은 화재 안전성 평가에서 매우 중요하다.

연기 환경의 위험성을 예측하고 평가하기 위해 다양한 수치해석 기법이 활용되고 있으며, 그중 대표적으로 미국 NIST에서 개발한 Fire Dynamics Simulator(FDS)가 있다. FDS는 연소율과 그을음 생성 계수(soot yield) 값을 곱해 시간에 따른 그을음 농도를 계산하고, 이를 기반으로 가시거리 저하를 추정한다. 그러나 이 모델은 soot yield를 고정된 상수로 간주하며, 연소 조건이나 입자 특성 변화에 따른 광소멸 효과는 고려하지 않는다. 즉, 연기 발생량과 시야 저하 사이의 관계를 단순화하여 실제 화재 현장의 광학 특성을 정밀하게 반영하기 어렵다. 따라서 연기입자의 물리적 특성을 실험적으로 분석하는 것은 화재 시물레이션 모델의 정확도를 높이고, 보다 실질적인 피난 안전 평가 기준을 마련하는 데 중요한 기반이 될 수 있다.

연기는 일반적으로 연소 가스와 에어로졸로 구성되며, 이 중 에어로졸은 기체 내에 분산된 액체 또는 고체 입자를 포함한다. 연기입자는 외부 광원을 산란 또는 흡수하여 피난자의 가시거리를 감소시키는 직접적인 원인이 된다. 특히 고체 입자는 연소 조건에 따라 크기, 농도, 성분이 다양하게 변화하며 이러한 변화는 광소멸 특성에 큰 영향을 미친다.

연기에 의한 광소멸 현상은 연기입자에 의한 광산란(scattering)과 광흡수(absorption)로 인해 발생한다. 이는 빛이 연기입자와 상호작용을 하면서 전자기파가 변형되어 빛의 강도와 전달 경로가 변하는 과정에서 나타난다. 개별 입자에 대한 빛의 감쇠 정도는 입자의 크기, 성분, 빛의 파장에 의해 결정되며, 다수의 연기

입자가 존재하는 경우 개별 입자에서 발생하는 광소멸이 중첩되어 전체적인 광소멸 효과가 증폭된다. 따라서 연소 조건에 따라 성장하는 연기입자의 크기 분포 변화가 시야 저하에 미치는 영향에 대한 실험 기반 분석이 필요하다. 이러한 연구는 수치 해석 모델의 정확도를 높이며, 실제 화재 안전 설계 및 피난 시뮬레이션의 신뢰성을 확보하는 데 중요한 역할을 할 수 있다.



1.2 연구 동향

연기로 인한 광소멸을 정량적으로 측정하는 연구는 지속적으로 수행됐다. Tissot 등⁽²⁾은 ASTM E 662 표준을 적용하여 나무와 Polymethyl methacrylate(PMMA)를 대상으로 복사열 25kW/m²에서 발생하는 연기의 광학 밀도를 측정하였으며, 이를 통해 각 가연물의 광소멸 특성을 분석하였다. 분석 결과, 나무가 PMMA보다 특정 광학 밀도 값에서 최대 2,000배 큰 값을 나타내며, 광소멸의 위험성이 더욱 높다는 점을 밝혔다. You 등⁽³⁾은 smoke density chamber를 이용해 ISO 5659-2 표준에 따라 복사열 25 kW/m²와 50 kW/m² 조건에서 연기의 광학 밀도를 측정하였다. Polymethyl Methacrylate(PMMA), Polycarbonate(PC), Polyvinyl Chloride(PVC)의 화재 조건별 광소멸 특성을 비교한 결과, PVC는 모든 복사열에서 가장 높은 광소멸값을 나타낸 반면, PMMA는 가장 낮은 값을 보였다. PC는 열적으로 안정하여 낮은 복사열에서는 낮은 광소멸을 보였으나 높은 복사열에서 불꽃연소가 발생하는 경우 급격한 광소멸의 증가가 관찰되었다. 선행 연구들^(2,3)은 연소 과정에서 발생하는 광소멸의 값을 정량적으로 도출하고, 이를 기반으로 연소 조건에 따른 가연물별 위험도를 비교·분석하는데 초점을 맞추었다. 그러나 광학 밀도는 광소멸의 결과를 반영하는 지표에 해당하며, 광소멸을 결정하는 요인에 대한 정량적인 분석은 제한적으로 이루어졌다. 연기의 광소멸은 입자 크기별 개수 분포에 크게 영향을 받는다.

한편, 화재 조건에 따른 연기입자 크기 분포 변화를 규명하기 위한 연구도 활발히 진행되었다. Goo⁽⁴⁾는 ISO/TS 19700에 규정된 등속 튜브 연소 방식을 적용하여 ELPI+을 사용한 실험을 수행하였으며, 목재 연소 시 온도와 당량비에 따른 연기입자 크기별 개수 농도 분포를 측정하였다. 실험 결과, 동일한 당량비 조건에서 온도가 상승할수록 0.1 μm 이하의 작은 입자와 1 μm 이상의 큰 입자의 농도는 감소하는 경향을 보였지만 중간 크기 입자의 농도는 증가하는 양상을 나타냈다. Keith와 Derrick⁽⁵⁾은 담배 연기의 입자 크기와 농도를 측정하였으며, 0.33 mm의 담배를 연소시켰을 때 0.1-1 μm 범위의 입자가 대부분을 차지하며, 0.2 μm에서 최대 개수 농도를 기록하는 것을 확인하였다. 연소 시간이 지남에 따라 입자 간의 응고(coagulation) 및 합체(aggregation) 현상이 발생하면서 입자 크기가 점진적으로 성장하는 경향을 보였다. Mustafa 등⁽⁶⁾은 소나무를 연료로 자유 환기와 제한 환기 조건에서 DMS 500을 이용한 연기입자 크기 분포와 가스 농도 측정을 수행하였다. 실

험 결과, 제한 환기 조건에서 전체 입자 농도가 더 높은 값을 보였으며, 특히 20 nm 크기의 초미세 입자가 대량으로 생성됨을 확인하였다. 자유 환기 조건 대비 CO와 HC 농도가 높은 값을 보여, 연기입자의 다량 생산이 불완전 연소와 관련됨을 도출하였다. 이와 같이 선행 연구⁽⁴⁻⁶⁾들은 연소 조건에 따른 연기입자 크기 분포를 측정하고, 초미세 입자의 비율을 비교하여 화재 조건별 인체 위해도를 평가하는 데 주로 초점을 맞추고 있다. 그러나 연기입자 크기가 광소멸에 미치는 영향에 대한 분석은 충분히 이루어지지 않았으며, 특정 입자 크기가 광소멸을 유발하는 원리에 대한 명확한 규명이 부족하다.

Patterson 등⁽⁷⁾은 PMMA, PC, PVC, Polystyrene(PS), High Density Polyethylene(HDPE), Polypropylene(PP)를 대상으로 연소 과정에서 발생하는 연기의 질량 대비 광소멸계수(B_e)와 단일 산란 알베도(ω_0)를 측정하여 연기입자의 광학적 특성을 규명하였다. PMMA는 단일 산란 알베도(ω_0) 값이 낮지만, 광소멸계수(B_e)가 높아 광흡수 특성이 두드러졌다. 반면, PC와 PVC는 상대적으로 높은 ω_0 값을 보여 주로 산란에 의해 광소멸이 발생함을 확인하였다. 복사열 조건 및 연소 형태에 따른 흡수(absorption)와 산란(scattering)의 비율을 정량적으로 평가하여, 화재 발생 시 가시도에 미치는 영향을 비교·분석하였다. 그러나 광소멸계수와 입자 크기별 기여도를 직접적으로 연관 지은 연구는 매우 제한적이며, 기존 연구⁽²⁻⁷⁾와 같이 연기입자 크기 분포와 광소멸 특성이 개별적으로 다루어지는 경향이 있다. 이러한 연구 방식은 연기의 광학적 특성을 해석하는데 한계를 초래하며, 화재 시 가시도 저하 메커니즘을 명확히 규명하는데 어려움을 일으킨다.

1.3 연구 목적

화재 시 발생하는 연기는 연소 조건에 따라 입자 크기 분포와 광학 특성이 변화한다. 연기입자는 고온 환경에서 물리·화학적 성장을 거치며, 이 과정은 광소멸 특성에 영향을 미쳐 가시거리 저하를 유발한다. 따라서, 연기의 광학적 특성을 해석하고 가시거리 저하 메커니즘을 규명하기 위해서는 연기입자 크기 분포 변화와 광소멸 특성 간의 관계를 분석하는 것이 필수적이다.

본 연구는 연기입자 크기가 광소멸에 미치는 영향을 분석하기 위해, 크기가 다른 폴리스타이렌(Polystyrene) 입자를 사용하여 입자 크기별 광소멸 척도를 정립하였다. 이후, 복사열 세기와 가연물 종류에 따른 연소 실험을 통해 실제 화재에서 발생하는 연기입자 크기 분포와 시간에 따른 성장 특성을 도출하였다. 측정된 입자 분포와 동기화하여 동일 조건에서 연기의 광학 밀도를 시간에 따라 측정하고, 입자 크기와 광소멸 간의 상관성을 평가하였다. 마지막으로, 도출된 실험값을 기반으로 입자 크기에 따른 광소멸 기여도를 정량화하였다. 이를 통해 FDS와 같은 수치해석 모델에서 입자 크기 분포를 반영한 광소멸 예측 정밀도를 향상시킬 수 있으며, 실제 화재 상황에서 피난 가시성 예측과 감지기 성능 평가 기준 개선에 활용 가능한 실증 기반 자료를 제시하고자 한다.

제 2 장 연구 이론 및 실험

2.1 연구 이론

2.1.1 미세/나노입자의 광소멸

광소멸은 연기입자에 의해 발생하는 빛의 산란 및 흡수 현상으로, 연기 환경에서 가시거리 저하를 정량적으로 설명할 수 있는 핵심 지표이다. 일반적으로 광소멸은 광원의 초기 강도(I_0)에 대해 수광부에 도달한 빛의 강도(I) 비율인 광투과율로 표현된다. 광투과율은 빛이 매질을 통과할 때 빛의 강도가 거리에 따라 기하급수적으로 감소한다는 Bouguer's Law에 근거하여, 감광계수(b_{ext})와 광 경로 길이(L)의 곱에 대한 음의 지수함수 표현되며 식(1)과 같이 정의된다⁽⁸⁾.

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-b_{ext} L) \quad (1)$$

감광계수(b_{ext})는 단위 거리당 빛의 세기가 얼마나 감소하는지를 나타내는 값으로, 이론적으로 입자의 크기(A_p), 개수(N), 굴절률(m)의 다양한 변수에 따라 식(2)와 같이 정리된다. 특히 입자의 크기는 산란 이론의 적용 기준이 되며, 해석 방식에 직접적인 영향을 미친다. 입자의 크기가 가시광선의 파장과 유사한 경우에는 Mie 산란 이론⁽⁹⁾이 적용되며, 이때 광소멸은 입자 크기에 따라 민감하게 반응한다. 반면, 50 nm 이하의 미세한 입자에는 Rayleigh 산란 이론⁽¹⁰⁾이 적용되어 서로 다른 광소멸 특성을 보인다. 식(3)과 식(4)는 각각 Mie 및 Rayleigh 산란을 기반한 무차원 광소멸계수(Q_{ext})를 나타내며, Mie 계수 a_n 과 b_n 는 입자의 굴절률(m)에 따라 결정된다.

$$b_{ext} = NA_p Q_{ext} = \int_0^\infty Q_{ext} \frac{\pi d_p^2}{4} n_d(d_p) d(d_p) \quad (2)$$

$$Q_{ext} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \Re(a_n + b_n) \quad (3)$$

$$Q_{ext} = \frac{8}{3} \left(\frac{2x}{\lambda}\right)^4 \left(\frac{m^2-1}{m^2+2}\right)^2 \quad (4)$$

2.1.2 미세/나노입자 크기 분포 특성

입자의 크기는 일반적으로 핵 모드(nuclei mode), 축적 모드(accumulation mode), 특성을 나타내었다. 연소 시 고온에서 방출된 화학종은 주로 기체 상태의 전구체 (precursor) 형태로 존재하며, 이들은 주변 조건에서 포화 농도를 초과하면 응축이 유도된다. 응축된 전구체는 기존 입자의 표면에 흡착되어 크기 성장을 유도하거나, 주변에 응집 중심이 부족한 경우 자발적인 핵 형성 과정(nuclei)을 통해 신규 입자를 생성하게 된다. 이렇게 생성된 초기 입자는 핵 모드에 속하며, 그 범위는 $D_p < 50 \text{ nm}$ 이다⁽¹¹⁾. 핵 모드의 입자는 부피 대비 표면적이 크기 때문에 연소, 흡착, 흡습성, 흡수 및 정전기적 효과 반응이 활발하게 일어난다. 이러한 작은 입자의 성장 과정에서 연기가 발생하며, 이후 입자는 더욱 복잡한 방식으로 성장한다⁽¹²⁾. 고농도의 입자가 분포하는 환경에서는 입자 간 속도 차이로 인해 연쇄적 충돌이 발생하며, 합체(coalescence), 집합(aggregation), 응집(agglomeration) 및 파손(breakage)을 통해 입자가 성장한다⁽¹³⁾. 이 과정을 통해 연기입자 크기가 $50 \text{ nm} \leq D_p < 2,000 \text{ nm}$ 인 경우 축적 모드, $2,000 \text{ nm} \leq D_p < 10,000 \text{ nm}$ 인 경우 조대 모드로 분류된다⁽¹⁴⁾. 입자의 성장은 온도 분포, 입자의 조성 및 연소 조건에 민감하게 반응하므로, 입자 크기 분포는 시간과 환경에 따라 다양하게 나타날 수 있다. Figure 2.1은 입자의 크기 분포 특성을 정리하여 나타낸다.

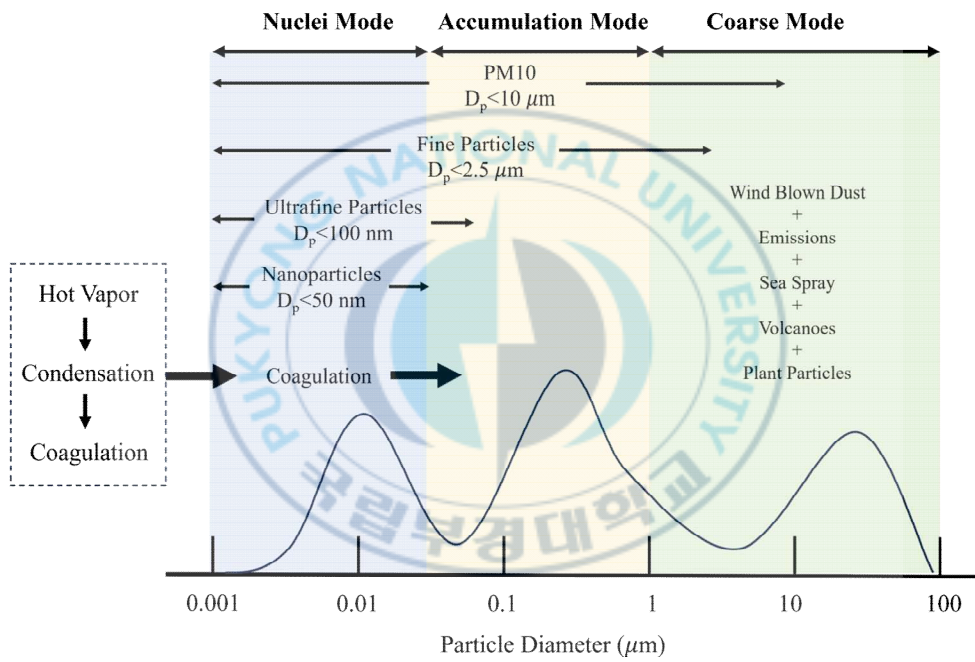


Figure 2.1 Size distribution characteristics of aerosols.

2.2 실험 장치 및 방법

2.2.1 실험 장치

2.2.1.1 소규모 광학 장치

입자 크기별 광소멸 영향을 정량화하기 위해, ISO 5659-2 연기밀도 챔버의 광경로 길이와 광학 장치의 구성을 동일하게 적용한 소규모 광학 장치를 제작하였다. 해당 장치는 지름 0.1 m, 길이 0.914 m의 원통형 구조로, 단색광 광원이 원통을 통과하여 반대편의 광전증폭관(photomultiplier tube)에 도달하도록 설계되었다. 입자 주입 및 배출이 가능하도록 원통형 챔버의 양단에 각각 입구와 출구를 설치하였다. 챔버 내부에는 일정한 유동이 형성되며, 이를 통해 입자가 일정한 농도로 원통을 통과한다. 감쇠된 빛의 강도는 광전증폭관을 통해 측정된다. 측정의 정밀도를 높이기 위해, 장치 내부 표면은 무광 흑색으로 마감하여 광원에서 발생하는 반사 및 간섭을 최소화하였다. 본 장치는 입자에 의해 감쇠된 빛의 강도를 1 s 단위로 수집하며, 출력 신호는 광투과율로 변환하여 광소멸 차이 비교에 사용된다.

일정 농도의 입자 용액을 네블라이저에 주입하고 3.8 bar의 압력을 가하여 미세한 실험 입자를 포함한 에어로졸을 형성하였다. 생성된 입자는 수증기와 함께 배출되며, 광학 장치 내부로 유입되도록 구성하였다. 입자가 챔버 내부에 체류하지 않고 일정한 속도로 흐르도록, 출구에는 6.5 L/min 유속을 유지하는 진공 펌프를 연결해 지속적으로 배출하였다. 이때 입자 농도와 크기 분포는 장치 유출부에 설치된 광학적 입자 개수기(optical particle counter)를 통해 실시간으로 확인하였다. 입자가 장치 내부에 일정한 농도로 분포한 상태에서 광투과율을 측정하였으며 측정된 투과율을 기반으로 입자 크기별 광소멸 특성을 산출하였다.

2.2.1.2 연기밀도 시험기-입자 분석 장치

Figures 2.2는 실험 장비의 전체 구성을 나타낸다. Figure 2.2(a)는 소규모 광학 장치 개략도이며, Figure 2.2(b)는 연기밀도 챔버와 연소 생성물 측정 장비의 구성도를 나타낸다. ISO 5659-2 표준 실험 방법을 기반으로 제작된 연기밀도 챔버(Korea Fire Assessment Tester Equipment., Ltd)를 이용하여 가연물 연소 시 발생하는 연기의 광학 밀도를 측정하였다. 시험편은 콘 방열기의 설정 온도에 따라 복사열을 공급받으며, 연소로 발생한 연기는 밀폐된 챔버 내부에 포집된다. 연기밀도 챔버 하단에 있는 단색광 광원이 실험 공간을 통과하며, 상단의 광검출기로 전달된다. 연기에 의해 감쇠된 빛의 강도를 측정하여 광투과율을 산출한다. 광투과율은 연기밀도 챔버의 기하학적 형상을 반영한 특정 광학 밀도 D_s 로 변환되며, 특정 광학 밀도는 다음 식(5)으로 정의된다⁽¹⁵⁾.

$$D_s = \frac{V}{AL} \left[\log_{10} \left(\frac{100}{T} \right) + F \right] \quad (5)$$

여기서 V 는 챔버의 체적, A 는 시험편의 노출 면적, L 은 챔버 내 광 경로 길이, T 는 광투과율을 의미한다. F 는 광학 필터의 밀도를 나타내며, 필터가 사용되는 경우 '0.3', 사용되지 않는 경우 '0'의 값을 갖는다. 광학 필터는 광투과율이 0.1 미만의 값을 가질 때 적용한다.

