

[Research Paper]

열가소성 수지(PP, PMMA, PVC)의 연기생성 및 발생에 관한 실험적 연구

황의홍 · 최돈묵^{*†}

가천대학교 설비·소방공학과 대학원생, *가천대학교 설비·소방공학과 교수

Experimental Study on Smoke Production and Smoke Generation in Thermoplastic Resins Based on PP, PMMA, and PVC

Euy-Hong Hwang · Don-Mook Choi^{*†}

Graduate student, Dept. of Equipment System · Fire Protection Engineering, Gachon Univ.,

*Professor, Dept. of Equipment System · Fire Protection Engineering, Gachon Univ.

(Received April 13, 2020; Revised May 18, 2020; Accepted May 19, 2020)

요 약

건축물의 복잡화, 대형화로 인해 합성수지를 건축 재료로써 많이 활용되고 있다. 이에 따라 합성수지가 원인이 되는 화재의 발생이 증가하고 있다. 합성수지 화재의 특성으로는 연기 등 연소생성물로 인한 인명 및 재산피해가 크다는 점이고, 이는 연기생성과 발생과 관계된다. 이에 본 연구는 국내 건축 및 소방관계법령과 연기측정방법에 대해 검토하고, 연기관련 3가지 시험기준(ISO 5660-1, ISO 12136, ASTM E 662)을 바탕으로 실험을 실시하였다. 실험에 대한 결과로 연기생성 관련 데이터에서는 PP 43.27 m², PVC 32.83 m², PMMA 12.33 m² 순으로 나타났고, 연기발생 관련 데이터에서는 PVC 27.855 g, PP 9.599 g, PMMA 6.975 g 순으로 나타났다.

ABSTRACT

Due to the complexity and large size of buildings, plastic resin is widely used as a building material. Accordingly, the occurrence of fires caused by plastics is increasing. Due to the nature of plastic resin fires, the amount of damage to properties and human life caused by combustion products such as smoke are large, and these damages are related to smoke production and smoke generation. Therefore, this study reviews smoke measurement methods and laws on domestic buildings and fire services. Experiments were conducted based on three smoke-related test standards (ISO 5660-1, ISO 12136, ASTM E 662). The experiment results indicate a total smoke production and generation by PP, PVC, and PMMA of 43.27, 32.83, and 12.33 m², and 27.855, 9.599, and 6.975 g, respectively.

Keywords : Smoke production, Smoke generation, Fire propagation apparatus, Cone calorimeter, Smoke destiny chamber

1. 서 론

1.1 연구 배경

건축물의 복잡화, 대형화 등으로 인해 시공성이 우수하고 경제적인 재료인 합성수지가 많이 활용되고 있다. Figure 1에 63개국의 합성수지의 생산 및 소비량을 나타내었는데 2020년에는 전세계적으로 약 2억5천만톤을 생산 및 소비할 것으로 예측하였다. 이는 전세계적으로 꾸준히 생산 및 소비량이 증가하고 있다는 것을 확인 할 수 있다⁽¹⁾.

국내에서도 합성수지를 마감재, 단열재 등이 적용된 샌

드위치패널 건축구조, 구획용도, 창틀 등 다양한 형태로 사용되고 있으며, 합성수지가 원인이 되는 화재의 발생이 증가하고 있다.

Table 1에 2018년도에 소방청 국가화재정보센터에서 집계한 합성수지 및 샌드위치패널 화재사건 및 재산피해에 대한 내용을 나타내었다. 합성수지와 관련된 화재통계자료를 확인한 결과, 최초착화물이 합성수지인 화재의 건수대비 재산피해가 14.95%로 전체 건수대비 재산피해인 13.22%보다 높았고, 샌드위치 패널 건축구조에서 발생한 화재의 건수대비 재산피해는 51.62%로 전체 건수대비 재산피해인

[†] Corresponding Author, E-Mail: fire@gachon.ac.kr. TEL: +82-31-750-5716, FAX: +82-31-750-8749

© 2020 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

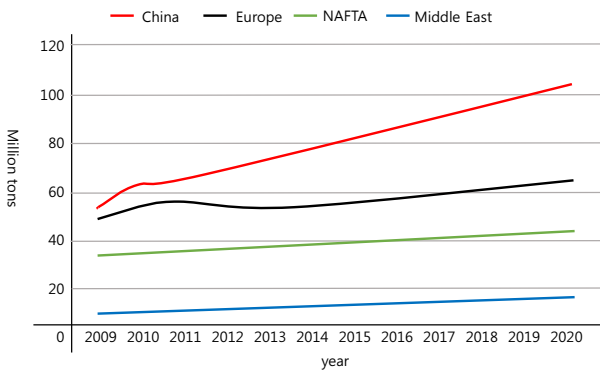


Figure 1. Production and consumption of plastic resins.

