

[Research Paper]

## 플라스틱의 연소 시 발생하는 연기 위험성에 관한 연구

유지선 · 정영진<sup>\*†</sup>

강원대학교 방재전문대학원 대학원생, \*강원대학교 소방방재공학과 교수

## Risk of Smoke Occurring in the Combustion of Plastics

Jisun You · Yeong-jin Chung<sup>\*†</sup>

Graduate Student, Graduate School of Fire & Social Disaster Prevention, Kangwon National University,

\*Professor, Dept. of Fire Protection Engineering, Kangwon National University

(Received January 10, 2019; Revised February 14, 2019; Accepted February 20, 2019)

### 요 약

본 연구에서는 5종의 섬유강화플라스틱(Fiber Reinforced Plastic, FRP), 폴리스티렌(Polystyrene, PS), 폴리카보네이트(Polycarbonate, PC), 폴리프로필렌(Polypropylene, PP), 폴리염화비닐(Polyvinyl chloride, PVC) 판을 콘칼로리미터(Cone calorimeter, ISO 5660)를 이용하여 연소성을 시험하였다. 그 결과 PVC판은 최대열방출률(HRR<sub>peak</sub>)이 44.65 kW/m<sup>2</sup>, 최대 평균열방사율(MARHE)이 30.97 kW/m<sup>2</sup>로 가장 낮게 나타났고, PS판은 HRR<sub>peak</sub>은 773.44 kW/m<sup>2</sup>, MARHE는 399.14 kW/m<sup>2</sup>으로 가장 높게 나타났다. 일산화탄소의 평균(CO<sub>mean</sub>) 발생량은 PC판과 PS판이 최대 3.88배로 가장 많이 발생하였고, 반대로 이산화탄소(CO<sub>2mean</sub>)의 평균 발생량은 PS판과 PP판이 최대 4.88배로 가장 많이 발생하였다. 또 PS판은 다른 플라스틱보다 연기성능지수(SPI)가 74.81%~95.99% 감소하였고, 연기성장지수(SGI)는 76%~300%, 연기강도(SI)는 917.73%~9607.57% 증가하여 연기위험성이 높다는 것을 알 수 있었다. 따라서 PS판은 열적 측면에서나 연기 측면 모두 연기로 인한 인명피해의 위험성이 가장 높았음을 알았다.

### ABSTRACT

In this study, the combustibility of five types of plastic plates, fiber reinforced plastic (FRP), polystyrene (PS), polycarbonate (PC), polypropylene (PP), and polyvinyl chloride (PVC), were tested using a cone calorimeter (ISO 5660). The PVC plate showed a 44.65 kW/m<sup>2</sup> lower peak heat release rate (HRR) and a 30.97 kW/m<sup>2</sup> lower maximum average rate of heat emission than the other four types of plastics, whereas the PS plate showed a 773.44 kW/m<sup>2</sup> higher peak HRR and 399.14 kW/m<sup>2</sup> higher maximum average rate of heat emission. The PC plate and PS plate showed the highest HRR by a maximum of 3.88 times in CO<sub>mean</sub> yields, while the PS plate and PP plate showed the highest HRR by a maximum 4.88 times in CO<sub>2mean</sub> yields. In addition, the smoke performance index (SPI) of the PS plate decreased by 74.81%~95.99%; the smoke growth index (SGI) increased to 76%~300%; the smoke intensity (SI) also increased to 917.73% ~ 9607.57%, and the danger of smoke increased. The PS plate was found to have the highest risk of life damage due to smoke on the thermal and smoke sides.

**Keywords :** Plastic, Cone calorimeter, Smoke Performance Index (SPI), Smoke Growth Index (SGI), Smoke Intensity (SI)

### 1. 서 론

플라스틱은 연소가 쉬우며 열방출률(Heat release rate, HRR)이 높고, 화염의 전파 속도가 빨라 화재 위험성이 높고, 독성가스의 발생량 또한 높아 많은 인명피해와 재산피해가 발생하는 위험성을 내재하고 있다<sup>(1,2)</sup>. 그러나 여러부

야에서 다양하게 사용되고 있는 플라스틱의 효율성과 중요성에 비해 화재 위험성에 관한 연구가 매우 부족하다고 판단하여 본 연구는 플라스틱 자체의 물질이 갖고 있는 화재나 연기의 위험성에 대해 연구하였다. 이처럼 플라스틱은 화재발생 당시화재 열에 의한 손실보다는 연소 당시 발생하는 연소가스와 연기에 의한 피해가 훨씬 많이 발생한다.

<sup>†</sup> Corresponding Author, E-Mail: [yjchung@kangwon.ac.kr](mailto:yjchung@kangwon.ac.kr), TEL: +82-33-540-3121, FAX: +82-33-540-3119

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

특히, 연기는 화재발생 당시 인명피해에 있어서 제일 큰 비중을 차지한다<sup>(3,4)</sup>.

화재 시 화학 물질의 비열적(比熱的) 위험은 대부분 연기, 독성, 부식, 냄새 등으로 알려져 있다. 비열적 위험 요인에 대한 화재 피해는 피해자의 약 75~80%가 화염에 직접 노출되기보다는 연기와 독성 가스등의 흡입과 산소 결핍에 의한 것으로 보고되었다<sup>(5)</sup>. 유의한 독성 물질은 일산화탄소(Carbon monoxide, CO), HCN 및 자극성 또는 산성 가스이다. 이러한 독성 가스의 정량적 방출은 재료 자체의 열분해뿐만 아니라 화재 조건에도 영향을 받는다<sup>(6)</sup>.

