[Research Paper]

플라스틱류의 화재 위험성 등급 평가

유지선 · 정영진^{*†}

강원대학교 소방방재연구센터 연구원, *강원대학교 소방방재공학과 교수

Rating Evaluation of Fire Risk Associated with Plastics

Ji Sun You · Yeong-jin Chung^{*†}

Researcher, Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National Univ.,

*Professor, Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National Univ.

(Received February 26, 2021; Revised March 11, 2021; Accepted March 15, 2021)

요 약

본 연구에서는 유리섬유강화플라스틱(glass fiber reinforced plastic, GFRP), 폴리스티렌(polystyrene, PS), 폴리카보네이트(polycarbonate, PC), 폴리프로필렌(polypropylene, PP), 폴리염화비닐(polyvinyl chloride, PVC)을 선정하여 ISO 5660-1의 기준에 따라 콘칼로리미터(cone calorimeter)를 이용하여 측정하였다. 측정된 값으로 Chung's equations-II에 의한 화재 위험성을 예측하고자 하였고, 이를 확장하여 화재 시 화재 위험성 평가를 표준화하기 위하여 기준물질(PMMA)을 사용하여 새로운 Chung's equations-III와 Chung's equation-IV에 의한 화재 위험성을 등급화하여 평가하였다. Chung's equations-II의 FPI-II 값은 PVC가 32.04 s²/kW로 화재성능지수-II가 가장 높았고, PS가 0.07 s²/kW로 화재성능지수-II가 가장 낮았다. FGI-II 값은 PVC가 0.09 kW/s²로 화재성장지수-II가 가장 낮았고, PS가 3.41 kW/s²로 화재성장지수-II가 가장 높았다. Chung's equations-III의 FPI-III에서 PS가 0.2로 화재성능지수-III가 가장 낮게 나타났고, PVC가 89로 화재성능지수-III가 가장 높았다. FGI-III에서는 PS가 20.1로 화재성장지수-III가 가장 높게 나타났고, PVC는 0.5로 가장 안전한 물질로 판단하였다. 그리고 Chung's equation-IV의 FRI-IV는 PS (100.5) >> PP (2.43) > PC (1.12) > PMMA (1.0) > FRP (0.19) > PVC (0.01)의 순서로 나타났다. 따라서 PVC가 화재 위험성이 가장 낮고, PS가 가장 높은 것으로 판단하였다.

ABSTRACT

In this study, plastics such as glass fiber reinforced plastic (GFRP), polystyrene (PS), polycarbonate (PC), polypropylene (PP), polyvinyl chloride (PVC) were selected, and the fire risk associated with them was investigated using a cone calorimeter, as per ISO 5660-1. These values were measured to comprehensively predict the fire risk by Chung's equations-II. Standard materials (PMMA) were used to standardize the fire hazard assessment, and the fire risk was classified and evaluated by new Chung's equations-III and Chung's equation-IV. The fire performance index-II of Chung's equations-II showed that PVC had the highest FPI-II of 32.04 s²/kW, whereas PS had the lowest FPI-II of 0.07 s²/kW. From the viewpoint of FGI-II, the lowest fire growth index-II was 0.09 kW/s² for PVC, and the highest fire growth index-II for PS was 3.41 kW/s². The FPI-III of Chung's equations-III had the lowest fire performance index-III for PS (0.02) and highest fire performance index-III for PVC (89). The FGI-III had the highest fire growth index-III of 20.1, and PS and PVC were found to be the safest materials with an FGI of 0.5. The FRI-IV of Chung's equation-IV was in the following order: PS (100.5) >> PP (2.43) > PC (1.12) > PMMA (1.0) > FRP (0.19) > PVC (0.01). Therefore, it was concluded that the fire risk associated with PVC is lowest, whereas that associated with PS is highest.

Keywords : Cone calorimeter, Plastic, Fire performance index-III (FPI-III), Fire growth index-III (FGI-III), Fire risk index-IV (Chung's equation-IV)

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

© 2021 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

1. 서 론

화재는 연간 30만 명 이상의 사망자를 발생시키며, 전 세계적으로 네 번째로 큰 사고 원인이다(도로 사고, 추락, 익사). 집중된 인구밀도와 높은 경제적 가치, 건축물 등으로 인해 고층건물 및 주거단지 화재는 주요 도시재해 중 하나이다⁽¹⁾.