Table 1. Fire and Property Damage of Plastic Resins and Sandwich Panels in 2018

Content	Fire events (A)	Property damages (B)	$[(B) \times 10^{-6}/(A)] \times 100\%$
Plastic resin fire	4,940	73,873,000,000	14.95
Total	42,338	559,736,000,000	13.22
Sandwich panel fire	3,650	188,402,000,000	51.62
Total	27,970	502,382,000,000	17.96

17.96% 보다 높았다²⁾.

합성수지 화재는 연기 등 연소생성물로 인한 인명 및 재산 피해가 크다는 특징을 가지고 있다. 특히, 연기로 인한 그을음, 오염 그리고 부식은 화재가 발생한 건축물의 재산 피해를 야기하고, 인명피난에 영향을 미치기 때문에 연기 생성과 발생에 대한 고려가 필요하다.

1.2 연구 범위 및 방법

연구범위 및 방법으로는 국내에서 규정하고 있는 재료의 연기관련 법적기준과 연기측정방법에 대해 검토하고, 연기생성 및 발생에 대한 실험을 실시하였다.

실험은 연기측정방식에 따라 동적측정방식으로는 국제기준인 ISO 5660-1 (2015)의 콘칼로리미터법과 ISO 12136 (2011)의 화재전과장치법을 근거한 장비를 활용하였고, 정적측정방식으로는 미국기준인 ASTM E 662 (2019)의 연기밀도챔버법을 근거한 장비를 활용하였다. 실험을 위한 시료는 FEPIC에서 조사한 국내 플라스틱 사용량과 연소특성 근거로 3종의 열가소성 수지(PP, PVC, 그리고 PMMA)을 선정하였다⁽³⁻⁶⁾.

실험을 통해 도출된 결과로서 연기생성과 연기발생에 대한 데이터를 비교·분석하여 3종의 열가소성 수지의 연기 특성에 대해 확인하고자 한다.

Table 2. Contents of Construction Materials in Enforcement Decree of The Building Act

Materials	Contents
Incombustible	Means materials that do not burn easily, and meet the standards determined by Ordinance of the Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
Noncombustible	Means materials, which do not burn, and meet the standards determined by Ordinance of the Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
Quasi-noncombustible	Means materials having qualities similar to those of noncombustible materials and meet the standards determined by Ordinance of the Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

2. 이론적 배경

2.1 연기관련 법적기준

2.1.1 건축관계법령

Table 2에 나타난 것과 같이 「건축법 시행령」 제2조와 「건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙」에서 재료에 대한 성능에 따라 불연재, 준불연재 그리고 난연재로 구분하고, 건축물 마감재료의 난연성능 및 화재 확산 방지구조 기준을 준거하여 시험을 실시 있다. 모든 재료는 소규모 실험을 통해 평가되며, KS F 2271의 가스유해성시험으로서 실험용 쥐의 평균행동정지시간이 9 min 이상이면 성능을 확보한 것으로 판단한다. 이외의 불연재료는 KS F ISO 1182의 불연성 시험, 준불연 및 난연재료는 KS F 5660-1의 열발출 시험을 실시하고 있다.

건축법상 정의되어 있는 재료에 대한 연기특성평가방법으로는 가스유해성만 실시되고 있었다. 콘칼로리미터법에서도 연기측정이 가능하지만 평가항목에는 포함되어 있지 않았고, 연기생성 및 발생에 대해서는 규정하고 있지 않았다.

2.1.2 소방관계법령

「화재예방, 소방시설 설치·유지 및 안전관리에 관한 법률」(이하 소방시설법) 제12조와 동법 시행령의 제20조에서 방염대상물품 및 방염성능기준에 대해서 명시하고 있으며, 소방청 고시인 「방염성능기준」에서 종류와 성능기준을 상세하게 다루고 있다. 그러나 온도 및 열적 특성에 관한 시험방법 및 성능기준만 규정하고 연기와 관련된 시험방법에 대해서는 규정하고 있지 않다.

한편, 소방시설법 제9조의 성능위주설계의 방법 및 그 시행에 관한 준거지침인 「소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준」의 [별표 1]에서 인명안전기준으로서 간접적으로 연기관련기준이 존재하였다. 주요내용으로 호흡기계선을

바닥으로부터 1.8 m, 가시거리의 영향을 집회·판매시설 10 m 및 기타시설 5 m, 독성에 의한 영향을 CO 1,400 ppm, O₂ 15% 이하 그리고 CO₂ 5% 이하가 규정되어 있었다.