Junod는 화재조건에서 플라스틱에서 방출되는 유독가스에 대한 연구를 하였으며, 나무와 같은 셀룰로오스 재료로부터 나오는 유독가스보다 탄소, 수소 그리고 산소를 갖고 있는 플라스틱에서 더 많이 유독가스가 발생한다고 하였다<sup>(7)</sup>.

Shi 등은 자연발화 조건에서 탄화가 되지 않는 플라스틱, 탄화가 이루어지는 플라스틱을 선정해 점화와 자연발화 조건에서 콘칼로리미터로 실험한 결과 HRR은 탄화되지 않는 플라스틱들이 탄화되는 플라스틱들 보다 더 높았고 가스발생에서 탄소량에 따른 영향에 대한 실험에서 CO와 이산화탄소(Carbon dioxide, CO<sub>2</sub>)의 발생량은 탄소의 질량이 아니라 재료 자체에게 의존한다고 보고하였다<sup>(8)</sup>.

이처럼 CO는 서서히 퍼지는 유독한 가스로서 인체 내의 헤모글로빈과의 강한 결합으로 적은 양으로도 매우 치명적인 것으로 보고되었다<sup>(9)</sup>. CO는 Carboxyhemoglobin (COHb)을 형성함으로써 저산소증(Hypoxia)을 일으키고 Oxyhemoglobin의 해리를 일으키는 것으로 알려져 있다<sup>(9)</sup>. CO<sub>2</sub>는 CO처럼 화재 시 발생하며, CO<sub>2</sub>의 농도가 5% 이하인 경우 CO만큼 유독하지는 않지만 호흡을 자극하여 호흡량을 증가시킨다<sup>(10)</sup>. CO<sub>2</sub>는 저산소증에 의한 질식을 유발할뿐만 아니라 독성 물질로 작용한다. 고농도에서는 1 분 이내에 거의 순간적으로 의식을 잃고 호흡 정지를 일으키는 것으로 나타났다<sup>(11)</sup>.

따라서 화재시험을 통해 발생하는 유독가스에 대한 정량적 연구가 필요하며 이것으로 화재 위험성을 어느 정도 감지할 수 있다. 가연물의 화재 위험성은 화재 조건에 노출되었을 때 연소 성능을 효과적으로 평가할 수 있는 핵심요소로 착화성, 열방출률, 화재의 전파 및 연소가스의 유해성 등으로 평가할 수 있다. 이들 중 건자재의 중요한 화재 성질은 연소하는 동안에 발생하는 HRR을 측정하는 것이다. HRR은 화재 시에 대상 물질의 잠재 위험성을 나타내기 때문에 중요하다. HRR을 측정하는 방법들이 많이 발전되어 왔지만 그 중 하나인 콘칼로리미터가 있다<sup>(12)</sup>. 이 시험 방법은 일반적으로 “순연소열은 연소하는데 필요로 하는 산소의 양에 비례한다”는 점에 기초를 두고 있다. 즉, 산소 1 kg이 소비되면 약  $13.1 \times 10^3$  kJ의 열이 방출된다는 관계가 성립한다<sup>(13)</sup>.

따라서 본 연구에서는 섬유강화플라스틱(Fiber reinforced plastic, FRP)과 폴리스티렌(Polystyrene, PS), 폴리카보네이트(Polycarbonate, PC), 폴리프로필렌(Polypropylene, PP) 그

리고 폴리염화비닐(Polyvinyl Chloride, PVC)의 5 종류의 플라스틱을 선정하여<sup>(14)</sup> ISO 5660의 기준에 따라 콘칼로리미터(Cone Calorimeter)를 사용하여 외부 복사열원에 의한 연소 특성으로 유해가스 및 연기관련 지수 등을 측정하였다. 또한 Chung의 방정식에<sup>(15)</sup> 의한 연기성능지수(Smoke performance index, SPI), 연기성장지수(Smoke growth index, SGI), 연기강도(smoke intensity, SI) 등을 평가하여 화재위험과 연기 특성을 파악하고, 플라스틱 화재 시 화재 위험성을 예측하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험재료

FRP판은 유리섬유강화플라스틱(Glass fiber reinforced plastic, GFRP)으로 유리 섬유 보강재(30-50%), 불포화 폴리에스테르 수지(27-57%), 라디칼 중합 개시제(Benzoyl Peroxide, B.P.O.) (3%), 희석제(Styrene)(10-20%)로 구성되었으며, 유리전이온도( $T_g$ )는 130 °C, 밀도는 1.68 g/cm<sup>3</sup>인 제품을 사용하였다. PS 판은  $T_g$ 가 80 °C, 밀도는 1.04 g/cm<sup>3</sup>인 제품을 사용하였다. 본 연구에서 PP판은 백색 제품을 사용하였고 PVC판은 회색 제품을 사용하였다. PC판은 147 °C, 밀도는 1.2 g/cm<sup>3</sup>인 제품을 사용했고, PP판은  $T_g$  -20 °C, 밀도 0.9 g/cm<sup>3</sup>인 제품을 사용했으며, PVC판은  $T_g$  82 °C, 밀도 1.28 g/cm<sup>3</sup>인 제품을 사용하였다. 본 논문에서 선정한 FRP판, PS판, PC판, PP판, PVC판 구입 후 모두 별도의 처리없이 그대로 사용하였다.

