

밀폐된 구획 내 일부 플라스틱류의 연기 특성 평가

유지선 · 강경신 · 이재승* · 정영진**,†

한국건설기술연구원 화재안전연구소, *한남대학교 건축공학과, **국가안전환경원
(2023년 6월 13일 접수, 2023년 7월 1일 수정, 2023년 7월 2일 채택)

Evaluation of the Smoke Characteristics of Some Plastics in an Enclosed Compartment

Ji-Sun You, Kyeong-Sin Kang, Jae-Sung Lee* and Yeong-Jin Chung**,†

Department of Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology Fire Researcher Center, Hwaseong 18544, Korea

*Department of Architectural Engineering, Hannam University, Daejeon 34430, Korea

**The National Safety Environment Institute, Seoul 05836, Korea

(Received June 13, 2023; Revised July 1, 2023; Accepted July 2, 2023)

초 록

Polymethyl methacrylate (PMMA), polycarbonate (PC), polyvinyl chloride (PVC), 그리고 polyacetal을 포함하는 일부 플라스틱류에 대한 연기특성을 조사하였다. 연기밀도는 ISO 5659-2의 기준에 의해 연기밀도시험기를 이용하여 정적인 연기 특성의 관련 값을 측정하였다. 또한 불꽃을 동반하는 연소와 불꽃을 동반하지 않는 연소를 구분하여 측정하였다. 불꽃방식의 복사열 50 kW/m²의 조건하에서 연기의 최대비광학밀도(D_m) 측정값은 PMMA (401.26)가 최저로, PVC (1345.04)가 최대로 나타났다. 또한 비불꽃방식의 복사열 50 kW/m²의 조건하에서 연기의 D_m 측정값은 PMMA (262.82)가 최저로, PVC (1385.43)가 최대로 나타났다. 대상물의 연소 시 연기발생은 복사열 유속의 영향을 상당히 받으며, 탄화성 플라스틱은 연소 시 비탄화성 플라스틱보다 높은 연기 발생량을 나타내었다. 주 고분자 사슬에 방향족 그룹이 있는 폴리머는 열분해로 인해 다량의 숯이 생성되므로 다량의 연기를 발생시켰다.

Abstract

The smoke properties of some plastics were investigated, including polymethyl methacrylate (PMMA), polycarbonate (PC), polyvinyl chloride (PVC), and polyacetal. For smoke density, related values of static smoke characteristics were measured using a smoke density tester according to ISO 5659-2. In addition, combustion with and without flame was measured independently. Under the condition of radiant heat of 50 kW/m² using the flame method, the measured value of the maximum specific optical density (D_m) of smoke showed the lowest value for PMMA (401.26) and the highest value for PVC (1345.04). In addition, PMMA (262.82) was the lowest and PVC (1385.43) was the highest in the measured D_m of smoke under the condition of radiant heat of 50 kW/m² in the non-flame method. Smoke generation during combustion of the object is significantly affected by the radiant heat flux, and carbonizable plastics showed a higher amount of smoke than non-carbonizable plastics during combustion. Polymers with aromatic groups in the main polymer chain generated a large amount of smoke because a large amount of char was generated due to thermal decomposition.

Keywords: Smoke density, Specific optical density, Plastics, ISO 5659-2, Radiant heat

1. 서 론

고층 건축물과 집중된 인구밀도 등으로 인해 인명 및 재산피해가 높은 건축물 화재는 주요 도시재해 중 하나이다[1]. 건축물에 사용되고 있는 구조 재료로는 플라스틱, 목재, 복합 재료, 시멘트, 콘크리트, 석재 등이 있다. 그 중 플라스틱은 현대 건축 산업에서 가장 중요한 재료로[2] 사용률이 높아질수록 위험성도 높아질 수밖에 없다.

