

## 경질 폴리우레탄폼의 착화성 및 열방출특성 연구

# A Study on Ignitability and Heat Release Rate Characteristics of Rigid Polyurethane Foam

공영건 · 이두형\*†

Young-Kun Kong · Doo-Hyung Lee\*†

경기대학교 자연과학부 화학과, \*한국화재보험협회부설 방재시험연구원  
(2003. 10. 9. 접수/2003. 12. 1. 채택)

### 요 약

본 연구에서는 Setchkin 착화성시험장치와 산소소비원리를 이용한 콘칼로리미터를 사용하여 난연처리 되지 않은 경질우레탄폼의 착화특성 및 열방출특성 및 플래쉬오버 가능성에 대하여 연구하였다. 연구결과 경질폴리우레탄폼의 유도발화온도(FIT)는 383°C~390°C, 자연발화온도(SIT)는 493°C~495°C로 나타났으며 자연발화온도가 유도발화온도에 비해 약 100°C 높게 나타났다. 콘칼로리미터시험에서는 착화시간은 heat flux의 크기가 증가할수록 빨라졌으며 동일한 heat flux 크기에서는 밀도가 작을수록 착화시간은 짧게 나타났다. 열방출율은 50 kW/m<sup>2</sup>에서 가장 크게 나타났으며, 최대열방출율의 경우 heat flux의 크기와 밀도가 커질수록 증가하는 경향을 보였다. 착화시간과 열방출율의 관점에서 경질폴리우레탄폼의 화재성능은 가해진 heat flux의 크기와 밀도에 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, Petrella의 제안방법에 의해 플래쉬오버 가능성을 분류한 결과 플래쉬오버 가능성이 큰 것으로 분류되었다.

### ABSTRACT

In this study, the ignition and heat release rate characteristics of rigid polyurethane foam were investigated in accordance with setchkin ignition tester and cone calorimeter which is using oxygen consumption principle. In the ignition temperature study, flash-ignition temperature was 383°C~390°C, self-ignition temperature was 493°C~495°C. The self-ignition temperature of rigid polyurethane foam was about 100°C higher than the flash-ignition temperature. In the cone calorimeter study, the time to ignition of rigid polyurethane foam was faster as the external heat flux increase. In the same heat flux level, the time to ignition was faster as the density of rigid polyurethane foam decrease. Also the heat release rate was the largest value at the heat flux of 50 kW/m<sup>2</sup> and had a tendency of increase as the heat flux level and density increase. In the standpoint of time to ignition and heat release rate, the fire performance of rigid polyurethane foam was influenced by the applied heat flux level and density and the flashover propensity classified by Petrella's proposal was high.

**Keywords :** Rigid polyurethane foam, Setchikin ignition tester, Flash-ignition temperature, Self-ignition temperature, Time to ignition, Cone calorimeter, Heat release rate, Flashover propensity

## 1. 서 론

폴리우레탄이란 2개 이상의 수산기(-OH)을 갖는 화합물과 다관능성의 이소시아네이트(-NCO)의 첨가반응에 의해 생성된 고분자를 말한다. 폴리우레탄은 원부

자재의 조성을 변화시킴에 따라 다양한 물성과 형태를 갖는 제품을 얻을 수 있는 장점이 있어 1998년도 한 해동안 세계적으로 약 800만톤이 소비될 만큼 널리 사용되고 있다.<sup>1)</sup> 여러 가지 다양한 폴리우레탄중 경질폴리우레탄폼은 가볍고 단열성능이 우수한 발포 플라스틱으로서 건축물의 단열재료, 샌드위치 패널의 심재, 자동차 내장재 등으로 널리 활용되고 있다. 그러나 이

† E-mail: dh11775@kfpa.or.kr

러한 장점에도 불구하고 화재에 노출되면 쉽게 착화되어 연소함에 따라 다량의 열과 연기를 방출하는 특성이 있어 상대적으로 화재에 취약한 단점이 있다.

대부분의 고분자재료와 마찬가지로 폴리우레탄폼의 화재위험성은 착화성, 자기소화성, 연소로 인한 열방출 속도, 화염전파성, 연기 및 연기독성과 같은 개별요소들이 복합적으로 나타나므로 이들 화재특성들에 대해 평가하여야 한다.

폴리우레탄은 열분해온도가 높아짐에 따라 시안화수소와 일산화탄소의 발생량이 증가한다. 폴리우레탄의 주된 열분해 메카니즘은 중합시 형성된 폴리올-이소시아네이트 결합이 끊어지는 과정에서 이소시아네이트가 증기화되어 연기로써 재응축되고, 남아 있는 액체 폴리올이 계속해서 열분해를 진행하면서 연소하는 과정으로 알려져 있다.<sup>2)</sup>

화재예방측면에서 폴리우레탄폼이 착화되지 않도록 하는 것이 최선이겠지만 대부분의 유기 고분자재료와 마찬가지로 근본적으로 착화되기 쉬우므로 난연처리 등을 통해 착화성을 낮추는 것이 최우선 방법이라고도 할 수 있다.

