

유기 단열재의 화재위험성 등급 평가

유지선 · 전 남* · 정영진**.†

강원대학교 소방방재연구센터, *한국건설생활환경시험연구원, **강원대학교 소방방재공학과
(2021년 5월 15일 접수, 2021년 6월 16일 수정, 2021년 6월 17일 채택)

Fire Risk Rating Evaluation of Organic Insulation Materials

Ji Sun You, Nam Jeon* and Yeong-jin Chung**.

Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National University, Samcheok 25913, Korea

*Real-scale Fire Testing & Research Center, Samcheok 25913, Korea

**Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University, Samcheok 25949, Korea

(Received May 15, 2021; Revised June 16, 2021; Accepted June 17, 2021)

초 록

본 연구에서는 유기 단열재인 poly isocyanurate foam (PIR), poly urethane foam (PUR), phenol foam (PF)을 선정하여 ISO 5660-1의 기준에 따라 콘칼로리미터(cone calorimeter)를 이용하여 측정하였다. 화재위험성 평가를 표준화하기 위하여 기준물질(PMMA)을 사용하여 Chung's equations-III와 Chung's equation-IV에 의한 화재위험성을 등급화하여 평가하였다. Chung's equations-II의 화재성능지수-II 값은 PF가 14.77 s²/kW로 화재성능지수-II가 가장 높았고, PUR이 0.08 s²/kW로 화재성능지수-II가 가장 낮았다. 화재성장지수-II 값은 PF가 0.01 kW/s²로 화재성장지수-II가 가장 낮았고, PUR이 1.14 kW/s²로 화재성장지수-II가 가장 높았다. Chung's equations-III의 화재성능지수-III에서 PUR이 0.11로 화재성능지수-III가 가장 낮게 나타났고, PF가 20.23으로 화재성능지수-III가 가장 높았다. FGI-III에서는 PUR이 14.25로 화재성장지수-III가 가장 높게 나타났고, PF가 0.13으로 가장 안전한 물질로 판단하였다. 그리고 Chung's equation-IV의 화재위험성지수-IV는 PUR (130.03) >> PIR (19.13) > PMMA (1.00) > PF (0.01)의 순서로 나타났다. 따라서 PF가 화재위험성이 가장 낮고, PUR이 가장 높은 것으로 판단하였다.

Abstract

In this study, poly isocyanurate foam (PIR), poly urethane foam (PUR), and phenol foam (PF) of organic insulation materials were selected, and investigated using a cone calorimeter, as per ISO 5660-1. Standard materials (PMMA) were used to standardize the fire hazard assessment, and the fire risk was classified and evaluated by Chung's equations-III and IV. The fire performance index-II value of Chung's equations-II was the highest value with PF of 14.77 s²/kW. And the PUR was 0.08 s²/kW, the lowest value of fire performance index-II value. The fire growth index-II value was the lowest value with PF of 0.01 kW/s². And the PUR was 1.14 kW/s², the highest value of fire growth index-II value. The fire performance index-III (FPI-III) of Chung's equations-III had the lowest value for PUR (0.11) and the highest for PF (20.23). The PUR showed the highest value of the fire growth index-III (FGI-III) as 14.25, while the PF exhibited 0.13 regarded as the safest materials. The fire risk index-IV (FRI-IV) value of Chung's equation-IV was in the following order: PUR (130.03) >> PIR (19.13) > PMMA (1.00) > PF (0.01). Therefore, it was concluded that the fire risk associated with PF is the lowest, whereas that associated with PUR is the highest.

Keywords: Cone calorimeter, Insulation, Fire performance index-III, Fire growth index-III, Fire risk index-IV

1. 서 론

오늘날 외벽 시스템은 건물 외벽의 에너지 성능 향상을 위해 고성능 단열재를 확보하는 데 중점을 두고 있다. 에너지 효율에 대한 엄격

한 요구 사항으로 인해 건축 환경에서 단열재를 보다 광범위하게 사용하고 있는 추세이다[1,2].

벽의 단열재는 유리섬유 또는 글라스 울과 같은 불연성 재료로 구성되어 있거나, 광범위한 단열성 폼 플라스틱 재료로 구성되어 있다. 가장 일반적으로 사용되는 단열재는 난연제를 포함하거나 포함하지 않은 압출 가공된 폴리스티렌, 팽창된 폴리스티렌, 폴리우레탄폼(poly urethane foam, PUR) 그리고 폴리이소시아누레이트폼(poly isocyanurate foam, PIR)과 같은 중합체이다[1].