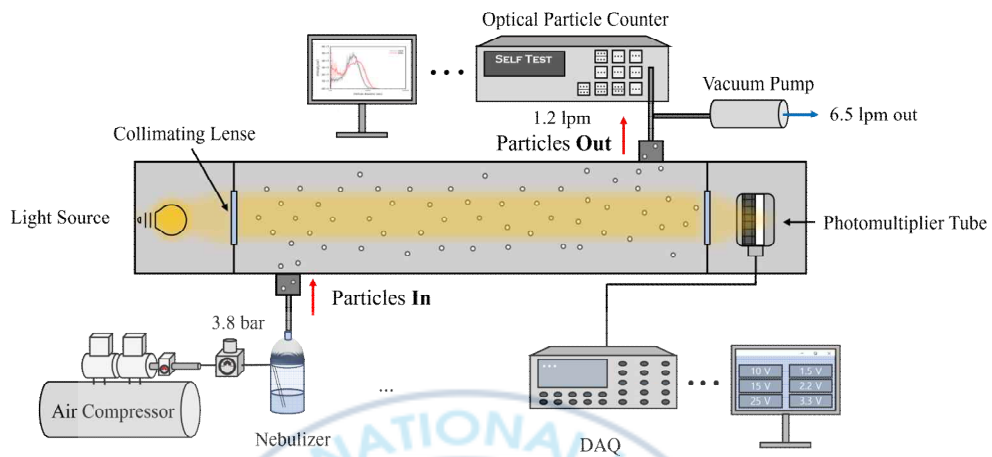
입자 크기별 개수 분포 측정은 Scanning Mobility Particle Sizer(SMPS+C, Grimm Aerosol Technik Co., Germany)를 활용하였으며 SMPS 측정 시스템은 미분형 전기 이동도 분석기인 Differential Mobility Analyzer(DMA)와 응축핵 계인 Condensation Particle Counter(CPC)로 구성된다. DMA는 전기적으로 중화된 다분산 입자(polydisperse aerosol)와 측정 대상 입자를 혼합한 후, 전기 이동도(electrical mobility)의 차이를 이용하여 크기별로 입자를 분리한다. 이를 CPC로 유입시켜 입자의 개수 농도를 측정한다. CPC는 입자의 응축 성장의 원리를 기반으로 개수 농도를 분석하며, 입자의 단면적에 따른 광산란 강도를 이용해 크기 분포를 산출한다. Figure 2.3의 (a)와 (b)는 각각 DMA와 CPC의 작동 원리를 나타낸다. SMPS의 측정 가능 범위는 10 - 1055 nm이며, 232 s 간격으로 데이터를 수집한다. 연기입자 크기 분포는 광범위하게 분포하므로, 분석 과정에서 대수적인 방법을

적용하여 표준화하였다. 식(6)은 연기입자 크기 분포를 표준화하는 수식을 나타낸다.

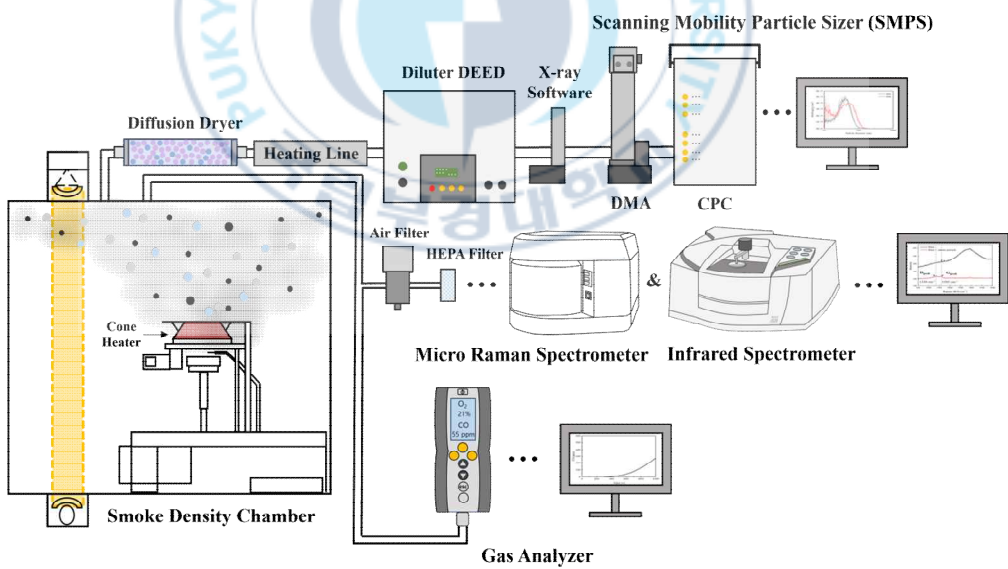
$$\Delta N / \Delta(\log d_p) \quad (6)$$

N 은 특정 입자 크기 범위(d_{p1} , d_{p2}) 내 존재하는 입자 개수를 의미하며, d_p 는 해당 구간에서의 기하평균 입경(geometric mean diameter)이다. 실제 연기입자는 다수의 구형 입자들이 표면 접촉하며 결합된 응집체(agglomerate) 형상을 나타내는 반면⁽¹⁶⁾, SMPS 장비는 입자에 레이저 광선을 조사한 후 산란 특성이 이론적으로 일치하는 단일 구형 입자의 직경을 기반으로 크기를 산출하기 때문에, 실제 입자의 형상과 측정 결과 간에는 일정한 차이가 존재할 수 있다.

연기의 성분 분석을 위해 라만 분광기(NRS-5100, JASCO)와 적외선 분광기(Nicolet iS20, thermoscientific)를 활용하였다. 라만 분광기는 532 nm 레이저를 조사하여 분자와의 상호작용으로 발생하는 진동 및 회전에너지의 변화를 분석하며, 입사광과 산란광의 파수 차이(Raman shift)를 기반으로 물질 고유의 진동 모드를 식별한다. 적외선 분광기는 적외선 영역의 빛을 시료에 조사하고, 파수 영역별 흡수 스펙트럼을 측정하여 분자의 구조 및 작용기 특성을 도출한다. 두 장비 모두 분석된 최대값의 위치를 바탕으로 분자의 결합 상태 및 화학적 조성을 정성적으로 판별할 수 있다.

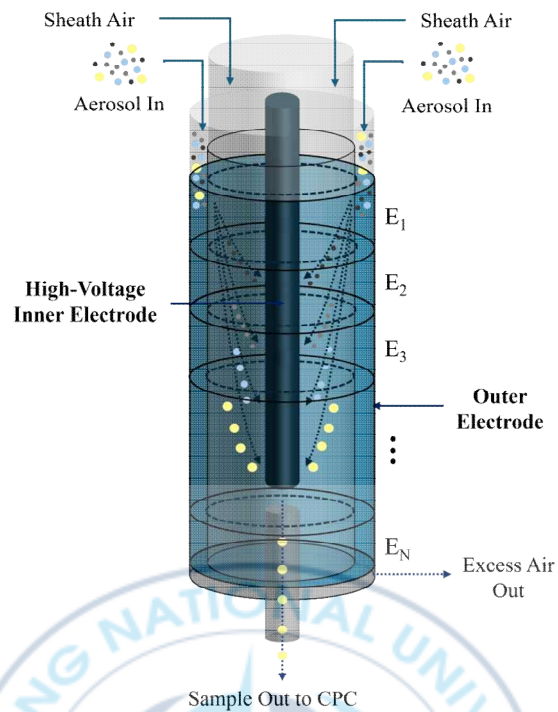


(a) Reduced-scale optical setup

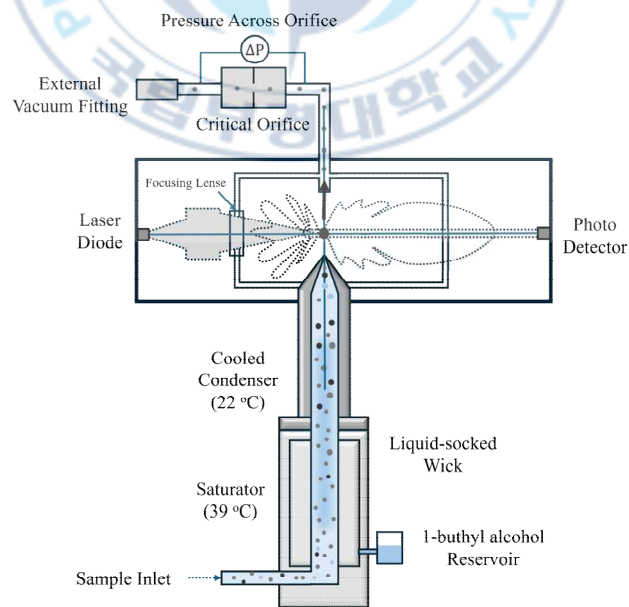


(b) Smoke density chamber, scanning mobility particle sizer and gas analyzer

Figure 2.2 Layout of the experimental setup



(a) Differential mobility analyzer



(b) Condensation particle counter

Figure 2.3 The principle of differential mobility analyzer and condensation particle counter.

2.2.2 실험 방법

입자 크기별 광소멸 특성을 정량적으로 분석하기 위해, polystyrene(PSL)입자를 사용하여 기준 실험을 수행했다. 해당 실험에서는 입자 크기에 따라 광투과율이 어떻게 변화하는지 측정하고, 이를 기반으로 입자 크기별 광소멸 척도를 도출하였다. 사용된 입자 크기는 250 - 300 nm, 300 - 350 nm, 410 - 490 nm의 세 구간이며, 각 크기 구간은 광학 입자 개수기(OPC)에서 구분 가능한 범위에 해당한다. 챔버 내부의 입자 수 농도는 OPC의 측정 상한치인 3.0×10^6 particles/L에 근접하도록 2.7×10^6 particles/L로 설정하였으며, 입자 응집이나 체류에 의한 농도 변화를 방지하고 일정한 흐름을 유지하기 위해 유속을 조절하였다. 광투과율은 15 min간 연속 측정되었으며, 초기 유입 안정화 구간과 유동 조건의 영향을 배제하기 위해 입자 개수의 표준편차가 1% 미만으로 유지된 600 - 900 s 구간의 평균값을 분석에 활용하였다. 측정값의 신뢰성과 반복성을 확보하기 위해 동일한 조건에서 각 실험을 세 차례 반복 수행하였으며, 이들 결과의 평균값을 최종 분석에 적용하였다.

연소 실험에는 열가소성 플라스틱인 polycarbonate(PC), polymethyl methacrylate(PMMA)와 polyvinyl chloride(PVC)를 대상으로 실험을 수행하였다. 세 물질은 모두 탄소와 수소를 주성분으로 하나, 구조적 차이로 인해 열특성과 연소 시 생성되는 연기 및 유독가스 특성이 상이하다. 외부에서 전달되는 복사열 조건을 일관되게 유지하기 위하여, 세 시험편을 모두 동일하게 가로, 세로, 두께를 각각 75 mm, 75 mm, 10 mm인 크기로 제작하였다. 제작된 시험편은 알루미늄 포일로 감싸 노출 면적이 65 mm × 65 mm가 되도록 하였다. PC와 PMMA는 각각 65.0 ± 1.0 g로 유사한 질량을 보였으나, PVC는 상대적으로 밀도가 높아 80.0 ± 1.0 g으로 더 큰 질량을 나타냈다. 이러한 질량의 차이는 동일한 부피 내에서 밀도가 더 높은 재료가 더 많은 가연물을 포함하기 때문에 연소 생성물의 총량에 영향을 미칠 수 있다. 시험편은 연기밀도 챔버 내 지지대 위에 배치되며, 콘 방열기로부터 50 mm 아래에 위치하도록 고정하였다.

복사열로 인해 발생한 연기는 밀폐된 연기밀도 챔버 내에 포집되며, 광학 장치를 이용하여 특정 광학 밀도(D_s)를 측정하였다. 각 실험 조건은 3회 반복하여 평균값을 산출하였으며, 실험 조건별 측정된 최대 특정 광학 밀도의 표준편차의 평균값은 $4.97 D_s$ 로 나타났다. 장비 자체의 오차를 확인하기 위해, 연기입자가 없는 상태에서

120 s 동안 측정된 특정 광학 밀도의 표준편차 평균값은 $1.56 D_s$ 로 측정되었다.

연기입자의 크기 분포 측정을 위해 SMPS는 연기밀도 챔버와 연결하여 연소 과정에서 발생한 연기를 수집하였다. 수집된 연기는 diffusion dryer를 사용하여 수분을 제거하고 희석장치(Exhaust Diluter DEED Dekati® Ltd.)를 통해 입자 농도를 조정된 후 SMPS로 유입되었다. 연기입자 크기 분포는 동일한 실험 조건에서 3회 반복 측정된 후, 평균값을 도출하였다. 모든 실험 조건에서 최빈값을 보이는 연기입자 크기의 표준편차의 평균값은 3.61 nm 로 나타났으며, 연기입자가 존재하지 않을 때 실험 장비 자체에서 120 s 동안 측정되는 연기입자 크기 표준편차의 평균값은 2.27 nm 로 확인되었다. 이를 바탕으로 SMPS의 확장 불확실성(expanded uncertainty, u_c)은 95% 신뢰수준에서 4.26 nm 로 계산된다⁽¹⁷⁾.

연기입자의 화학적 조성을 분석하기 위해, 연기 밀도 챔버에 High Efficiency Particulate Air(HEPA) 필터를 연결하여 연소 과정에서 발생하는 연기입자를 포집하였다. 포집 과정에서 수분을 제거하기 위하여 별도의 수분 필터를 사용하였으며, HEPA 필터에 포집된 연기입자는 라만분광법과 적외선분광법을 활용하여 주요 성분을 분석하였다.

2.2.3 실험 조건

복사열에 따른 세 가연물의 연기입자 크기 분포와 광소멸 특성을 분석하기 위해 20, 30, 40 kW/m² 복사열 조건에서 실험을 수행하였다. 각 실험에서는 1800 s 동안 일정한 복사열을 유지하였다. 복사열의 강도는 ISO 5659-2 표준 실험 방법에서 규정하는 낮은 수준(15-25 kW/m²)과 높은 수준(40-50 kW/m²)을 기준으로 설정하였고, 중간 수준(30 kW/m²)을 추가하여 복사열 변화에 따른 연기 특성을 정량적으로 비교할 수 있도록 하였다. 실험 조건은 연기 밀도 챔버의 밀폐된 구조에서 장시간 연소 시 산소 고갈이 발생할 수 있다는 점을 고려하여 설정하였다. 연소는 실험 중 안정적으로 유지되도록 하였으며, 실험 종료 후 외부 공기 유입에 따른 백드래프 발생 또한 방지될 수 있도록 구성하였다. Table 2.1은 입자 크기별 실험 조건과 PC, PVC, PMMA를 대상으로 한 연소 실험 조건을 나타낸다.



Table 2.1 Experimental conditions in this study

Experiment 1 – Light extinction by particle size	
Material	PSL
Particle size	250-300 nm, 300-350 nm, 410-490 nm
Total particle count	2.7×10^6 particles/L
Experiment 2 – Characterization of smoke particles	
Material	PC, PMMA, PVC
Material size	75 mm x 75 mm x 10 mm
Radiant heat flux	20, 30, 40 kW/m ²
Pilot flame	Without a pilot flame
Experimental time	1800 s

제 3 장 실험 결과

3.1 입자 크기별 광소멸

입자 크기에 따른 광소멸 특성을 정량화하기 위해, 크기가 다른 PSL 입자에 대해 광투과율을 측정하였다. Figure 3.1(a)는 실험 조건에 따라 15 min 동안 광학 장치 내 일정하게 흐르는 전체 입자 개수 농도를, Figure 3.1(b)는 각 크기 범위로 분류된 입자군의 내부에서 나타나는 입자 크기 분포를 나타낸다. 단일 크기의 입자로만 구성되지 않고 다양한 크기의 입자가 존재하지만, 가장 많은 입자가 분포하는 크기 범위를 대표값으로 하여 정의된다. Figure 3.2는 입자 크기 범위별 광투과율 변화를 정리하였다.

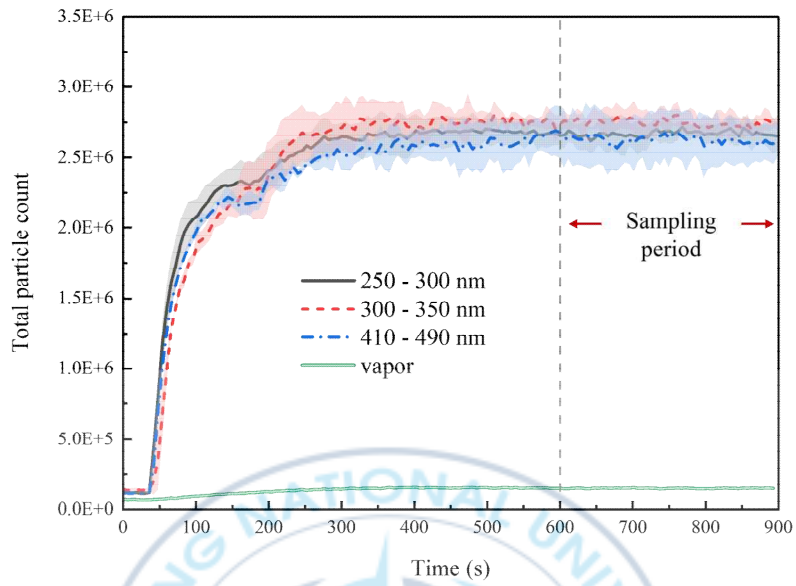
입자 회석에 사용되는 증류수가 광투과율과 입자 측정에 미치는 영향을 사전에 검토하기 위해, 입자가 없는 조건에 증류수를 네블라이저에 주입하여 생성된 미세 입자를 광학 장치에 투입하였다. 그 결과, OPC에서 입자 개수 변화는 거의 없었고, 광투과율은 평균 91.7%로 나타났다. 이 결과는 이후 실험에서 검출되는 대부분의 입자가 실험 대상 입자임을 의미한다.

입자 크기를 250 - 300 nm, 300 - 350 nm, 410 - 490 nm의 세 범위로 구분하고, 각 입자 개수 농도를 동일하게 유지한 상태에서 광투과율을 측정하였다. 그 결과, 광투과율은 각각 83.6%, 75.1%, 66.2%로 나타났다. 입자 크기가 클수록 광투과율이 감소하는 경향을 보였다. 이는 입자의 크기에 따라 빛의 산란과 흡수 특성이 달라지기 때문이다.

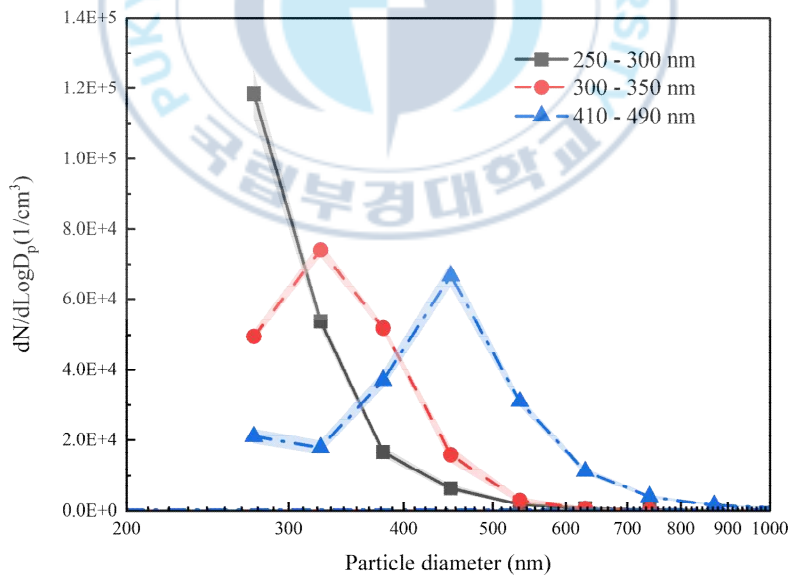
빛은 입자와 상호작용할 때 간섭, 회절, 공명현상 등 파동적 특성을 보이며, 이로 인해 광소멸 특성이 변화한다. 이러한 상호작용은 입자의 크기와 조성에 따라 달라진다. 입자가 작을수록 빛과의 상호작용 면적이 작아 광소멸 효과가 제한된다. 특히 파장보다 작은 50 nm 이하의 입자에서는 Rayleigh 산란이 주로 작용하며, 이때 광소멸은 입자 크기의 네 제곱에 비례한다. 반면 입자 크기가 빛의 파장에 가까워지면 Mie 산란이 지배적으로 작용하고, 이에 따라 산란과 흡수 단면적이 크기 증가한다. 이때 입자는 특정 파장에서 전자기 공명을 일으킬 수 있으며, 여러 공명 모드가 동시에 작용하면 강한 간섭 효과가 발생한다⁽¹⁸⁾. 이러한 공명과 간섭은 입자와 빛

사이의 상호작용을 극대화하며, 그 결과 입자 크기가 파장과 유사한 경우 강한 광 소멸이 일어난다.