### 2.2 콘칼로리미터 시험

연소특성 시험은 ISO 5660의 방법에<sup>(13)</sup> 의해 Dual Cone Calorimeter (Fire Testing Technology)를 이용하여 열유속(Heat flux) 50 kW/m<sup>2</sup> 조건에서 수행하였다<sup>(16)</sup>. 사용한 시험편의 두께는 2 mm로서 크기는 100 mm × 100 mm의 규격으로 제작하였으며, 시험조건은 온도 23 ± 2 °C, 상대습도 50 ± 5%에서 함량이 될 때까지 유지한 다음 알루미늄 호일로 비노출면을 감싼다. 시험에 앞서 콘히터의 열량이 설정값 ± 2% 이내, 산소분석기의 산소농도가 20.95 ± 0.01%가 되도록 교정하고 배출유량을 0.024 ± 0.002 m<sup>3</sup>/s로 설정하였다.

시험편은 단열재인 저밀도 유리섬유를 이용하여 높이를 조절하고 시편 홀더로의 열손실을 감소시키기 위하여 전도도가 낮은 고밀도 세라믹판 재료로 절연시켰다. 시편홀더는 수평방향으로 위치시켰다. 시편의 체적밀도는 시험하기 전에 부피와 무게를 측정하여 계산하였다. 연소시험은 지속적인 불꽃 연소가 시작된 때부터 30분 경과 후에 종료하였으며, 추가로 2분간의 데이터 수집시간을 부여하였다. 시편을 3번 측정하여 어느 하나라도 3개 값에 대한 산술 평균값이 10% 이상 차이가 나면 추가로 3번 더 측정하여 시편 6개에 대한 산술 평균값을 보고하였으며, 착화되는 시간과 착화된 시료로부터 열 및 연기 관련 지수를 구하였다.

**Table 1.** The Combustion Properties of Plastic at 50 kW/m<sup>2</sup> Radiant Heat

Samples	TTI <sup>a</sup> (s)	HRR <sup>b</sup> <sub>peak</sub> , Time (kW / m <sup>2</sup> ), (s)	MARHE <sup>c</sup> (kW / m <sup>2</sup> )	TSR <sup>d</sup> (m <sup>2</sup> / m <sup>2</sup> )
FRP Plate	31	110.31, 105	62.22	735.1
PS Plate	19	773.44, 100	399.14	2767.1
PC Plate	49	243.33, 125	96.62	1700.7
PP Plate	20	513.97, 95	215.91	507.8
PVC Plate	196	44.65, 755	30.97	2198.9
Samples	CO <sub>mean</sub> (%)	CO <sub>2mean</sub> (%)	SPR <sub>peak</sub> <sup>e</sup> (g/s) at Time (s)	SEA <sup>f</sup> (m <sup>2</sup> /kg)
FRP Plate	0.0042	0.0458	0.089 at 35	449.84
PS Plate	0.0076	0.2239	0.331 at 75	1169.16
PC Plate	0.0093	0.1686	0.215 at 105	612.37
PP Plate	0.0024	0.1906	0.079 at 70	212.37
PVC Plate	0.0051	0.0494	0.137 at 65	155.22

<sup>a</sup>Time To Ignition; <sup>b</sup>Peak Heat Release Rate; <sup>c</sup>Maximum Average Rate of Heat Emission; <sup>d</sup>Total Smoke Release; <sup>e</sup>Smoke Production Rate; <sup>f</sup>Specific Extinction Area

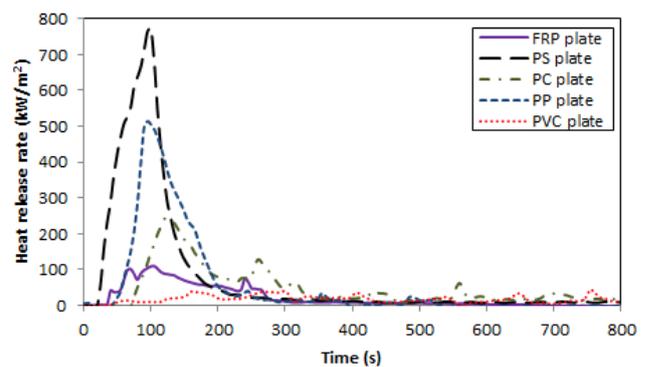
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 열적특성

많은 화재특성 가운데 화재 위험성을 가장 중요하게 알려줄 수 있는 것은 일반적으로 HRR로 알려져 왔다. HRR은 물질의 질량감소율(Mass loss rate, MLR)과 연소열의 곱으로 정의된다<sup>(17)</sup>. 시험하는 동안에 측정되는 주 연소특성은 HRR이다. 이것은 시료 표면적당 발생한 순간적인 열량의 크기로 표현되며, 재료의 연소 위험성을 가장 잘 나타낼 수가 있는 요소이다<sup>(18,19)</sup>.