소방법상 사용되는 재료에 대한 시험기준은 방염물품에 대해서 실시하고 있었으나 연기관련 기준은 존재하지 않았다. 다만, 화재·피난시물레이션 작성을 위한 인명안전기준을 연기와 관련하여 가시거리, 독성 등으로 간접적으로 규정하고 있었으나 연기생성 및 발생에 대한 직접적인 평가 항목은 존재하지 않았다.

2.2 연기측정방법

소규모 재료에 대한 연기 측정방법은 광소멸 및 불투명 특성을 계측하는 방식을 주로 사용하고 있고 연기의 흐름 여부에 따라 동적측정방법과 정적측정방법으로 구분한다.

동적측정방법에는 콘칼로리미터법을 활용한 방법과 화재전파장치법을 활용한 방법으로 구분할 수 있다. 콘칼로리미터법은 연기생성에 대해서 측정하는데 시험덕트의 내부에서 이동하는 연기의 흡광면적을 계산하여 도출하는 방식이고, 화재전파장치법은 연기발생에 대해서 측정하는데 시험덕트의 내부에서 이동하는 단위 면적당 연기의 양을 계산하여 도출하는 방식이다.

정적측정방법에는 연기밀도챔버법을 활용한 방법이 있으며, 이는 연기밀도챔버의 내부에 축적된 연기의 특정광학밀도를 계산하여 도출하는 방식이다.

3. 실험

3.1 콘칼로리미터법

3.1.1 실험방법 및 조건

실험은 ISO 5660-1 기준과 KS F ISO 5660-1을 근거하여 제작한 장비를 활용하였다.

실험방법으로는 알루미늄호일(0.1 mm 두께)로 시험편을 감싸고 각각의 시험편을 홀더와 시험틀에 결합한다. 가스 샘플링장치 및 감광측정시스템의 Low 및 High의 보정기준에 따라 보정한 후 데이터 수집을 개시하고 1 min 동안 기준 데이터를 수집한다. 콘히터의 차단막을 닫은 상태에서 실험을 위해 준비한 시험편을 콘히터와 수평방향으로 질량 측정장치에 결합하고 콘히터로부터 복사열유속을 공급되도록 차단막을 열고 점화장치를 작동시켜 실험을 시작한다. 시험편이 착화되면 발생한 연기를 감광측정시스템을 이용하여 측정하고 결과데이터를 도출하는 방식이다⁽⁴⁾.

실험조건으로는 연소할 때 요구되는 산소의 양은 순연소열과 비례함을 전제조건으로 두고 동적 연기측정방법으로 측정한다. 시험편이 연소할 때 발생하는 연기가 덕트를 통해 이동하는 과정에서 발생하는 레이저의 감광정도 통해 연기생성 및 방출 정도를 계산하였다. 재료별 총 3회에 걸쳐 진행한 실험을 바탕으로 나온 결과의 평균값을 활용하였다.

Table 3. Conditions of Test and Contents of Specimens in Cone-calorimeter Method

Contents	PP	PMMA	PVC
Size	100 × 100 mm ²	100 × 100 mm ²	100 × 100 mm ²
Thick	10 ± 0.3 mm	10 ± 0.3 mm	10 ± 0.3 mm
Mass of average	105 g	98 g	125 g
Number of specimens	3	3	3
Temperature	25 °C	25 °C	25 °C
Relative humidity	50.0%	50.0%	50.0%
Radiation heat flux	50 kW/m ²	50 kW/m ²	50 kW/m ²

Table 3에 시험편의 내용 및 조건에 대해서 나타내었다.

3.1.2 데이터 계산

콘칼로리미터법으로 측정 가능한 데이터는 크게 연기생성과 총연기생성으로 구분할 수 있다.

연기생성은 시험체가 연소하는 과정 중에 발생된 연기를 시험장비의 덕트 단면적으로서 나타내는 값이다. 기호로는 s 이고 단위는 m²이다. 연기생성과 연기발생의 관계를 식 (1)에 나타내었다.

$$S = k \dot{V} \Delta t = k \frac{G_s}{\rho_d} \quad (1)$$

여기서, s 는 연기생성, G_s 는 연기발생, k 는 흡광 또는 감광계수, \dot{V} 는 체적유량, ρ_d 는 발생한 연기의 밀도, Δt 는 연기생성시간을 의미한다^(4,5).