건축물에 사용되고 있는 구조 재료로는 목재, 엔지니어링 플라스틱, 복합 재료, 석재, 시멘트, 콘크리트, 금속, 유리, 세라믹 타일 등이 있다. 그 중 플라스틱은 현대 건축 산업에서 떼려야 뗄 수 없는 중요한 부분이다⁽²⁾.

플라스틱은 공공기반 시설 분야에서 점점 더 많은 역할을 하고 있고, 이 분야에서 두 번째로 가장 큰 소비재이다. 응용 범위는 건물 내외부의 구조적 용도부터 비구조적 용도, 즉 파이프, 부품들, 밸브, 고강도 및 구조 부재에 이르기까지 다양하다⁽³⁾. 이렇게 쓰임과 중요성이 높아질수록 위험성 또한 높아질 수밖에 없다.

화재 시 높은 온도, 거대한 열방출률(heat release rate, HRR) 그리고 빠른 화재 성장을 수반하는 유기 고분자 물질의 연소는 많은 양의 연기와 독성 가스를 생성한다⁽⁴⁾. 연소 과정 동안 고분자 사슬과 첨가제 사이의 물리적 및 화학적 상호 작용의 복잡성은 복합재의 화재 거동에 대한 예측을 어렵게 만든다⁽⁵⁾. 이처럼 플라스틱의 화재 거동을 예측하는 데 많은 어려움이 따른다. 하지만 이에 대한 연구는 다양하게 이루어져 왔다.

이에 화재 조건에서 플라스틱에서 방출되는 유독가스는 목재와 같은 셀룰로오스 재료로부터 나오는 유독가스보다 탄소, 수소 그리고 산소를 갖고 있는 플라스틱에서 유독가스가 더 많이 발생한다고 하였다⁽⁶⁾.

또 자연발화 조건에서 탄화가 되지 않는 플라스틱과 탄화되는 플라스틱을 구분하여 선정해 콘칼로리미터로 실험한 결과 HRR은 탄화되지 않는 플라스틱들이 탄화되는 플라스틱들 보다 더 높았다고 보고하였다⁽⁷⁾.

Sonnier 등은 연소하는 동안 물질의 거동은 많은 화학적 및 물리적 현상을 포함하기 때문에 다소 복잡함을 보고하였다. 게다가 물질은 대부분 여러 구성 요소로 구성되며 각 구성 요소(폴리머, 유기나 무기물, 불활성이나 반응하는 내연제)는 자체 속도에 따라 열분해 되며, 구성 요소의 열분해 속도는 주로 자체의 열 안정성에 달려 있다고 하였다⁽⁸⁾.

그리고 평균 HRR이 커질수록 가연물이 더 격렬하게 타고, 질량 손실률이 더 커질수록 시편을 무력하게 만들기 쉽고 불꽃 전파 속도가 더 빨라지고, 화재 위험이 더 커진다고 보고한 바 있다⁽⁹⁾.

따라서 가연물의 화재 위험성은 화재 조건에 노출되었을 때 연소 성능을 효과적으로 평가할 수 있는 핵심요소로 착화성, HRR, 화재의 전파 및 연소가스의 유해성 등으로 평가할 수 있다. 이들 중 건자재의 중요한 화재성질은 연소하는 동안에 발생하는 HRR을 측정하는 것이다. HRR은 화

재 시에 가연물의 잠재 위험성을 나타내기 때문에 중요하다.

HRR을 측정하는 방법들이 많이 발전되어 왔지만 그 중 하나인 콘칼로리미터가 있다⁽¹⁰⁾. 이 시험 방법은 일반적으로 “순연소열은 연소하는데 필요로 하는 산소의 양에 비례한다”는 점에 기초를 두고 있다. 즉, 산소 1 kg이 소비되면 약 13.1×10^3 kJ의 열이 방출된다는 관계가 성립한다⁽¹¹⁾.

따라서 본 연구에서는 유리섬유강화플라스틱(glass fiber reinforced plastic, GFRP), 폴리스티렌(polystyrene, PS), 폴리 카보네이트(polycarbonate, PC), 폴리프로필렌(polypropylene, PP), 폴리염화비닐(polyvinyl chloride, PVC)를 선정하여 ISO 5660-1의 기준⁽¹²⁾에 따라 콘칼로리미터(cone calorimeter)를 이용하여 외부 복사열원에 의한 연소특성으로 열 및 연기 관련 값 등을 측정하였다.