화재는 수많은 사망자를 발생시키며, 유기 고분자 물질의 연소는 빠른 화염 전파를 수반하고, 다량의 연기와 독성 가스를 생성한다[3]. 이처럼 화재 시 생성되는 연기와 독성가스는 인명피해의 주된 원인으로, 큰 비중을 차지하고 있다[4]. 그리고 사망자 및 사상자의 흡입 부상은 모든 화상 환자의 최대 1/3에서 발생하는 치명적인 부상이며 전체 사망률을 증가시키는 데 기여한다. 화상 부상에 의한 사망률보다 연기 흡입 부상에 의한 사망률이 최대 20배 높은 사망률의 증가를 초래할 수 있다. 화상 부상은 직접적으로 화재에 노출된 후에 발생하지만, 흡입 부상은 화학 물질, 연기, 가스, 증기 또는 연기에 노출될 확률이 화상 부상보다 높다. 연기 흡입은 직접적으로 열에 노출되거나, 더 일반적으로 연소 화학 물질에 노출되어 그에 따른 국소적 및 전신적 영향을 통해 폐 손상의 원인이 된다[5]. 이에 인명피해를 줄이고, 피난

† Corresponding Author: The National Safety Environment Institute
Seoul 05836, Korea
Tel: +82-33-655-9394 e-mail: yjchung@kangwon.ac.kr

시간을 확보하기 위해서는 화재 시 발생하는 연기와 유독가스에 대한 정량적 연구가 필요하다.

또한 연소 과정 동안 고분자 사슬과 첨가제 사이의 물리적 및 화학적 상호 작용으로 인해 화재 거동에 대한 예측을 어렵게 만든다[6]. 이처럼 화재 시 셀룰로오스 재료(ex. 목재)로부터 나오는 유독가스보다 플라스틱에서 방출되는 탄소, 수소 그리고 산소를 포함하고 있는 유독가스가 더 많이 발생한다고 보고하였다[7].

Sonnier 등은 연소 시 다양한 화학적 및 물리적 반응으로 인해 연소 과정의 복잡함을 보고하였다. 게다가 물질은 여러 구성 요소로 구성되어 있고, 각 구성 요소(폴리머, 유기물 또는 무기물, 불활성이나 활성 내연제)는 자체 반응속도에 따라 열분해 되고, 열분해 속도는 주로 자체의 열적 안정성이 결정한다고 보고한 바 있다[8].

이에 본 연구에서는 인명피해를 줄이고, 피난시간을 확보하기 위하여 연기의 특성에 대해 연구하고자 한다. 연기 특성을 측정하는 시험 방법은 smoke density chamber tester를 이용하는 것으로, 연기에 의해 투과된 빛의 양을 측정하는데, 광학계를 사용하여 초기 빛의 투과율로 구한다. 이때 빛이 투과하는 최소 투과율은 최대 광학 밀도를 계산하는 데 이용된다. 연기 측정의 단위로 최대 광학 밀도를 사용하는 것은 단색광 감쇠의 Beer-Bouguer-Lambert의 법칙을 기초로 한다. 이것은 환기가 되지 않는 조건에서의 화재 시 연기 발생량을 평가한다[9].

따라서 본 연구에서는 현대 건축 산업에서 가장 중요한 재료로 사용률이 높은 polymethyl methacrylate, polycarbonate, polyvinyl chloride, Polyacetal을 선정하여 ISO 5659-2의 기준에[9] 따라 연기 특성의 관련 값 등을 측정하고 평가하여 건축 및 화재설계의 기초자료로 활용하고자 하며, 건축물의 화재 시 위험성을 평가하기 위하여 불꽃을 동반하는 연소(flaming mode)와 불꽃을 동반하지 않는 연소(non-flame mode)의 연기 특성을 평가하기 위함이다.