연기생성은 흡광면적과 동일한 단위를 사용하는데 이는 측정방식에 따라 명칭이 다르기 때문이다. 동적측정방식일 경우 연기생성, 정적측정방식일 경우 흡광면적으로서 연기의 양을 표현한다.

총연기생성은 단위시간당 흡광면적으로 시간에 따른 연기생성의 값을 적분한 값이다. 총연기생성의 계산식은 식 (2)에 나타내었다.

$$S_T = \int \dot{S} dt \quad (2)$$

여기서, S_T 는 총연기생성, \dot{S} 는 연기생성율을 의미한다⁽⁴⁾.

3.2 화재전파측정법

3.2.1 실험방법 및 조건

실험은 ISO 12136을 근거하여 제작한 장비를 활용하였다.

실험방법으로는 총 착화시험, 연소시험, 화재전파시험 3가지가 존재한다. 공통된 조건으로 4개의 IR가열시스템에서 복사열유속 조건을 해당시험 조건에 충족하도록 조정하고 점화불꽃이 10 mm 높이의 안정된 상태가 되도록 준비한다. 가스샘플링장치의 Low 및 High 조건을 보정기준에 따라 보정하고, 컴퓨터에 측정 데이터를 확보할 수 있도록 시험편의 기본정보를 입력한다. 이후, 로드셀의 질량과 레이저연기측정시스템의 전압을 보정하고 4개의 IR가열시스템의 가운데에 준비한 시험편을 결합하여 파일럿불꽃과 조정된 열유속을 가하고 1 min간 수냉식차폐장치를 이용하여 안정화를 한 후 실험이 시작된다.

시험별 준비사항으로 착화시험은 사각 또는 원형 시험편을 최소 5개를 준비하고 시험틀에 시험편의 형태에 맞게 결합한다. 철사를 이용하여 십자모양으로 고정한다. 연소시험은 사각 또는 원형 시험편을 이용하고 각각의 시험편의 형태에 맞게 시험틀에 결합한다. 철사를 이용하여 십자모양으로 고정하고 석영관을 씌운다. 화재전파시험은 수직형태의 직사각형시험편을 이용하고 시험거치대와 결합하고 석영관을 씌운 상태에서 내부의 산소농도를 40%로 맞춘다. 착화가 되면 착화시험은 즉시종료하고 연소시험과 화재전파시험은 실험 종료조건에 해당하면 종료한다. 이를 이용하여 착화, 연소, 화재전파 및 연기 측정에 따른 결과 데이터를 도출하는 방식이다⁽⁵⁾.

실험조건으로는 규정된 복사열유속 조건을 시험편 가했을 때 도출된 연기발생 및 수율값 측정을 전제조건으로 두고, 동적연기측정방식을 사용한다. 연소시험과 화재전파시험에서 연기측정이 가능하며 발생한 연기가 덕트 내부를 흐를 때 레이저의 감광정도를 계산하고, 화재전파측정법의 실험결과는 착화시험은 재료별 총 5회에 걸쳐 진행한 실험을 바탕으로 나온 결과를 활용하여 평가하였고 연소 및 화재전파시험은 재료별 총 1회에 걸쳐 진행한 실험을 바탕으로 나온 결과를 활용하여 평가하였다. Table 4에 시험편의 내용과 조건에 대해서 나타내었다.

3.2.2 데이터 계산

화재전파측정법으로 측정 가능한 데이터는 크게 연기발생과 연기수율로 구분할 수 있다.

연기발생은 연기생성에서 다루었으니 식 (1)을 참고하면 된다. 총연기발생은 단위면적당 연기방출속도, 체적유량, 연기의 밀도, 연소시간을 고려하여 구할 수 있다. 총연기발생과 관련된 식은 식 (3)에 나타내었다⁽⁵⁾.

$$G_{s,T} = A \sum \dot{S}'(t) \Delta t \quad (3)$$

여기서, $G_{s,T}$ 는 총 연기발생, \dot{S}' 은 연기발생율, A 는 시험체의 단면적, Δt 는 총 시험시간을 의미한다.

연기수율은 총 연기발생을 시험체의 총 질량손실로 나눈 값이다. 기호로는 Y_s 이고 단위는 kg/kg과 %로 표현된

Table 4. Conditions of Test and Contents of Specimens in Fire Propagation Apparatus Method.

