

[Research Paper]

콘칼로리미터 시험법에 의한 생활용 플라스틱의 가연성 평가

유지선 · 정영진^{*†}

강원대학교 방재전문대학원, ^{*}강원대학교 소방방재학과

Flammable Evaluation of Plastics for Living by Cone Calorimeter Test

Jisun You · Yeong-Jin Chung^{*†}

Professional Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University

^{*}Dept. of Fire Protection Engineering, Kangwon National University

(Received May 23, 2018; Revised June 20, 2018; Accepted June 21, 2018)

요 약

여러 산업분야나 일상생활에서 다양하게 쓰이고 있는 플라스틱의 중요성과 효용성에 비해 화재 위험성에 관한 연구가 매우 부족하여 본 연구에서는 5종의 플라스틱 제품의 화재 위험성을 콘칼로리미터(ISO 5660-1)로 측정하였다. 그 결과, PVC판의 착화시간(TTI)은 196 s로 다른 플라스틱보다 연소시간이 가장 지연되었고, PS판은 19 s로 착화 시간이 가장 짧았다. PS판의 총열방출열량(THR)은 가장 낮게 측정된 PVC판 보다 213.07% 높게 측정되었다. 또한 PS판의 CO는 다른 플라스틱에 비해 1.45~4.21배, CO₂는 1.77~6.97배 더 높게 나타나 불완전연소가 가장 높고 인명 피해가 가장 많이 발생할 것으로 예측된다. 따라서 화재 위험성은 PS판이 가장 위험하고, PVC판이 가장 안전한 것으로 나타났다.

ABSTRACT

It was conceived from the realization that there was a lack of studies on the fire risk compared to utility and importance of plastic which is widely used. In this study, the fire hazard of five types of plastic products was measured by Cone Calorimeter (ISO 5660-1). As a result, the time to ignition (TTI) of polyvinyl Chloride (PVC) plate delayed TTI (196 s), and polystyrene (PS) plate had the shortest TTI of 19 s. The total heat release (THR) of PS plate was measured at 213.07 % higher than the lowest measured PVC plate. Also, the PS plate will have 1.45 to 4.21 times higher CO₂ than other plastics, resulting in the highest incomplete combustion and the greatest possible damage of life. Thus, assessing the risk of fire revealed that PS plate is the most dangerous and PVC is the safest.

Keywords : Plastic, Cone Calorimeter, ISO 5660-1, Fire hazard, Risk

1. 서 론

플라스틱은 연소가 쉬우며 화염의 전파 속도가 빨라 화재 위험성뿐만 아니라 독성가스의 발생량 또한 높아 많은 인명피해와 재산피해가 발생하는 위험성을 내재하고 있다. 최근 중요한 사고 사례를 살펴보면 2003년 2월 18일 오전 9시 53분쯤 대구시 중구에서 대구지하철참사로 총 12량의 지하철 객차를 불태워 192명이 사망하고 148명이 부상당했다⁽¹⁾. 2018년 1월 26일에 경상남도 밀양시 중앙로에 있는 세종병원에서 발생한 사고로 51명이 사망하고 141명이 부상당했으며 전기합선이 원인으로 플라스틱이 다량으로 있

어 질식사로 인한 인명피해가 높게 발생했다⁽²⁾. 이 외에 크고 작은 사고 사례들이 많다. 그러나 여러 산업분야나 일상생활에서 다양하게 쓰이고 있는 플라스틱의 중요성과 효용성에 비해 화재 위험성에 관한 연구가 매우 부족하다.