Table 1은 각 시험편의 열적 특성을 나타내었다. 여기에 나타난 열적 특성은 다음과 같다: 착화시간(Time to ignition, TTI), HRR<sub>peak</sub>, 최대평균열방사율(Maximum Average Rate of Heat Emission, MARHE), 총연기방출량(Total smoke release, TSR), 연기발생속도(Smoke production rate, SPR), 비감쇠면적(Specific extinction area, SEA). 50 kW/m<sup>2</sup>의 복사열에 의한 플라스틱의 HRR 커브는 Figure 1에 나타난 바와 같이 HRR<sub>peak</sub>가 PS판이 가장 높게 나타났다(Table 1). 이는 고분자 복합체로부터 방출되는 열의 양은 유기 성분의 분해에서 발생하는 가연성 가스의 연소에 의해 결정된다는 것과 일치하였다<sup>(20)</sup>. 순 HRR은 분해성 복합체에 의해 방출된 휘발성 물질의 분해 반응에 의해 생성된 열이 중합체 매트릭스 및 유기 섬유 흡열 분해 반응에 의해 흡수된 열을 덜 받음으로써 결정되는 복합 특성이다. 이에 PS판은 다른 4 종류의 플라스틱보다 가연성 가스와 휘발성 물질의 분해 반응이 높은 것으로 판단되어 Figure 1과 같이 HRR<sub>peak</sub>가 높게 나타난 것으로 판단된다.

PP판은 PC판 보다 HRR<sub>peak</sub>이 111.22% 더 높게 나타나 순간적인 열량의 크기가 높아 PP판이 PC판 보다 열적 위험성이 더 높다고 판단된다. PVC판은 FRP판 보다 HRR<sub>peak</sub>가



**Figure 1.** Heat release rate curves of plastic at 50 kW/m<sup>2</sup> radiant heat.

59.52% 낮게 나타나 PVC판이 FRP판 보다 열적 위험성이 더 낮다고 판단된다. PVC판은 HRR<sub>peak</sub>이 755 s에 나타난 것을 제외하고 4 종류의 플라스틱은 점화된 후부터 HRR이 서서히 증가해 90 s~130 s 사이에 HRR<sub>peak</sub>가 나타났다. PP판은 95 s에 HRR<sub>peak</sub>가 가장 빠르게 나타났고, PVC판은 Figure 5에 나타난 바와 같이 숯을 만들어 탄화물 층의 두께를 형성하느라 가장 늦게 HRR<sub>peak</sub>가 나타났으며 숯으로 인한 연소억제 효과에 의해 Figure 1에 나타난 바와 같이 HRR 커브가 가장 낮게 나타난 것으로 설명될 수 있다.

그러나 HRR 값은 기계장치의 노이즈(Noise)에 의한 값의 오차가 발생하므로 이를 최소화할 수 있는 새로운 HRR 값인 MARHE를 도입하였다. MARHE는 총 HRR을 시간으로 나눈 값이다<sup>(21,22)</sup>. 화재 안전성과 관련하여 MARHE는 실제 규모 조건에서 화재 발생 경향에 대한 좋은 척도로 간주 될 수 있으며, MARHE 값이 높을수록 시험편의 위험 수준이 높다는 것을 나타낸다<sup>(23)</sup>. Table 1에 나타난 바와 같이 MARHE와 HRR<sub>peak</sub>는 동일한 양상을 보였으며 재료의 위험

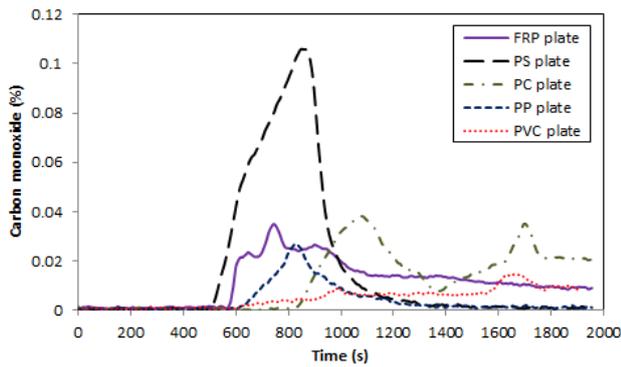


Figure 2. Carbon monoxide (%) curves of plastic at 50 kW/m<sup>2</sup> radiant heat.

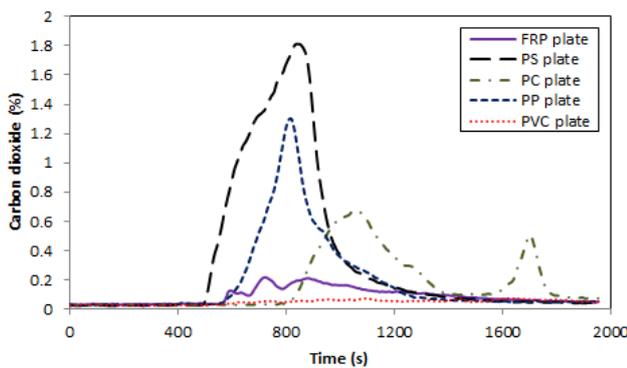


Figure 3. Carbon dioxide (%) curves of plastic at 50 kW/m<sup>2</sup> radiant heat.

성을 가장 잘 판단할 수 있는 중요한 요소라고 할 수 있다. 따라서 다른 플라스틱에 비해 PS판이 열적 위험성이 가장 컸고, PVC판이 가장 적다고 판단된다.