† Corresponding Author: Kangwon National University,
Department of Fire Protection Engineering, Samcheok 25949, Korea
Tel: +82-33-540-3121 e-mail: yjchung@kangwon.ac.kr

단열재는 글라스울, 미네랄울 등을 사용하는 무기단열재와 스티로폼, 우레탄, 페놀폼 등을 사용하는 유기단열재가 있으며, 유기단열재의 사용량이 무기단열재의 사용량에 비하여 약 80% 이상을 차지하고 있다. 유기단열재가 무기단열재에 비하여 단열성능이 좋고 성형성이 뛰어나며 공사비용이 저렴한 경제적인 장점이 있지만 무기단열재에 비하여 화재에 취약한 단점을 가지고 있다[3]. 하지만 열악한 난연 성능으로 인해 가연성 단열재가 화염에 접화되면 표면이 매우 빠르게 확산되어 다량의 독성 물질을 생성한다. 따라서 외부 전면 단열재의 화재 안전 문제는 고층건물의 주요 문제가 된다[4].

특히 경질 폴리우레탄 폼은 열전도율이 낮기 때문에 단열 응용 분야에 사용된다. 그러나 열원에 노출되면 쉽게 발화하고 타 버릴 수 있다. 따라서 발포체의 열분해 및 내화성 향상이 필요하다. 이러한 목적에 사용되는 방법 중 하나는 폼에 다양한 필러와 난연성 재료를 추가하는 것이다. 발포체에는 다양한 종류의 난연성 재료가 추가되는데, 난연제의 효과는 화학적 구성에 따라 달라질 수 있다[5].

단열재 및 화재위험성의 연소 특성에 대한 다양한 연구를 수행해 왔다. Patel 등은 표준 콘 열량계 설정을 따르고 열 손실 효과를 최소화하기 위해 폴리머 샘플의 바다 표면을 단열하기 위해 1.5 cm 두께의 유리솜 층을 사용하였다[6]. 단열재 표면에 화염이 확산되는 특성을 연구했다. 단열재의 연소 성능이 자체 특성, 두께, 표면적, 화재 크기, 화재 위치 등에 의해 영향을 받는 것을 보여 주었다[7]. 그리고 단열재의 유형, 용융 점성도, 폼화제의 위치와 재료 밀도에 폼화제의 열전도도가 단열재의 용융 흐름과 연소 성능에 영향을 미친다는 것을 보고하였다[8]. 또한 열가소성 단열재의 연소 거동, 용융 유속 그리고 재료의 두께가 각각 화재 확산에 어떤 영향을 미치는지에 대한 기초 연구를 하였다[9].

화재 시 높은 온도와 열방출률(heat release rate, HRR) 그리고 빠른 화재 성장을 수반하는 유기 고분자 물질의 연소는 다량의 연기와 독성 가스를 생성한다[10]. 연소 과정 동안 고분자 사슬과 첨가제 사이의 물리적 및 화학적 상호 작용의 복잡성은 복합체의 화재 거동에 대한 예측을 어렵게 만든다[11].

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[12].

따라서 가연물의 화재위험성은 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 발생되는 HRR을 측정하는 것이다. HRR은 화재 시에 가연물의 잠재 위험성을 나타내기 때문에 중요하다.

HRR을 측정하는 방법들이 많이 발전되어 왔지만 그 중 하나인 콘칼로리미터가 있다[13]. 이 시험 방법은 일반적으로 “순연소열은 연소하는 데 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[14]. 연기측정은 Beer-Bouguer-Lambert 법칙을 원리로 하는 콘칼로리미터를 이용하여 측정하고자 한다. 이것은 일반적으로 투과하는 빛의 세기가 거리에 따라 지수 함수적으로 감소한다는 법칙이다[15].

따라서 본 연구에서는 건물 외벽의 단열재로서 보편적으로 사용되고 있는 유기 단열재인 폴리이소시아누레이트(polyisocyanurate)인 polyisocyanurate foam (PIR), 폴리우레탄(polyurethane)인 poly urethane foam

Table 1. Formulation of Poly Isocyanurate Foam and Poly Urethane Foam

Component	PUR foam formulation	PIR foam formulation
	Mass (php)	Mass (php)
Ester polyol	10~30	70~90
Ether polyol	70~90	10~30
Water	0.5~1.5	0.5~1.5
Catalyst (Amines)	5~10	5~10
Trimerization catalyst (KOct)	-	2~5
Silicone	1~2	1~2
Flame retardant (TCPP)	0~15	0~15
Blowing agent (HCFC-141b)	25~50	25~50

php: parts per hundreds of total polymer

(PUR), phenol foam (PF)을 선정하여 ISO 5660-1의 기준에[15] 따라 콘칼로리미터(cone calorimeter)를 이용하여 외부 복사열원에 의한 연소특성으로 열 및 연기 관련 값 등을 측정하였다.