(a) Total particle number with time



(b) Particle size distribution of Polystyrene

Figure 3.1 Total number and size distribution of Polystyrene particles during experiment.

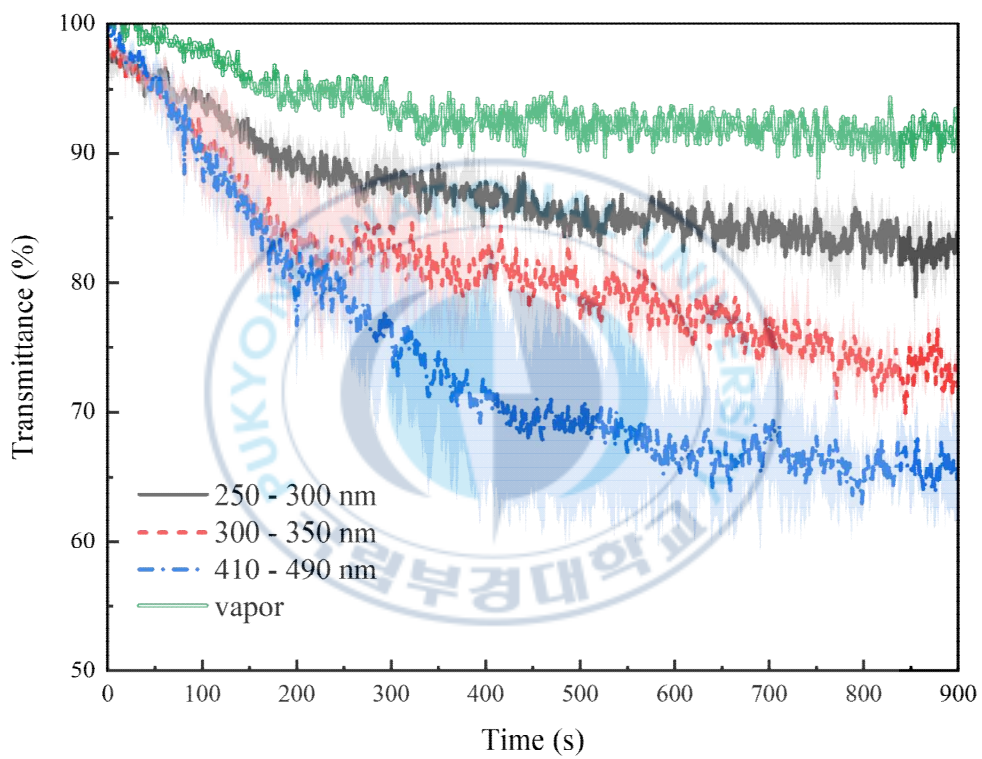


Figure 3.2 Light transmittance by particle size range.

3.2 연기입자 크기 분포

3.2.1 PC 연기입자 크기 분포

Figures 3.3-3.5은 복사열 20, 30, 40 kW/m² 조건에서 PC가 생성한 연기입자 크기 분포 변화를 보여준다. 그래프의 x축은 입자 크기 범위(10 - 1,000 nm)를, y축은 입자의 개수를 나타낸다. 그래프의 하단 방향은 시간 경과에 따른 변화를 의미한다. Table 3.1은 시간에 따라 각 크기 범위의 입자 분율 변화를 정량적으로 정리하였다. 표는 복사열 조건에 따른 입자 크기별 분율을 나타내며, 가로축 방향으로 시간 경과에 따른 변화가 표시된다.

Figure 3.3에서 볼 수 있듯이, 20 kW/m² 조건에서, 초기 232 s에는 핵 모드 10 - 50 nm 범위의 입자 분율이 43.5%였으나, 이후 1,856 s에는 93.8%까지 증가하였다. 반면, 50 - 1,000 nm의 입자 분율은 46.5%에서 6.5%로 감소하였다. 시간에 따라 미세한 입자의 생성이 지속되며, 전체 연기입자 중 핵 모드의 비중이 점차 커졌다.

이러한 분포 변화는 열분해로 생성된 가연성 가스와 연소 생성물이 대기 중에서 냉각되며 응축을 형성하고, 이를 중심으로 10 - 50 nm 크기의 입자가 생성되며 형성된다⁽¹⁹⁾. 복사열 노출 시간이 길어질수록 표면 온도가 상승하고⁽²⁰⁾ 열분해가 촉진되어 10 - 50 nm 입자의 농도가 증가한다. 이때 형성된 10 - 50 nm 입자는 높은 밀도로 충돌 및 응집하며, 이후 점차적으로 입자 크기가 증가한다⁽²¹⁾.

Figure 3.4는 30 kW/m² 조건의 결과를 나타내며 20 kW/m² 조건과 유사한 경향이 나타났다. 10 - 50 nm 범위의 입자 분율은 232 s에 48.7%였으며 928 s에 95.6%로 정점에 도달했다가, 1,856 s에는 87.0%로 감소하였다. 반대로 50 - 100 nm 입자는 232 s에서 22.2%였으나, 928 s에 2.4%까지 감소한 후 응집 성장으로 인해 1,856 s에서 11.3%까지 증가하였다.

Figure 3.5에 나타난 바와 같이 40 kW/m² 조건에서는 초기에 이미 10 - 50 nm 입자 분율이 80.8%로 높았고, 464 s에는 95.8%까지 상승하였다. 이후 시간이 경과함에 따라 해당 비율은 점진적으로 감소하여 1,856 s에는 73.3%를 나타냈다. 50 - 100 nm 입자는 232 s에 10.8%에서 464 s에 2.1%로 감소한 후, 응집 효과로 인해 1,856 s에 22.3%까지 도달하였다.

모든 복사열 조건에서 10 - 50 nm 범위의 입자가 연기입자의 대부분을 차지하였다. 이는 PC가 비스페놀 A와 카보네이트 결합의 연쇄구조로 이루어져 열적으로 안정하기 때문이다⁽²²⁾. 이러한 열적 특성은 열분해 반응을 주요한 입자 생성 메커니즘으로 작용하게 하며, 결과적으로 10 - 50 nm 크기의 입자가 우세하게 형성된다. 한편 해당 크기의 입자 분율은 시간 경과에 따라 증가한 뒤 감소하는 경향을 보인다. 복사열이 증가할수록 초기 열분해가 급격히 진행되며⁽²³⁾, 이에 따라 가연성 가스 및 연소 생성물의 농도가 증가하고, 응축을 통해 다량의 10 - 50 nm 입자가 형성된다. 이후 입자 간 충돌과 응집이 활발해지고, 복사열에 따른 입자의 운동 에너지가 증가함에 입자의 성장 속도가 가속된다. 이로 인해 10 - 50 nm 입자의 분율은 점차 감소하며, 반대로 50 - 100 nm 범위의 분율은 증가하는 경향을 나타낸다. 결국 초기에는 열분해로 인한 입자 생성이 지배적이나, 시간이 경과할수록 응집 및 성장 메커니즘이 입자 분포에 주요한 영향을 미친다.



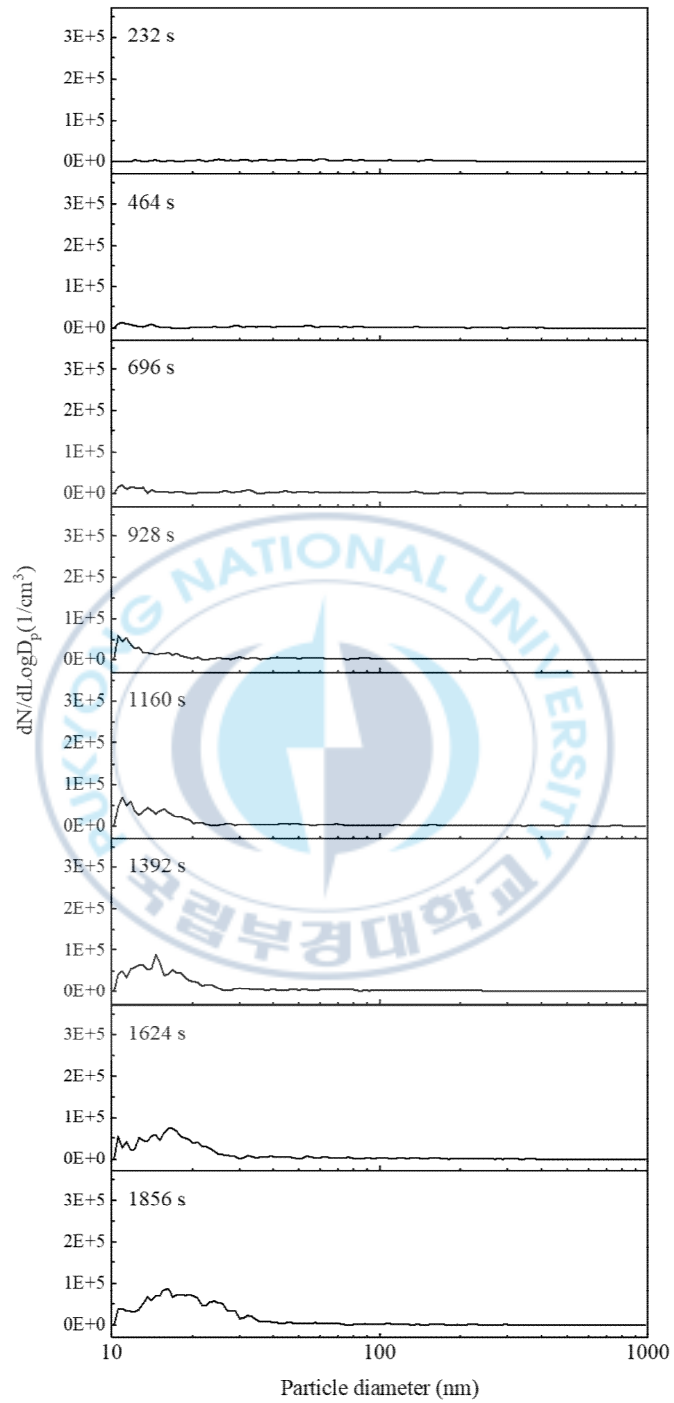


Figure 3.3 PC smoke particle size distribution under 20 kW/m².

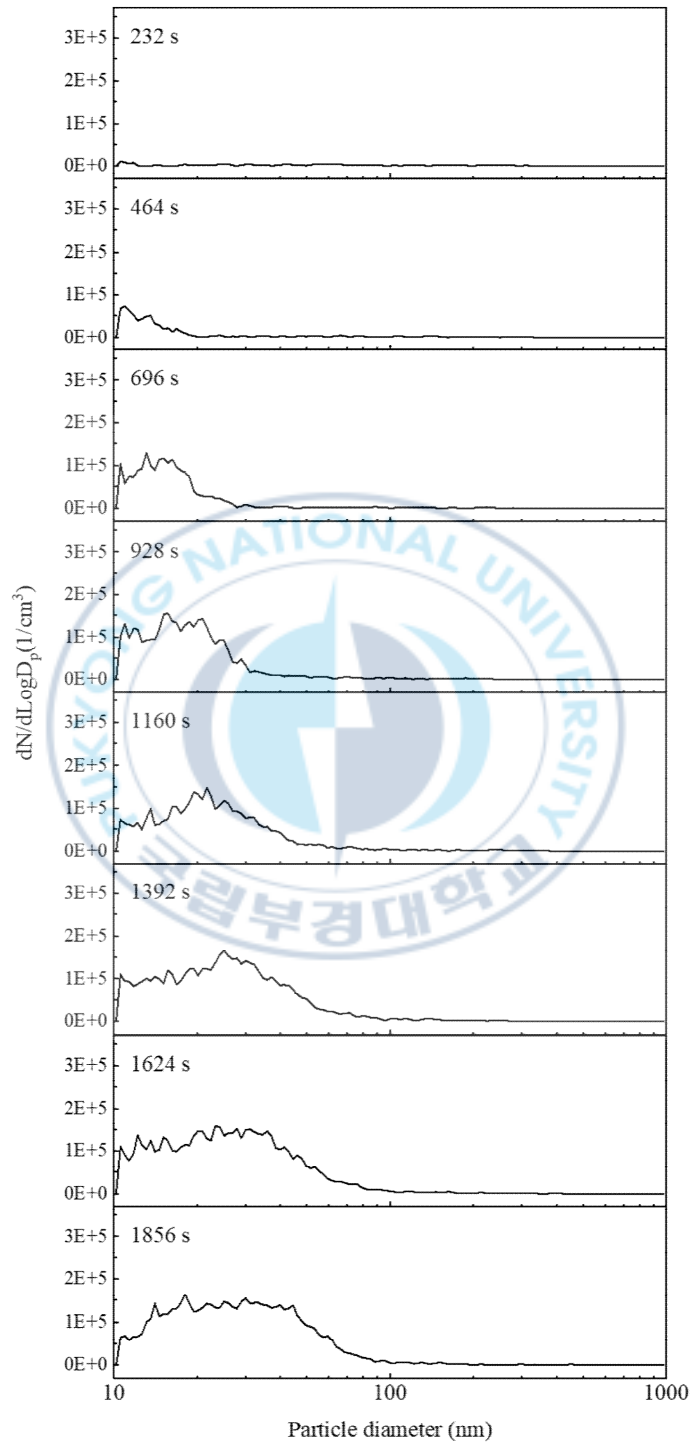


Figure 3.4 PC smoke particle size distribution under 30 kW/m².

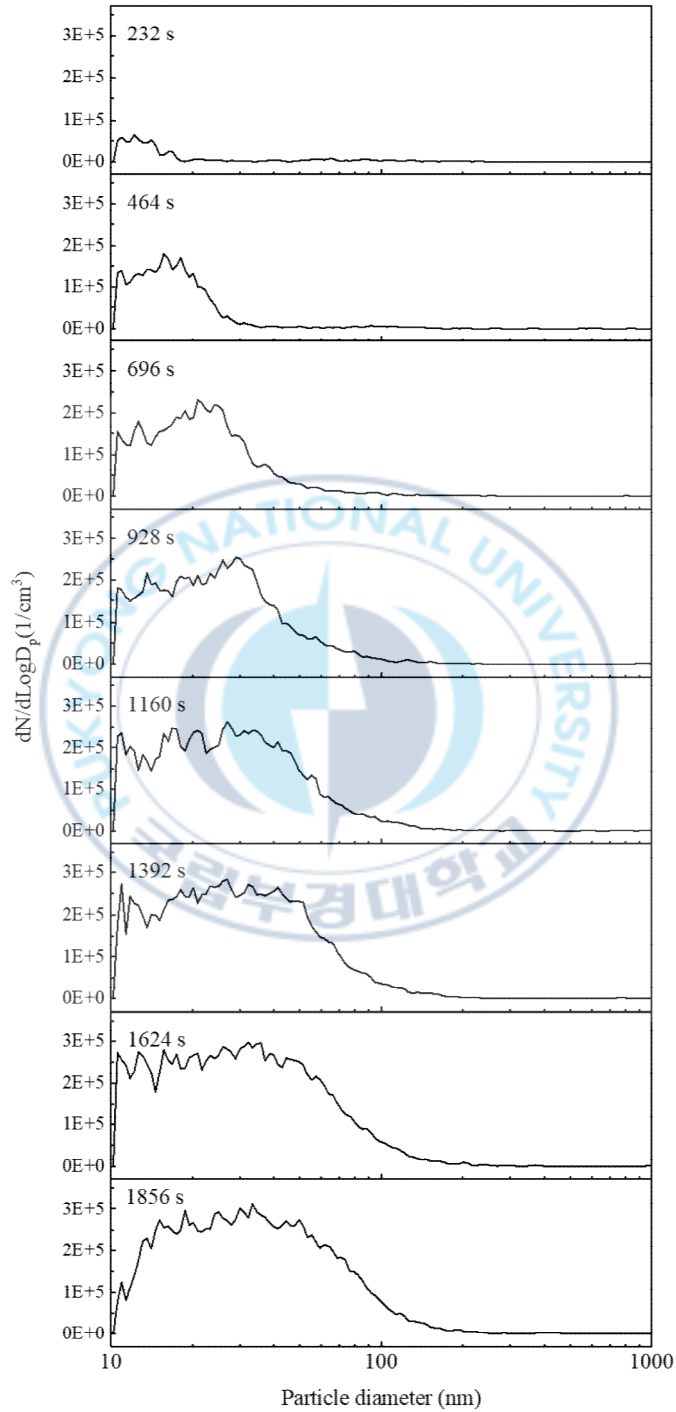


Figure 3.5 PC smoke particle size distribution under 40 kW/m².

Table 3.1 Temporal variation in particle number fraction by size under different heat flux conditions for PC

		PC							
		Particle number fraction by size over time (%)							
Heat flux (kW/m ²)	Particle size (nm)	Time (s)							
		232 s	464 s	696 s	928 s	1160 s	1392 s	1624 s	1856 s
20	10 - 50	43.5	55.2	64.8	80.9	89.0	90.5	90.3	93.8
	50 - 100	29.4	22.5	16.1	9.4	5.1	4.7	4.8	3.3
	100 - 500	26.0	21.9	18.9	9.2	5.2	4.6	4.7	2.8
	500 - 1000	1.1	0.2	0.0	0.4	0.6	0.1	0.2	0.1
30	10 - 50	48.7	86.0	94.3	95.6	94.7	91.9	90.0	87.0
	50 - 100	22.2	6.8	2.5	2.4	3.8	6.3	8.4	11.3
	100 - 500	27.0	7.2	2.8	1.9	1.5	1.8	1.5	1.6
	500 - 1000	1.9	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
40	10 - 50	80.8	95.7	94.9	90.5	85.7	81.5	77.8	73.3
	50 - 100	10.8	2.1	3.7	8.1	12.3	16.1	18.9	22.3
	100 - 500	8.0	1.8	1.2	1.3	1.9	2.3	3.3	4.3
	500 - 1000	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1

3.2.2 PMMA 연기입자 크기 분포

Figures 3.6-3.8은 복사열에 따른 PMMA 연기입자의 크기 분포를 나타낸다. 그래프의 x축은 입자 크기 범위를, y축은 입자의 개수를 나타낸다. 그래프의 하단 방향은 시간 경과에 따른 변화를 의미한다. 그래프 우측 상단의 삽입 그래프는 입자 개수 범위를 10배 축소한 값을 기준으로 확대하여 나타낸 것이다. Table 3.2는 시간에 따른 입자 크기별 분율 변화를 정리하였다. 표는 복사열 조건에 따른 입자 크기별 분율을 나타내며, 가로축 방향으로 시간 경과에 따른 변화가 표시된다.

Figure 3.6은 20 kW/m² 복사열 조건에서 나타난 결과이다. PMMA는 훈소 중심의 연소가 진행되며, 입자 크기 분포는 PC와 유사한 양상을 보인다. 10 - 50 nm 범위의 입자 분율은 232 s에서시점에서 48.3%였으며, 1,856 s에는 97.2%에 도달하였다. 반면, 50 - 1,000 nm 범위의 입자 분율은 51.7%에서 2.8%로 감소하였다. 이는 열분해가 진행되면서 가연성 가스 및 연소 생성물의 농도가 증가하고, 응축 과정을 통해 10 - 50 nm 입자가 지속적으로 형성되기 때문이다.