측정된 값으로 Chung's equations-II⁽¹³⁾에 의한 화재 위험성을 종합적으로 예측하고자 하였다. 이를 확장하여 화재 시 화재 위험성 평가를 표준화하기 위하여 기준물질(PMMA)을 사용하여 새로운 Chung's equations-III와 Chung's equation-IV⁽¹³⁾에 의한 화재 위험성을 등급 평가하고자 한다. 이것은 콘칼로리미터 시간, 열, 연기의 세 가지 변수를 토대로 지수간의 상관관계를 확장시켜 등급화하여 더 정확한 화재 위험성을 판단하기 위함이다.

2. 실험 방법 및 조건

2.1 재료

본 연구에 사용된 플라스틱은 유리섬유강화플라스틱(glass fiber reinforced plastic, GFRP)으로 유리 섬유 보강재(30~50 wt%), 불포화 폴리에스테르수지(27~57 wt%), 희석제(styrene)(10~20 wt%), 라디칼 중합 개시제(benzoyl peroxide, B.P.O.)(3 wt%)로 구성되었으며, 폴리스티렌(polystyrene, PS), 폴리 카보네이트(polycarbonate, PC), 폴리프로필렌(polypropylene, PP), 폴리염화비닐(polyvinyl chloride, PVC)를 구입하여 특별한 가공 없이 이물질 제거하고 25 °C 오븐에서 건조하여 사용하였다. 폴리머 시편에 충전제와 첨가제가 포함되지 않았다. 각 플라스틱의 물성은 Table 1에 나타내었다⁽¹⁴⁾.

2.2 콘칼로리미터 시험

연소특성 시험은 ISO 5660-1의 방법⁽¹²⁾에 의해 dual cone calorimeter (Fire Testing Technology)를 이용하여 열유속(heat flux) 50 kW/m² 조건에서 수행하였다. 사용한 시험편의 두께는 2 mm로서 100 mm × 100 mm (±2%) 크기의 규격으로 제작하였으며, 이들의 연소특성을 비교하기 위하여 기준물질로 PMMA ($T_g = 114$ °C, $D = 1.18$ g/cm³)의 시편을 10 mm로 사용하였다.

시험조건은 온도 23 ± 2 °C, 상대습도 $50 \pm 5\%$ 에서 함량이 될 때까지 유지한 다음 알루미늄 호일로 비노출면을 감싼다. 시험에 앞서 콘히터의 열량이 설정값 $\pm 2\%$ 이내, 산소분석기의 산소농도가 $20.95 \pm 0.01\%$ 가 되도록 교정하고

Table 1. The Characteristics of Each Plastic

Specimens	Glass transition temp. (T_g) ($^{\circ}\text{C}$)	Density range (g/cm^3)
FRP	130	1.68
PS	80	1.04
PC	147	1.20
PP	-20	0.90
PVC	82	1.28

Figure 1. The heat release rate curves at $50 \text{ kW}/\text{m}^2$ external heat flux.

배출유량을 $0.024 \pm 0.002 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 설정하였다.

시편은 단열재인 저밀도 유리섬유를 이용하여 높이를 조절하였으며, 시편 홀더로의 열손실을 감소시키기 위하여 전도도가 낮은 고밀도 세라믹판으로 절연시켰다. 시편 홀더는 수평방향으로 위치시켰다. 장비내의 콘히터 부분은 외부 열유속을 유지시키며, 스파크 점화기로 시편을 점화시켰다. 복사열에 노출된 시편의 열방출률을 측정하는 방법으로 규정한다.