2. 실험 방법 및 조건

2.1. 재료

본 연구에 사용된 플라스틱은 polymethyl methacrylate (PMMA), polycarbonate (PC), polyvinyl chloride (PVC), polyacetal를 한국의 ‘아크릴최가’ 회사에서 구입하여 이물질을 제거하고, 특별한 가공 없이 오븐에서 건조(25 °C로 동일하게 적용)하여 사용하였다. 본 연구에 사용된 폴리머는 원래 상업용 펠트 제품으로 일반적인 절차로 압출 및 성형 공정을 사용하여 성형하거나 시트로 주조했다. 그리고 충전제와 첨가제가 포함되지 않은 시편을 사용하였다. 각 플라스틱의 물성은 Table 1에 나타내었다[10-11].

2.2. 연기밀도 시험

연소특성 시험은 smoke density chamber tester (Fire Testing Technology)의 장비를 사용하여 ISO 5659-2의 방법에[9] 의해 열유량 (heat flux) 25 kW/m²와 50 kW/m² 조건에서 수행하였다. 시험편은 Figure 1과 같이 75 mm × 75 mm (±0.2) 크기의 규격으로 두께 10 mm로 제작하였다.

챔버 문을 닫고 밀폐시킨 후 챔버 내부 압력이 0.76 kPa가 되었을 때, 5분 동안 0.5 kPa 이하가 되지 않으면 연기가 새지 않는다고 간주하고 실험을 시작하였다. Heat flux meter를 cone heater 아래에 위치 (간격 25 mm)시키고, 온도를 조절하여 irradiance를 맞춘다. 그리고 시험편의 비노출면을 알루미늄 호일 중 반짝이지 않는 면을 안쪽으로 향하게 하여 감쌌다.

Table 1. The Glass Transition Temperature and Density Range for Each Plastic

Specimens	Glass transition temp. (T _g) (°C)	Density range (g/cm ³)
PMMA	114	1.18
PC	150	1.20~1.22
PVC	80~85	1.38~1.51
Polyacetal	-69	1.41~1.42

불꽃을 동반하는 연소(flaming mode)일 경우 불꽃 길이가 30 ± 5 mm가 되도록 하고, air (300 cm³/min)와 propane (50 cm³/min)으로 flow rate를 조절하는 별도의 과정을 수행하였다. 불꽃을 동반하지 않는 연소(non-flame mode)일 경우 불꽃 길이 조절 없이 바로 ignition 버튼을 누르고 foot switch를 눌러 실험을 시작하였다. 열유량 25 kW/m²와 50 kW/m² 조건과 불꽃을 동반하는 연소(flaming mode)와 불꽃을 동반하지 않는 연소(non-flame mode)는 총 네 가지 모드에서 시험편을 노출하는 방법으로, 시험편이 노출되는 복사광과 불꽃 유무에 따라 연기 특성이 달라지는 것을 평가하고자 하였다. 불꽃 유무는 시험편이 화재에 직접 노출되는 유무에 따라 발생하는 연기 특성을 평가하였다.

실험 시간은 10 min으로 수행하였고, transmission이 최저치에 다다르지 않았을 경우에는 10 min을 초과하여 수행하였다. 실험이 끝나면 extraction system을 가동하고 lower vent를 열고 extraction 버튼을 눌러 연기를 환기하였다. 안정화가 되면, record 버튼을 눌러 시험 결과를 기록하였다.

3. 결과 및 고찰

연기 특성은 ISO 5659-2의 기준에[9] 따라 smoke density chamber tester를 이용하여 측정하였다. 그리고 불꽃을 동반하는 연소와 불꽃을 동반하지 않는 연소를 구분하여 측정하였다.

3.1. 연기 특성

연기 특성을 고려한 시험은 smoke density chamber tester를 이용하여 측정하였다. 이 장비는 열유량 가열 방향에 따라 가열 방향이 수직인 ASTM E 662 기준과[12] 가열 방향이 수평인 ISO 5659-2 기준에[9] 구분할 수 있다. 본 연구에서는 용융되어 흐르는 플라스틱 시편 자체의 특성에 의해 수평시험 방법인 ISO 5659-2 기준을 선택하여 수행하였다.