측정된 값으로 Chung's equations-II에 의한 화재위험성을 종합적으로 예측하고자 하였다[16]. 이를 확장하여 화재 시 화재위험성 평가를 표준화하기 위하여 기준물질인 polymethylmethacrylate (PMMA)을 사용하여 새로운 Chung's equations-III와 Chung's equation-IV에 의한 화재위험성을 등급 평가하고자 한다[16]. 이것은 시간, 열, 연기의 세 가지 변수를 토대로 지수간의 상관관계를 확장시켜 등급화하여 더욱 정량적이고 정밀한 화재위험성을 판단하기 위함이다.

2. 실험

2.1. 재료

본 연구에 사용된 시편들은 유기 단열재로 PUR과 PIR의 구성요소는 Table 1에 나타내었다. 그리고 PF는 페놀과 포름알데히드 60%, 첨가제 40%로 제작하였다. 특별한 가공 없이 이물질 제거하고 25 °C 오븐에서 건조하여 사용하였다.

2.2. 콘칼로리미터 시험

연소특성 시험은 ISO 5660-1의 방법[15]에 의해 dual cone calorimeter (fire testing technology)를 이용하여 열유속(heat flux) 50 kW/m² 조건에서 수행하였다. 사용한 시험편의 두께는 50 mm로서 100 mm × 100 mm (±1) 크기의 규격으로 제작하였으며, 이들의 연소특성을 비교하기 위하여 기준물질로 PMMA (T_g = 114 °C, D = 1.22 g/cm³)의 시편을 18 mm로 사용하였다. 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 m³/s로 설정하였다.

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

Table 2. The Range of Density and Thermal Conductivity for Each Insulation Material[17]

Specimens	Density range (kg/m ³)	Thermal conductivity range (W/m · K)
PIR	33.1	0.023~0.041
PUR	30.8	0.029~0.041
PF	36.9	0.029~0.041

Table 3. The Overall Heat Characteristic for Each Insulation Material 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)
PIR	2	119.45 / 10	0.054 / 10
PUR	3	242.21 / 20	0.165 / 35
PF	2	67.69 / 10	0.002 / 10
PMMA	26	811.84 / 595	0.044 / 440

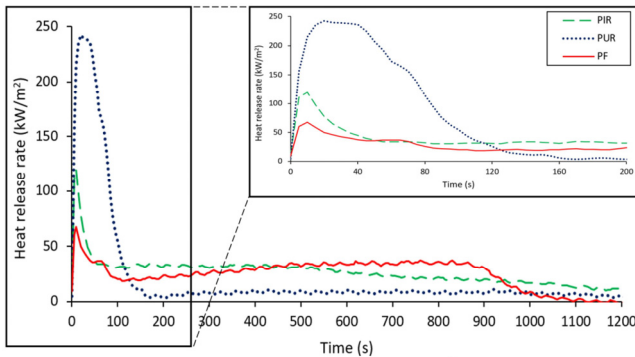


Figure 1. The heat release rate curves of insulation materials at 50 kW/m² external heat flux.

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 min 간의 데이터 수집시간을 부여하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 열 특성

Table 3에 착화시간(time to ignition, TTI)에 대하여 나타내었다. 시험편 중 PMMA를 제외하고 PIR은 2 s, PUR은 3 s, PF는 2 s로 매우 빠르게 나타났다. 이는 낮은 밀도와 높은 가연성으로 인해 열유속(heat flux)에 노출된 후 거의 즉시 점화된다는 점에 주목할 필요가 있다. 50 kW/m²의 외부 열원에서 시험한 시험편의 최대열발출률(peak heat release rate, HRR_{peak})을 Figure 1과 Table 3에 나타내었다. 모든 단열재 폼은 착화시간이 매우 빨랐고, 초기에 HRR_{peak} 값이 나타났다.