시편의 체적밀도는 시험하기 전에 부피와 무게를 측정하여 계산하였고, 장비 내 저울을 이용하여 연소되는 시편의 무게를 측정하였다. 연소시험은 지속적인 불꽃 연소가 시작된 때부터 30 min 후에 종료하였으며, 추가적으로 2 min간의 데이터 수집시간을 부여하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열 특성

착화시간(time to ignition, TTI)은 Table 2에 나타난 바와 같이 PS가 19 s이고, PP가 20 s로 가장 빠르게 나타났고, PVC가 196 s로 가장 느리게 나타났다. 그 중 PP는 밀도가 $0.9 \text{ g}/\text{cm}^3$ 로 가장 낮아 TTI가 빠른 것으로 보인다. 그리고 Table 1에 나타난 바와 같이 PS와 PVC는 T_g 와 밀도의 값이 비슷했으나, 플라스틱 자체의 특성과 구조에 따른 열분해

때문인 것으로 판단된다.

$50 \text{ kW}/\text{m}^2$ 의 외부 열원에서 시험한 시험편의 최대열방출률(peak heat release rate, HRR_{peak})을 Figure 1과 Table 2에 나타냈다. PS의 HRR_{peak} 값이 $773.44 \text{ kW}/\text{m}^2$ 으로 가장 높게 나타났다. 이것은 PS가 액체 연소 거동을 보였는데, 액체 연소 시 휘발성이 높기 때문인 것으로 보여 화재 위험성이 더 크다고 판단된다. 그리고 PS의 열분해는 주로 스티렌 단량체와 일부 스티렌 올리고머(이합체, 삼합체, 사합체 및 오합체)를 생성한다. 제안된 메커니즘은 1차 라디칼 종을 생성하는 폴리머 사슬의 열 절단으로, 올리고머는 분자 내 라디칼 전달 반응을 통해 생성된다⁽¹⁵⁾.

PP의 연소 속도는 Figure 1에 나타난 바와 같이 PS의 연소 속도보다 느렸다. 이것은 기 보고된 바와도 일치하였다⁽¹⁶⁾. PP의 열분해는 초기 분자 사슬의 과열에 의해 지배되며, 대개 반복 그룹 $-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)-$ 의 3차 수소 원자에 인접한 탄소-탄소 결합에서 지배된다고 보고하였다⁽¹⁷⁾. 또한 PP의 성질이 고결정성이며, 높은 강도와 인장 강도를 가지므로⁽¹⁸⁾ 착화 초기에는 HRR 값이 적게 나타나다가 연소 시간의 지연과 열축적에 의해 질량감소율이 커지면서 HRR 값이 높게 나타나는 것으로 판단된다. 그리고 시편 표면에서 수많은 작은 거품들이 터지면서 생성된 후 미세한 거품을 가진 액체처럼 행동했다. 실험이 끝날 때 탄소는 남아 있지 않았다.

Figure 2. The smoke production rate curves at 50 kW/m² external heat flux.

Table 2. The Overall Heat Characteristics for Each Plastic at 50 kW/m² External Heat Flux

Specimens	TTI (s)	HRR _{peak} (kW/m ²) / at time (s)	SPR _{peak} (m ² /s) / at time (s)
FRP	31	110.31 / 105	0.089 / 35
PS	19	773.44 / 100	0.331 / 75
PC	49	243.33 / 125	0.215 / 105
PP	20	513.97 / 95	0.079 / 70
PVC	196	44.65 / 755	0.137 / 65
PMMA	26	1154.72 / 400	0.063 / 440

그리고 PP는 분해되어 지방족 탄화수소를 생성하고, PC는 방향족 탄화수소를 생성한다. 확실히 두 탄화수소 모두가연성이지만 방향족 탄화수소를 완전히 분해하고 연소하려면 더 많은 열에너지가 필요하다⁽¹⁹⁾. 또한 더 높은 온도에서 열분해되기 때문에 HRR_{peak}가 지연되어 나타났다.

반면에 PVC는 HRR_{peak} 값이 44.65 kW/m²으로 가장 낮게 나타났는데, 이들은 열 축적으로 숯이 생성되어 팽창함에 따라 시편의 표면과 맨 아래 부분간의 거리가 증가하게 되는데, 그렇게 되면 표면에서 열을 전달하는 데 더 많은 시간이 필요하다⁽²⁰⁾. 본 연구에서도 숯을 만들어 탄화물 층의 두께를 형성하느라 TTI가 지연되었고, 숯으로 인한 열 차단 효과로 인해 HRR 커브가 가장 낮게 나타난 것으로 판단된다.

FRP는 유기 매트릭스가 분해될 때 약 300~500 °C의 온도에서 연기, 그을음 및 독성의 휘발성 물질이 방출되는 특성을 지녔으며, 그로 인해 HRR 커브가 두 번째로 낮게 나타났다⁽²¹⁾.