실험이 시작된 이후부터 1.5 min, 4 min 그리고 10 min의 연기의 비광학밀도(specific optical density, D_s) 값과 연기의 최대비광학밀도(maximum specific optical density, D_m) 값을 측정하였다. 이처럼 불꽃을 동반하는 연소와 불꽃을 동반하지 않는 연소를 구분하여 측정하였고, 그 결과 불꽃 유무에 따라 연기는 서로 다른 양상을 나타내었다. 플라스틱 시험편은 일부 상황을 제외하고 불꽃을 동반하는 연소에서 연기의 양이 더 높게 발생하였다. 이것은 연소 시 연소조건이 더 용이한 것으로 판단된다.

Table 2에 나타낸 바와 같이 열유량이 25 kW/m²일 경우, 실험이 시작된 이후부터 1.5 min이 경과했을 때 PVC 2.73으로 연기가 가장 많이 발생했으며, PMMA는 4 min이 경과했을 때 87.07이고, 10 min이 지났을 경우에는 263.70으로 4 min 이후 PMMA의 연기의 밀도가 가

Table 2. The Smoke (Static) Properties for Each Plastic in Flaming Mode

Specimens	Heat flux (kW/m ²)	Flaming mode			
		D _s (1.5 min)	D _s (4 min)	D _s (10 min)	D _m
PMMA	25	0.32	87.07	263.70	264.73
PC	25	0.08	0.14	12.22	982.55
PVC	25	2.73	58.86	224.48	516.15
Polyacetal	25	0	0.71	4.09	140.86
PMMA	50	78.92	353.24	328.98	401.26
PC	50	1.25	640.25	1289.20	1289.20
PVC	50	260.47	886.71	1023.79	1345.04
Polyacetal	50	1.24	124.17	515.85	1308.81

D_m : Maximum specific optical density

장 높은 것을 알 수 있었다.

그리고 1.5~4 min 사이에서 PMMA의 D_s가 0.7~272배로 가장 많이 증가하였다. 이때 PMMA 시험편은 버블이 일어나기 시작한 것으로 보인다. 4~10 min 사이에서 PC의 D_s는 3.0~87.3배로 가장 크게 증가한 것으로 보아 연소가 촉진된 것으로 판단된다. D_m 측정값은 PC 982.55와 PVC 516.15가 가장 높게 나타났는데, 연소 후 숯과 검정색 탄화물을 형성한 시험편들이 대체적으로 연기발생이 높은 것을 알 수 있었다.

Table 2에 나타난 바와 같이 열유량이 50 kW/m²일 경우, 실험이 시작된 이후부터 PVC가 1.5 min이 경과했을 때 260.47로, 4 min이 경과했을 때 886.71로 가장 높게 나타났다. 마지막 10 min이 경과했을 때 PC는 1289.20, PVC는 1023.79로 탄화하는 플라스틱이 가장 높게 발생하였다. 그리고 1.5~4 min 사이의 D_s는 PC가 3.4~512.2배 가장 많이 증가하였다. PC는 이 구간에 숯이 많이 형성된 것으로 보인다.

D_m 측정값은 PVC 1345.04, Polyacetal 1308.81로 가장 높게 발생하였다. 여기에서 Polyacetal은 열유량이 증가함에 따라 연기밀도 발생량이 증가하는 것으로 보인다. 결론적으로 탄화하는 플라스틱의 연기밀도가 높게 발생하였다.

불꽃을 동반하지 않는 연소에서는 일정하지 않는 양상을 보였다. Table 3에 나타난 바와 같이 열유량이 25 kW/m²일 경우, PVC는 실험이 시작된 이후부터 1.5 min이 경과했을 때 2.67로 가장 높게 나타났고, 4 min이 경과했을 때 50.55로 가장 높게 발생하였다. 그리고 10 min이 경과했을 때 181.34로 높게 발생하였다. 반면 Polyacetal은 실험이 시작된 이후부터 10 min까지 6.05로 가장 낮게 발생하였다.