Contents	PP	PMMA	PVC	
Size	a	100 × 100 mm ²	100 × 100 mm ²	100 × 100 mm ²
	b	97 ∅ mm ²	97 ∅ mm ²	97 ∅ mm ²
	c	100 × 305 mm ²	100 × 305 mm ²	100 × 305 mm ²
Thick	10 ± 0.3 mm	10 ± 0.3 mm	10 ± 0.3 mm	
Mass of average	a	92.48 g	112.89 g	147.45 g
	b	67.95 g	79.84 g	107.66 g
	c	279.64 g	343.09 g	445.77 g
Number of specimens	a	5	5	5
	b,c	1	1	1
Temperature	25 °C	25 °C	25 °C	
Relative humidity	50.0%	50.0%	50.0%	
Radiation heat flux	a	30~50 kW/m ²	30~50 kW/m ²	30~50 kW/m ²
	b,c	50 kW/m ²	50 kW/m ²	50 kW/m ²

a. Ignition test, b. Combustion test, c. Fire propagation test

다. 연기 수율에 관한 식은 식 (4)에 나타내었다⁽⁵⁾.

$$Y_s = \frac{G_{s,T}}{-M} \quad (4)$$

여기서, Y_s 는 연기수율, $-M$ 은 총질량감소를 의미한다.

3.3 연기밀도챔버법

3.3.1 실험방법 및 조건

실험은 ASTM E 662를 근거하여 제작한 장비를 활용하였다.

실험방법으로는 알루미늄호일(0.1 mm 두께)로 시험편을 감싸고 각각의 시험편을 홀더와 시험틀에 결합한다. 시험 챔버내 수직방향으로 설치된 가열로를 25 kW/m²의 복사열 유속으로 맞추고 다중점화장치에 프로판가스가 50 cm³/min의 유량으로 나올 때 점화한다. 측정 데이터를 확보할 수 있도록 컴퓨터에 시험편의 기본정보를 입력하고, 광도계의 전압을 보정한 후 준비한 시험편을 가열로와 수평방향으로 시험편 홀더 지지대에 결합하고 힌지도어를 잠근다. 시험편 이동손잡이를 당김과 동시에 바닥에 실험개시 풋 스위치를 눌러 실험을 시작한다. 다중점화장치의 불꽃으로 직접 시험편에 착화하며 지속해서 점화장치의 불꽃과 가열로의 복사열과 함께 가했을 때 축적되는 연기를 광도계를 이용하여 측정하고 결과데이터를 도출하는 방식이다⁽⁶⁾.

실험조건으로는 규정된 복사열유속 조건을 시험편 가했을 때 발생된 연기의 특정 광학 밀도에 대해 측정함을 전제조건으로 두고, 정적연기측정방법으로 측정한다. 시험편

Table 5. Conditions of Test and Contents of Specimens in Smoke Destiny Chamber Method

Contents	PP	PMMA	PVC
Size	75 × 75 mm ²	75 × 75 mm ²	75 × 75 mm ²
Thick	10 ± 0.3 mm	10 ± 0.3 mm	10 ± 0.3 mm
Number of specimens	3	3	3
Temperature	25 °C	25 °C	25 °C
Relative humidity	50.0%	50.0%	50.0%
Radiation heat flux	25 kW/m ²	25 kW/m ²	25 kW/m ²

의 질량은 고려하지 않았으며 시험편이 연소할 때 시험챔버 내에 축적되는 연기를 광도계에서 감광정도를 측정함으로써 도출된 연기밀도를 활용하였다. Table 5에 시험편의 내용 및 조건에 대해서 나타내었다.

3.3.2 데이터 계산

연기밀도챔버법으로 측정 가능한 데이터는 크게 비광밀도(특정광학밀도)와 가시도로 구분할 수 있다. 비광밀도는 시험체의 질량손실을 고려하지 않은 값으로 시험장치내의 광학연기농도와 시험체표면적, 광경로길이로서 도출할 수 있다. 기호로는 D_s 이고 단위는 없다. 식 (5)에 비광밀도에 대한 계산식과 비광밀도와 흡광면적의 비례의 관계식을 나타내었다⁽⁶⁾.

$$D_s = [V/(AL)]D' = \frac{S}{2.303A} \tag{5}$$

여기서, D_s 는 비광밀도, V 는 시험장치의 체적, D' 는 광밀도, A 는 시험체의 단면적, L 은 광경로길이, S 는 흡광면적을 의미한다.