### 3.2 연기 특성

기체 생성물의 종류와 양은 물질에 따라 다르지만 모든 고분자 복합체는 CO와 CO<sub>2</sub>를 방출한다<sup>(20,24)</sup>. 콘칼로리미터를 이용한 CO 및 CO<sub>2</sub>의 측정은 실시간 농도를 측정하였고 이 데이터들은 질량의 감소에 따른 산출량인 CO yield, CO<sub>2</sub> yield를 주요 중요한 데이터로 사용한다. 하지만 이 데이터는 수치 미분식에 의해 얻어진 MLR을 이용하기 때문에 시간에 따른 변화율에는 큰 의미를 두지 않으며 평균값을 주로 사용한다.

CO는 특히 서서히 퍼지는 유독한 가스로 인체 내의 헤모글로빈과의 강한 결합성으로 작은 양으로도 매우 치명적이다<sup>(25)</sup>. CO<sub>mean</sub> 발생량은 Figure 2와 Table 1에 나타난 바와 같이 0.0093%로 PC판이 가장 많이 발생하였고 그 다음으로 PS판 0.0076%, PVC판 0.0051%, FRP판 0.0042% 그리고 PP판 0.0024% 순으로 발생하였다. FRP판, PS판, PP판은 700 s~900 s 사이에 최대 CO 발생량이 나타났다. PP판은 초기에 최대 CO 발생량이 나타났음에도 불구하고 전체적으로 가장 적게 발생했다. PC판은 800 s 이후에 CO 발생량

이 나타나기 시작해 1075 s에 첫 번째 피크가 나타났고, 1700 s에 두 번째 피크가 나타나 두 번의 최대 CO 발생량이 발생했으며 총 CO 발생량이 가장 높게 나타났다. 그리고 PVC판은 CO 발생량이 1200 s까지 CO 커브가 낮고 서서히 증가해 화재 시 초기 인명대피에 있어 효율적이라고 판단된다.

CO<sub>2</sub> 농도가 10% 이상이 되면 의식상실이 더욱 급속하게 나타나며 사람들은 대략 2분 이내에 의식을 잃게 된다<sup>(26)</sup>. CO<sub>2</sub>는 CO처럼 화재 시 항상 발생하며 CO<sub>2,mean</sub> 발생량은 Figure 3과 Table 1에 나타난 바와 같이 PS판이 0.2239%로 가장 많이 발생했으며 그 다음으로 PP판 0.1906%, PC판 0.1686%로 발생했고, PVC판 0.0494%와 FRP판 0.0458%로 거의 비슷한 수치로 가장 적게 발생하였다. CO와 CO<sub>2</sub>의 최대 발생량이 나타난 시간은 시간 차이가 최대 4% 이내로 거의 비슷하게 나타났다. PS판의 경우 800 s 전후로 CO 발생량이 세 번째로 높게 나타난 것에 비해 CO<sub>2</sub> 발생량은 가장 높은 것으로 보아 화재 시 연기로 인한 인명피해가 가장 높을 것으로 판단된다. 반대로 FRP판은 CO 발생량이 두 번째로 낮고 CO<sub>2</sub> 발생량은 가장 낮게 나타나 연기로 인한 인명피해가 가장 적을 것으로 판단된다.

콘칼로리미터는 실제 화재 상황을 알아보기 위해 시편의 연기 발생과 현상에 대해 알아보는 장치이다<sup>(27)</sup>. 연기는 화재가 발생했을 때 생성되며 화재발생 시 시야확보에 중요한 역할을 하므로 인명구조에 있어 연기는 가장 중요한 요소이다. S. Ishihara에 의하면 플라스틱의 연소는 목재와 합판의 연소와 유사하게 연소하는 동안에 가열온도가 상승되면 증가하는 질량감소속도에 따라 연기발생 및 연기농도가 증가하였다<sup>(28)</sup>.

시간에 따른 SPR은 감쇠계수와 배기 덕트에서 연기의 체적유량의 곱으로 계산한다<sup>(29)</sup>. SPR 값은 TSR 값과 경향성이 같게 나타났다. Table 1과 같이 PS판은 75 s에 0.331 g/s로 SPR<sub>peak</sub> 값이 가장 높게 나타났고, PP판은 70 s, 0.079 g/s로 SPR<sub>peak</sub> 값이 가장 낮게 나타났다. 그러나 Figure 4에 나타난 바와 같이 PS판은 초기부터 연기가 가장 많이 생성되어 100 s 이후부터 조금씩 줄어들기 시작했다. PS판은 열적 위험성뿐만 아니라 연기에서도 위험성이 가장 크다고 판단된다. Figure 5에 나타난 바와 같이 PVC판의 경우 가열로부터 착화 후 시편이 탄화하는 기간 동안 열 축적을 하면서 열을 많이 생성해 열을 차단하면서 열을 가지고 있어 SPR 그래프 선이 매끄럽지 않게 가장 긴 기간 동안 SPR이 나타나는 양상을 보였다.

Figure 5는 콘칼로리미터로 실험한 시편의 연소 후 탄화된 형태로서 플라스틱의 잔여물을 나타내었다. 이들 잔여물은 연소거동기 일치하며, 특히 PVC판은 다른 플라스틱에 비해 가장 많이 탄화하여 열을 차단하는 특징을 보였다. 각 시편 간에는 특징적으로 구분하여 설명하기가 어려웠다.