3.2 연기 특성

Figure 2에 나타난 바와 같이 최대 연기발생속도(peak smoke production rate, SPR_{peak})는 0.331 m²/s로 가장 높게 나타났다.

이는 PS가 인화성이 높으며, 연소 중에 액체성 연소 물질로 열과 연기의 발생량이 높은 것으로 보인다. 반면에 PP는 수많은 작은 거품들이 생성되면서 다 타버려 0.079 m²/s로 가장 낮게 나타났다.

또한 PP 시험편의 경우 타면서 불꽃이 시각적으로 회색과 검은색이었고, PS 시험편의 경우는 다량의 그을음을 발생시켰고 검은 연기가 발생하였으며, 이와 유사한 보고도 있었다⁽²²⁾.

3.3 화재 위험성 등급 평가

화재 위험성을 더욱 정량적이고 정밀하게 평가하기 위하여 콘칼로리미터로 측정된 세 개의 인자를 이용하여 Chung's equations-II⁽¹³⁾로 계산하였다. FPI-II는 시간, 연기, 열을 나타내는 세 가지 변수를 고려하여 종합적으로 나타낼 수 있는 화재 평가 지수이다. TTI는 연기와 가연성 가스의 발생을 의미하며, SPR_{peak}는 실시간 연기로 인한 최대 위험한 정도를 의미하며, PHRR은 HRR_{peak}와 동일한 의미로 순간적인 최대 열량의 크기를 나타낸다⁽²³⁾. TTI 및 HRR의 초기 피크의 최대값은 물질의 화재 위험성을 특성화한다⁽²⁴⁾. FPI-II 값이 높아질수록 화재 안전성 또한 높아지고, FPI-II 값이 낮아질수록 화재 위험성은 높아진다. 이것은 연

Table 3. Calculated Fire Performance Index-II (FPI-II) at 50 kW/m² External Heat Flux

Specimens	TTI (s)	PHRR (kW/m ²)	SPR _{peak} (m ² /s)	FPI-II (s ² /kW)
FRP	31	110.31	0.089	3.16
PS	19	773.44	0.331	0.07
PC	49	243.33	0.215	0.94
PP	20	513.97	0.079	0.49
PVC	196	44.65	0.137	32.04
PMMA	26	1154.72	0.063	0.36

Table 4. Calculated Fire Growth Index-II (FGI-II) at 50 kW/m² External Heat Flux

Specimens	SPR _{peak} (m ² /s)	PHRR (kW/m ²)	Time to SPR _{peak} (s)	FGI-II (kW/s ²)
FRP	0.089	110.31	35	0.28
PS	0.331	773.44	75	3.41
PC	0.215	243.33	105	0.50
PP	0.079	513.97	70	0.58
PVC	0.137	44.65	65	0.09
PMMA	0.063	1154.72	440	0.17

기 유해성도 같은 맥락으로 파악할 수 있다.

Table 3에 나타난 바와 같이 PS와 PMMA는 같은 액체 연소로 화재 위험성이 제일 높게 나타났지만, PS가 PMMA보다 5.14배 더 위험한 것으로 보인다. 이는 연소 시 휘발성이 더 높기 때문인 것으로 보인다. PVC는 32.04 s²/kW로 가장 높게 나타난 것으로 보아 화재 위험성이 제일 낮았다. 이것은 숯으로 인한 탄화된 단열층을 생성하여 열을 차단하는 것으로 보인다.

FPI-II를 구하는 식은 다음 식 (1)과 같다⁽¹³⁾.

$$\text{Fire Performance Index-II (FPI-II)} = \frac{TTI (s)}{SPR_{peak} (m^2/s) \cdot PHRR (kW/m^2)} \quad (1)$$

FGI-II에서 Time to SPR_{peak}는 최대 연기발생속도에 도달하는 시간이며, SPR_{peak}는 최대연기발생속도이다. 그리고 PHRR은 최대 열방출률이다. 이 세 가지 변수로 열과 연기의 상관관계를 나타냈다. 이는 순간적인 최대의 열량의 크기가 클수록 최대 발생하는 연기의 속도가 빠를수록 그리고 최대 연기발생속도에 도달하는 시간이 빠를수록 FGI-II가 높아지므로 그 재료의 연기 유해성이 높다고 판단할 수 있다.