우레탄은 일반적으로 다기능의 알코올과 같은 분자를 운반하는 활성 수소 그룹에 다관능의 이소시아네이트를 첨가하여 형성된다. 이소시아네이트는 카르복실 산 염과 같은 촉매의 도움으로 이소시아네이트를 삼량체화하거나 알코올과 과량의 이소시아네이트 사이의 단계적인 반응에 의해 형성될 수 있다[18].

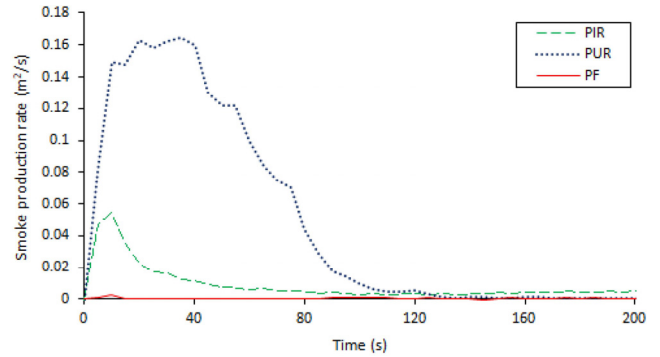


Figure 2. The smoke production rate curves of insulation materials at 50 kW/m² external heat flux.

PUR의 HRR_{peak} 값이 242.21 kW/m²으로 가장 높게 나타난 것으로 보아 화재위험성이 가장 높은 것으로 판단된다. 이것은 두 번째로 높게 나타난 PIR의 HRR_{peak} 값보다 약 2배 높게 나타났는데, PUR의 열전도도는 PF와 동일한 0.029~0.041 W/m · K로 PIR의 열전도도(0.023~0.041 W/m · K)보다 약간 더 높기 때문이다. 그리고 PIR은 트리아진-트리온 고리 구조인 이소시아누레이드 고리를 형성하기 위해 디이소시아네이트 또는 이소시아네이트 종단 전고분자의 폴리사이클로트리머리제이션 반응을 기반으로 하며[19], 열역학적 관점에서 불 때 폴리이소시아누레이드의 350 °C와 대조적으로 대략 200 °C로 분리하는 PUR 내의 우레탄 결합보다 열적으로 더 안정적이다[20]. 그리고 PIR은 상부층 표면의 분리와 박락물과 함께 실험 종료 후 최종 숯 잔여물에서 균열이 관찰되었다. 숯은 부서지기 쉽고, 균일하지 않게 분포되어 있었다.

반면 페놀 폼은 67.69 kW/m²으로 낮게 나타났는데, 이것은 페놀 폼의 열적 특성은 단열 발포제로 채워진 높은 비율의 밀폐 기포를 포함하는 구조와 관련이 있고[21], 화재 시에도 페놀 폼은 물방울이 떨어지지 않고 기름이 적으며, 표면에 형성된 숯 층이 내부 구조를 보호할 수 있다고 보고한 바 있다[2]. 또한 PIR과 PUR에 비해 밀도가 36.9 kg/m³으로 비교적 높기 때문인 것으로 이해된다.

3.2. 연기 특성

PU의 반복 단위는 이소시아네이트(-NH=C=O)와 폴리올(-OH)의 반응에서 얻은 우레탄의 결합(-NH-COO-)으로[22], PU는 가연성이 높고 화재가 시작된 후 몇 분 동안 많은 연기를 빠르게 방출한다[23]. 이러한 특성으로 인해 PUR의 최대 연기발생속도(peak smoke production rate, SPR_{peak})는 0.165 m²/s로 가장 높게 나타났다. 그리고 PUR은 PIR보다 분자량이 적어 열확산이 유리하므로 연소가 용이하여, PUR의 SPR_{peak} 값이 PIR보다 더 높게 나타난 것으로 보인다.

페놀 수지는 연소 시 물(H₂O)과 이산화탄소(CO₂)가 주로 발생하며, 연기와 독성가스의 발생량이 적다고 보고된 바 있다[24]. 본 연구에서도 Figure 2와 Table 3에 나타난 바와 같이 SPR_{peak} 값이 0.002 m²/s로 낮게 나타났다. PIR과 PF의 경우 Figure 1에 나타난 바와 같이 HRR의 그래프에 비해 SPR의 그래프가 120 s부터 연기 발생이 거의 없는 데, 이것은 연소가 용이하여 초기 연소 후 질량의 급격한 감소에 따라 소멸되어 가는 상태로 보인다.