사용된 데이터인 TTI 및 HRR의 초기 피크의 최대값은

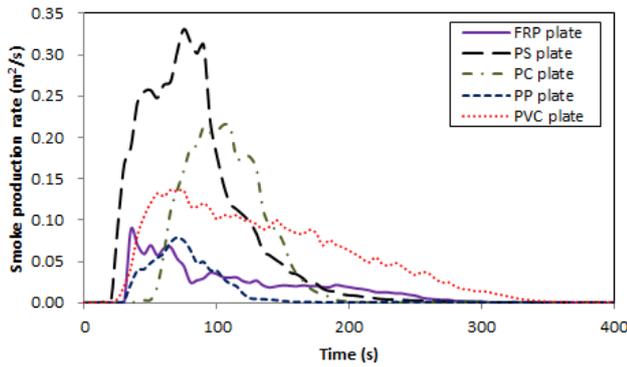


Figure 4. Smoke production rate curves of plastic at 50 kW/m<sup>2</sup> radiant heat.

Table 2. Smoke Performance Index, Smoke Growth Index and Smoke Intensity of plastic at 50 kW/m<sup>2</sup> External Heat Flux

Samples	SPI (s <sup>2</sup> / m <sup>2</sup> )	SGI (m <sup>2</sup> / s <sup>2</sup> )	SI (MW / kg)
FRP Plate	348.31	0.0025	27989.04
PS Plate	57.40	0.0044	466658.52
PC Plate	227.91	0.0020	59167.19
PP Plate	253.16	0.0011	45852.81
PVC Plate	1430.66	0.0021	4807.16

음과 같으며, Table 1의 열적 특성 값을 이용하여 Table 2에 나타내었다.

$$SPI = \frac{TTI (s)}{SPR_{peak} (m^2/s)} \quad (1)$$

이어서 연기 위험성을 예측할 수 있는 연기성장지수 (Smoke growth index, SGI)를 이용하여 평가하였다<sup>(15)</sup>. SGI는 SPR<sub>peak</sub> 값을 SPR<sub>peak</sub>에 도달하는 시간으로 나눈 값으로 정의된다. SGI 값이 클수록 SPR<sub>peak</sub>에 도달하는 시간이 짧아지며, 그 재료의 연기 위험성이 커지는 것으로 예측된다. 이는 화재 위험성이 커지는 것과 맥을 같이한다<sup>(31)</sup>. SGI를 구하는 식은 다음과 같으며, Table 1의 열적 특성 값을 이용하여 Table 2에 나타내었다.

$$SGI = \frac{SPR_{peak} (m^2/s)}{Time\ to\ SPR_{peak} (s)} \quad (2)$$

Figure 4와 Table 2에 나타난 바와 같이 PS판은 다른 4 종류의 플라스틱에 비해 SGI가 76%~300% 증가한다는 것을 알 수 있었다. 따라서 플라스틱의 SGI 값이 클수록 화재 위험성은 높아지고, 화재 안정성은 낮아진다는 것을 알 수 있으며, SPI와 SGI는 측정된 데이터를 이용해 계산하여 얻어지는 값으로, 콘칼로리미터 실험에서 재료의 연기 위험성을 파악하는데 종합적인 평가방법으로 볼 수 있다.

SEA는 SPR을 MLR로 나눈 것으로 연기관련 지수로 많이 연구되고 있다. 또 연기/화재의 위험성을 예측하기 위한 지수로 연기강도(Smoke intensity, SI)를 이용하였다<sup>(15)</sup>. SI는 전체 규모의 화재 조건에서 발생될 수 있는 연기의 잠재적 양을 추정하는 데 사용될 수 있다. SI는 연소초기 ISO 5660의 열 방출 특성 시험에서 얻어진 MARHE와 SEA의 곱으로 계산된 요소로서, 실물화재 시험에서 발생될 수 있는 연기의 성향을 예측할 수 있는 데이터이다. SI를 구하는 식은 다음과 같으며, Table 1의 열적 특성 값을 이용하여 Table 2에 나타내었다.