전체 시험시간 중 측정된 비광밀도의 최대값은 기호로서 D_{max} 로 표현된다. 식 (6)은 D_{max} 를 구하는 계산식이다⁽⁶⁾.

$$D_{max} = 132 \log_{10} \frac{100}{T_{min}} \tag{6}$$

여기서, D_{max} 는 비광밀도 최대값, 132는 시험챔버에서 표현된 V/AL 로 유도한 계수, V 는 시험장치의 체적, D 은 광밀도, A 는 시험체의 단면적, L 은 광경로길이, T_{min} 은 최소 광투과율을 의미한다.

흡광면적 및 비광밀도를 측정하는 목적은 가시도를 예측하기 위해서 사용된다. 가시도는 연기의 양(S 또는 D_s)과 연기가 차지하는 체적(V), 흡광계수와 가시도 간의 비례상수(γ)를 이용하여 구할 수 있다. 기호로 ω 를 사용하고 단위는 m를 사용한다. 식 (7)에 가시도의 계산식을 나타내었다⁽⁶⁾.

Table 6. Result of Cone Calorimeter Test

Contents	PP	PMMA	PVC
TSP (m ²)	43.27	12.33	32.83
Peak of SPR (m ² /s)	0.1522	0.0456	0.0868

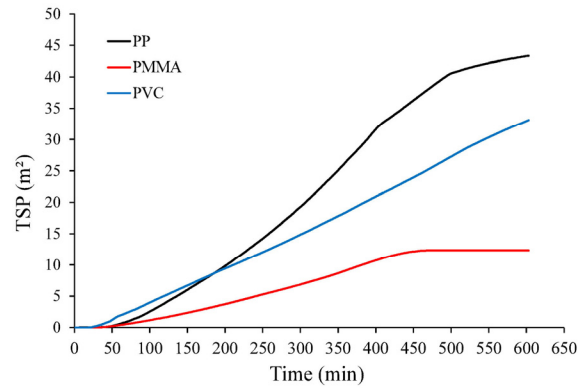


Figure 2. Total smoke production by plastic.

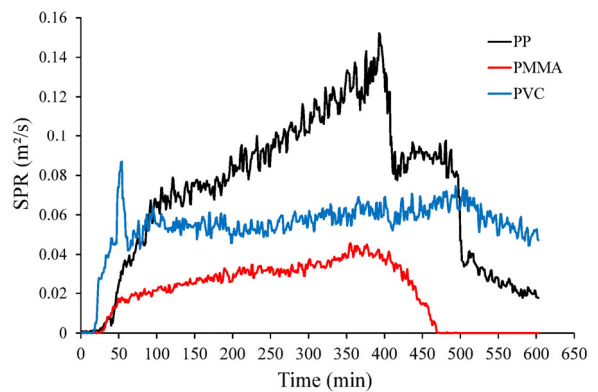


Figure 3. Smoke production rates by plastic.

$$\omega = \gamma(V/S) = \gamma(V/2.303AD_{max}) \tag{7}$$

여기서, ω 는 가시도, V 는 시험챔버의 체적, S 는 흡광면적, A 는 시험체의 단면적, D_{max} 는 비광밀도 최대값, γ 는 비례상수를 의미한다.

흡광계수와 가시도간의 비례상수(γ)는 2가지의 값으로 존재하는데 광발산에서는 3을 취하고, 광반사에서는 8을 취한다. 이는 가시도가 외부조명, 빛의 발산 및 밝기, 빛의 반사 등과 관련이 있음을 나타낸다⁽⁶⁾.

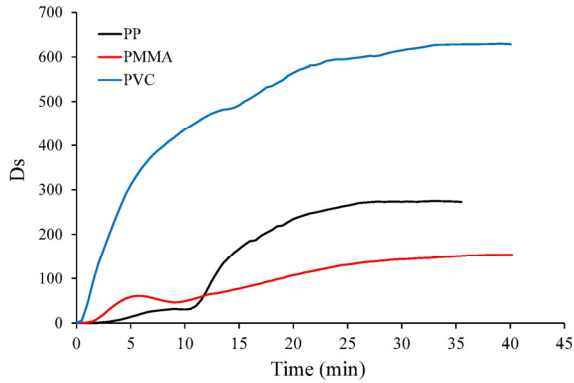
4. 결과 및 고찰

4.1 연기생성과 밀도

연기생성은 콘칼로리미터법을 이용해서 구할 수 있다. Table 6에 콘칼로리미터법의 실험결과를 나타내었고, Figure 2에 총연기생성, Figure 3에 연기생성율에 관한 그래프를 나타내었다.