3.3. 화재위험성 등급 평가

화재위험성을 더욱 정량적이고 정밀하게 평가하기 위하여 콘칼로

Table 4. Calculated Fire Performance Index-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)
PIR	2	119.45	0.054	0.31
PUR	3	242.21	0.165	0.08
PF	2	67.69	0.002	14.77
PMMA	26	811.84	0.044	0.73

리미터로 측정된 세 개의 인자를 이용하여 Chung's equations-II로 계산하였다[16]. 화재성능지수-II (fire performance index-II, FPI-II)는 시간, 연기, 열을 나타내는 세 가지 변수를 고려하여 종합적으로 나타낼 수 있는 화재 평가 지수이다.

FPI-II를 구하는 식은 다음 Equation (1)과 같다[16].

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

여기서, 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. TTI 및 HRR의 초기 피크의 최대값은 물질의 화재위험성을 특성화한다[25]. FPI-II값이 높아질수록 화재 안전성 또한 높아지고, FPI-II값이 낮아질수록 화재위험성은 높아진다. 이것은 연기 유해성도 같은 맥락으로 파악할 수 있다.

Table 4에 나타난 바와 같이 PUR의 FPI-II 값은 0.08 s²/kW로 가장 낮게 나타났다. 이것은 시험편 중 화재위험성이 가장 높은 것으로 평가되었다. PIR과 PUR의 화재위험성은 PMMA의 FPI-II 값은 0.73 s²/kW와 비교하여 약 2.35~9.13배 높았다. 이것은 PHRR 값이 낮게 나타나고 SPR_{peak} 값의 차이가 크지 않음에도 불구하고, 거의 즉시 접화되는 특성이 있어 TTI가 상당한 영향을 미친 것으로 판단된다. 이처럼 FPI-II에서 세 가지 변수를 고려하였기 때문에 화재위험성을 더욱 정량적이고 정밀하게 평가할 수 있었다.

그리고 PF의 FPI-II는 14.77 s²/kW로 가장 높게 나타난 것으로 보아 화재위험성이 제일 낮은 것으로 이해된다. 이것은 PF 자체가 가지고 있는 열적 특성과 기름이 적고, 숯으로 인해 탄화된 단열층을 생성하여 열을 차단한 이유들 때문으로 판단된다.

FPI-II를 구하는 식은 다음 Equation (2)와 같다[16].

$$FPI-II = \frac{SPR_{peak} (m^2/s) \cdot PHRR (kW/m^2)}{Time\ to\ SPR_{peak}} \quad (2)$$

여기서, 화재성장지수-II (fire growth index-II, FGI-II)에서 Time to SPR_{peak}는 최대 연기발생속도에 도달하는 시간이며, SPR_{peak}는 최대 연기발생속도이다. 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.

Table 5에 나타난 바와 같이 PUR이 1.14 kW/s²로 화재 위험성이 가장 높게 나타났고, PF가 0.01 kW/s²로 화재 안전성이 가장 낮은 것으로

Table 5. Calculated Fire Growth Index-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)
PIR	0.054	119.45	10	0.65
PUR	0.165	242.21	35	1.14
PF	0.002	67.69	10	0.01
PMMA	0.044	811.84	440	0.08

판단된다. 이것은 PUR이 초기에 다량의 PHRR과 SPR_{peak}가 발생하였고, PF는 PHRR과 SPR_{peak} 값이 비교적 우수하기 때문으로 보인다.

화재 시 화재위험성 평가를 표준화하기 위하여 기준물질을 사용하여 새로운 Chung's equations-III을 사용하여 계산하였다[16]. 기준물질은 PMMA로 선정하였는데, 이것은 콘칼로리미터 시험에서 PMMA의 우수한 반복성 및 재현성이 우수하기 때문이다. 본 연구에서 PMMA는 두께가 18 mm로 이에 대한 영향을 받을 수도 있음을 감안하였다. 각 식은 무차원 지수로 나타낸다.

화재성능지수-III (fire performance index-III, FPI-III)는 FPI-II를 FPI-II_[PMMA]의 기준값(PMMA 기준)으로 나눈 값으로 정의되며, 이것은 다음 Equation (3)과 같다[16].

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

PMMA를 기준으로 한 화재 등급 지수인 FPI-III는 PIR (0.42)과 PUR (0.11)이 PMMA (기준값 1)보다 2.4~9.1배 위험한 것으로 나타났고, PF는 20.23으로 화재위험성이 매우 낮은 것으로 판단된다.