FGI-II를 구하는 식은 다음 식 (2)와 같다⁽¹³⁾.

$$\text{Fire Growth Index-II (FGI-II)} = \frac{SPR_{peak} (m^2/s) \cdot PHRR (kW/m^2)}{Time to SPR_{peak} (s)} \quad (2)$$

Table 4에 나타난 바와 같이 PS가 3.41 kW/s²로 화재 위험성이 가장 높게 나타났고, PVC가 0.09 kW/s²로 화재 안전성이 가장 낮은 것으로 판단된다. FPI-II와 같은 양상으로 나타났다.

화재 시 화재 위험성 평가를 표준화하기 위하여 기준물질을 사용하여 새로운 Chung's equations-III⁽¹³⁾을 사용하여 계산하였다. 기준물질은 PMMA로 선정하였는데, 이것은 콘칼로리미터 시험에서 PMMA의 우수한 반복성 및 재현성이 우수하기 때문이다. 본 연구에서 PMMA는 두께가 10 mm로 이에 대한 영향을 받을 수도 있음을 감안하였다. 각 식은 무차원 지수로 나타낸다.

화재성능지수-III (fire performance index-III, FPI-III)은 FPI-II를 FPI-II_[PMMA]의 기준값(PMMA 기준)으로 나눈 값으로 정의되며, 이것은 다음 식 (3)과 같다⁽¹³⁾.

$$FPI-III = \frac{\frac{TTI (s)}{SPR_{peak} (m^2/s) \cdot PHRR (kW/m^2)}}{\left[\frac{TTI (s)}{SPR_{peak} (m^2/s) \cdot PHRR (kW/m^2)} \right]_{PMMA}} \quad (3)$$

PMMA를 기준으로 한 화재 등급 지수인 FPI-III는 PS는 0.2로 PMMA보다 위험한 것으로 나타났고, PVC는 89로 화재 위험성이 가장 낮은 것으로 판단된다. PS와 PMMA는 전형적인 액체 연소 거동으로 화재 위험성이 가장 높은 것으로 보인다.

화재성장지수-III (fire growth index-III, FGI-III)는 FPI-III와 같은 맥락으로 FGI-II를 FGI-II_[PMMA]의 기준값(PMMA 기준)

Table 5. Fire Risk Index-IV (FRI-IV) of Plastics at 50 kW/m² External Heat Flux

Specimens	FPI-III	FGI-III	FRI-IV
FRP	8.8	1.7	0.19
PS	0.2	20.1	100.5
PC	2.6	2.9	1.12
PP	1.4	3.4	2.43
PVC	89.0	0.5	0.01
PMMA	1.0	1.0	1.00

으로 나눈 값으로 정의되며, 이것은 다음 식 (4)와 같다⁽¹³⁾.

$$FGI-III = \frac{\frac{SPR_{peak}(m^2/s) \cdot PHRR(kW/m^2)}{Time\ to\ SPR_{peak}(s)}}{\left[\frac{SPR_{peak}(m^2/s) \cdot PHRR(kW/m^2)}{Time\ to\ SPR_{peak}(s)} \right]_{PMMA}} \quad (4)$$

Table 5에 나타난 바와 같이 PVC는 0.5로 화재 위험성이 가장 낮았고, PS는 20.1로 가장 위험한 물질로 보인다. 종합적인 화재위험성 평가를 위하여 화재성능지수-III (FPI-III)와 화재성장지수-III (FGI-III)와의 상관관계에 근거한 Chung's equation-IV를 이용하여 계산하였다. Chung's equation-IV는 화재위험성지수-IV (fire risk index-IV, FRI-IV)로 다음 식 (5)와 같다⁽¹³⁾.

$$FRI-IV = \frac{FGI-III}{FPI-III} \quad (5)$$

각 (3)~(5) 식을 계산하여 Table 5에 정리하였다. FRI-IV는 FGI-III를 FPI-III으로 나눈 값으로 정의되며, FRI-IV 값이 클수록 화재 위험성이 커지고 FRI-IV 값이 작을수록 화재 위험성이 작아진다. 이것은 화재 위험성 및 화재 등급을 종합적으로 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