$$SI = MARHE (kW/m^2) \cdot SEA (m^2/kg) \quad (3)$$

평균열방사율(Average rate of heat emission, ARHE)은 총

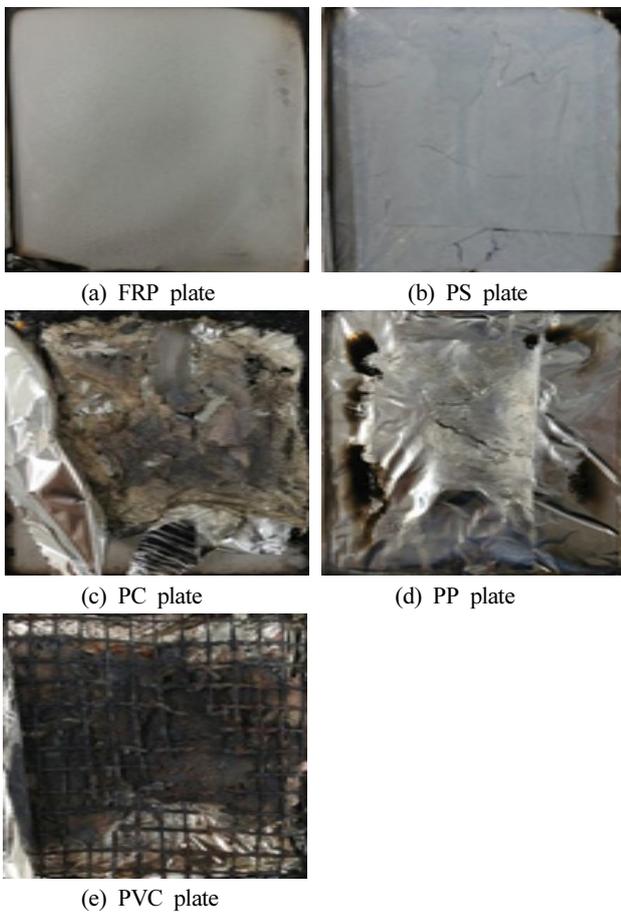


Figure 5. The residues of plastic after combustion.

물질의 화재위험성을 특성화한다<sup>(30)</sup>. 또한 연기 위험성도 맥을 같이 하는 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 플라스틱의 연기 안전성은 Chung의 방정식에 의하여<sup>(15)</sup> 연기 성능지수(Smoke performance index, SPI)를 구하였다. SPI는 TTI를 SPR<sub>peak</sub>로 나눈 값으로 정의된다. Figure 4와 Table 2에 나타난 바와 같이 PS판은 SPI값이 57.40 s<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>으로 다른 4 종류의 플라스틱에 비해 74.81%~95.99% 감소하여 연기안전성이 가장 낮다는 것을 알 수 있었다. SPI를 구하는 식은 다

HRR을 시간으로 나눈 값으로 정의되고 최대값인 MARHE는 실제 상황에서 화재 발생 경향을 보여주는 좋은 척도로 간주되고 있다. SI 값에서 PS판이 466658.52 MW/kg으로 월등히 높게 나타나 다른 플라스틱에 비해 917.73%~9607.57% 증가하여 실물 화재 시험에서 연기위험성이 가장 높을 것으로 예측되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 5종의 섬유강화플라스틱(Fiber Reinforced Plastic, FRP), 폴리스티렌(Polystyrene, PS), 폴리카보네이트(Polycarbonate, PC), 폴리프로필렌(Polypropylene, PP), 폴리염화비닐(Polyvinyl chloride, PVC) 판을 콘칼로리미터(Cone calorimeter, ISO 5660)를 이용하여 연기위험성을 Chung의 방정식에 의하여 예측하였다.

1. 최대열방출률( $HRR_{peak}$ ) 값과 최대평균열방사율(MARHE) 값은 동일한 양상을 보였으며 열적 위험성을 판단하는 데 중요한 요소라고 할 수 있다. 따라서 PS판이 열적 위험성이 가장 컸고, PVC판이 가장 낮았다.

2. PS판은 평균일산화탄소( $CO_{mean}$ ) 발생량이 3번째로 높게 나타난 것에 비해 평균이산화탄소( $CO_{2mean}$ ) 발생량은 가장 높은 것으로 보아 완전연소가 잘 이루어져 화재 시 연기로 인한 인명피해가 가장 높을 것으로 판단되며, FRP판은 일산화탄소(CO) 발생량이 두 번째로 낮고 이산화탄소( $CO_2$ ) 발생량은 가장 낮게 나타나 연기로 인한 인명피해가 가장 적을 것으로 판단된다. 그리고 PVC판은 화재 시 초기 인명 대피에 있어 비교적 효율적이라고 판단된다.

3. 플라스틱의 연기 위험성을 파악하는데 종합적인 평가 방법으로 계산한 결과 PS판은 다른 플라스틱보다 연기성능지수(SPI)가 74.81%~95.99% 감소하였고, 연기성장지수(SGI)는 76%~300%, 연기강도(SI)는 917.73%~9607.57% 증가하여 PS판은 다른 플라스틱에 비해 연기위험성이 가장 높을 것으로 예측된다.