Table 7. Result of Smoke Destiny Chamber Test

Contents	PP	PMMA	PVC
D_{max}	278.00	<u>154.53</u>	633.00
D_c	266.80	<u>141.37</u>	594.93

**Figure 4.** Specific optical smoke density by plastic.

실험결과로 총연기생성은 PP 43.27 m², PVC 32.83 m², PMMA 12.33 m² 순이었고, 최대연기생성율은 PP 0.1522 m²/s, PVC 0.0868 m²/s, PMMA 0.0456 m²/s 순이었다.

연기생성과 동일한 단위인 흡광면적을 활용하여 도출한 비광밀도는 연기밀도챔버법을 이용하여 구할 수 있다. Table 7에 연기밀도챔버법의 실험결과를 나타내었고, Figure 4에 비광밀도에 관한 그래프를 나타내었다.

실험결과로 D_{max} 는 PVC 633.00, PP 278.00, PMMA 154.53 순이었고, D_c 는 PVC 594.93, PP 266.80, PMMA 141.37 순이었다.

4.2 연기발생과 수율

연기발생과 수율은 화재전과측정법을 이용하여 구할 수 있다. Table 8에 화재전과측정법의 실험결과를 나타내었다.

실험결과로 총연기발생은 PVC 27.855 g, PP 9.599 g, PMMA 6.975 g 순이었고, 연기수율은 PVC 0.862%, PMMA 0.262%, PP 0.141% 순이었다.

4.3 O₂, CO 그리고 CO₂

총산소소모와 CO 및 CO₂ 수율에 대해서는 콘칼로리미터법을 이용하여 구할 수 있으며, 실제화재와 유사한 복사강도에서 석영관 내 최저산소농도는 화재전과측정법을 이용하여 구할 수 있다. Table 9에 O₂, CO 그리고 CO₂에 관한 결과를 나타내었다.

실험결과로 총산소소모는 PP 252.40 g, PMMA 214.63 g, PVC 14.90 g 순이었고, CO 수율은 PVC 0.0595%, PP 0.0302%, PMMA 0.0087% 순이었으며, CO₂ 수율은 PP 2.44%, PMMA 1.84%, PVC 0.44% 순이었다. 그리고 석영관 내 최저산소농도는 PMMA 5.46%, PP 5.95%, PVC 11.69% 순으로 나타났다.

Table 8. Result of Fire Propagation Apparatus Test

Contents	PP	PMMA	PVC
G_{s_Total} (g)	9.559	<u>6.975</u>	27.855
Y_s (%)	<u>0.141</u>	0.262	0.862

Table 9. Result about O₂, CO and CO₂

Contents	PP	PMMA	PVC
Total O ₂ consume (g)	252.40	214.63	<u>14.90</u>
CO yield (%)	0.0302	<u>0.0087</u>	0.0595
CO ₂ yield (%)	2.44	1.84	<u>0.44</u>
O ₂ in quartz tube (%)	5.95	5.46	<u>11.69</u>

Table 10. Result of Visibility

Contents	PP	PMMA	PVC
Optical diffusion (m)	1.1320	<u>2.0365</u>	0.4912
Optical reflection (m)	0.4245	<u>0.7637</u>	0.1864

4.4 가시도

가시도는 최대비광밀도를 이용하여 구할 수 있으며, 식 (7)을 활용하여 산출하였다. Table 10에 가시도에 대한 결과를 나타내었다.

산출결과로 광발산가시도는 PVC 0.4912 m, PP 1.1320 m, PMMA 2.0365 m 순이었고, 광반사가시도는 PVC 0.1864 m, PP 0.4245 m, PMMA 0.7637 m 순이었다.

4.5 결과에 대한 고찰

3종의 합성수지의 특성을 실험으로 도출한 결과 값에 적용해보면 PP는 구조적으로 메틸기가 분자 내 탄소원자에 달려있기 때문에 밀도가 상대적으로 작고, 산소의 유입이 용이하여 연소속도가 빠르게 진행되어 반응이 일어나기 쉽다. 그래서 연기생성이 다른 플라스틱에 비해 수월하게 일어났고 가장 높은 생성율을 나타내었다고 판단되었다. 또한 가장 많은 산소를 소모한 것과 CO₂ 수율이 높은 것 그리고 총 연기수율이 가장 낮은 것은 동일한 이유라고 판단된다.

PMMA는 구조적으로 산소원자가 분자 내부에 포함되어 있기 때문에 연소 시 산소라디칼이 생성되어 연소에 참여하기 때문에 연소반응이 활발하게 이루어진다. 그래서 연기생성 및 연기밀도, 연기발생 모든 부분에서 가장 작은 값을 나타내고 있고, 실제화재와 유사한 복사강도에서의 산소농도가 가장 적게 나타났다. 그리고 불완전연소의 결과로 발생하는 CO의 수율도 가장 낮게 나타난 것으로 판단된다.