PMMA를 기준물질로 하여 기준값 1로 잡고, FRI-IV는 PS (100.5) >> PP (2.43) > PC (1.12) > PMMA (1.0) > FRP (0.19) > PVC (0.01)의 순서로 나타났다. 따라서 PVC가 화재 위험성이 가장 낮고, PS가 가장 높은 것으로 판단하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 유리섬유강화플라스틱(glass fiber reinforced plastic, GFRP), 폴리스티렌(polystyrene, PS), 폴리카보네이트(polycarbonate, PC), 폴리프로필렌(polypropylene, PP), 폴리염화비닐(polyvinyl chloride, PVC)를 선정하여 ISO 5660-1의 기준에 따라 콘칼로리미터(cone calorimeter)로 측정하여 Chung's equations-II를 계산하고, 이를 확장하여 Chung's equations-III와 Chung's equation-IV에 의한 화재 위험성을 등급 평가하고자 하였다.

1) 열의 특성을 측정한 결과, PS의 착화시간(TTI)은 19 s로 가장 빠르고, 최대열방출률(HRR_{peak})은 773.44 kW/m²으로 가장 높게 나타났다. 이것은 액체 연소 거동으로 인화성이 높은 것으로 판단된다. PVC는 착화시간(TTI)이 196 s로 가장 느리고, 최대열방출률(HRR_{peak})은 44.65 kW/m²으로 가장 낮게 나타났다. 이것은 연소 시 솟을 형상함으로 인해 열 차단 효과가 있음을 보여준다.

2) Chung's equations-II의 FPI-II 값은 PS가 0.07 s²/kW로 화재성능지수-II가 가장 낮았고, PVC가 32.04 s²/kW로 화재성능지수-II가 가장 높았다. FGI-II 값은 PVC가 0.09 kW/s²로 화재성장지수-II가 가장 낮았고, PS가 3.41 kW/s²로 화재성장지수-II가 가장 높았다.

3) Chung's equations-III의 FPI-III에서 PS가 0.2로 화재성능지수-III가 매우 낮았고, PVC가 89로 화재성능지수-III가 가장 높았다. FGI-III에서도 동일한 양상을 보였으며, PS가 20.1로 화재성장지수-III가 가장 높게 나타났고, PVC는 0.5로 가장 안전한 물질로 판단하였다.

4) Chung's equation-IV의 FRI-IV는 PS (100.5) >> PP (2.43) > PC (1.12) > PMMA (1.0) > FRP (0.19) > PVC (0.01)의 순서로 나타났다. 따라서 PVC가 화재 위험성이 가장 낮고, PS가 가장 높은 것으로 판단하였다.

References

1. Z. Masoumi, J. van L. Genderen and J. Maleki, "Genderen, Jamshid Maleki, Fire Risk Assessment in Dense Urban Areas Using Information Fusion Techniques", International Journal of Geo-Information, Vol. 8, No. 579, pp. 1-22 (2019). <https://doi.org/10.3390/ijgi8120579>.
2. A. N. Ede, "Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites: Exploring the Potentials for Repairs of Deficient RC Structures in Nigeria", NICE Journal of Structural Engineering, Vol. 7, No. 1, pp. 17-24 (2011).
3. A. N. Ede, "Acceptability of Plastic Materials for Structural Applications in Nigerian Buildings", Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE), Vol. 2, No. 3, pp. 23-28 (2015).
4. T. Zhang, X. Zhou and L. Yang, "Experimental Study of