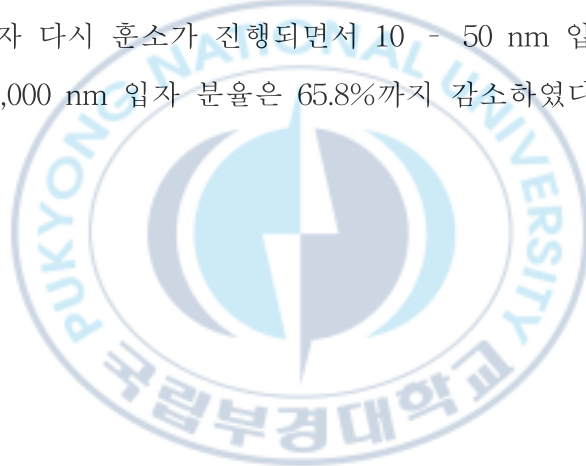
30 kW/m² 조건에서는 760 s에 가연성 가스가 산소와 급격히 반응하며 불꽃연소 (flaming combustion)가 시작되었다. 불꽃연소는 가연성 가스가 점화원 없이 스스로 산소와 화학 반응해 불꽃, 열, 다량의 연소 생성물을 방출하는 연소 형태를 의미한다. 이 이전까지는 표면에서 산소와의 느린 반응으로 연기만 발생하는 훈소가 유지되었다 Figure 3.7은 30 kW/m² 복사열 조건에서 변화하는 입자 크기 분포를 나타낸다. 불꽃연소 발생 전인 696 s까지 10 - 50 nm 입자 분율은 40.6%에서 85.6%까지 증가하였으나 불꽃연소가 전이된 이후인 928 s에서는 1.4%로 급격히 감소하였다. 같은 시점에서 100 - 1,000 nm 범위의 입자 분율은 91.3%로 증가하여 뚜렷한 분포 전환이 발생하였다. 이와 같은 변화는 연소 생성물의 급격한 산화 반응과 고온 환경에서의 입자 응집으로 인한 성장에 기인한다.

불꽃연소가 발생하면 화염이 형성되고, 공간 내 온도 구배가 급격히 증가한다. 이로 인해 연소 생성물은 빠르게 응축되며, 동시에 고온 환경에서의 입자의 운동 에너지가 상승해 충돌과 응집이 활발하게 일어난다^(24,25). 이러한 과정은 입자 크기의 성장을 유도하며, 결과적으로 100 - 1,000 nm 범위의 입자가 지배적으로 형성된다. 특히, 불완전 연소로 생성된 탄소 화합물은 높은 표면 에너지를 갖는다. 이는 주변 입자나 분자와의 결합 및 흡착을 유도해 응집을 더욱 촉진시킨다⁽²⁶⁾. 시간이 경과하

면서 입자는 점차 안정된 구조로 전환되고, 표면적 대비 부피 비율이 감소하여 에너지적으로 안정된 상태에 도달한다.

불꽃연소는 밀폐된 공간에서 질식소화에 의해 종료되며, 이후 연소 형태는 산소가 부족한 상태의 혼소로 전환된다. 불꽃이 사라짐에 따라 챔버 내 온도가 하강하고, 고온에서 활발하게 작용하던 입자의 응집 및 성장 메커니즘이 억제된다. 이로 인해 100 - 1,000 nm 범위의 입자 분율이 감소한다. 반면 10 - 50 nm 입자는 혼소 반응에 의해 해당 크기 구간의 상대적 분율이 증가한다.

Figure 3.8에서 볼 수 있듯이, 40 kW/m² 조건에서도 유사한 양상이 관찰되었다. 더 높은 복사열로 인해 표면 온도 상승 속도가 빨라지고, 340 s에 불꽃연소가 초기에 발생하였다. 이 시점에서 10 - 50 nm 입자 분율은 65.7%에서 1.6%로 감소하였으며, 100 - 1,000 nm 범위의 입자 분율은 13.1%에서 90.9%로 증가하였다. 이후 불꽃연소가 종료되자 다시 혼소가 진행되면서 10 - 50 nm 입자 분율이 19.1%까지 증가하고, 100 - 1,000 nm 입자 분율은 65.8%까지 감소하였다.



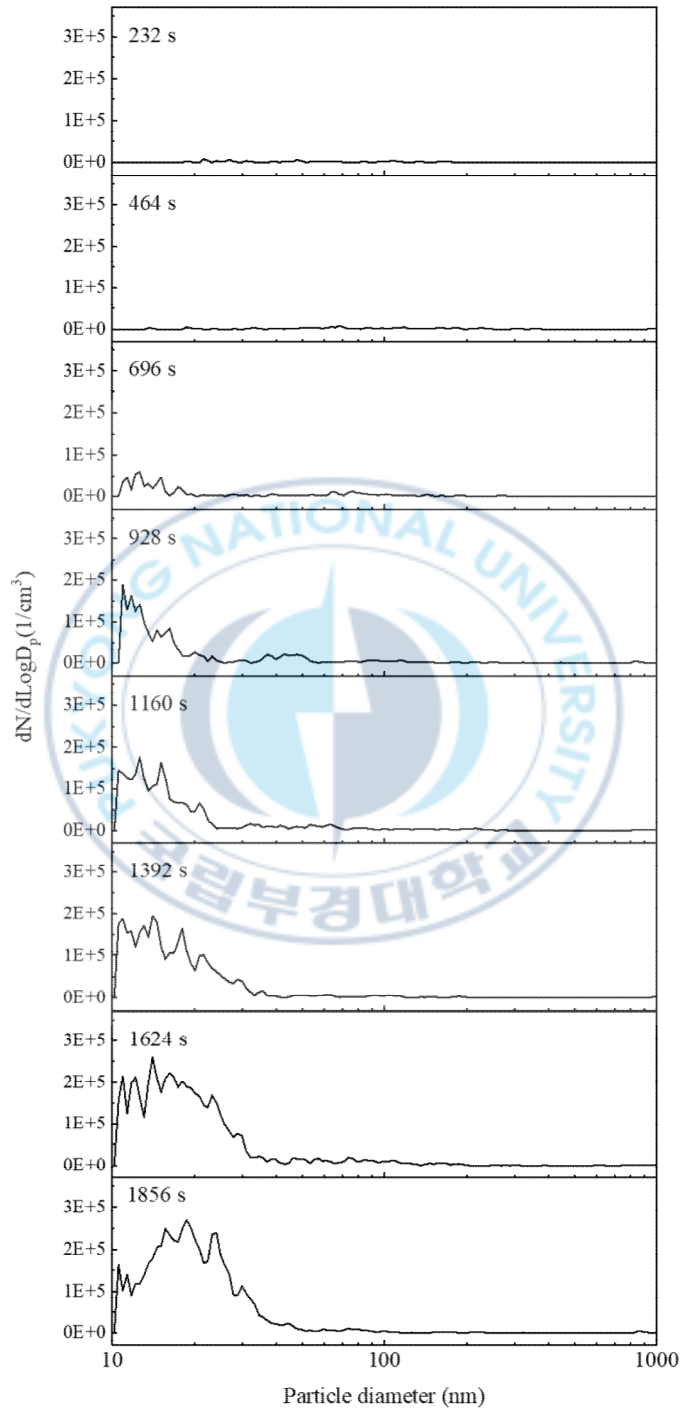


Figure 3.6 PMMA smoke particle size distribution under 20 kW/m^2 .

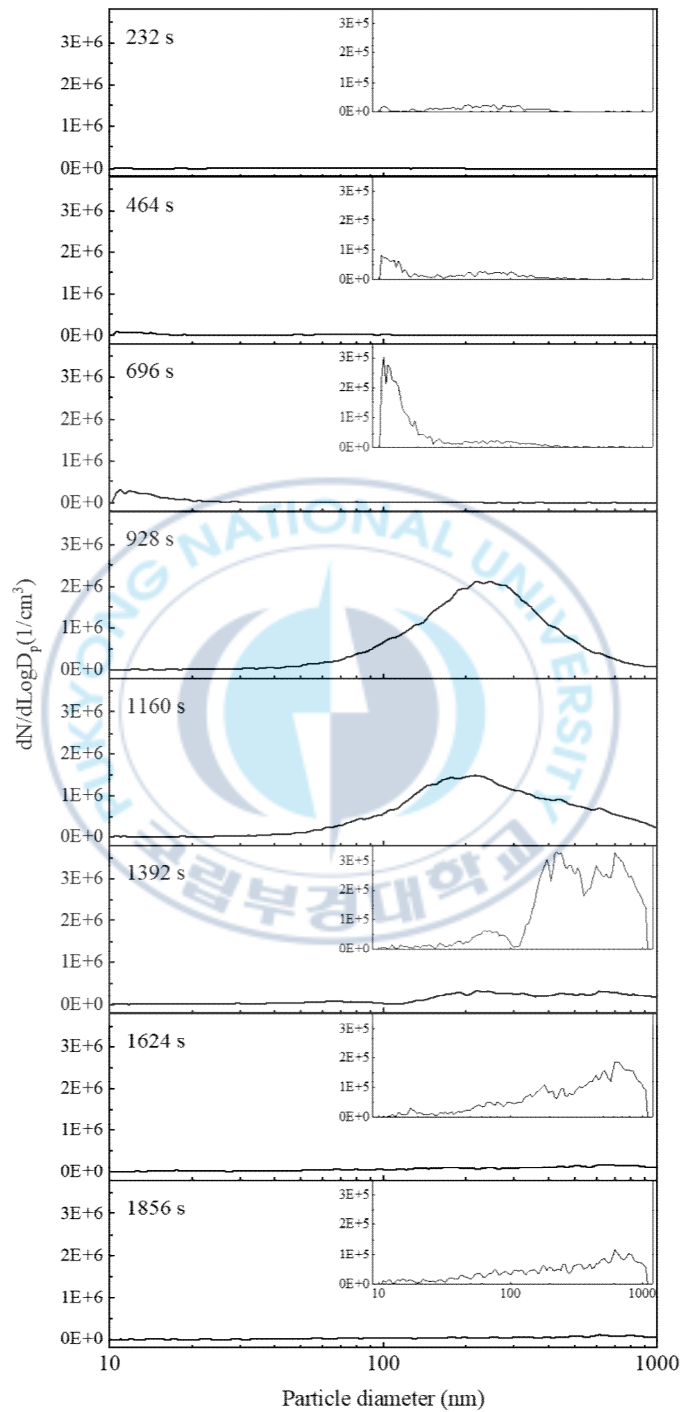


Figure 3.7 PMMA smoke particle size distribution under 30 kW/m^2 .

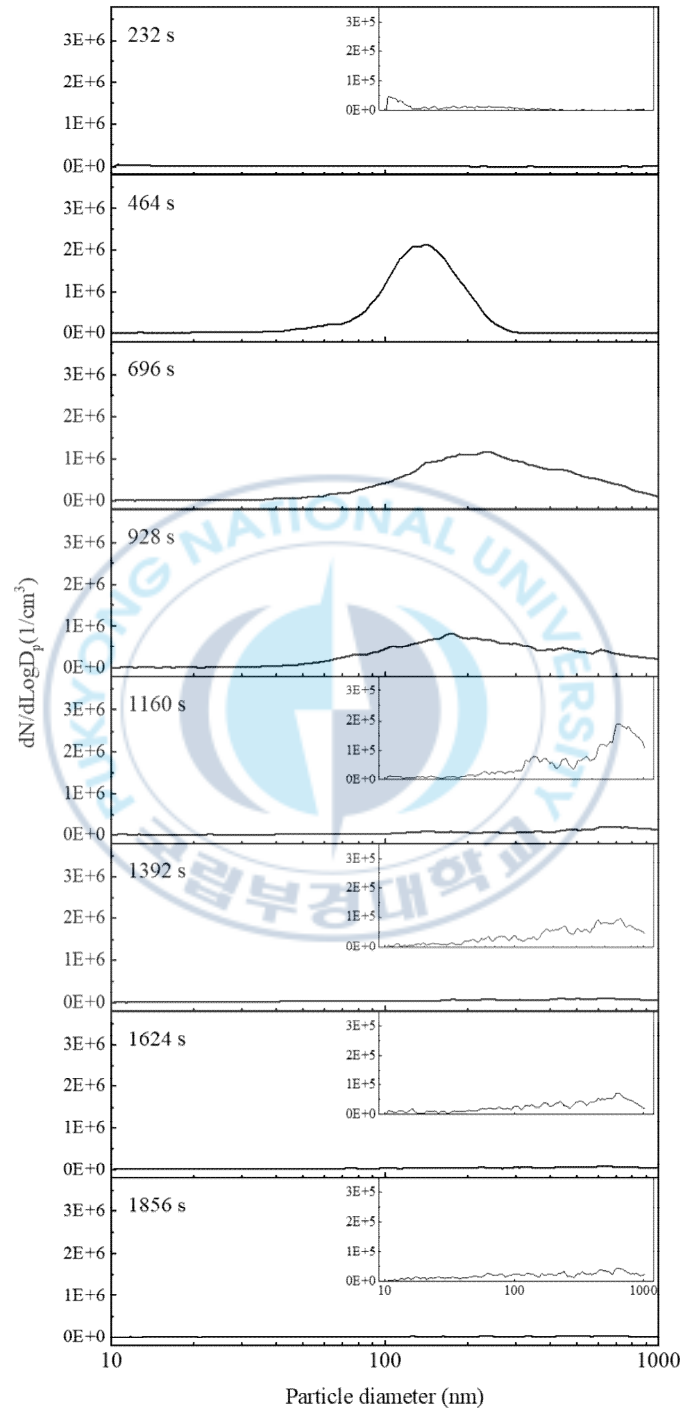


Figure 3.8 PMMA smoke particle size distribution under 40 kW/m^2 .

Table 3.2 Temporal variation in particle number fraction by size under different heat flux conditions for PMMA

PMMA									
Particle number fraction by size over time (%)									
Heat flux (kW/m ²)	Particle size (nm)	Time (s)							
		232 s	464 s	696 s	928 s	1160 s	1392 s	1624 s	1856 s
20	10 - 50	48.3	26.9	76.2	92.1	92.2	96.1	93.7	97.2
	50 - 100	21.6	33.6	16.4	3.8	4.7	2.4	4.0	1.9
	100 - 500	26.2	37.0	7.0	3.4	2.6	1.3	2.0	0.7
	500 - 1000	3.8	2.3	0.3	0.6	0.4	0.1	0.3	0.2
30	10 - 50	40.5	62.5	85.6	1.4	1.8	3.5	6.7	11.4
	50 - 100	32.6	21.8	7.9	7.3	8.9	6.0	9.5	12.1
	100 - 500	24.5	14.5	6.1	83.5	72.7	56.8	45.0	42.2
	500 - 1000	2.2	1.2	0.4	6.7	15.0	30.2	34.7	30.5
40	10 - 50	65.7	2.5	1.6	2.3	6.2	9.7	13.2	19.1
	50 - 100	21.2	15.7	7.6	12.1	7.0	11.4	11.1	15.1
	100 - 500	11.0	81.7	76.0	68.1	40.2	46.2	44.6	40.5
	500 - 1000	1.8	0.0	13.2	15.6	42.1	29.1	28.3	22.4

3.2.3 PVC 연기입자 크기 분포

PVC는 복사열 조건에서 입자의 급격한 생성과 성장, 그리고 분포 이동이 연속적으로 발생하는 특성을 보인다. Figures 3.9-3.11은 복사열 조건에서 PVC가 생성한 연기입자 크기 분포 결과이다. 그래프의 x축은 입자 크기 범위를, y축은 입자의 개수를 나타낸다. 그래프의 하단 방향은 시간 경과에 따른 변화를 의미한다. Table 3.3에는 시간에 따른 입자 분율의 변화를 정리하였다. 표는 복사열 조건에 따른 입자 크기별 분율을 나타내며, 가로축 방향으로 시간 경과에 따른 변화가 표시된다.

Figure 3.9에 나타난 바와 같이, 20 kW/m² 조건에서 464 s에 10 - 50 nm 범위의 입자가 증가한 후, 686 s에는 해당 범위의 입자 급속히 성장하여 분포에 변화를 일으켰다. 이후 10 - 50 nm 범위의 입자 분율은 점차 감소하였고, 반대로 100 - 500 nm 범위의 입자 분율은 0.9%에서 8.0%까지 증가하였다. 특히, 686 s 시점의 입자 성장은 응집 및 표면 성장 과정을 통해 상대적으로 큰 크기의 범위로의 전이를 유도하였으며, 이로 인해 100 - 500 nm 범위의 입자 분율이 뚜렷하게 확대되었다.

30 kW/m² 조건에서는 입자 크기 변화가 더 이른 시점에서 시작되며, 그 전반적인 분포 변화 양상은 20 kW/m² 조건과 유사하게 전개된다. Figure 3.10은 30 kW/m² 조건에서 나타난 입자 크기 분포 결과이다. 232 s에는 10 - 50 nm 입자가 증가하고, 464 s에는 급속히 성장하면서 해당 범위의 분율이 감소하였다. 이후 입자는 응집 및 표면 성장 과정을 거치며 100 - 500 nm 범위의 입자로 크기를 확장하였고, 1,856 s까지 해당 범위의 입자 분율은 0.8%에서 16.4%로 증가하였다. 특히 646 s부터는 10 - 50 nm 범위의 입자가 새롭게 생성되며 쌍봉분포를 형성한다. 이로 인해 10 - 50 nm 범위의 분율이 일시적으로 상승하나, 이후 100 - 500 nm 범위로 입자가 성장이 우세하여 10 - 50 nm 범위의 분율이 다시 감소하는 경향을 보인다.

이러한 입자 크기 분포 변화는 PVC의 열분해 특성과 밀접한 관련이 있다. PVC는 염소 원자가 결합된 고분자 구조를 가지며, 열분해 과정에서 두 단계의 반응을 거친다. 초기 낮은 온도에서는 탈염화수소화 반응이 우선 진행되어 염화수소(HCl)가 방출되며 고분자의 탄소 사슬이 불안정해진다. 이후 고온에서 탄소 간 결합이 절단되며, 2차 반응으로 PVC 표면에 방향족 화합물이 생성된다⁽²⁷⁾. 방출된 HCl은

산성을 띠고, 수분이나 탄소 입자와 쉽게 응축하여 입자 크기를 증가시킨다^(28,29). 특히, HCl 농도가 높을수록 입자의 성장률이 크게 나타난다. 그 결과, PVC는 연기입자가 점진적으로 증가하기보다, 초기부터 급격한 입자 성장과 함께 100 - 500 nm 입자가 우세하게 형성된다. 이후 온도가 상승함에 따라 PVC 표면에는 방향족 화합물이 축적되며, 일부는 고리화 반응을 통해 다환 방향족 탄화수소(PAH)로 전환된다. 고온 환경에서는 휘발성 화합물의 기화 반응이 우세해지고, 기존에 형성된 탄화층도 연소하면서 다시 10 - 50 nm 범위의 열분해 산물이 발생하여 쌍봉분포를 형성한다.

화학 구조의 변화는 적외선분광법(IR) 분석 결과를 통해 정량적으로 확인할 수 있다. Figure 3.12는 30 kW/m² 복사열을 90 s, 180 s, 410 s, 928 s 동안 조사한 후 측정된 PVC 표면의 적외선분광법(IR) 분석 결과를 나타낸다. 180 s 조사된 표면은 복사열을 가하지 않은 기존의 PVC와 비교했을 때, O-H, C-H, C-Cl, C-O 결합 피크가 소멸되고 C=C 결합의 최대값이 새롭게 나타났다. 이는 저온에서 탈염화수소 반응이 진행되며 PVC의 고분자 사슬이 붕괴되고 이중 결합이 생성되었음을 의미한다. 이 시점에서는 10 - 50 nm 범위의 미세 입자가 초기 열분해 산물로 관찰된다. 410 s 조사된 표면은 180 s 결과와 비교해 C-H, C-O 결합 소멸이 지속적으로 나타나며, 일부 알케인 구조는 이중 결합을 가지는 알켄 구조로 변화하였다. 이와 함께 C=C 결합 피크가 뚜렷하게 나타나, PVC 표면에 방향족 화합물을 생성이 본격화되고, 탄화층이 형성되는 과정으로 해석된다⁽³⁰⁾. 동시에, HCl 응축입자에 의한 입자 성장이 지배적으로 나타나며, 10 - 50 nm 입자의 급격한 증가가 관찰된다. 928 s 동안 복사열을 가한 표면은 420 s 결과와 비교해 C-H(alkene), C-O, C=C 결합 피크가 소멸되었다. 이러한 변화는 장시간 고온에 노출되면서 표면에 형성된 탄화층이 연소한 결과이다. 이 과정에서 다시 탄화층의 연소반응이 다시 활성화되어 10 - 50 nm 범위의 입자가 재생성되며, 쌍봉분포를 이루게 된다.