그리고 1.5~4 min 사이에서 Polyacetal의 연기밀도는 3.0~22.56배로 가장 많이 증가하였고, 4~10 min 사이에서 PC의 D_s가 3.0~227.8배로 가장 많이 증가하였다. PC는 불꽃 유무에 상관없이 4~10 min 사이에 연기가 가장 많이 발생한 것을 알 수 있었다. D_m 측정값은 Polyacetal 30.09로 가장 적게 발생하였고, PVC 467.42로 가장 높게 발생하였다.

Table 3에 나타난 바와 같이 열유량이 50 kW/m²일 경우, 실험이 시작된 이후부터 1.5 min이 경과했을 때 PVC의 연기밀도가 150.18로 가장 높게 발생하였고, 4 min이 경과했을 때 437.94로 가장 높게 발생했다. 이때 탄화하는 플라스틱과 비탄화 플라스틱의 연기밀도가 뚜렷하게 구분되었다. 10 min이 경과했을 때는 PVC가 1287.4로 가장 높게 발생하였다. D_m 측정값은 PVC가 1385.43으로 가장 높게 발생하였고, 그 다음으로 Polyacetal이 1301.78로 두 번째로 높게 발생하였다.

Table 3. The Smoke (Static) Properties for Each Plastic in Non-flaming Mode

Specimens	Heat flux (kW/m ²)	Non-flaming mode			
		D _s (1.5 min)	D _s (4 min)	D _s (10 min)	D _m
PMMA	25	0.13	2.38	58.80	185.45
PC	25	0.04	0.12	27.33	75.62
PVC	25	2.67	50.55	181.34	467.42
Polyacetal	25	0.09	2.03	6.05	30.09
PMMA	50	1.29	106.31	223.34	262.82
PC	50	0.08	366.10	1287.40	1287.40
PVC	50	150.18	437.94	1055.91	1385.43
Polyacetal	50	2.74	134.89	519.40	1301.78

초기 연기밀도는 불꽃을 동반하는 연소에서 열유량이 25 kW/m²일 경우, 탄화하는 플라스틱이 비탄화 플라스틱보다 높게 발생하였고, 그 중에서 PC가 연기 발생량이 가장 높았다. 열유량이 50 kW/m²일 경우, PVC가 가장 높게 발생하였고, Polyacetal이 두 번째로 높게 발생하였다. Polyacetal은 열유량에 영향을 가장 많이 받는 것으로 판단된다.

불꽃을 동반하지 않는 연소에서 열유량에 상관없이 PVC가 가장 높게 발생하였다. 열유량이 25 kW/m²일 경우, PMMA가 두 번째로 높게 나타났다. 이것은 시험편이 버블링되면서 빠르게 휘발되어 연기 발생량이 높게 나타난 것으로 보인다. 열유량이 50 kW/m²일 경우, Polyacetal이 두 번째로 높게 발생하였다. 이것은 초기 균열 발생에 대한 내성은 좋지만, 균열이 발생한 이후에 대한 내성은 낮은 것으로 판단된다. 또한 산소 함량이 약 53%로[13] 매우 높기 때문에 설명된다.

PVC는 T_g가 80~85 °C로 낮고 PVC 자체의 화학중, -Cl에 의해[14] 탄화층을 형성하면서 탄화층 표면으로 열을 축적시키지 않고, 표면에 균열을 형성하는 데[15] 더 많이 기여하여 연기밀도가 가장 높게 나타난 것으로 판단된다.

숯이 더 많이 형성될수록 가연성 휘발성 물질과 연기의 발생량이 더 많아지고, 숯은 360~520 °C의 온도에서 주로 형성된다. 온도가 높아질수록 숯은 더 많이 형성되며, 더 아로마틱해진다[16]. 주 고분자 사슬에 방향족 그룹이 있는 폴리머는 열분해로 인해 다량의 숯이 생성되므로 다량의 연기를 발생시켰다.