Long 등은 가스발생에서 탄소량에 따른 영향에 대한 콘칼로리미터 실험 결과 CO와 CO₂의 발생량은 탄소의 질량에 의해 발생하는 것이 아니라 재료 자체에 따라 다르다고 보고한 바 있다. 그리고 순수한 중합체는 특히 숲이 높은 온도의 열을 막아 주고 그 효과는 숲의 두께가 증가할수록 더 크게 나타난다고 했다⁽³⁾. 또 Hull 등에 의하면 독성 위험성은 두 가지 중요한 요소로 결정되며, 그 요소는 가연물의

[†] Corresponding Author, E-Mail: yjchung@kangwon.ac.kr, TEL: +82-33-540-3121, FAX: +82-33-540-3119

© 2018 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

Table 1. The Properties of Plastics

Material	Glass Transition Temp. (Tg) (°C)	Density (g/m ³)
FRP Plate	130	0.2104
PS Plate	100	0.0241
PC Plate	145-150	0.1374
PP Plate	-18	0.0372
PVC Plate	87	2.8549

질량감소율과 단위당 발생하는 화재 유출물의 독성으로서 두 물질 구성의 합수라고 했다⁽⁴⁾. Hietaniemi 등은 중합체의 연소 시 CO₂는 중합체의 균등화 비율이 증가함에 따라 감소하는 반면 CO는 증가한다고 했다⁽⁵⁾.

국내에서 Lee 등은 플라스틱 단열재의 종류에 따른 열방출을 값을 제시했으며 이는 밀도와 열플럭스의 증가에 따라 증가한다고 했다⁽⁶⁾. Kim 등은 자동차 내장재에 적용되고 있는 플라스틱 합성물질에 대하여 연구하였다⁽⁷⁾.

본 연구에서는 플라스틱 연소 시 열과 연기에 관해 화재 위험성 연구를 통하여 기초자료를 확보하고, 플라스틱이 화재에 노출되었을 경우 화재위험성 뿐만 아니라 연기에 관한 위험성을 알려 인명피해를 줄이고자 한다.

따라서 시험방법은 실재 화재를 가장 잘 모사한 방법인 콘칼로리미터 시험법(ISO 5660-1)을 이용하였다⁽⁸⁾. 콘칼로리미터를 이용한 연기를 측정하는 방법은 Beer-Bourguer-Lambert의 법칙으로 일반적으로 연소생성물을 투과하는 빛의 세기가 거리에 따라 지수 함수 곱으로 감소한다는 것을 기초로 하였다. 본 연구에서 사용한 시험편은 콘칼로리미터에 수평으로 설치하고 외부 점화장치를 부착한 상태로 50 kW/m² 복사열 유속에 수십 분 동안 노출시켜 착화되는 시간과 착화된 시료로부터 열 및 연기 관련 지수를 구하였다.

2. 실험

2.1 재료

본 연구에 사용된 시험편은 대부분 많이 사용하고 있는 열경화성 플라스틱인 섬유강화플라스틱(fiber reinforced plastic, FRP)과 열가소성 플라스틱인 폴리스티렌(polystyrene, PS), 폴리카보네이트(polycarbonate, PC), 폴리프로필렌(polypropylene, PP), 폴리염화비닐(Polyvinyl Chloride, PVC)를 시중에서 구입하여 특별한 가공 없이 이물질들을 제거하고 25 °C 오븐에서 건조하여 사용하였다. 각 플라스틱의 물성은 Table 1⁽⁹⁻¹¹⁾에 나타내었다.

2.2 콘칼로리미터 시험

연소특성 시험은 ISO 5660-1의 방법에 의해 Dual Cone Calorimeter (Fire Testing Technology)를 이용하여 열유속(heat flux) 50 kW/m² 조건에서 수행하였다⁽⁸⁾. 사용한 시험

편의 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 산소분석기의 산소농도가 20.95 ± 0.01%가 되도록 교정하고 배출유량을 0.024 ± 0.002 m³/s, 콘히터의 열량이 설정값 ± 2% 이내로 설정하였다.

시험편은 단열재인 저밀도 유리섬유를 이용하여 높이를 조절하였으며, 시편 홀더로의 열손실을 감소시키기 위하여 전도도가 낮은 고밀도 세라믹판 재료로 절연시켰다. 시편 홀더는 수평방향으로 위치시켰다. 시편의 체적밀도는 시험하기 전에 부피와 무게를 측정하여 계산하였다. 연소시험은 스파크 점화 후 지속적인 불꽃 연소가 시작된 때부터 30분 경과 후에 종료하였으며, 추가로 2분간의 데이터 수집시간을 부여하였다.