화재성장지수-III (fire growth index-III, FGI-III)는 FPI-III와 같은 맥락으로 FGI-II를 FGI-II_[PMMA]의 기준값(PMMA 기준)으로 나눈 값으로 정의되며, 이것은 다음 Equation (4)와 같다[16].

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

Table 6에 나타난 바와 같이 PF는 0.13으로 화재위험성이 가장 낮았고, PUR은 14.25로 가장 위험한 물질로 보인다. 종합적인 화재위험성 평가를 위하여 FPI-III와 FGI-III와의 상관관계에 근거한 Chung's equation-IV를 이용하여 계산하였다. Chung's equation-IV는 화재위험성 지수-IV (fire risk index-IV, FRI-IV)로 다음 Equation (5)와 같다[16].

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

Equation (3)~(5)을 계산하여 Table 6에 정리하였다. FRI-IV는 FGI-III을 FPI-III으로 나눈 값으로 정의되며, FRI-IV 값이 클수록 화재위험성이 커지고 FRI-IV 값이 작을수록 화재위험성이 작아진다.

Table 6. Fire Risk Index-IV of Plastics at 50 kW/m² External Heat Flux

Specimens	FPI-III	FGI-III	FRI-IV
PIR	0.42	8.13	19.13
PUR	0.11	14.25	130.03
PF	20.23	0.13	0.01
PMMA	1.00	1.00	1.00

이것은 화재 위험성 및 화재 등급을 종합적으로 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

PMMA를 기준물질로 하여 기준값 1로 잡고, FRI-IV는 PUR (130.03) >> PIR (19.13) > PMMA (1.00) > PF (0.01)의 순서로 나타났다. 따라서 PF가 화재위험성이 가장 낮고, PUR이 가장 높은 것으로 판단하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 유기 단열재인 poly isocyanurate foam (PIR), poly urethane foam (PUR), phenol foam (PF)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 화재위험성을 등급 평가하고자 하였다.

1) 열적 특성을 측정된 결과, PMMA를 제외한 유기 단열재의 착화 시간(TTI)은 2-3 s로 거의 즉시 점화되었으며, 초기에 최대열방출률(HRR_{peak}) 값이 나타났다. PU는 연소성 물질이 많으므로 PUR의 HRR_{peak} 값이 242.21 kW/m²으로 가장 높게 나타났다. PF는 단열 발포제로 채워진 밀폐 기포 구조와 우수한 난연성으로 인해 67.69 kW/m²으로 가장 낮게 나타났다.

2) Chung's equations-II의 FPI-II 값은 PUR이 0.08 s²/kW로 FPI-II가 가장 낮았고, PF가 14.77 s²/kW로 FPI-II가 가장 높았다. FGI-II 값은 PF가 0.01 kW/s²로 FGI-II가 가장 낮았고, PUR이 1.14 kW/s²로 FGI-II가 가장 높았다.

3) Chung's equations-III의 FPI-III에서 PUR이 0.11로 FPI-III가 매우 낮았고, PF가 20.23으로 FPI-III가 가장 높았다. FGI-III에서도 동일한 양상을 보였으며, PUR이 14.25로 FGI-III가 가장 높게 나타났고, PF가 0.13으로 가장 안전한 물질로 판단하였다.

4) Chung's equation-IV의 FRI-IV는 PUR (130.03) >> PIR (19.13) > PMMA (1.00) > PF (0.01)의 순서로 나타났다. 따라서 PF가 화재위험성이 가장 낮고, PUR이 화재위험성이 가장 높은 것으로 판단하였다.

감 사

이 논문은 2018년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였습니다(No. 620180015).

References

1. E. Asimakopoulou, J. Zhang, M. McKEE, K. Wiczorek, A. Krawczyk, M. Andolfo, M. Scatto, M. Sisani, and M. Bastianini, Assessment of fire behaviour of polyisocyanurate (PIR) insulation foam enhanced with lamellar inorganic smart fillers, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1107**, 1-7 (2018).
2. J. P. Hidalgo, J. L. Torero, and S. Welch, Fire performance of