Figure 3.11에서 볼 수 있듯이, 복사열을 40 kW/m²로 증가시킨 조건에서는, 고온에 의해 입자 형성이 더욱 가속되었다. 232 s에 10 - 50 nm 범위의 입자가 생성되어 쌍봉 형태의 분포가 나타난다. 이후 10 - 50 nm 범위의 입자는 매우 빠르게 성장한 뒤, 시간이 지남에 따라 분율이 급격히 감소하였다. 232 s 시점에서 94.1%였던 분율은 1856 s에 42.0%로 감소하여, 초기 소형 입자의 대부분이 점차 줄어드는 양상을 보였다. 반면, 100 - 500 nm 범위의 입자 분율은 같은 기간 동안 0.3%에서

28.3%까지 증가하였다. 이로 인해 전체 입자 분포는 시간 경과에 따라 10 - 50 nm의 작은 입자에서 100 - 500 nm의 큰 입자로 중심이 이동하였으며, 후기에는 큰 입자의 상대적 비중이 확대되는 경향을 보였다.



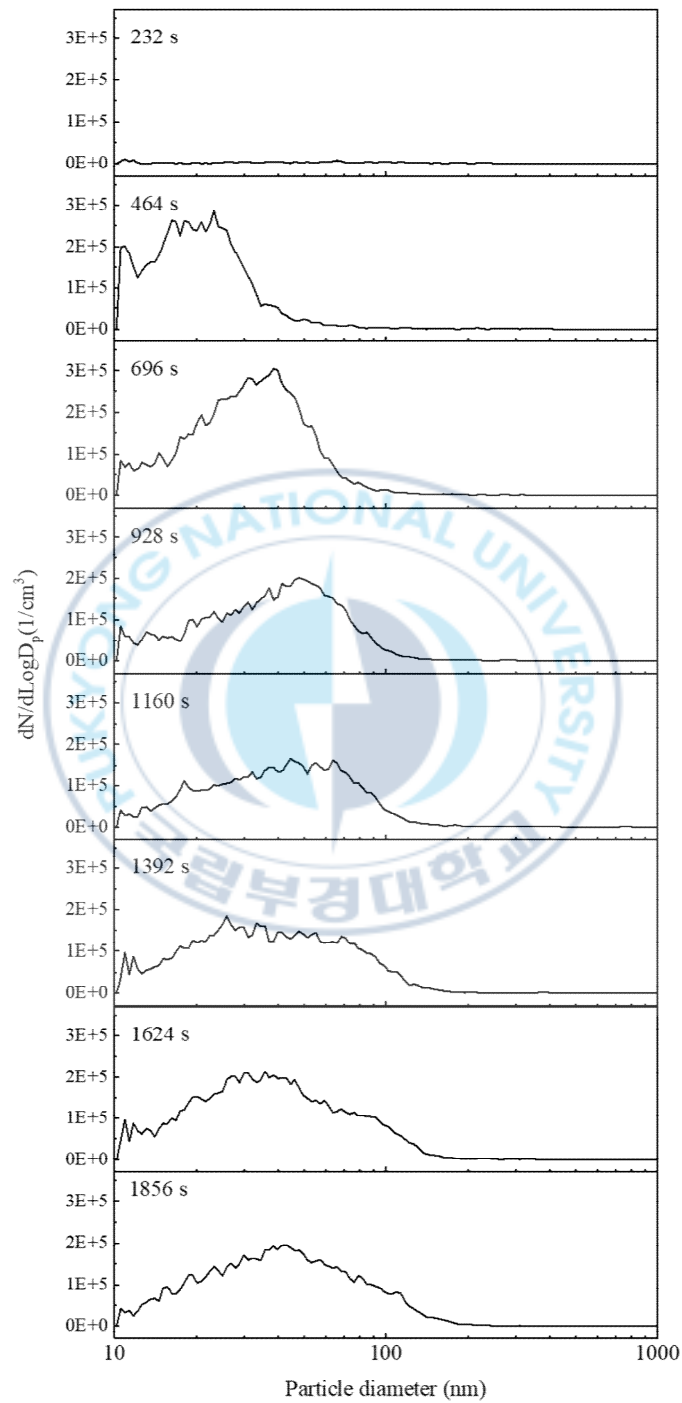


Figure 3.9 PVC smoke particle size distribution under 20 kW/m².

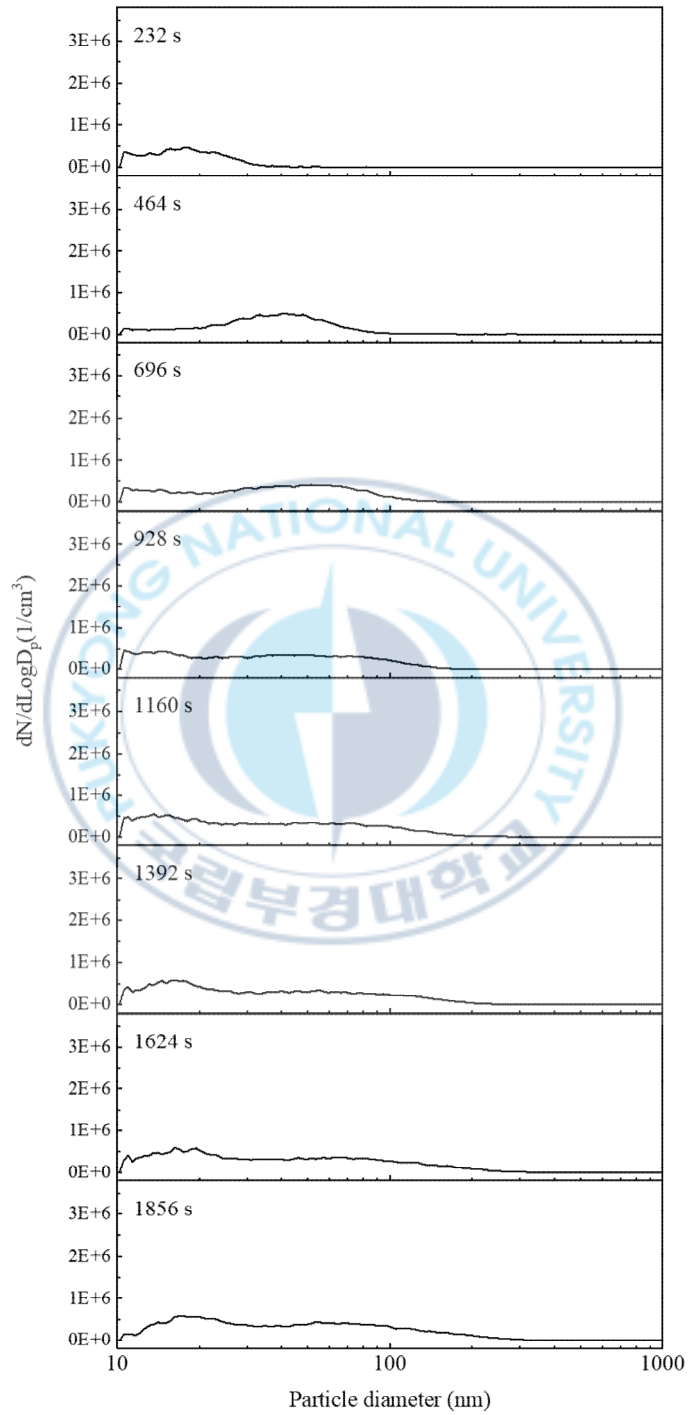


Figure 3.10 PVC smoke particle size distribution under 30 kW/m².

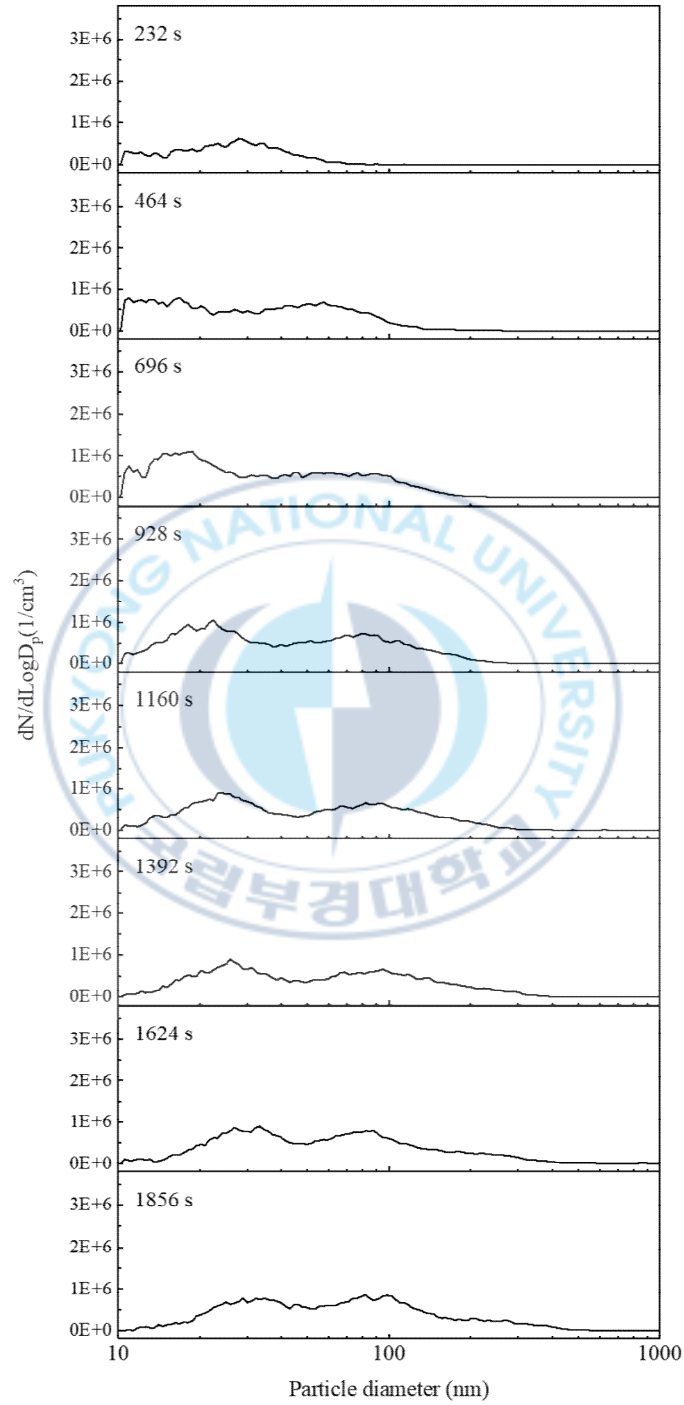
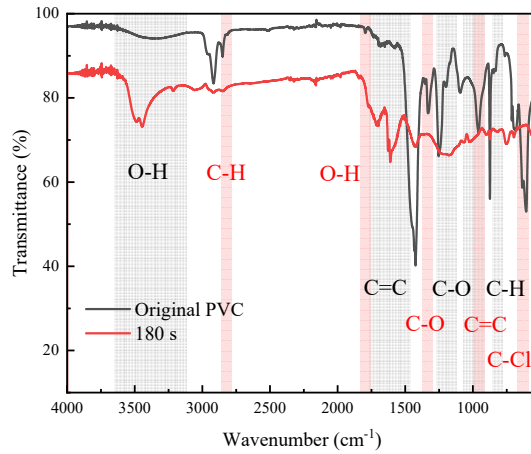


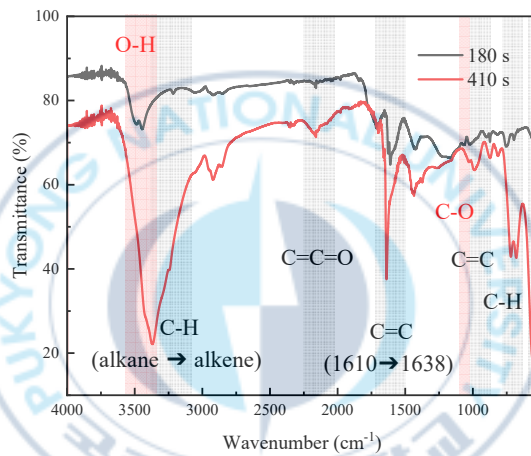
Figure 3.11 PVC smoke particle size distribution under 40 kW/m².

Table 3.3 Temporal variation in particle number fraction by size under different heat flux conditions for PVC

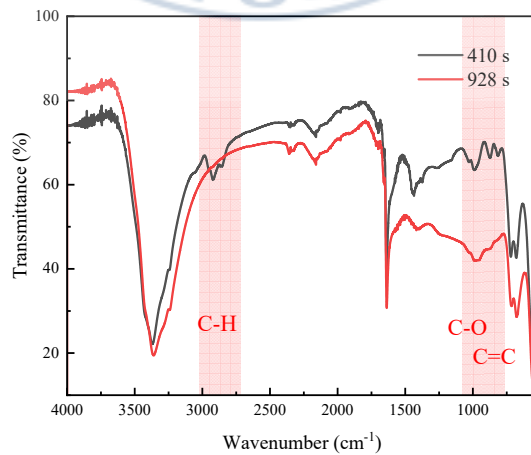
PVC									
Particle number fraction by size over time (%)									
Heat flux (kW/m ²)	Particle size (nm)	Time (s)							
		232 s	464 s	696 s	928 s	1160 s	1392 s	1624 s	1856 s
20	10 - 50	50.1	96.8	86.2	67.2	63.2	67.2	69.5	63.6
	50 - 100	26.6	2.3	12.7	30.5	33.2	27.9	24.5	28.4
	100 - 500	23.3	0.9	1.1	2.2	3.6	5.0	5.9	8.0
	500 - 1000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	10 - 50	98.4	77.4	66.6	67.6	68.1	66.6	62.6	58.3
	50 - 100	0.9	21.5	30.2	25.7	22.7	21.8	23.1	25.2
	100 - 500	0.8	1.1	3.3	6.6	9.2	11.6	14.3	16.4
	500 - 1000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	10 - 50	94.1	70.5	68.4	58.5	52.7	48.9	46.7	41.9
	50 - 100	5.5	26.1	23.2	26.4	26.1	25.4	29.1	29.6
	100 - 500	0.3	3.4	8.3	15.0	21.2	25.7	24.2	28.3
	500 - 1000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1



(a) IR spectra at 0 s and 180 s



(b) IR spectra at 180 s and 410 s



(c) IR spectra at 410 s and 928 s

Figure 3.12 IR spectra of the PVC surface after exposure to a radiant heat flux of 30 kW/m^2 at different duration: (a) 180 s, (b) 410 s and (c) 928 s (Red regions indicate bond dissociation; gray regions indicate bond formation).

3.3 특정 광학 밀도

Figure 3.13은 복사열 조건(20, 30, 40 kW/m²)에 따른 PC, PMMA, PVC의 특정 광학 밀도 변화를 보여준다. Figures 3.14-3.16는 각각 PC, PMMA, PVC의 연소 과정에서 발생하는 연소 가스(CO, O₂)의 농도 변화를 나타낸다. Figures 3.14(a)-3.16(a), Figures 3.14(b)-3.16(b), Figures 3.14(c)-3.16(c)는 각각 복사열 20, 30, 40 kW/m²에 노출된 상태에서 변화하는 연소 가스 농도를 나타낸다. 그래프의 x축은 연소 시간(0 - 1,800 s)을, 좌측의 y축은 특정 광학 밀도, 우측의 y축은 CO, O₂의 농도를 나타낸다.

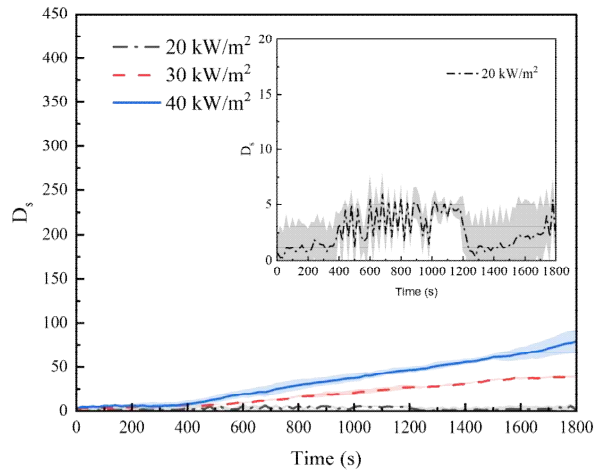
Figure 3.14는 복사열 조건별 PC의 특정 광학 밀도와 연소 가스 농도를 나타낸다. PC는 모든 복사열 조건에서 불꽃연소 없이 혼소만 진행되며, 연소 표면에 견고한 탄화층을 형성한다. 연소 중 O₂의 소비와 CO의 생성이 거의 발생하지 않은 것은 탄화층 내부에서 생성된 가연성 가스의 외부 방출을 차단했기 때문이다. 이로 인해, 산소와의 접촉 반응이 억제되고 열분해 반응 역시 제한된다. 결과적으로 연소 생성물의 발생량이 적고, 연기입자의 개수 농도 또한 현저히 낮게 나타난다. 따라서 PC의 특정 광학 밀도는 PMMA와 PVC에 비해 상대적으로 낮은 값을 보인다. 그러나 연기입자 개수가 적더라도 복사열의 세기와 노출 시간이 증가함에 따라 입자 간 응집으로 인해 성장이 촉진되며, 큰 입자의 개수 비율이 증가한다. 주요 발생 입자보다 큰 크기 구간에서 개수 증가율이 뚜렷하게 나타나며 이러한 입자 크기 분포 변화는 특정 광학 밀도의 점진적인 증가로 이어진다. 모든 조건에서 1800 s 시점에 최대값에 도달하며 복사열의 세기가 클수록 특정 광학 밀도의 증가 폭도 크게 나타난다.

PMMA는 20 kW/m² 복사열 조건에서는 불꽃연소 없이 혼소만 진행되지만, 30 및 40 kW/m² 조건에서는 불꽃연소가 발생한다. 불꽃연소가 시작되면 급격한 산화 반응에 의해 PMMA의 고분자 사슬이 빠르게 분해되고, 다량의 연소 생성물과 연기입자가 생성된다. 생성된 입자는 고온 환경에서 큰 온도 구배의 영향을 받아 급격히 성장하며, 이에 따라 큰 입자의 개수 비율이 증가하고 입자 크기 분포도 넓어진다. 그 결과, 불꽃연소가 시작됨과 동시에 특정 광학 밀도가 순간적으로 급격히 상승한다. Figure 3.15(b)-3.15(c)에 따르면, 실험 장치의 밀폐구조로 인해 불꽃연소 과정에서 O₂의 농도는 12% 수준까지 급감하고 질식소화가 유도되어 불꽃이 소멸된다. 이

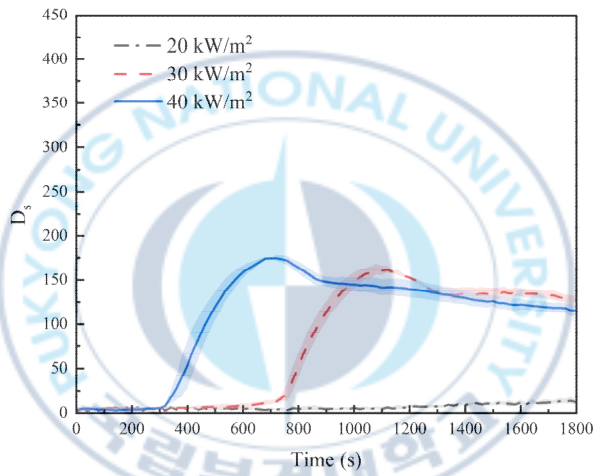
후 급격한 산화 반응이 중단되면서 불완전 연소가 지속되면서 CO의 농도가 크게 증가한다. 이 시점부터 연기입자의 생성량은 급격히 감소하고 입자 간 응집도 둔화되어 입자 성장 속도가 저하된다. 이와 같은 변화는 특정 광학 밀도의 감소로 이어진다.