반면 PC는 T_g가 150 °C로 높기 때문에 난연성이 우수하다. 그러나 탄소 입자와 그을음을 형성하여 발생하는 연기의 양이 높은 것으로 판단된다. 연기 발생은 응축상에서 열분해가 시작하고, 탄소층을 뚫고 나온 다음 기체상에서 연기 입자로 커진다고 보고한 바 있다[17]. PC의 탄소층도 층층이 형성되므로 연기 입자로 커지는 양 또한 많은 것으로 판단된다.

그러나 열가소성인 Polyacetal과 PMMA는 연소 시 용융되어 비탄화 연소를 한다. 비탄화 폴리머는 쉽게 점화되고 빠르게 지속적으로 연소된다. 그 중 Polyacetal은 T_g가 -69 °C로 열에 대해 불안정하고 온도가 높을 때 'Unzipping (압축풀기)' 반응 형태로 쉽게 분해된다. 또 약 270 °C에서 빠르게 분해되기 시작하고, 약 350 °C에서 난연성을 잃는 것으로 보고된 바 있다[13].

PMMA는 연소 중에 인화성, 폭발성, 자극성 가스를 방출하므로[18] 빠른 화염 확산에 기여한다. PMMA의 표면에 열이 전도되면 내부에서 가스화가 발생하여 내부 기포가 형성되고, 외부 표면이 팽창하며 기포가 터지면서 가스 및 작은 방울을 내뿜는다. 여기서 기포는 휘발

성 가스를 방출하는 메커니즘으로 작용한다[19]. 또한 PMMA는 버블링되면서 빠르게 휘발되고, 표면에서 연소되어 용융물이 거의 관찰되지 않았다.

이처럼 PMMA의 열분해 과정은 해중합 메커니즘에 의해 좌우된다. 폴리머 사슬이 휘발되기 위해서는 일반적으로 해중합이 풀어지는 효과로 인해 무작위 열분해 과정보다 적은 에너지로도 휘발되는 것으로 이해된다. PMMA는 해중합인 열분해 과정과 온도가 높을수록 기체 휘발성 물질로 가스의 생산량 또한 높아지는 것으로 판단된다.

따라서 종합적으로 판단하였을 때 PVC가 연기 위험성이 가장 높

고, PMMA가 가장 낮은 것을 알 수 있었다. 특히 Polyacetal은 열유량이 25 kW/m²일 경우 연기 위험성이 가장 낮았지만, 열유량이 50 kW/m²일 경우 연기 위험성이 두 번째로 높아 열유량에 상당한 영향을 받는 것으로 판단된다.

3.2. 연소 후 사진

Figure 2에 ISO 5659-2의 기준에 따른 시험편의 연소 후 시험편의 탄화된 형태나 잔여물을 나타내었다. PMMA는 내부 기포가 형성되고, 외부 표면이 팽창하며 기포가 터지면서 가스나 연기를 형성하였

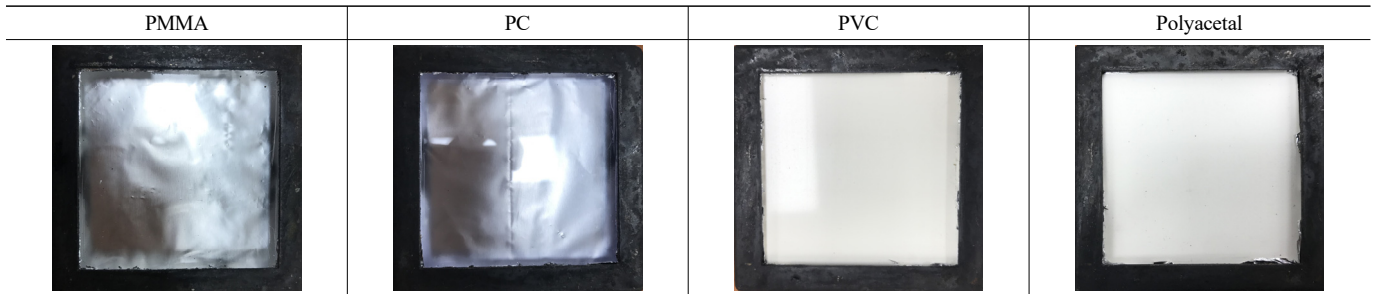


Figure 1. Plastic specimens before smoke density tester according to ISO 5659-2.