본 연구에서 선정된 시험편은 콘칼로리미터에 수평으로 설치하고 외부 점화장치를 부착한 상태로 50 kW/m² 복사열 유속에 수십 분 동안 노출시켜 착화되는 시간과 착화된 시료로부터 열 및 연기 관련 지수를 구하였다.

3. 결과 및 고찰

가연물과 관련하여 연소 특성의 이해를 돕는 중요한 성질은 착화시간(time to ignition, TTI)과 질량감소율(mass loss rate, MLR)이다. Table 2는 본 연구에서 선정하여 실험한 플라스틱의 연소특성을 나타내었다.

TTI는 시험편의 열원에 의한 노출로부터 지속적인 불꽃 연소의 시작 전까지를 나타내었다. PS판과 PP판은 각각 19 s와 20 s로 연소가 용이하였고, PVC판은 196 s로 매우 늦게 불꽃연소가 시작되어 연소시간이 가장 지연되었다⁽¹²⁾. 이는 PVC판이 다른 플라스틱보다 유리전이온도가 낮고, 밀도가 상당히 높아 TTI도 매우 늦은 것으로 보인다.

MLR은 화재거동에 대하여 추가적인 정보를 준다⁽¹³⁾. Figure 1에 나타난 바와 같이 PVC판의 MLRpeak이 가장 높았고, 그 다음으로는 PP판이 높았다. 그리고 PS판과 PC판은 비슷한 MLRpeak을 보였으며, FRP판이 가장 낮게 나타났다. 또 MLRpeak은 PS판이 10 s로 가장 빨리 나타났고, PVC판이 210 s로 가장 늦게 나타났다. 이것은 PVC판의 높은 밀도와 자체의 난연성에 의한 장시간의 연소과정에 기인한 것으로 예상된다^(14,15).

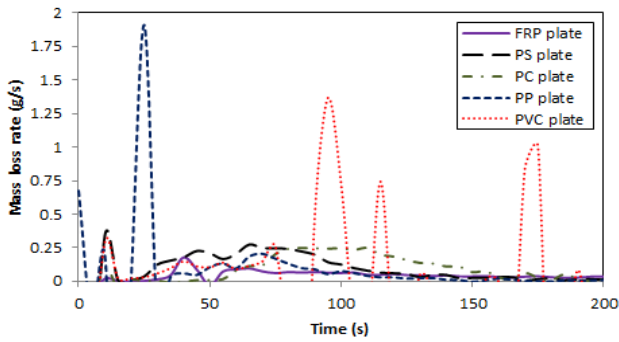


Figure 1. MLR curves of plastic at 50 kW/m² radiant heat.

이에 대하여 MLR (\dot{m})은 다음과 같은 관계식으로 주어진다⁽¹⁶⁾.

$$\dot{Q} \text{ (HRR)} = \dot{m} \cdot \Delta h_c \text{ 또는 } \dot{m} = \dot{Q} \text{ (HRR)} / \Delta h_c \quad (1)$$

여기에서 \dot{Q} (kW) = HRR; \dot{m} (kg/s) = MLR; Δh_c (kJ/kg) = EHC로 표시된다. MLR은 열방출률(heat release rate, HRR)을 유효연소열(effective heat of combustion, EHC)로 나눈 값으로 표시된다. PP판은 초기 25 s에 급격히 MLR이 일어났고, PVC판은 95~175 s 사이에 비교적 빈번이 MLR 그래프가 높게 나타났는데 이는 PVC판은 196초로 가장 늦게 착화되어 그 이후에 MLR이 일어났고, 탄화된 PVC판의 숯이 축적된 열에 의하여 재연소 과정을 거치면서 가연성 질량의 감소로 확인할 수 있었다⁽¹⁷⁾.

다음은 Table 2 및 Figure 2에 총방출열량(total heat release, THR)을 나타내었다. THR은 각 실험에서 실험재료의 연소로 인해 방출된 열량으로서 화재 발생 시 발생하는 열의 총량을 의미한다. 이는 시료 표면적당 시간에 대한 함수로 표현되는 열방출을 주어진 시간을 적분하여 계산한 값이다⁽¹⁸⁾.