- charring closed-cell polymeric insulation materials: Polyisocyanurate and phenolic foam, *Fire Mater.*, **42**, 358-373 (2018).
3. J. W. Park and N. W. Cho, A study on the cone calorimeter evaluation method of sandwich panels, *Fire Sci. Eng.*, **31**, 74-82 (2017).
4. L. Hu, J. A. Mike, and B. Merci, Special issue on fire safety of high-rise buildings, *Fire Technol.*, **53**, 1-3 (2017).
5. B. Aydoğan and N. Usta, Cone calorimeter evaluation on fire resistance of rigid polyurethane foams filled with nanoclay/intumescent flame retardant materials, *Res. Eng. Struct. Mater.*, **4**, 71-77 (2018).
6. P. Pater, T. R. Hull, A. A. Stec, and R. E. Lyon, Influence of physical properties on polymer flammability in the cone calorimeter, *Polym. Adv. Technol.*, **22**, 1100-1107 (2011).
7. A. Tewarson, Generation of heat and chemical compounds in fires, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd. ed., 83-161, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts (2002).
8. T. J. Ohlemiller, J. R. Shields, K. M. Butler, B. L. Collins, and M. D. Seck, Exploring the role of polymer melt viscosity in melt flow and flammability behavior, *New Developments and Key Market Trends in Flame Retardancy, Proceedings of the Fall Conference of the Fire Retardant Chemicals Assoc.* Oct. 15-18, Ponte Vedra, FL, USA, 1-28 (2000).
9. Q. Y. Xie, H. P. Zhang, and L. Xu, Large-scale experimental study on the effects of flooring materials on combustion behavior of thermoplastics, *J. Macromol. Sci. A*, **45**, 529-533 (2008).
10. T. Zhang, X. Zhou, and L. Yang, Experimental study of fire hazards of thermal-insulation material in diesel locomotive: Aluminum-polyurethane, *Materials*, **9**, 1-17 (2016).
11. H. Vahabi, B. K. Kandola, and M. R. Saeb, Flame retardancy index for thermoplastic composites, *Polymers*, **11**, 1-10 (2019).
12. 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).
13. 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, 78-87 (1986).
14. M. M. Hirschler, Fire performance of organic polymers, *Thermal Decomposition and Chemical Composition*, ACS Symp Series, Washington DC, **797**, 293-306 (2001).
15. 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).
16. Y. J. Chung and E. Jin, Rating evaluation of fire risk for combustible materials in case of fire, *Appl. Chem. Eng.*, **32**, 75-82 (2021).
17. A. A. Stec and T. R. Hull, Assessment of the fire toxicity of building insulation materials, *Energ. Buildings*, **43**, 498-506 (2011).
18. P. Gahlen, S. Fröbel, A. Karbach, D. Gabriel, and M. Stommel, Experimental multi-scale approach to determine the local mechanical properties of foam base material in polyisocyanurate metal panels, *Polym. Test.*, **93**, 1-11 (2021).
19. K. Chen, C. Tian, S. Liang, X. Zhao, and X. Wang, Effect of stoichiometry on the thermal stability and flame retardation of polyisocyanurate foams modified with epoxy resin, *Polym. Degrad. Stab.*, **150**, 105-113 (2018).
20. M. Kuranska, U. Cabulis, M. Auguscik, A. Prociak, J. Ryszkowska, and M. Kirpluks, Bio-based polyurethane-polyisocyanurate composites with an intumescent flame retardant, *Polym. Degrad. Stab.*,

- 127, 11-19 (2016).
21. M. Pfundstein, *Insulating Materials: Principles, Materials, Applications*, De Gruyter GmbH (2013).
 22. 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).
 23. W. Xu, G. J. Wang, and X. R. Zheng, Research on highly flame-retardant rigid PU foams by combination of nanostructured additives and phosphorus flame retardants, *Polym. Degrad. Stab.*, **111**, 142-150 (2015).
 24. J. Troitzsch, *Plastics Flammability Handbook 3E: Principles, Regulations, Testing, and Approval*, Hanser Publications (2004).
 25. Y. J. Chung and E. Jin, Smoke generation by burning test of cy-

press plates treated with boron compounds, *Appl. Chem. Eng.*, **29**, 670-676 (2018).

Authors

Ji Sun You; Researcher, Ph.D., Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National University, Samcheok 25913, Korea; jsyou@kangwon.ac.kr

Jeon Nam; Researcher, B.A., Real-scale Fire Testing & Research Center, Samcheok 25913, Korea; jn93@kcl.re.kr

Yeong-Jin Chung; Professor, Ph.D., Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University, Samcheok 25949, Korea; yjchung@kangwon.ac.kr