추가적으로 실험 종료 시점에서 PMMA의 잔존 질량은 초기 64 g에서 약 18 g으로, 전체의 약 28%에 해당하는 가연물이 남아있는 것으로 확인된다. 이는 연소가 가능 물질이 충분히 존재함에도 밀폐된 챔버 구조로 인해 연소가 제한된 결과이다. 따라서 본 실험에서 도출된 입자 분포와 연소 특성은 산소 유입이 차단된 밀폐 조건에서의 반응 결과로 해석되어야 하며, 동일한 열 노출 조건이 개방형 시스템에서 적용될 경우, 잔존 가연물의 지속적인 연소로 인해 상이한 연소 양상이 나타날 수 있다. 이러한 경우 연기입자의 생성량, 크기 분포, 그리고 광학 밀도에서 유의미한 차이가 발생할 가능성이 있다.

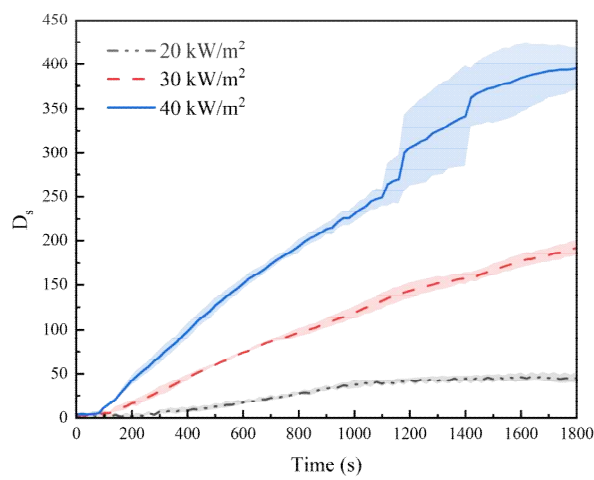
PVC는 모든 복사열 조건에서 PC와 동일하게 혼소만 발생한다. PVC는 탄소 사슬에 염소 원자가 결합된 구조를 가지며, 열분해 초기 단계에서 염화수소(HCl) 가스를 방출하면서 고분자 사슬이 빠르게 분해된다. HCl의 방출은 고분자 구조를 약화시키고 추가적인 열분해를 가속하여 다량의 연기입자를 생성한다. 이로 인해 PVC는 열 안정성이 우수한 PC보다 높은 특정 광학 밀도를 나타내며, 불꽃연소가 발생하는 PMMA보다도 더 높은 값을 보인다. 복사열이 커지고 노출 시간이 길어질수록 입자의 성장 과정이 누적되면서, 큰 입자의 비율이 점진적으로 증가한다. 특히, 30 및 40 kW/m² 조건에서는 PVC 표면에 생성된 탄화층이 연소되며 미세한 열분해 입자가 추가로 방출되고, 이로 인해 입자 크기 분포는 쌍봉 형태로 변화한다. 이와 같은 분포 특성의 변화는 광소멸에 영향을 주어, Figure 3.13(b)과 같이 결과적으로 특정 광학 밀도의 상승을 유도한다.



(a) PC

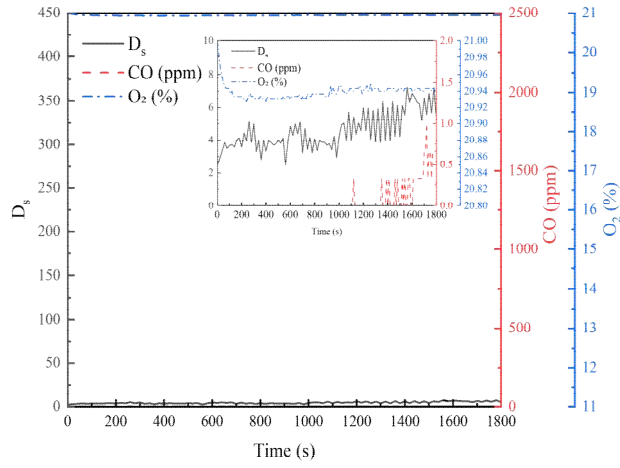


(b) PMMA

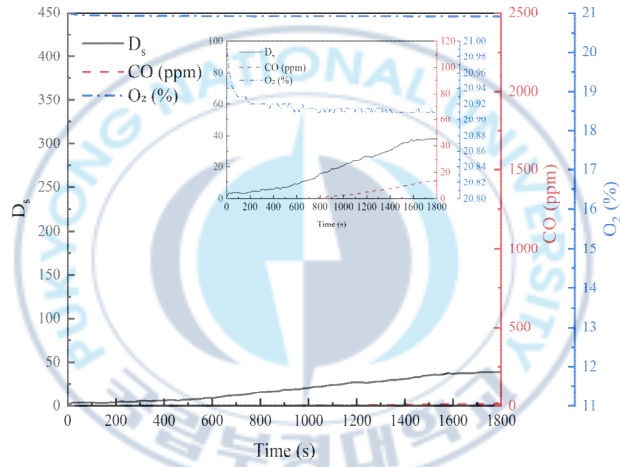


(c) PVC

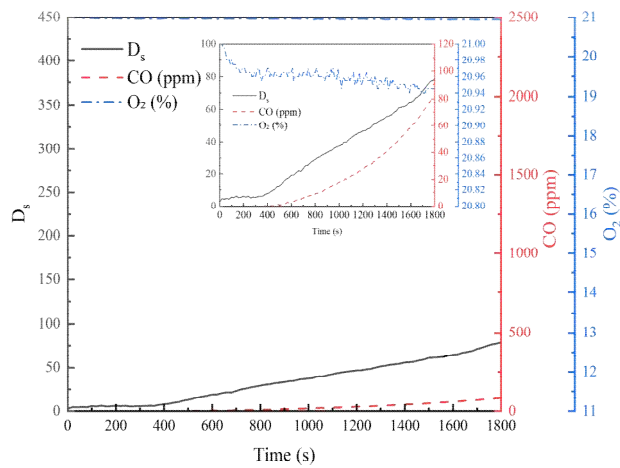
Figure 3.13 Specific optical density of (a) PC, (b) PMMA and (c) PVC under 20, 30, 40 kW/m² with time.



(a) 20 kW/m²

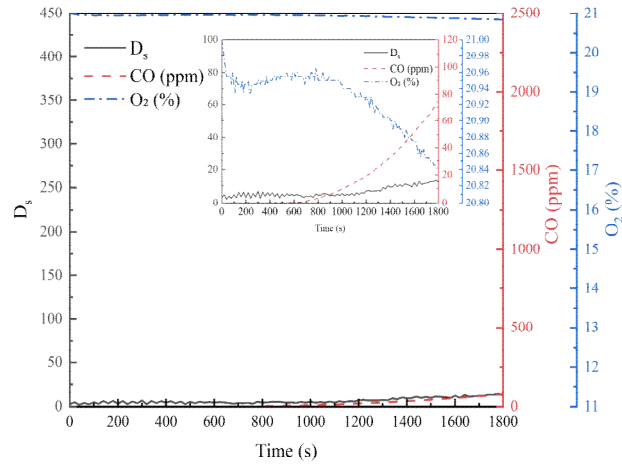


(b) 30 kW/m²

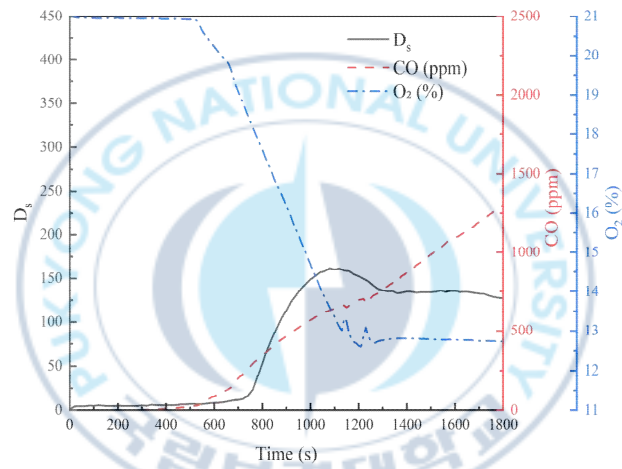


(c) 40 kW/m²

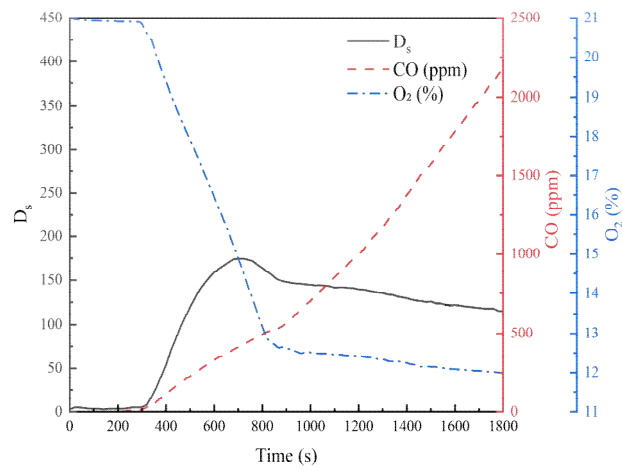
Figure 3.14 O₂ and CO concentration of PC under (a) 20, (b) 30, (c) 40 kW/m².



(a) 20 kW/m²

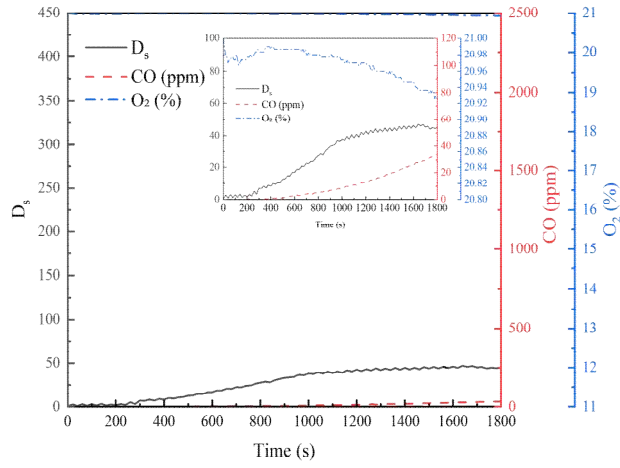


(b) 30 kW/m²

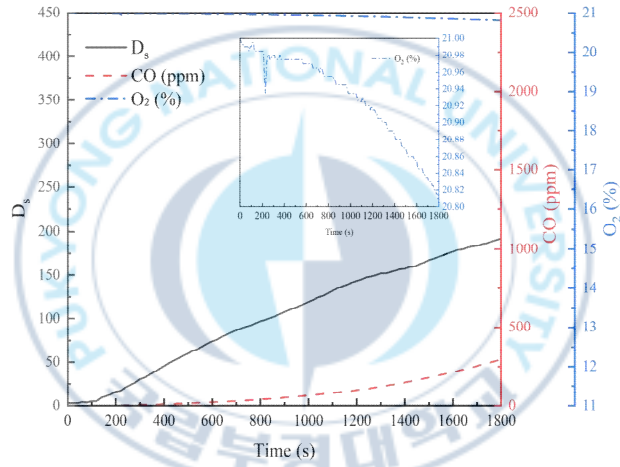


(c) 40 kW/m²

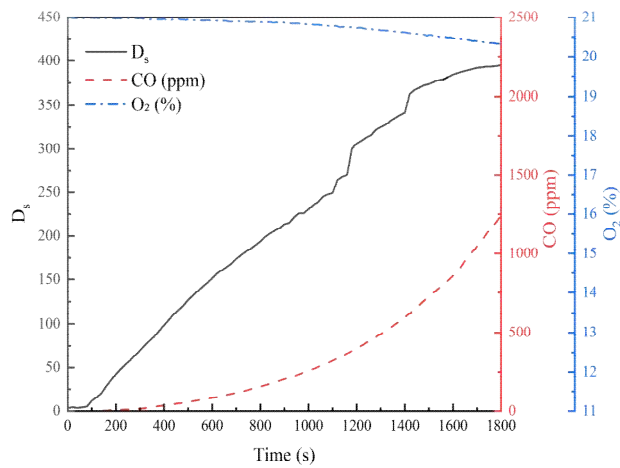
Figure 3.15 O₂ and CO concentration of PMMA under (a) 20, (b) 30, (c) 40 kW/m².



(a) 20 kW/m^2



(b) 30 kW/m^2



(c) 40 kW/m^2

Figure 3.16 O_2 and CO concentration of PVC under (a) 20, (b) 30, (c) 40 kW/m^2 .

3.4 연기입자 크기별 광소멸 기여도

PC, PMMA, PVC 모두에서 복사열의 세기와 노출 시간이 증가할수록 연기입자의 평균 크기와 주요 분포 범위가 함께 확대되는 경향을 보였다. 입자 생성과 광소멸 특성을 분석하기 위해, 최대 개수 분포를 나타내는 입자 크기와 개수 증가율이 가장 높은 입자 크기를 도출하였다.

실험 전 10분 동안 대기 중 입자 농도를 측정하고 동일한 입자 크기 내에서 발생하는 개수 변동의 표준편차를 산출하였다. 이 과정을 5회 반복하여 각 입자 크기별 표준편차의 평균값을 계산한 결과, 0.173으로 나타났으며 이를 변동성의 기준으로 설정하였다. 따라서 실험 중 개수 증가율이 0.173을 초과하는 경우를 유의미한 증가로 판단하였다. Tables 3.4-3.6은 시간 경과에 따라 가장 많은 입자가 형성된 크기와 최대 개수 증가율을 보인 입자 크기를 구분하여 정리한 결과이다.

PC의 경우, 복사열 20 kW/m^2 조건에서 1,856 s 동안 가장 많은 입자가 형성된 크기는 초기 대비 1.7% 증가하여 17.5 nm에 도달하였으며, 최대 개수 증가율을 보인 입자는 27.5 nm로 2.6% 상승하였다. 복사열을 30 kW/m^2 로 증가시키면, 가장 많은 입자가 형성된 크기는 27.5 nm로 변하고, 최대 증가율을 보인 입자는 65.0 nm로 변화하여 두 값 사이의 차이가 크게 벌어진다. 40 kW/m^2 조건에서는 이 격차가 더 확장되어, 최빈값을 갖는 입자 크기는 35.0 nm, 최대 증가율 입자 크기는 175 nm에 도달하였다.

PMMA는 이와 다른 경향을 나타냈다. 20 kW/m^2 조건에서는 낮은 온도에서 혼소가 지속되어 가장 많이 형성된 크기의 입자가 17.5 nm, 최대 증가율 입자 크기는 35.0 nm로 소규모의 증가만 관측되었다. 그러나 복사열이 30 kW/m^2 로 상승하면서 불꽃연소가 진행되었다. 최대 광학 밀도에 도달한 시점에 최빈값을 갖는 입자 크기는 225 nm, 최대 증가율 입자 크기는 275 nm로 입자가 급격히 성장하였다. 40 kW/m^2 조건에서도 이 경향이 유지되었으며, 가장 많이 형성된 입자 크기는 225 nm, 최대 증가율을 보이는 입자는 450 nm로 나타났다.

PVC는 복사열 세기에 따라 다양한 크기 영역에서 입자가 성장하는 양상을 보인다. 20 kW/m^2 조건에서 가장 많은 입자가 형성된 크기가 45.0 nm, 최대 증가율을 보이는 입자는 175 nm로 관측되었다. 30 kW/m^2 조건에서는 17.5 nm와 65.0 nm 두 구간에서 입자가 집중되었고, 최대 증가율은 350 nm에서 발생하였다. 40 kW/m^2

조건에서는 35.0 nm와 95.0 nm에서 입자 분포가 집중되었고, 최대 증가율을 갖는 입자는 35.0 nm와 550 nm로 나타났다. 이는 복사열 세기에 따라 PVC가 상대적으로 더 넓은 크기 영역에서 입자를 형성하고 성장시킨다는 것을 보여준다.

세 물질 모두 복사열이 증가할수록 가장 많이 발생하는 입자 크기가 커지고, 입자 크기 분포가 넓어진다. 또한, 입자 크기별 개수의 증가가 유효하게 나타나는 범위도 복사열의 세기와 노출 시간이 증가할수록 큰 입자 범위로 확장되었다. 특히, 가장 많은 입자가 생성된 크기보다 개수 증가율이 최대인 입자 크기가 더욱 크게 나타남을 통해 성장 중인 입자들의 활성 구간이 점차 큰 크기로 이동함을 확인할 수 있다. 입자들은 충돌 및 결합을 통해 큰 입자가 작은 입자를 흡수하며 성장하고, 입자 크기가 커질수록 표면적이 증가하여 응집이 더욱 활발히 진행된다. 결과적으로, 크기가 큰 입자가 더 빠르게 성장한다.

PC, PMMA, PVC의 연기입자 크기 분포는 서로 다른 경향을 보였다. 입자 크기는 광소멸에 영향을 주는 주요 인자이므로, 입자 크기 분포의 차이는 광소멸 특성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 입자 크기 분포와 광소멸 간의 관계를 정량적으로 분석할 필요성을 가진다.

연기입자 크기별 광소멸 기여도를 정량적으로 평가하기 위해, 연기입자가 농도가 충분히 형성되는 40 kW/m² 복사열 조건에서 노출 시간에 따른 입자 크기 분포와 특정 광학 밀도의 상관관계를 분석하였다. 특정 광학 밀도(D_s)의 증가율에 대해 총 입자 수(N)와, 입자 크기의 영향을 반영한 입자 수(ND_p^3)의 증가율을 각각 계산하여, 이들의 일치도를 비교하였다. 여기서 ND_p^3 는 입자 크기가 클수록 광소멸에 더 크게 기여한다는 가정을 기반으로 구성된 지표이며, ND_p^3 증가율과 특정 광학 밀도 증가율 간의 정량적 일치 정도를 통해 해당 가정의 적용 범위를 분석하였다. Table 3.7은 특정 광학 밀도 증가율에 대한 총 입자 수와, 입자 크기의 영향을 반영한 입자 수 증가율의 비를 정리한 결과를 나타낸다.

PC의 경우, 복사열에 노출되는 시간에 따른 특정 광학 밀도 증가율은 전반적으로 총 입자 수 증가율과 높은 일치도를 보인다. 이는 연소 시 생성되는 입자 크기가 10 - 50 nm로 매우 작아, 입자 크기에 따른 광소멸 기여가 제한되고 개수 누적이 중요한 영향을 미친다는 것을 의미한다. 그러나 연소가 1160 s를 초과하면서 입자의 성장으로 인해 입자 크기가 증가하고, 이후 특정 광학 밀도의 증가율은 입자 크기를 반영한 입자 수 증가율과의 상관성이 뚜렷하게 나타난다. 특히 1856 s 시점까

지 최대 225 nm 크기의 입자가 증가하였으며, 이로부터 225 nm 이하의 입자에서는 크기 증가에 따라 광소멸 기여가 유의미하게 커지는 경향을 확인할 수 있다.

PMMA는 464 s 이후 붓꽃연소가 시작되며 특정 광학 밀도의 증가율에 비해, 입자 표면적을 반영한 입자 수의 증가율이 약 5배 이상 크게 나타났다. 이는 해당 시점에서 450 - 750 nm 범위의 대형 입자 개수가 급격히 증가했기 때문으로, 입자 크기가 커질수록 광소멸에 큰 영향을 미친다는 가정에 따라 입자 표면적을 반영한 입자 수의 증가율이 과대 산정되었기 때문이다. 그러나 696 s 이후 해당 크기 입자의 수가 급감하면서, 입자 표면적을 반영한 입자 수 증가율은 특정 광학 밀도 증가율과 유사한 수준으로 수렴하였다. 이 결과는 450 nm 이상의 대형 입자의 경우, 입자 크기 증가가 광소멸의 증가로 직접 이어지지 않으며, 해당 크기 구간에서는 광소멸 기여가 과대평가되었음을 시사한다.

PVC는 1392 s까지 특정 광학 밀도의 증가율에 대해 입자 표면적을 반영한 입자 수의 증가율은 총 입자 개수의 증가율에 비해 상관성이 매우 유사하게 나타났다. 그러나 1160 s 시점부터는 입자 표면적을 반영한 입자 수 증가율이 특정 광학 밀도 증가율을 초과하며, 두 값의 비율이 1.1 이상으로 증가하였다. 입자 크기별 개수 증가율 분석 결과, 1160 s 시점부터 450 nm 이상의 대형 입자 수가 증가하기 시작하며, 이 크기 범위의 입자들은 입자의 크기 증가가 광소멸의 증가로 직접 이어지지 않는다. 따라서 1160 s 이후에 관측된 과대평가는 대형 입자의 광소멸 기여가 실제보다 과도하게 반영된 결과이다.