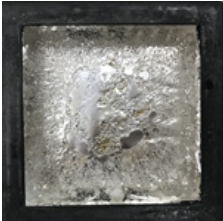
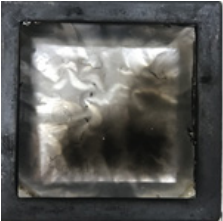


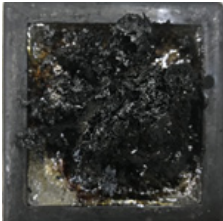



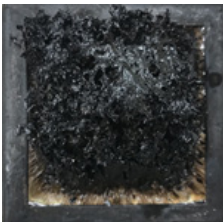





Specimens	Non-flaming mode _ Heat flux		Flaming mode _ Heat flux	
	25 kW/m ²	50 kW/m ²	25 kW/m ²	50 kW/m ²
PMMA				
PC				
PVC				
Polyacetal				

Figure 2. Residues of plastic specimens after smoke density tester according to ISO 5659-2.

다. 이것은 열유량이 25 kW/m²인 경우 연소 후 사진에서도 확인할 수 있었다. PMMA를 제외한 플라스틱에서 연소 후 잔여물의 탄화된 형태를 확인할 수 있었다. Polyacetal의 가운데 부분은 특이하게 일부 보라색과 파란색이 혼재된 것을 확인하였다. 불꽃을 동반하지 않은 연소 후 사진보다 불꽃을 동반한 연소 후 사진에서 연소가 더 진행된 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 polymethyl methacrylate (PMMA), polycarbonate (PC), polyvinyl chloride (PVC), Polyacetal을 선정하여 ISO 5659-2의 기준에 따라 연기밀도시험기(smoke density chamber tester) 장비를 사용하여 불꽃방식과 비불꽃방식의 조건에서의 연기 특성을 시험하였다.

1) 불꽃방식의 복사열 50 kW/m²의 조건하에서 연기의 최대비광학 밀도(D_m) 측정값은 PMMA (401.26) < PC (1289.20) < Polyacetal (1308.81) < PVC (1345.04) 순으로 나타났다.

2) 비불꽃방식의 복사열 50 kW/m²의 조건하에서 연기의 D_m 측정값은 PMMA (262.82) < PC (1287.40) < Polyacetal (1301.78) < PVC (1385.43) 순으로 나타났다.

3) PVC가 연기 위험성이 가장 높고, PMMA가 가장 낮은 것을 알 수 있었다. 그리고 Polyacetal은 열유량이 25 kW/m²일 경우 연기 위험성이 가장 낮았지만, 열유량이 50 kW/m²일 경우 연기 위험성이 두 번 째로 높아 열유량에 상당한 영향을 받는 것으로 판단된다.

결론적으로 연소 대상물의 연소 시 연기발생은 복사열 유속의 영향을 상당히 받으며, 탄화성 플라스틱은 비탄화성 플라스틱보다 높은 연기 발생량을 나타내었다. 즉, 주 고분자 사슬에 방향족 그룹이 있는 폴리머는 열분해로 인해 다량의 숯이 생성되므로 다량의 연기를 발생시켰다.

감 사

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2021-KS163162).