PVC판은 196 s로 가장 늦게 착화되어 MLR이 가장 높게 나타나 시편을 가장 많이 연소시켰지만 PVC판 자체의 화학종, -Cl에 의해⁽¹⁹⁾ 탄화층이 형성됨으로써 탄화층 표면에 흡수된 열이 축적되지 않고 탄화층 표면을 미세하게 균열시켜⁽²⁰⁾ THR 값이 낮게 나타난 것으로 보인다. 반면 PS판은 시편을 19 s로 가장 빠르게 착화시켜 MLR값이 낮게 나타났지만 비교적 다른 플라스틱보다 숯의 생성 없이 시편 표면에 열을 계속 축적시켜 THR 값이 74.15 MJ/m²으로 가장 높게 나타난 것으로 보인다. Table 1에 나타난 바와 같이 이는 다른 플라스틱보다 유리전이온도가 낮은 PS판의 특성으로 보인다.

또한 EHC는 MLR과 함께 물질의 화재거동에 추가적인 정보를 제공해 주기 위하여 사용될 수 있다. EHC는 한 가지의 분해 형태를 갖는 균일한 시편의 연소시간 동안의 상수로서 이론적인 순연소열의 값보다 적다⁽²¹⁾. 한 가지 이상의 분해형태를 갖는 재료나 복합재료 또는 비균일한 재료의 유효연소열은 반드시 일정하지 않다.

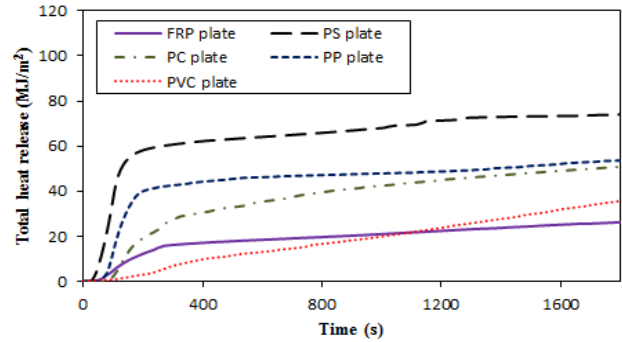


Figure 2. THR curves of plastic at 50 kW/m² radiant heat.

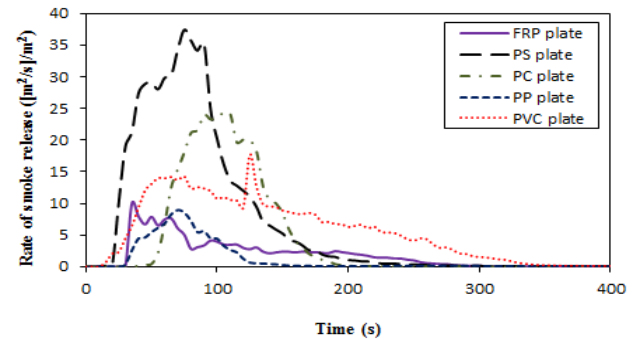


Figure 3. RSR curves of plastic at 50 kW/m² radiant heat.

Table 2. An Analysis of the Combustion Characteristics with Cone Calorimeter

Samples	TTI ^a (s)	MLR ^b _{peak} (g/s)	THR ^c (MJ/m ²)
FRP Plate	31	0.18	26.23
PS Plate	19	0.29	74.15
PC Plate	49	0.28	51.25
PP Plate	20	1.91	53.55
PVC Plate	196	3.85	34.80
Samples	EHC ^d (MJ/kg)	RSR ^e ([m ³ /s]/m ²)	SEA ^f (m ² /kg)
FRP Plate	15.14	0.35	449.84
PS Plate	30.30	1.48	1169.16
PC Plate	16.75	0.91	612.37
PP Plate	15.38	0.29	212.37
PVC Plate	27.15	1.21	155.22

^aTime to ignition; ^bPeak mass loss rate; ^cTotal heat release rate; ^dEffective heat of combustion; ^eRate of smoke release; ^fSpecific extinction area

Table 2에 나타난 바와 같이 플라스틱의 EHC 값은 PS판 > PVC판 > PC판 > PP판 > FRP판의 순으로 나타났다. 이는 연기를 나타내는 항목인 연기방출률(rate of smoke release, RSR)과 근접한 양상을 보였다.