4. PS판은 열적 측면에서나 연기적 측면에서 모두 연기로 인한 인명피해의 위험성이 가장 높았다.

#### References

1. A. A. Stec and T. R. Hull, "Fire Toxicity", Woodhead Publishing, Cambridge (2008).
2. S. Molyneux, T. R. Hull and A. A. Stec, "The Effect of Gas Phase Flame Retardants on Fire Effluent Toxicity", Polym. Degrad. Stab. pp. 36-46 (2014).
3. A. A. Alarifi, H. N. Phylaktou and G. E. Andrews, "What Kills People in a Fire? Heat or Smoke?", Presented at the 9th Saudi students conference, University of Birmingham, Birmingham, UK (2016).
4. A. A. Stec, "Fire Toxicity-The Elephant in the Room?", Fire Safety Journal, pp. 79-90 (2017).
5. R. H. White and M. A. Dietsberger, "Wood Handbook: Wood as an Engineering Material", Ch.17: Fire Safety, Forest Product Laboratory U.S.D.A., Forest Service Madison, Wisconsin, USA (1999).
6. D. A. Purser, in: P. J. DiNunno et al. (Eds.), "Toxic assessment of combustion products", The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third ed., National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA, pp. 83-171 (2002).
7. T. L. Junod, "Gaseous Emissions and Toxic Hazards Associated with Plastics in Fire Situations-A Literature Review", Nasa Technical Note, pp. 6-10 (1976).
8. L. Shi and M. Y. L. Chew, "Fire Behaviors of Polymers Under Autoignition Conditions in a Cone Calorimeter", Elsevier, pp. 243-253 (2013).
9. A. Ernst and J. D. Zibrak, "Carbon Monoxide Poisoning", N Engl. J. Med. 339, pp. 1603-1608 (1998).
10. U. C. Luft, "Aviation Physiology: the Effects of Altitude in Handbook of Physiology", American Physiology Society, Washington DC, USA, pp. 1099-1145 (1965).
11. N. Ikeda, H. Takahashi, K. Umetsu and T. Suzuki, "The Course of Respiration and Circulation in Death by Carbon Dioxide Poisoning", Forensic Sci. Int. 41, pp. 93-99 (1989).
12. D. Marquis, E. Guillaume and D. Lesenechal, "Accuracy (Trueness and Precision) of Conecalorimeter Tests with and without a Vitiated Air Enclosure", Procedia Engineering Vol. 62, pp. 103-119 (2013).
13. ISO 5660, "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)", Geneva (2015).
14. J. S. You, "A Fire Risk Assessment of Plastics by Using the Cone Calorimeter and Smoke Density Chamber", Master's Degree in Engineering, Department of Fire Protection Engineering Graduate School, Kangwon National University (2016).
15. Y. J. Chung and E. Jin, "Smoke Generation by Burning Test of Cypress Plates Treated with Boron Compounds", Applied Chemistry for Engineering, Vol. 29, No. 6, pp. 670-677 (2018).
16. ISO 5659-2, "Plastics - Smoke Generation, Part 2: Determination of Optical Density by a Single-chamber Test" (2012).
17. A. Irshad, A. Alarifi, S. Thompson, C. J. Melton, G. E. Andrews, B. M. Gibbs and H. N. Phylaktou, "Use of the Cone Calorimeter for Investigating Biomass Gasification Combustion" (2014).
18. J. D. Dehaan, "Kirks's Fire Investigation", Fifth Ed., pp. 84-112 (2002).

19. V. Babrauskas, "Development of Cone Calorimeter - A Bench - Scale Heat Release Rate Apparatus Based on Oxygen Consumption", *Fire and Materials*, Vol. 8, No. 2, pp. 81-95 (1984).
20. A. P. Mouritz, Z. Mathys and A. G. Gibson, "Heat Release of Polymer Composites in Fire", Elsevier, pp. 1040-1054 (2006).
21. G. J. Duggan, S. J. Duggan and S. G. Kummar, "New Fire Classifications and Fire Test Methods for the European Railway Industry", Interscience Communications Ltd., UK (2015).
22. EN 45545-2, "Railway Applications - Fire Protection on Railway Vehicles - Part 2: Requirements for Fire Behavior of Materials and Components", Association Francaise de Normalisation: La Plaine Saint-Denis, France (2013).
23. J. S. Bermejo, L. G. Rovira and R. Fernandez, "Fire-Retardant Performance of Intumescent Coatings Using Halloysites as a novel Fire-Retardant Additive", *Jacobs Journal of Nanomedicine and Nanotechnology* (2015).
24. A. P. Mouritz and A. G. Gibson, "Fire Properties of Polymer Composite Materials", Springer (2006).
25. N. B. Hampson, E. D. Ecker and K. L. Scott, "Use of a Noninvasive Pulse CO-Oximeter to Measure Blood Carboxyhemoglobin Levels in Bingo Players", *Respiratory Care*, Vol. 51, No. 7, pp. 758-760 (2006).
26. K. Sharabi, C. Charar, N. Friedman, I. Mizrahi, A. Zaslaver, J. I. Sznajder and Y. Gruenbaum, "The Response to High CO<sub>2</sub> Levels Requires the Neuropeptide Secretion Component HID-1 to Promote Pumping Inhibition", *PLOS Genetics*, Vol. 10 (2014).
27. S. K. Sharma, "Measurement of Smoke from Fires: The Present Trends", *Journal of Scientific & Industrial Research*, Vol. 54, pp. 98-107 (1995).
28. S. Ishihara, "Smoke and Toxic Gases Produced During Fire", *Wood Resh. Tech. Notes*, Vol. 16, No. 5, pp. 49-62 (1981).
29. Y. J. Chung, "Combustive Properties of Specimens Treated with Methylenepiperazinomethyl-Bis-Phosphonic Acid (M<sup>PI</sup>)s", *Applied Chemistry for Engineering*, Vol. 26, No. 4, pp. 505-510 (2015).
30. M. M. Hirschler, "Fire Performance of Organic Polymers, Thermal Decomposition and Chemical Composition", *ACS Symposium Series*, Vol. 797, pp. 293-306 (2001).
31. L. Liu, J. Hu, J. Zhuo, C. Jiao, X. Chen, S. Li, "Synergistic Flame Retardant Effects between Hollow Glass Microspheres and Magnesium Hydroxide in Ethylene-vinyl Acetate Composites", *Polym. Degrad Stab*, Vol. 104, pp. 87-94 (2014).