모든 가연물에서 입자 크기가 증가할수록 광소멸 기여도도 함께 증가하는 경향을 보였으나, 450 nm 이상의 입자는 특정 광학 밀도 증가율과 비례하는 양상을 보이지 않았다. 이는 일정 크기를 초과한 입자는 크기가 커지더라도 광소멸에 효과적으로 기여하지 않음을 의미한다.

입자 크기에 따른 광소멸 특성의 차이를 이해하기 위해, PC, PMMA, PVC로부터 생성된 연기입자의 화학 조성을 분석하였다. Figure 3.17 PC, PMMA, PVC 연기입자의 적외선 분광(IR) 분석 결과와 PMMA 연기입자의 라만(Raman) 분광 분석 결과를 나타낸다. 적외선 분광(IR) 분석 결과, 모든 연기입자에서 C=C, C-O 결합이 공통으로 확인되었으며, 이는 탄소 구조의 존재를 시사한다⁽³¹⁾. 추가적으로 PMMA 연기입자에 대한 라만(Raman) 분광 분석에서는 1338 cm^{-1} 와 1595 cm^{-1} 에서 각각 D_{peak} 와 G_{peak} 가 나타났다. D_{peak} 과 G_{peak} 는 SP^2 와 SP^3 혼성 결합구조이 공존하는 전

형적인 탄소 구조체에서 나타나는 특성이다. $I(D)/I(G)$ 비는 약 0.995로 측정되었으며, 이는 연기입자 내에 정렬된 그래핀 구조가 존재하는 무질서한 흑연(graphite bar)임을 의미한다⁽³²⁾. 흑연은 높은 굴절률과 흡수계수를 가지며, 다양한 공명과 산란 모드의 간섭이 발생한다. 입자 크기가 커지면 이러한 현상이 복합적으로 작용하여 광소멸 효율이 증가하지만, 일정 크기 이상부터는 입자 표면에 반사된 빛이 입자 내부로 전달되지 못하고 외부로 산란되면서 흡수 효과가 포화된다⁽³³⁾. 또한, 입자 크기 증가에 따라 체적 대비 표면적 비율이 감소하여 빛의 흡수 효율이 저하된다⁽³⁴⁾. 이로 인해 일정 크기를 초과한 입자는 크기가 커지더라도 광소멸 증가와 비례하지 않는 경향을 보인다. 따라서 450 nm 이상의 입자에서는 크기 증가가 특정 광학 밀도의 증가로 직접 이어지지 않는 현상이 관찰된다.



Table 3.4 Time-resolved mode particle diameter and particle diameter with maximum number growth rate for PC

Sample	PC					
	Mode particle diameter (nm)			Particle diameter with the maximum increase rate in number concentration (nm)		
Time (s)	20 kW/m ²	30 kW/m ²	40 kW/m ²	20 kW/m ²	30 kW/m ²	40 kW/m ²
232	10.5	10.5	12.5	-	-	-
464	10.5	10.5	17.5	12.5	12.5	22.5
696	10.5	10.5	22.5	17.5	22.5	35.0
928	10.5	17.5	27.5	17.5	27.5	65.0
1160	10.5	22.5	27.5	22.5	35.0	95.0
1392	12.5	27.5	27.5	22.5	45.0	175.0
1624	17.5	22.5	35.0	27.5	55.0	225.0
1856	17.5	27.5	35.0	27.5	65.0	175.0

Table 3.5 Time-resolved mode particle diameter and particle diameter with maximum number growth rate for PMMA

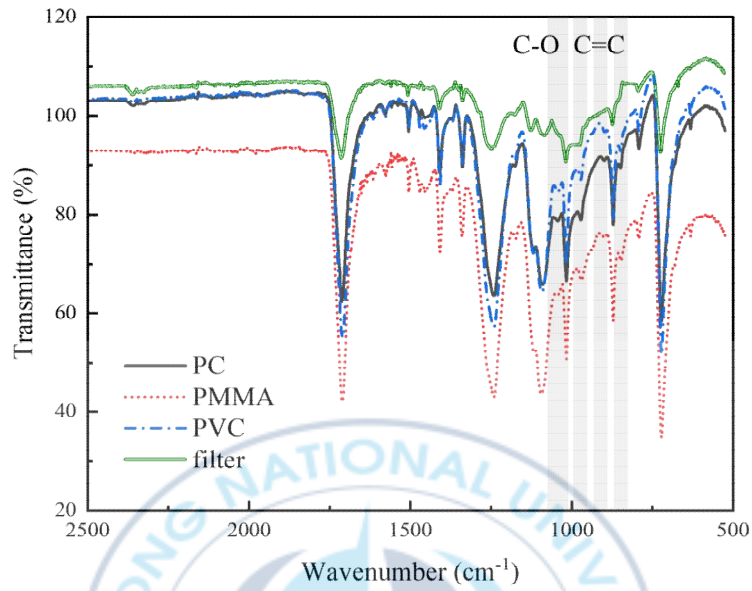
Sample	PMMA					
	Mode particle diameter (nm)			Particle diameter with the maximum increase rate in number concentration (nm)		
Time (s)	20 kW/m ²	30 kW/m ²	40 kW/m ²	20 kW/m ²	30 kW/m ²	40 kW/m ²
232	-	10.5	10.5	-	-	-
464	-	10.5	125.0	-	12.5	225
696	-	10.5	225.0	-	17.5	450
928	10.5	225.0	175.0	22.5	275.0	1000
1160	10.5	225.0	650.0	22.5	850.0	-
1392	10.5	225.0	650.0	27.5	-	-
1624	17.5	650.0	650.0	45.0	-	-
1856	17.5	650.0	300.2	35.0	-	-

Table 3.6 Time-resolved mode particle diameter and particle diameter with maximum number growth rate for PVC

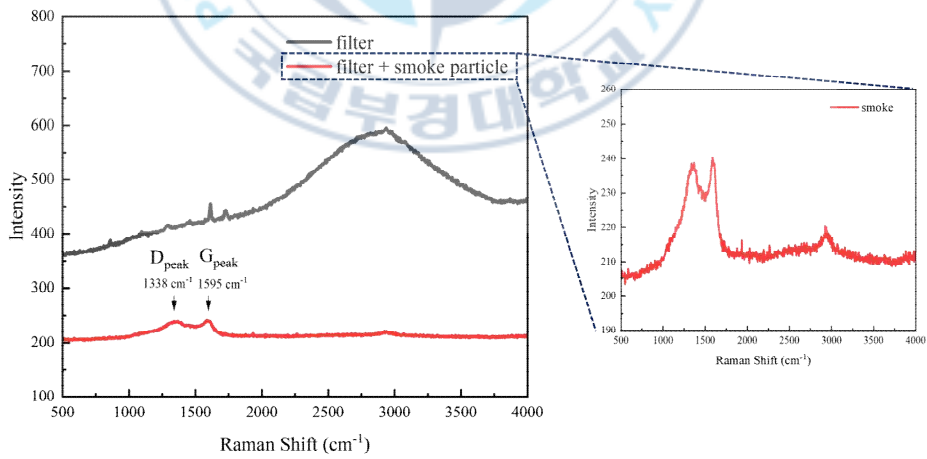
Sample	PVC							
	Mode particle diameter (nm)				Particle diameter with the maximum increase rate in number concentration (nm)			
Time (s)	20 kW/m ²	30 kW/m ²		40 kW/m ²		20 kW/m ²	30 kW/m ²	40 kW/m ²
232	10.5	17.5		10.5	27.5	-	-	-
464	10.5	45.0		10.5	55.0	17.5	55.0	95.0
696	35.0	10.5	55.0	17.5	55.0	45.0	95.0	225.0
928	45.0	10.5	45.0	22.5	85.0	85.0	225.0	275.0
1160	45.0	12.5	55.0	27.5	95.0	95.0	175.0	275.0
1392	27.5	17.5	55.0	27.5	95.0	125.0	225.0	550.0
1624	27.5	17.5	65.0	27.5	85.0	125.0	275.0	550.0
1856	45.0	17.5	65.0	35.0	95.0	175.0	350.0	550.0

Table 3.7 Ratio of total particle number and size-weighted particle number increase to specific optical density increase under 40 kW/m²

Condition Sample	40 kW/m ²					
	PC		PMMA		PVC	
Time (s)	$\frac{\Delta N}{\Delta D_s}$	$\frac{\Delta ND_p^2}{\Delta D_s}$	$\frac{\Delta N}{\Delta D_s}$	$\frac{\Delta ND_p^2}{\Delta D_s}$	$\frac{\Delta N}{\Delta D_s}$	$\frac{\Delta ND_p^2}{\Delta D_s}$
232 to 464	2.17	0.96	1.43	1.08	1.11	2.68
464 to 696	0.80	0.59	0.71	5.24	0.80	1.01
696 to 928	0.94	1.17	0.94	1.15	0.80	1.20
928 to 1160	0.95	0.67	0.24	0.50	0.76	1.03
1160 to 1392	0.97	1.06	0.68	0.50	0.83	1.13
1392 to 1624	1.01	1.06	0.74	0.67	1.04	1.18
1624 to 1856	0.80	0.94	0.82	0.75	0.97	1.18



(a) IR spectra of smoke particles generated from PC, PMMA, and PVC



(b) Raman spectrum of PMMA smoke particles

Figure 3.17 IR spectra of smoke particles generated from PC, PMMA, and PVC, and Raman spectrum of PMMA-derived smoke particles.

제 4 장 결 론

본 연구에서는 연소 조건에 따라 생성된 연기입자의 광학적 특성 변화를 분석하고, 입자 크기별 광소멸 특성을 정량적으로 평가하고자 하였다. 이를 위해 폴리스타이렌 입자(PSL)와 실제 화재 조건에서 발생한 연기입자를 대상으로 실험을 수행하였으며, 입자 크기 분포와 광투과율 데이터를 기반으로 광소멸 기여도를 비교 분석하였다. 본 연구를 기반으로 도출한 결과를 아래에 요약하였다.

- (1) 폴리스타이렌 입자 실험에서, 입경이 증가할수록 광투과율은 낮아졌으며, 이에 따라 소멸량은 뚜렷이 증가했다. 이 결과는 입자 크기에 따른 광소멸 기여를 정량화할 수 있는 기준값으로 활용 가능하다.
- (2) 연기입자의 분포는 복사열 강도(20, 30, 40 kW/m²)와 가연물 종류(PC, PMMA, PVC)에 의해 달라지며 시간에 따라 변화하였다. 연소가 진행될수록 평균 입경이 커졌고, 높은 복사열 조건에서는 입자 응집과 성장 속도도 함께 증가했다.
- (3) 입자 개수 증가가 두드러지는 크기 영역은 시간이 지남에 따라 더 큰 범위로 이동하였다. 특히 개수 증가율이 가장 큰 영역이 최대 분포보다 크게 나타나며, 이는 입자 성장이 활발하게 일어나는 크기 범위가 확장되고 있음을 의미한다.
- (4) 연소로 생성된 연기입자 크기가 증가할수록 특정 광학 밀도의 증가하는 양상이 나타났으며, 이에 따라 광소멸도 복사열 세기에 따라 비선형적으로 증가하였다.
- (5) 연기입자 크기별 광소멸 기여도 분석 결과, 입자 크기가 증가할수록 광소멸 기여도가 전반적으로 높아지는 경향을 보였으나, 450 nm 이상의 대형 입자에서는 광소멸 기여가 과대평가되는 현상이 나타났다. 특히 PMMA와 PVC는 대형 입자 수가 증가하면서 입자 크기를 반영한 지표 증가율이 특정 광학 밀도

증가율을 초과하였으며, 이는 단순한 크기 기반 해석의 한계를 시사한다.

본 논문은 연기입자의 광소멸 특성을 정량적으로 해석하기 위한 기초 연구로, 입자 크기별 분포와 광소멸 기여도의 상관성을 실험적으로 도출하였다. 실험을 통해 광소멸에 영향을 미치는 주요 입자 크기 영역과 그 한계 조건을 규명하였으며 향후 시뮬레이션 모델에서 보다 정밀한 광소멸 해석을 위해 입자 크기 기반의 보정 접근이 필요함을 제안하였다.



Reference

1. National Fire Information System and National Fire Agency, "Status of Casualties". (2013-2022).
2. J. Tissot, M. Talbaut, J. Yon, A. Coppalle and A. Bescond, "Spectral Study of the Smoke Optical Density in Non-flaming Condition", *Procedia Engineering*, Vol. 62, pp. 821-828 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.131>.
3. J. S. You, K. S. Kang, J. S. Lee and Y. J. Chung, "Evaluation of the Smoke Characteristics of Some Plastics in an Enclosed Compartment", *Applied Chemistry for Engineering*, Vol. 34, No. 4, pp. 421-425 (2023). <https://doi.org/10.14478/ace.2023.1056>.
4. J. H. Goo, "Measurement of the Size Distribution of Smoke Particles through Direct Sampling at the Exit of a Steady-State Tube Furnace", *Fire Science and Engineering*, Vol. 37, No. 6, pp. 126-135 (2023). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.55e94972>.
5. C. H. Keith and J. C. Derrick, "Measurement of the Particle Size Distribution and Concentration of Cigarette Smoke by the Conifuge", *Journal of Colloid Science*, Vol. 15, No. 4, pp. 340-356 (1960). [https://doi.org/10.1016/0095-8522\(60\)90037-4](https://doi.org/10.1016/0095-8522(60)90037-4).
6. B. G. Mustafa, M. H. Mat Kiah, G. E. Andrews, H. N. Phylaktou and H. Li, "Smoke Particle Size Distribution in Pine Wood Fires", *Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards*, Vol. 2, pp. 930-939 (2019). <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/k19-52>.
7. E. M. Patterson, R. M. Duckworth, C. M. Wyman, E. A. Powell and J. W. Gooch, "Measurements of the Optical Properties of the Smoke Emissions from Plastics, Hydrocarbons, and Other Urban Fuels for Nuclear Winter Studies", *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, Vol. 25, No. 11, pp. 2539-2552 (1991). [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(91\)90171-3](https://doi.org/10.1016/0960-1686(91)90171-3).
8. R. W. Ricci, M. Ditzler and L. P. Nestor, "Discovering the Beer-Lambert Law", *Journal of Chemical Education*, Vol. 71, No. 11, p. 983 (1994). <https://doi.org/10.1021/ed071p983>.
9. G. Mie, "Beiträge Zur Optik Trüber Medien, Speziell Kolloidaler Metallösungen", *Annalen der Physik*, Vol. 330, No. 3, pp. 377-445 (1908). <https://doi.org/10.1002/andp.19083300302>.
10. J. W. Rayleigh, "On the Light from the Sky, its Polarization and Colour", *Philosophical Magazine, Series 4*, Vol. 41, No. 271, pp. 107-120 (1871)
11. N. Bukowiecki, D. B. Kittelson, W. F. Watts, H. Burtscher and E. Weingartner, "Real-time Characterization of Ultrafine and Accumulation Mode Particles in

- Ambient Combustion Aerosols”, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 33, No. 8, pp. 1139-1154 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(02\)00063-0](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(02)00063-0).
12. U. Kreibig, H. Bönnemann and J. Hormes, “Nanostructured Metal Clusters and Colloids, *Handbook of Surfaces and Interfaces of Materials*”, *Handbooks of Surfaces and Interfaces of Materials*, Vol. 3, pp. 1-85 (2001).
 13. S. K. Friedlander, “Smoke, Dust and Haze: Fundamentals of Aerosol Dynamics”, Oxford University Press, Oxford (2000).
 14. C. Ning, Y. Gao, H. Zhang, H. Yu, R. Cao and J. Chen, “Urban Particulate Water-soluble Organic Matter in Winter: Size-resolved Molecular Characterization, Role of the Scontaining Compounds on Haze Formation”, *Science of the Total Environment*, Vol. 875, p. 162657 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162657>.
 15. National Institute of Standards and Technology (NIST), “ISO 5659-2: Plastics - Smoke Generation - Part 2: Determination of Optical Density by a Single-chamber Test” (2017).
 16. M. E. Meyer, “Particle Morphology and Elemental Composition of Smoke Generated by Overheating Common Spacecraft Materials”, NASA Technical Memorandum (2015).
 17. J. C. Woo, “Uncertainty in Measurements and Analysis (I)”, *Analytical Science and Technology*, Vol. 13, No. 2, pp 18-26 (2000)
 18. J. S. Park, “Control of the Size and the Shape of Gold Nanoparticles Using Pulsed Lasers and Applications to SERS”, Master’s Thesis, Dankook University, Department of Chemistry and Molecular Science, Korea (2009).
 19. G. M. Hidy, J. L. Katz and P. Mirabel, “Sulfate Aerosol Formation and Growth in the Stratosphere”, *Atmospheric Environment*, Vol. 12, No. 4, pp. 887-892 (1978). [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(78\)90027-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(78)90027-6).
 20. W. K. Smith and J. B. King, “Surface Temperature of Materials During Radiant Heating to Ignition”, *Journal of Fire and Flammability*, Vol. 1, p. 272 (1970).
 21. J. Gregor, “Chapter 3 - Floc Formation and Floc Structure”, *Interface Science and Technology*, Vol. 10, pp. 25-43 (2006). [https://doi.org/10.1016/S1573-4285\(06\)80072-4](https://doi.org/10.1016/S1573-4285(06)80072-4)
 22. A. Davis and J. H. Golden, “Stability of Polycarbonate”, *Journal of Macromolecular Science, Part C*, Vol. 3, No. 1, pp. 49-68 (1969). <https://doi.org/10.1080/15583726908545896>
 23. A. Marongiu, T. Faravelli, G. Bozzano, M. Dente and E. Ranzi, “Thermal degradation of poly(vinyl chloride)”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 70, No. 2, pp. 519-553 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(03\)00024-X](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(03)00024-X)

24. W. R. Zeng, S. F. Li and W. K. Chow, "Review on Chemical Reactions of Burning Poly (Methyl Methacrylate) PMMA", *Journal of Fire Sciences*, Vol. 20, No. 5, pp. 349-433 (2002). <https://doi.org/10.1177/0734904102020005482>.
25. W. Kalasee and P. Dangwilailux, "Smoke Particle, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Total Benzo[a]pyrene Toxic Equivalence Emitted by Palm Oil Sewage Sludge Bio-Char Combustion", *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 18, p. 8339 (2021). <https://doi.org/10.3390/app11188339>.
26. D. Vollath, F. D. Fischer and D. Holec, "Surface Energy of Nanoparticles - Influence of Particle Size and Structure", *Beilstein Journal of Nanotechnology*, Vol. 9, pp. 2265-2276 (2018). <https://doi.org/10.3762/bjnano.9.211>.
27. A. Marongiu, T. Faravelli, G. Bozzano, M. Dente and E. Ranzi, "Thermal degradation of poly(vinyl chloride)", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 70, Issue 2, pp. 519-553 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(03\)00024-X](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(03)00024-X)
28. S. S. Gunthe, P. Liu, U. Panda, S. S. Raj, A. Sharma, E. Darbyshire, E. Reyes-Villegas, J. Allan, Y. Chen, X. Wang, S. Song, M. L. Pöhlker, L. Shi, Y. Wang, S. M. Kommula, T. Liu, R. Ravikrishna, G. McFiggans, L. J. Mickley, S. T. Martin, U. Pöschl, M. O. Andreae and H. Coe, "Enhanced aerosol particle growth sustained by high continental chlorine emission in India", *Nature Geoscience*, Vol. 16, pp. 108-116 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41561-020-00677-x>.
29. J. Surakka and T. Raunemaa, "PVC-Smoke and Hygroscopic CSI Aerosol at 50 to 99% Humidity", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 22, Suppl. 1, pp. S845-S848 (1991). [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(05\)80231-9](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(05)80231-9).
30. Y. Wang, P. Hu, J. Yang, Y.-A. Zhu and D. Chen, "C-H bond activation in light alkanes: a theoretical perspective", *Chemical Society Reviews*, Vol. 50, pp. 4299-4351 (2021). <https://doi.org/10.1039/d0cs01262a>
31. Y. Chen, S. Lee, A. Tahmasebi, M. Liu, T. Zhang, J. Bai, L. Tian and J. Yu, "Mechanism of carbon structure transformation in plastic layer and semi-coke during coking of Australian metallurgical coals", *Fuel*, Vol. 315, Article 123205 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123205>
32. A. Sadezky, H. Muckenhuber, H. Grothe, R. Niessner and U. Pöschl, "Raman microspectroscopy of soot and related carbonaceous materials: Spectral analysis and structural information", *Carbon*, Vol. 43, No. 8, pp. 1731-1742 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.02.018>.
33. J. C. Corbin, T. J. Johnson, F. Liu, T. A. Sipkens, M. P. Johnson, P. Lobo and G. J. Smallwood, "Size-dependent mass absorption cross-section of soot particles from various sources", *Carbon*, Vol. 192, pp. 438-451 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.02.037>

34. D. Li, H. Song, X. Meng, T. Shen, J. Sun, W. Han and X. Wang, “Effects of particle size on the structure and photocatalytic performance by alkali-treated TiO₂”, *Nanomaterials* (Basel), Vol. 10, No. 3, Article 546 (2020). <https://doi.org/10.3390/nano10030546>.