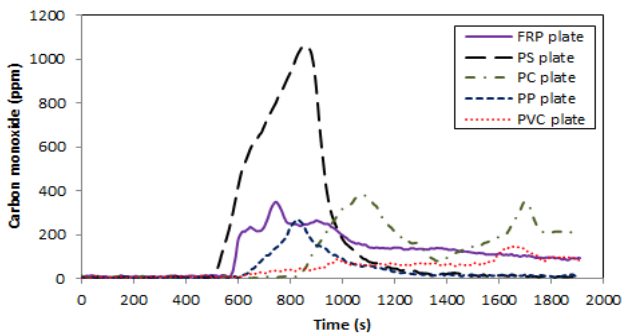


Figure 4. CO curves of plastic at 50 kW/m² radiant heat.

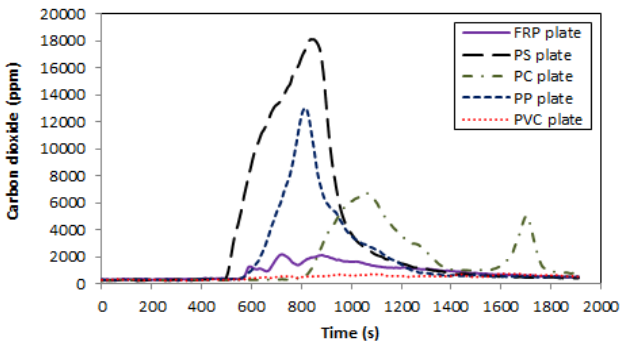


Figure 5. CO₂ curves of plastic at 50 kW/m² radiant heat.

연기지수에 관련하여 RSR은 완전연소가 이루어지지 않는 화재에서 유효연소열의 특징을 잘 말해주며, 시간에 따른 연기의 발생량을 실험에 사용된 시편의 노출면적으로 나눈 값으로서 구획 화재의 경우 화재가 발생한 구역 내 물질의 면적에 따른 연기발생량을 예측할 수 있다⁽²²⁾. Table 2에 나타난 바와 같이 RSR값이 가장 높게 나타난 PS판은 다른 플라스틱에 비해 1.38~2.83배 높게 나타났다. 이에 PS판은 연기에 대한 위험성이 높게 내재되어 있다는 것을 알 수 있었다.

또한 비감쇠면적(specific extinction area, SEA)는 RSR과 유사한 형태의 연기지수로서 연기발생속도(smoke production rate, SPR)를 MLR로 나눈 것으로 연기관련 지수로 많이 연구되고 있다⁽²³⁾. Figure 3과 Table 1에 나타났듯이 PS판은 PVC판에 비해 7.53배 더 높게 나타났다. PVC판의 경우 연소억제 작용의 효과가 있는 것으로 판단되며, 앞서 연기에 대한 위험성이 높게 나타난 PS판은 연소억제 작용이 가장 나쁜 것으로 보인다.

화재 시 발생하는 비열적 위험을 주는 화학물질들은 주로 연기, 독성, 부식, 냄새 등으로 화재로 인한 희생자 중에서 약 75~80%는 직접적인 화염에 의한 것이 아니라 연기, 유독가스 등의 흡입 또는 산소 고갈에 의한 것으로 알려져 있다⁽²⁴⁾.

Table 2와 같이 PVC판은 산소가 가장 많이 작용하면서 MLR값도 크게 발생했으므로 THR값이 높게 나타나야 했

으나, 앞서 설명한 것과 같이 PVC판 자체의 난연성 때문에 THR값은 적게 발생했다. 반면 FRP판과 PC판은 산소가 2번째와 3번째 순으로 많이 작용하였음에도 불구하고 MLR값과 THR값이 가장 적게 발생했다. 이는 Table 1과 같이 다른 3종류의 플라스틱보다 유리전이온도와 밀도가 매우 높은 것으로 이해된다. 각 플라스틱의 특성은 Table 1에 나타내었다.