References

1. Z. Masoumi, J. V. L. Genderen, and J. Maleki, Fire risk assessment in dense urban areas using information fusion techniques, *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, **8**, 579 (2019).
2. A. N. Ede, Fibre reinforced polymer (FRP) composites: Exploring the potentials for repairs of deficient RC structures in Nigeria, *NICE J. Struct. Eng.*, **7**, 17-24 (2011).
3. T. Zhang, X. Zhou, and L. Yang, Experimental study of fire hazards of thermal-insulation material in diesel locomotive: aluminum-polyurethane, *Materials*, **9**, 168 (2016).
4. W. P. Sung, J. C. M. Kao, and R. Chen, *Frontiers of Energy and Environmental Engineering*, 1st ed., 23, CRC Press, London (2012).
5. A. Mercel, N. D. Tsihlis, R. Maile, and M. R. Kibbe, Emerging

- therapies for smoke inhalation injury: A review, *J. Transl. Med.*, **18**, 141 (2020).
6. H. Vahabi, B. K. Kandola, and M. R. Saeb, Flame retardancy index for thermoplastic composites, *Polymers*, **11**, 407 (2019).
7. T. L. Junod, Gaseous emissions and toxic hazards associated with plastics in fire situations - A literature review, NASA Technical Note, Washington, D. C. 6-10 (1976).
8. R. Sonnier, A. Viretto, L. Dumazert, and B. Gallard, A method to study the two-step decomposition of binary blends in cone calorimeter, *Combust. Flame*, **169**, 1-10 (2016).
9. ISO 5659-2: Plastics — Smoke generation — Part 2: Determination of optical density by a single-chamber test (2012).
10. The National Technical Information Service (NTIS), Polymer Flammability (2005).
11. J. Greener, G. Pearson, and M. Cakmak, *Roll-to-Roll Manufacturing: Process Elements and Recent Advances*, 1st ed, 174, John Wiley & Sons, Inc. (2018).
12. ASTM E 662. Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials (2015).
13. Q. Zhang and Y. Chen, Synergistic effects of ammonium polyphosphate/melamine intumescent system with macromolecular char former in flame-retarding polyoxymethylene, *J. Polym. Res.*, **18**, 293-303 (2011).
14. Y. Matsuzawa, M. Ayabe, and J. Nishino, Acceleration of cellulose co-pyrolysis with polymer, *Polym. Degrad. Stab.*, **71**, 435-444 (2001).
15. Z. Czegeny, E. Jakab, J. Bozi, and M. Blazso, Pyrolysis of Wood-PVC mixtures. formation of chloromethane from lignocellulosic materials in the presence of PVC, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **113**, 123-132 (2015).
16. G. Wypych, *PVC Degradation & Stabilization*, 1st ed, 126, Elsevier, Toronto, Canada (2015).
17. X. Liu, J. Hao, and S. Gaan, Recent studies on the decomposition and strategies of smoke and toxicity suppression for polyurethane based materials, *RSC Adv.*, **6**, 74742-74756 (2016).
18. J. Zhou, H. Jiang, Y. Zhou, and W. Gao, Flame suppression of 100 nm PMMA dust explosion by KHCO₃ with different particle size, *Process Saf. Environ. Prot.*, **132**, 303-312 (2019).
19. K. M. Butler, A Numerical Model for Combustion of Bubbling Thermoplastic Materials in Microgravity, NISTIR-6894, 1, NIST, USA (2002).

Authors

Ji-Sun You; Ph.D., Researcher, Department of Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology Fire Researcher Center, Hwaseong 18544, Korea; youjisun@kict.re.kr
 Kyeong-Sin Kang; M.Sc., Researcher, Department of Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology Fire Researcher Center, Hwaseong 18544, Korea; kyeongsin@kict.re.kr
 Jae-Sung Lee; Ph.D., Professor, Department of Architectural Engineering, Hannam University, Daejeon 34430, Korea; jaesung @hnu.kr
 Yeong-Jin Chung; Ph.D., Chairman, The National Safety Environment Institute, NSEI, Seoul 05836, Korea; yjchung@kangwon.ac.kr