Appendix

연기입자의 성장 활성 구간을 도출하기 위해 입자 크기별 시간에 따른 입자 개수 증가율을 분석하였다. 최대 입자 개수가 나타난 크기보다, 입자 개수가 유의미하게 증가한 크기 범위는 더 넓고 큰 구간에서 분포하였다. PC, PMMA, PVC에 대해 복사열 조건별로 시간에 따른 입자 크기별 개수 증가율을 비교하였으며, 이를 Appendix의 Tables A.1 - A.9에 정리하였다. 해당 표에서는 복사열 조건 변화에 따른 성장 활성 구간의 시차 및 크기 범위 분포 특성을 확인할 수 있다.



Table A.1 Increase rate of PC particle number over time for each particle size range under 20 kW/m²

Sample	PC						
	Increase rate in number concentration						
Time (s)	232 to 464	464 to 696	696 to 928	928 to 1160	1160 to 1392	1392 to 1624	1624 to 1856
10.5	2.908	0.575	2.811	-0.188	-0.131	0.300	-0.301
12.5	3.637	0.726	1.607	0.525	0.294	-0.267	0.092
17.5	-0.398	4.037	2.813	1.406	0.628	0.339	0.239
22.5	-0.223	-0.302	1.012	1.423	2.159	0.701	0.740
27.5	-0.176	0.390	-0.131	-0.053	0.397	0.738	3.488
35	-0.049	0.325	-0.187	-0.072	0.491	0.307	1.297
45	0.076	0.094	0.035	0.141	-0.323	0.363	0.176
55	-0.104	-0.074	0.190	-0.425	0.065	0.626	0.078
65	0.181	-0.663	1.346	-0.503	2.121	-0.628	-0.168
75	-0.219	0.071	-0.336	0.214	1.036	-0.193	-0.463
85	-0.060	-0.132	0.422	-0.599	-0.112	0.317	0.427
95	-0.147	0.562	-0.294	-0.313	-0.111	0.702	-0.298
125	-0.076	0.273	-0.298	-0.360	0.578	0.362	-0.192
175	-0.217	-0.030	-0.039	0.083	0.224	-0.200	-0.105
225	-0.175	0.166	-0.035	-0.017	0.188	-0.173	-0.048
275	0.447	-0.389	0.368	-0.671	1.256	0.448	0.027
350	1.799	0.285	-0.324	-0.404	0.052	0.119	-0.646
450	0.463	-0.143	0.150	1.899	-0.916	2.355	-0.119
550	-	-	-	-	-	-	-
650	-	-	-	-	-	-	-
750	-	-	-	-	-	-	-
850	-	-	-	-	-	-	-
950	-	-	-	-	-	-	-
1000	-	-	-	-	-	-	-

Table A.2 Increase rate of PC particle number over time for each particle size range under 30 kW/m²

Sample	PC						
	Increase rate in number concentration						
Time (s)	232 to 464	464 to 696	696 to 928	928 to 1160	1160 to 1392	1392 to 1624	1624 to 1856
10.5	5.577	0.532	-0.022	-0.204	0.368	0.005	-0.416
12.5	17.633	0.963	0.098	-0.303	0.342	0.141	-0.184
17.5	9.146	5.620	0.508	-0.148	-0.066	0.086	0.148
22.5	0.363	8.606	3.023	0.158	-0.044	0.119	-0.067
27.5	-0.129	3.052	4.308	1.015	0.386	-0.043	0.008
35	0.254	0.311	2.939	3.354	0.745	0.223	0.045
45	-0.161	-0.098	3.140	1.672	2.096	0.283	0.334
55	-0.229	-0.006	1.200	1.263	1.223	0.670	0.499
65	0.066	-0.271	0.530	0.917	1.539	0.431	0.512
75	0.234	-0.286	1.019	0.367	1.252	0.423	0.155
85	-0.214	0.801	-0.361	0.614	1.734	0.017	0.234
95	0.891	-0.044	0.727	0.166	-0.061	1.041	0.161
125	0.493	-0.136	0.049	-0.011	1.148	-0.148	0.184
175	-0.410	-0.141	1.309	-0.402	0.766	-0.086	0.133
225	-0.138	0.502	-0.164	-0.157	-0.092	0.273	-0.518
275	-0.439	0.008	-0.098	0.408	-0.085	0.320	-0.128
350	-0.389	-0.031	0.249	0.639	-0.146	0.313	0.077
450	-0.708	1.575	-0.510	-0.289	-0.157	0.970	1.269
550	-	-	-	-	-	-	-
650	-	-	-	-	-	-	-
750	-	-	-	-	-	-	-
850	-	-	-	-	-	-	-
950	-	-	-	-	-	-	-
1000	-	-	-	-	-	-	-

Table A.3 Increase rate of PC particle number over time for each particle size range under 40 kW/m²

Sample	PC						
	Increase rate in number concentration						
Time (s)	232 to 464	464 to 696	696 to 928	928 to 1160	1160 to 1392	1392 to 1624	1624 to 1856
10.5	1.674	0.160	0.182	0.245	-0.221	0.552	-0.719
12.5	1.509	0.112	0.225	0.012	0.161	0.193	-0.310
17.5	11.494	0.166	0.060	0.153	0.075	0.079	0.036
22.5	18.319	1.174	-0.037	0.075	0.170	0.025	0.003
27.5	7.461	6.333	0.410	-0.015	0.114	0.043	0.018
35	1.965	10.404	1.247	0.219	0.133	0.103	0.006
45	0.627	8.483	1.556	0.957	0.319	0.039	0.047
55	-0.457	6.279	2.012	0.886	0.513	0.204	0.060
65	-0.527	3.528	2.308	0.810	0.739	0.308	0.167
75	0.245	1.506	2.301	0.746	0.547	0.516	0.345
85	-0.233	0.535	2.040	0.973	0.616	0.459	0.396
95	0.682	0.203	0.724	1.155	0.425	0.626	0.300
125	0.342	-0.122	0.910	1.112	0.455	0.564	0.268
175	-0.565	1.623	0.354	0.196	0.921	0.251	0.480
225	-0.603	1.682	0.020	-0.178	0.017	2.324	0.327
275	-0.278	0.977	-0.610	0.101	-0.639	8.253	-0.213
350	-0.039	-0.441	-0.658	5.609	-0.883	15.556	0.362
450	-0.534	-0.836	8.431	-0.564	3.118	-0.400	3.161
550	-	-	-	-	-	-	-
650	-	-	-	-	-	-	-
750	-	-	-	-	-	-	-
850	-	-	-	-	-	-	-
950	-	-	-	-	-	-	-
1000	-	-	-	-	-	-	-

Table A.4 Increase rate of PMMA particle number over time for each particle size range under 20 kW/m²

Sample	PMMA						
	Increase rate in number concentration						
Time (s)	232 to 464	464 to 696	696 to 928	928 to 1160	1160 to 1392	1392 to 1624	1624 to 1856
10.5	-	-	4.530	-0.230	0.207	-0.124	0.060
12.5	-	42.280	2.142	0.212	0.234	0.160	-0.257
17.5	1.157	6.478	3.427	1.122	0.342	0.734	0.200
22.5	-0.718	1.873	5.409	1.844	1.158	1.019	0.321
27.5	-0.876	8.816	0.146	0.504	6.616	1.025	0.525
35	0.091	0.755	3.145	0.066	0.082	0.695	1.551
45	-0.201	0.085	6.529	-0.594	-0.557	2.360	0.452
55	0.746	-0.224	-0.017	2.780	-0.417	1.270	-0.563
65	1.868	0.612	-0.790	5.051	-0.574	1.183	-0.772
75	0.598	6.891	-0.581	-0.115	-0.227	4.087	-0.353
85	0.963	0.934	0.221	-0.275	-0.336	3.017	-0.493
95	0.147	1.751	0.151	-0.599	1.863	0.628	-0.627
125	0.385	0.071	0.351	-0.169	-0.156	1.474	-0.818
175	1.519	-0.499	-0.303	1.797	-0.343	1.585	-0.557
225	2.666	-0.978	51.346	0.375	-0.817	-0.250	3.566
275	-0.413	1.123	-0.277	-0.848	3.052	1.043	-0.994
350	-	-	-	-	-	0.252	0.860
450	-	-	-	-	-	-0.400	3.161
550	-	-	-	-	-	-	-
650	-	-	-	-	-	-	-
750	-	-	-	-	-	-	-
850	-	-	-	-	-	-	-
950	-	-	-	-	-	-	-
1000	-	-	-	-	-	-	-

Table A.5 Increase rate of PMMA particle number over time for each particle size range under 30 kW/m²

Sample	PMMA						
	Increase rate in number concentration						
Time (s)	232 to 464	464 to 696	696 to 928	928 to 1160	1160 to 1392	1392 to 1624	1624 to 1856
10.5	4.530	1.813	-0.984	6.211	-0.713	-1.000	-
12.5	8.225	2.665	-0.973	0.069	-0.126	-0.029	0.778
17.5	2.843	4.122	-0.915	0.069	0.043	0.806	-0.241
22.5	1.277	2.603	-0.583	-0.453	0.229	-0.070	-0.063
27.5	0.064	1.111	-0.031	0.170	-0.520	-0.100	0.095
35	-0.122	0.265	1.855	0.105	-0.616	-0.080	0.095
45	0.004	-0.088	3.281	0.182	-0.702	-0.161	0.207
55	0.176	-0.055	7.023	0.044	-0.682	-0.212	-0.124
65	-0.218	2.587	41.346	0.120	-0.789	-0.419	-0.291
75	0.215	-0.093	13.791	0.154	-0.832	-0.228	-0.072
85	0.590	-0.325	25.913	0.101	-0.895	-0.129	-0.142
95	-0.009	0.038	29.081	-0.099	-0.932	0.330	-0.195
125	0.081	-0.006	64.984	-0.059	-0.945	0.166	-0.253
175	-0.354	0.278	218.51	-0.177	-0.822	-0.632	-0.449
225	0.461	-0.080	631.60	-0.290	-0.795	-0.738	-0.373
275	0.811	-0.616	1551.6	-0.393	-0.771	-0.723	-0.318
350	2.180	0.184	899.12	-0.303	-0.776	-0.542	-0.400
450	-0.373	0.805	1293.5	-0.033	-0.698	-0.479	-0.494
550	-0.344	-0.060	452.92	0.382	-0.645	-0.431	-0.438
650	0.223	0.789	275.91	0.957	-0.510	-0.415	-0.435
750	0.067	-0.466	193.65	1.668	-0.470	-0.388	-0.437
850	0.177	-0.251	146.71	2.613	-0.429	-0.349	-0.415
950	-0.005	-0.765	451.08	2.477	-0.318	-0.360	-0.391
1000	0.462	-0.770	350.5	2.240	-0.227	-0.367	-0.351

Table A.6 Increase rate of PMMA particle number over time for each particle size range under 40 kW/m²

Sample	PMMA						
	Increase rate in number concentration						
Time (s)	232 to 464	464 to 696	696 to 928	928 to 1160	1160 to 1392	1392 to 1624	1624 to 1856
10.5	-0.975	2.241	0.287	1.627	-0.591	1.508	-0.750
12.5	-0.657	-0.521	0.336	0.328	-0.374	0.705	-0.344
17.5	0.316	0.080	-0.284	-0.038	0.077	0.195	0.207
22.5	0.581	-0.257	-0.116	0.043	0.072	-0.169	0.268
27.5	2.263	-0.323	-0.135	-0.566	0.606	-0.184	0.824
35	2.209	-0.254	0.178	-0.684	0.153	-0.143	0.359
45	6.078	-0.335	0.158	-0.729	0.366	-0.417	0.174
55	11.474	-0.367	0.246	-0.795	0.005	-0.264	-0.002
65	49.929	-0.430	0.034	-0.878	-0.106	-0.107	0.168
75	26.260	-0.349	0.423	-0.902	0.190	-0.333	0.059
85	54.023	-0.471	0.078	-0.918	0.237	-0.386	-0.011
95	97.295	-0.600	0.046	-0.925	0.011	-0.310	0.096
125	335.95	-0.646	-0.150	-0.901	-0.494	-0.038	-0.109
175	419.86	-0.355	-0.270	-0.911	-0.280	-0.336	-0.300
225	440.44	0.773	-0.386	-0.921	0.124	-0.393	-0.294
275	260.31	8.280	-0.415	-0.914	-0.002	-0.420	-0.381
350	1.069	554.06	-0.443	-0.849	-0.211	-0.283	-0.346
450	-0.806	6972.3	-0.402	-0.760	-0.218	-0.391	-0.313
550	0.076	1013.6	-0.339	-0.639	-0.388	-0.307	-0.424
650	1.019	380.74	-0.124	-0.508	-0.519	-0.251	-0.356
750	-0.171	319.34	-0.092	-0.401	-0.600	-0.268	-0.394
850	-0.440	328.59	0.240	-0.376	-0.597	-0.350	-0.352
950	-0.365	129.36	0.683	-0.380	-0.591	-0.489	-0.258
1000	0.186	45.069	1.479	-0.396	-0.569	-0.536	0.108

Table A.7 Increase rate of PVC particle number over time for each particle size range under 20 kW/m²

Sample	PVC						
	Increase rate in number concentration						
Time (s)	232 to 464	464 to 696	696 to 928	928 to 1160	1160 to 1392	1392 to 1624	1624 to 1856
10.5	31.382	-0.575	-0.005	-0.498	-0.081	0.195	-0.096
12.5	53.553	-0.533	-0.221	-0.330	0.580	0.117	-0.275
17.5	158.73	-0.529	-0.413	0.183	0.247	0.130	-0.130
22.5	145.51	-0.268	-0.443	-0.098	0.429	0.149	-0.186
27.5	55.726	0.216	-0.523	-0.032	0.467	0.176	-0.240
35	21.326	2.788	-0.478	-0.116	0.097	0.381	-0.131
45	8.981	7.728	-0.174	-0.201	-0.084	0.310	0.017
55	4.195	7.574	0.339	-0.200	-0.083	0.078	0.090
65	0.536	6.454	1.199	0.024	-0.159	-0.030	0.155
75	2.298	3.442	1.876	0.216	0.021	-0.058	0.064
85	-0.076	5.487	2.279	0.338	0.115	0.081	0.010
95	0.193	2.110	1.952	0.653	0.288	0.236	-0.024
125	-0.120	1.499	0.941	0.645	0.679	0.436	0.193
175	-0.035	0.853	-0.242	0.482	0.325	0.318	0.990
225	0.075	-0.213	-0.074	0.128	-0.191	1.154	-0.021
275	1.386	-0.018	-0.001	-0.369	-0.294	0.399	-0.268
350	2.180	-0.473	-0.003	0.169	0.297	-0.469	0.087
450	-0.530	-0.329	1.153	0.328	-0.123	-0.487	0.284
550	-	-	-	-	-	-	-
650	-	-	-	-	-	-	-
750	-	-	-	-	-	-	-
850	-	-	-	-	-	-	-
950	-	-	-	-	-	-	-
1000	-	-	-	-	-	-	-

Table A.8 Increase rate of PVC particle number over time for each particle size range under 30 kW/m²

Sample	PVC						
	Increase rate in number concentration						
Time (s)	232 to 464	464 to 696	696 to 928	928 to 1160	1160 to 1392	1392 to 1624	1624 to 1856
10.5	-0.623	1.504	0.328	0.054	-0.212	-0.184	-0.501
12.5	-0.596	1.331	0.417	0.264	-0.140	-0.066	-0.307
17.5	-0.684	0.638	0.514	0.407	0.161	-0.008	0.000
22.5	-0.455	0.090	0.337	0.297	0.094	0.186	0.132
27.5	0.712	-0.105	-0.012	0.098	-0.024	0.091	0.163
35	11.002	-0.203	-0.091	-0.037	-0.014	0.065	0.058
45	55.063	-0.176	-0.123	-0.035	-0.011	0.037	0.094
55	62.199	0.173	-0.195	0.011	0.019	0.052	0.213
65	50.691	0.705	-0.173	-0.015	-0.031	0.194	0.201
75	21.970	1.526	0.030	0.018	-0.079	0.207	0.145
85	9.001	3.271	0.161	-0.039	0.022	0.234	0.113
95	5.278	3.594	0.701	0.109	-0.017	0.150	0.182
125	3.706	3.186	1.272	0.435	0.191	0.149	0.137
175	-0.274	2.221	1.323	2.217	0.743	0.620	0.193
225	-0.612	0.260	1.912	1.573	0.996	1.918	0.513
275	-0.013	-0.467	1.405	0.280	0.956	1.987	1.496
350	0.669	0.016	0.925	-0.488	1.046	-0.152	4.054
450	-	-0.195	1.137	-0.313	1.239	-0.290	-0.049
550	-	-	-	-	-	-	-
650	-	-	-	-	-	-	-
750	-	-	-	-	-	-	-
850	-	-	-	-	-	-	-
950	-	-	-	-	-	-	-
1000	-	-	-	-	-	-	-

Table A.9 Increase rate of PVC particle number over time for each particle size range under 40 kW/m²

Sample	PVC						
	Increase rate in number concentration						
Time (s)	232 to 464	464 to 696	696 to 928	928 to 1160	1160 to 1392	1392 to 1624	1624 to 1856
10.5	1.298	-0.146	-0.606	-0.470	-0.609	1.180	-1.000
12.5	1.788	0.035	-0.522	-0.418	-0.440	-0.197	-0.295
17.5	1.075	0.623	-0.251	-0.370	-0.150	-0.358	-0.262
22.5	0.082	0.707	0.150	-0.151	-0.169	-0.113	-0.122
27.5	-0.133	0.160	0.327	0.117	-0.036	0.035	-0.141
35	0.108	0.048	-0.056	0.056	0.081	0.429	-0.054
45	1.548	-0.090	-0.097	-0.267	0.067	0.313	0.156
55	4.241	-0.090	-0.068	-0.131	-0.108	0.318	0.019
65	10.303	-0.014	0.120	-0.124	-0.015	0.228	-0.052
75	22.760	0.149	0.285	-0.171	-0.024	0.330	0.028
85	55.920	0.355	0.297	-0.091	-0.074	0.333	-0.010
95	72.418	0.974	0.120	0.080	-0.009	0.025	0.229
125	39.836	2.085	0.469	0.132	0.027	-0.102	0.295
175	5.036	2.176	2.138	0.373	0.134	-0.065	-0.052
225	6.762	2.630	3.711	1.271	0.462	0.150	0.052
275	1.917	0.450	6.400	2.761	1.753	0.426	0.110
350	-	-	4.423	1.084	6.416	1.444	0.522
450	-	-	-	0.013	4.516	2.306	1.474
550	-	-	-	-	7.820	10.776	2.083
650	-	-	-	-	-	-	-
750	-	-	-	-	-	-	-
850	-	-	-	-	-	-	-
950	-	-	-	-	-	-	-
1000	-	-	-	-	-	-	-