가연성 물질들은 화재 시 다양한 연소유독가스들을 발생시킨다. 발생하는 다양한 유독가스들 중에서 본 연구에서는 CO, CO₂를 중심으로 살펴보았다. Kimmerle의 연구에 따르면 15% 미만의 O₂ 농도는 사람들에 치명적인 영향을 미칠 수 있기 때문이며, 또 매우 높은 농도의 CO₂와 낮은 농도 CO일지라도 사람을 질식사시킬 수 있기 때문이다⁽²⁵⁾. CO는 휘발성 물질의 불완전연소의 반응생성물이다. 특히 일산화탄소는 흡입 시 인체 내 서서히 퍼지는 유독한 가스로 헤모글로빈과의 강한 결합성으로 적은 양으로도 매우 치명적이다.

Ernst 등은 CO가 Carboxyhemoglobin (COHb)을 형성하여 저산소증을 일으키고 Oxyhemoglobin의 해리를 일으킨다고 하였다⁽²⁶⁾. CO와 마찬가지로 이산화탄소(CO₂)도 화재 시 발생하며, Purser는 5% 이하의 CO₂가 호흡을 자극해 호흡량을 증가시킨다고 하였다⁽²⁷⁾.

그리고 King의 연구에 따르면, CO₂는 대략 3~6%일 때 호흡장애의 정도가 증가하고, 대략 5~6%의 경우 호흡장애의 정도가 점점 심해지면서 두통 및 구토와 함께 호흡실패가 나타나고, 6% 정도의 CO₂에서 사람들은 20분 이상 견디기 힘들어진다⁽²⁸⁾. 7~10%의 경우 CO₂는 졸리거나 현기증 그리고 의식상실이 호흡 시 복합적으로 함께 나타난다. 또한 CO₂ 농도가 10% 이상이 되면 의식상실이 더욱 급속하게 나타나며 사람들은 대략 2분 이내에 의식을 잃게 된다.

CO 발생량은 PP판(41.12 ppm) < PVC판(49.94 ppm) < FRP판(115.62 ppm) < PC판(119.46 ppm) < PS판(173.08 ppm)이며, CO₂ 발생량은 PVC판(493.29 ppm) < FRP판(898.50 ppm) < PC판(1718.28 ppm) < PP판(1943.05 ppm) < PS판(3440.15 ppm)으로 서로 다르게 나타났다. CO 발생량에서는 PS판과 PC판이 가장 많이 발생하여 불완전 연소가 높아 인명피해가 가장 많이 발생할 것으로 예측된다. CO₂ 발생량에서는 PS판과 PP판이 가장 많이 발생하여 완전연소가 높았다. 두 성분을 종합해서 생각해보면 CO₂/CO의 낮은 비율은 더 적은 연소효율을 나타내며 더 높은 화재 독성도를 나타낸다. FRP판이 낮은 연소효율과 제일 높은 화재 독성도를 가졌으며 PP판이 높은 연소효율과 가장 낮은 화재 독성도를 갖는 것으로 나타났다.

플라스틱판의 최대산소결핍농도(O₂ peak depletion)은 Table 3에 나타내었다. 최대산소결핍농도(O₂ peak depletion)는 20.951~20.975%이므로, 통상 대기 중의 산소농도와 차별성이 없으므로 그로 인한 위험성은 매우 낮을 것으로 예상된다.

Table 3. The Generation of Toxic Gas

Samples	CO _{ave} (ppm)	CO ₂ _{ave} (ppm)	CO ₂ /CO	O ₂ Peak Depletion (%)/s
FRP Plate	115.62	898.50	7.771	20.951/40
PS Plate	173.08	3440.15	19.876	20.952/305
PC Plate	119.46	1718.28	14.384	20.972/375
PP Plate	41.12	1943.05	47.253	20.975/530
PVC Plate	49.94	493.29	9.878	20.961/275

4. 결 론

본 연구에서는 콘칼로리미터 시험법으로 5종의 섬유강화플라스틱(fiber reinforced plastic, FRP), 폴리스티렌(polystyrene, PS), 폴리카보네이트(polycarbonate, PC), 폴리프로필렌(polypropylene, PP), 폴리염화비닐(Polyvinyl Chloride, PVC) 플라스틱 제품의 화재 위험성을 Cone Calorimeter(ISO 5660-1)로 측정하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 착화시간(TTI)은 PVC판이 196 s로 다른 플라스틱보다 연소시간이 가장 지연되었고, PS판 19 s과 PP판 20 s로 연소가 용이하였다.