PVC는 구조적으로 염소원자를 분자 내부에 포함하고 있어서 연소 시 자기소화적 특징을 가진 염소라디칼이 형성되어 산소라디칼과 수소라디칼 등과 반응하기 때문에 상대적으로 불완전연소를 하게 되어 연기가 다량으로 발생하게 된다. 이로 인해 총 연기발생과 연기밀도, 연기수율, CO

의 수율이 가장 높게 나타난 것으로 판단되고, 가시도도 가장 낮게 산출 되었다고 판단된다.

연기생성 값과 연기발생 값에서 차이가 나는 것은 연기생성은 생성된 연기의 표면적으로 연기의 확산성과 관계되고, 연기발생은 연기의 발생량으로 연기의 순도와 암흑도와 관계되기 때문이다. 따라서 PP가 연기생성이 가장 크다는 것은 연기확산이 가장 빠르다는 것을 의미하고, PVC가 연기발생이 가장 크다는 것은 연기의 순도와 암흑도가 가장 높다는 것을 의미한다. 그리고 연기의 순도는 연기밀도와 관계되고 연기의 암흑도는 가시도와 관계된다.

5. 결 론

본 연구는 열가소성 수지의 연기생성 및 발생 등 특성을 확인하고자 국내에서 규정하고 있는 재료의 연기관련 시험기준 및 연기측정방법을 검토하였다. 이를 바탕으로 ISO 5660-1, ISO 12136 그리고 ASTM E 662의 연기측정방법을 활용한 실험을 실시하여 연기생성 및 발생의 특성 결과를 고찰하여 결론을 다음과 같이 정리하였다.

첫째, 국내의 건축 및 소방관계법령을 검토한 결과, 연기생성 및 발생에 관한 특성에 대한 명확한 기준은 존재하지 않았으며, 간접적으로 소방관계법령상 성능위주설계기준에 가시거리 및 O₂, CO, CO₂에 대한 독성기준이 존재하였다.

둘째, 연기확산성과 관계된 연기생성(43.27 m²)은 PP가 가장 높게 나타났고, 연기생성량과 관계되는 최대연기생성율(0.1522 m²/s), 총산소소모(252.40 g), CO₂수율(2.44%)에서도 PP가 가장 높게 나타났다.

셋째, 연기발생은 연기의 순도와 암흑도와 관련되며, 연기의 순도는 연기수율과 연기밀도, 연기의 암흑도는 가시도와 관련된다. PVC에서 연기발생(27.855 g), 연기수율(0.862%), 연기밀도(633.00)가 가장 높게 나왔으며, 가시도에서도 광

발산(0.4912 m), 광반사(0.1864 m),로 가장 짧게 나타났다. 그리고 불완전연소의 결과인 CO수율(0.0595%)도 가장 높게 나타났다.

넷째, 실제화재와 유사한 복사강도에서의 최저산소농도(5.46%)는 연소성이 가장 우수한 PMMA에서 낮게 나타났다. 이는 CO수율(1.84%)이 가장 낮게 나타난 것과 연기발생과 관련된 데이터가 낮게 나타난 것과 관계된다.

열가소성 플라스틱의 사용이 증가함은 화재 시 연기생성과 발생의 증가와 직결된다. 이는 인명 및 재산피해의 위험과 관계되기 때문에 반드시 고려해야 하는 연기특성이라고 판단된다. 따라서 후속 연구로써 현행 법령상 규정되어 있지 않은 연기생성 및 발생과 관련된 내용을 추가하는 방안에 대해서 연구하여 인명 및 재산피해를 최소화하여 화재안전을 도모하는 발판을 마련해야 할 것이다.

References

1. EUROMAP, "Plastics Resin Production and Consumption in 63 Countries Worldwide 2009-2020", European Plastics and Rubber Machinery (2016).
2. National Fire Agency, "National Fire Data System" (2018).
3. FEPIC, "One Paper for Plastic Consumption in Korea", The 40th Far East Plastics Industry Conference (2014).
4. ISO 5660-1, "Reaction-to-fire tests - Heat Release, Smoke Production and Mass loss rate - Part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method) and Smoke Production Rate (Dynamic Measurement)" (2015).
5. ISO 12136, "Reaction-to-fire Tests - Measurement of Material Properties using a Fire Propagation Apparatus" (2011).
6. ASTM E 662, "Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials" (2019).