- Fire Hazards of Thermal-Insulation Material in Diesel Locomotive: Aluminum-Polyurethane”, *Materials*, Vol. 9, No. 168, pp. 1-17 (2016). <https://doi.org/10.3390/ma9030168>.
5. H. Vahabi, B. K. Kandola and M. R. Saeb, “Flame Retardancy Index for Thermoplastic Composites”, *Polymers*, Vol. 11, No. 407, pp. 1-10 (2019). <https://doi.org/10.3390/polym11030407>.
 6. T. L. Junod, “Gaseous emissions and toxic hazards associated with plastics in fire situations – A literature review”, *NASA Technical Note*, Washington, D. C. pp. 6-10 (1976).
 7. L. Shi and M. Y. L. Chew, “Fire behaviors of polymers under auto-ignition conditions in a cone calorimeter”, *Fire Safety Journal*, Vol. 61, pp. 243-253 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.09.021>.
 8. R. Sonnier, A. Viretto, L. Dumazert and B. Gallard, “A method to study the two-step decomposition of binary blends in cone calorimeter”, *Combustion and Flame*, Vol. 169, pp. 1-10 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2016.04.016>.
 9. B. Pei, G. Y. Song and C. Lu, “The Application of Cone Calorimeter on the Study of Burning Performance of Liquorices”, *ELSEVIER*, Vol. 71, pp. 291-295 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.04.042>.
 10. V. Babrauskas, “The cone calorimeter - A versatile bench-scale tool for the evaluation of fire properties”, In S. J. Grayson and D. A. Smith (Eds.), *New Technology to Reduce Fire Losses and Costs*, Elsevier Applied Science Publishers, London, UK, pp. 78-87 (1986).
 11. M. M. Hirschler, “Fire performance of organic polymers”, *Thermal decomposition and chemical composition*, Washington DC, ACS Symp Series, Vol. 797, pp. 293-306 (2001). <https://doi.org/10.1021/bk-2001-0797.ch023>.
 12. 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).
 13. Y. J. Chung and E. Jin, “Rating Evaluation of Fire Risk for Combustible Materials in case of fire”, *Appl. Chem. Eng.*, Vol. 32, No. 1, pp. 75-82 (2021). <https://doi.org/10.14478/ace.2020.1103>.
 14. J. S. You and Y. J. Chung, “Risk of Smoke Occurring in the Combustion of Plastics”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 33, No. 1, pp. 69-75 (2019). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2019.33.1.069>.
 15. S. Bourbigot, J. W. Gilman and C. A. Wilkie, “Kinetic Analysis of the Thermal Degradation of Polystyrene-Montmorillonite Nanocomposite”, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 84, No. 3, pp. 483-492 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.01.006>.
 16. K. M. Butler, “A Numerical Model for Combustion of Bubbling Thermoplastic Materials in Microgravity”, *NIST Interagency/Internal Report (NISTIR)*, 6894, pp. 1-70 (2002).
 17. D. Price and A. R. Horrocks, “Chapter 1a: Polymer degradation and the matching of FR chemistry to degradation”, In C. A. Wilkie and A. B. Morgan (Eds.), *Fire Retardancy of Polymeric Materials* (2nd ed.), CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp. 15-42 (2010). ISBN: 978-1-4200-8399-6.
 18. N. L. Batista, P. Olivier, G. Bernhart, M. C. Rezende and E. C. Botelho, “Correlation between degree of crystallinity, morphology and mechanical properties of PPS/carbon fiber laminates”, *Materials Research*, Vol. 19, No. 1, pp. 195-201 (2016). <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2015-0453>.
 19. A. B. Morgan and M. F. Bundy, “Cone calorimeter analysis of UL-94 V-rated plastics”, *Fire and Mater.*, Vol. 31, No. 4, pp. 257-283 (2007). <https://doi.org/10.1002/fam.937>.
 20. S. I. Stoliarov, S. Crowley, R. N. Walters and R. E. Lyon, “Prediction of the burning rates of charring polymers”, *Combustion and Flame*, Vol. 157, No. 11, pp. 2024-2034 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.03.011>.
 21. J. R. Correia, “Polymeric Matrix Composites”, in *Science and Engineering of Construction Materials*, chapter 11, IST Press, Lisboa (2012).
 22. H. Y. Jang and C. H. Hwang, “Obscuration Threshold Database Construction of Smoke Detectors for Various Combustibles”, *Sensors*, Vol. 20, No. 6272, pp. 1-14 (2020). <https://doi.org/10.3390/s20216272>.
 23. Y. J. Chung and E. Jin, “New Smoke Risk Assessment on Wood Treated with Silicone Compound”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 33, No. 4, pp. 16-27 (2019). <https://doi.org/10.7731/kifse.2019.33.4.016>.
 24. Y. J. Chung and E. Jin, “Smoke generation by Burning Test of Cypress Plates Treated with Boron Compounds”, *Appl Chem Eng.*, Vol. 29, No. 6, pp. 670-676 (2018). <https://doi.org/10.14478/ace.2018.1076>.