2) 총방출열량(THR)값은 PS판 74.15 MJ/m², PP판 53.55 MJ/m², PC판 51.25 MJ/m², FRP판 26.23 MJ/m², PVC판 34.80 MJ/m² 순으로 나타났다. 따라서 PS판이 화재위험성이 가장 높고, PVC판이 가장 낮은 것으로 예측되었다.

3) 각 플라스틱의 유효연소열(EHC)은 PS판(30.30 MJ/kg) > PVC판(27.15 MJ/kg) > PC판(16.75 MJ/kg) > PP판(15.38 MJ/kg) > FRP판(15.14 MJ/kg)의 순으로 나타났다.

4) 비감쇠면적(SEA)은 PS판(1169.16 m²/kg) > PC판(612.37 m²/kg) > FRP판(449.84 m²/kg) > PP판(212.37 m²/kg) > PVC판(155.22 m²/kg)의 순으로 나타나 PVC판의 경우 연기 위험성이 가장 낮았고, PS판은 연기 위험성이 가장 높았으며 연소억제 작용이 가장 낮았다.

5) CO 발생량은 PP판(41.12 ppm) < PVC판(49.94 ppm) < FRP판(115.62 ppm) < PC판(119.46 ppm) < PS판(173.08 ppm)이며, CO₂ 발생량은 PVC판(493.29 ppm) < FRP판(898.50 ppm) < PC판(1718.28 ppm) < PP판(1943.05 ppm) < PS판(3440.15 ppm)으로 서로 다르게 나타났다. CO 발생량에서는 PS판과 PC판이 가장 많이 발생하였고, CO₂ 발생량에서는 PS판과 PP판이 가장 많이 발생하였다.

플라스틱 5 종류에 대하여 콘칼로리미터로 가연성을 평가한 결과 PS판이 가장 위험하였고, PVC판이 가장 안전한 것으로 나타났으며, PC판과 FRP판은 비교적 열의 위험성은 낮게 나타났으며 연기의 위험성이 높게 나타났고, PP판은 PVC판 다음으로 화재 위험성이 비교적 낮은 것을 본 연구를 통해 알 수 있었다.

References

1. Seoul News, "Daegu Subway Disaster" of Dogok Station, Line 3 Reminds Me (2014).
2. Hello TV News, "Sejong Hospital Fire" Most of the Victims Died of Suffocation (2018).
3. L. Shi and M. Y. L. Chew, "Fire Behaviors of Polymers under Autoignition Conditions in a Cone Calorimeter", Fire Safety Journal, Vol. 61, pp. 243-253 (2013).
4. T. R. Hull, D. Brein and A. A. Stec, "Quantification of Toxic Hazard from Fires in Buildings", Journal of Building Engineering, Vol. 8, pp. 313-318 (2016).
5. J. Hietaniemi, R. Kallonen and E. Mikkola, "Burning Characteristics of Selected Substances: Production of Heat, Smoke and Chemical Species", Fire and Materials, Vol. 23, No. 4, pp. 171-185 (1999).
6. K. W. Lee and K. E. Kim, "Fire Characteristics of Plastic Insulating Materials from Cone Calorimeter Test", Fire Science and Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 76-83 (2003).
7. H. P. Lee and Y. T. Kim, "A Study on the Fire Risk of Car Interior Materials", Journal of Korean Institute Fire Science & Engineering, Vol. 24, No. 2, pp. 82-88 (2010).
8. 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)", Geneva, Switzerland (2015).
9. P. Beverly, "fib Model Code for Concrete Structures 2010", Wilhelm Ernst & Sohn, p. 142 (2013).
10. N. R. Jadhav, V. L. Gaikwad, K. J. Nair and H. M. Kadam, "Glass Transition Temperature: Basics and Application in Pharmaceutical Sector", Asian Journal of Pharmaceutics, pp. 82-89 (2009).
11. B. Acherjee, A. S. Kuar, S. Mitra and D. Misra, "Empirical Modeling and Multi-Response Optimization of Laser Transmission Welding of PC to ABS", Lasers in Manufacturing and Materials Processing, Vol. 2, No. 3, pp. 103-123 (2015).
12. Q. Xu, C. Jin, M. Zachar and A. Majlingova, "Test Flammability of PVC Wall Panel with Cone Calorimetry", Procedia Engineering, Vol. 62, pp. 754-759 (2013).

13. M. Delichatsios, B. Paroz and A. Bhargava, "Flammability Properties for Charring Materials", *Fire Safety Journal*, Vol. 38, No. 3, pp. 219-228 (2003).
14. J. Yu, L. Sun, C. Ma, Y. Qiao and H. Yao, "Thermal Degradation of PVC: A Review", *Waste Management*, Vol. 48, pp. 300-314 (2016).
15. W. Hui, C. Xiao-lei, B. Yang, G. Chao and Z. Li, "Application of Dissolved Air Flotation on Separation of Waste Plastics ABS and PS", *Waste Management*, Vol. 32, pp. 1297-1305 (2012).
16. V. Babrauskas, "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", Fourth Ed., National Fire Protection Association, Massachusetts, USA (2008).
17. A. Marcilla and M. Beltran, "Thermogravimetric Kinetic Study of Poly(Vinyl Chloride) Pyrolysis", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 48, No. 2, pp. 219-229 (1995).
18. Y. J. Chung, "Combustion Characteristics of Pinus rigida Plates Painted with Alkylenediaminoalkyl-Bis-Phosphonic Acid Derivatives", *Fire Science and Engineering*, Vol. 27, No. 5, pp. 57-63 (2013).
19. Y. Matsuzawa, M. Ayabe and J. Nishino, "Acceleration of Cellulose co-Pyrolysis with Polymer", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 71, No. 3, pp. 435-444 (2001).
20. 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", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 113, pp. 123-132 (2015).
21. J. G. Quintiere, "Principles of Fire Behavior, chap. 5", Cengage Learning, Delmar, USA (1998).
22. B. W. Shin, Y. H. Song, D. H. Rie and K. S. Chung, "A Study on the Analysis of Smoke Density Characteristics for Wood-Plastic Composites", *Journal of Korean Institute Fire Science & Engineering*, Vol. 25, No. 3, pp. 119-124 (2011).
23. Y. J. Chung, "Combustive Properties of Low Density Polyethylene and Ethylene Vinyl Acetate Composites Including Magnesium Hydroxide", *Journal of Korean Institute Fire Science & Engineering*, Vol. 25, No. 5, pp. 69-75 (2011).
24. R. H. White and M. A. Dietenberger, "Wood Handbook: Wood as an Engineering Material", Ch. 17: Fire Safety, Forest Product Laboratory U.S.D.A., Forest Service Madison, Wisconsin, USA (1999).
25. G. Kimmerle, "Aspects and Methodology for the Evaluation of Toxicological Parameters During Fire Exposure", *Journal of Combustion Toxicology*, Vol. 1, pp. 4-51 (1974).
26. A. Ernst and J. D. Zibrak, "Carbon Monoxide Poisoning", *New England Journal of Medicine*, Vol. 339, No. 22, pp. 1603-1608 (1998).
27. D. A. Purser, "A Bioassay Model Fortesting the Incapacitating Effects of Exposure to Combustion Product Atmospheres Using Cynomolgus Monkeys", *Journal of Fire Sciences*, Vol. 2, No. 1, pp. 20-26 (1984).
28. B. G. King, "High Concentration-short Time Exposures and Toxicity", *Journal of Industrial Hygiene and Toxicology*, Vol. 31, No. 6, pp. 365-375 (1949).