또한 재료가 착화되어 연소되면 얼마나 많은 양의 열이 얼마나 빠른 속도로 방출되는지를 나타내는 열방출율이 중요한 요소가 된다. 열방출율은 화재의 규모가 얼마만큼 크게 성장할 것인가를 가장 잘 표현하는 화재특성으로써 화재시 인명피해 없이 피난하는데 필요한 시간의 확보와 방재대책의 수립에 있어 다른 어떤 화재특성보다 중요하다.<sup>3)</sup>

폴리우레탄폼의 화재성능을 향상시키기 방안을 강구하기 위해서는 폴리우레탄폼의 착화성 및 열방출특성에 대한 연구가 선행되어야 한다. 외국의 경우 각종 고분자재료들을 화재시에도 안전하게 사용할 수 있도록 하기 위해 다양한 연구가 수행되고 있고 이러한 화재특성을 종합적으로 실험할 수 있는 실험방법으로 콘칼로리미터가 널리 활용되고 있는데<sup>4)</sup> 비해 우리나라의 경우에는 플라스틱 단열재의 화재특성 연구<sup>5)</sup> 일부 연구가 수행된 바 있으나 전반적으로 이러한 화재특성에 관한 연구가 미흡하여 많은 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 Setchkin 착화온도 실험과 콘칼로리미터 실험을 통해 각 밀도 및 heat flux level에서 경질폴리우레탄폼의 착화온도 및 착화시간에 의한 착화성과 최대열방출율, 총방출율, 질량감소를 등 열방출특성을 평가하고, 착화시간과 열방출율 데이터를 이용한 플래쉬오버 가능성을 검토함으로써 경질폴리우레탄폼의 난연화 연구와 화재예방대책 수립을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

## 2. 실 험

### 2.1 실험재료

본 실험에 사용된 재료는 KS M 3809에 규정된 경질폴리우레탄폼으로서 두께 50 mm의 난연처리되지 않은 것이며, 밀도별로 23 kg/m<sup>3</sup>, 30 kg/m<sup>3</sup>, 40 kg/m<sup>3</sup>, 50 kg/m<sup>3</sup> 4종을 사용하였다. 실험에 앞서 온도 23°C, 상대습도 50%의 표준조건에서 48시간이상 유지하였다.

### 2.2 실험장치 및 실험방법

#### 2.2.1 착화성실험(Ignitibility test)

착화성은 주어진 조건에서 재료 또는 그 분해생성물이 얼마나 쉽게 착화될 수 있는지를 나타낸다. 이 특성은 재료의 화재위험을 상대적으로 나타낼 수 있는 척도가 된다. 본 연구에서는 정밀하게 제어되는 가열로 내에서 일정한 온도의 고온공기에 노출시켜 재료가 착화되는 온도를 측정하는 ASTM D 1929<sup>6)</sup> 방법과 일정한 크기의 heat flux에 노출시켜 착화되는 시간을 측정하는 ASTM E 1354<sup>7)</sup>(ISO 5660-1)<sup>8)</sup> 방법에 의해 착화성을 측정하였다. 착화온도 측정을 위해 사용한 시험장치는 ASTM D 1929(ISO 871) 착화온도 장치로서 전열코일에 의해 가열되는 길이 254 mm, 내부직경 76 mm의 가열로와 제어장치 및 착화온도를 측정을 위한 온도측정장치로 구성되어 있으며 실험장치는 사진 1에 나타내었다.

실험에 앞서 시편을 온도 23±2°C, 상대습도 50±5%에서 24시간 유지한 다음 3±0.2 g을 가열로 내부에 설치하고 시편이 설치된 고온의 주위공기에 의해 충분한 양의 가연성기체가 방출되어 외부의 파일롯트 불꽃에 의해 착화가 개시되는 최저온도인 유도발화온도와 외부의 파일롯트 불꽃이 없는 상태에서 착화가 개시되



Fig. 1. Photograph of ignition temperature tester.

는 최저온도인 자연발화온도를 측정하였다.

또한 착화시간에 의한 착화특성은 ASTM E 1354 (ISO 5660-1) 콘칼로리미터 시험방법에 의해 측정하였다. 콘칼로리미터는 원래 열방출율을 측정하기 위해 개발된 방법이지만 여러 가지 heat flux 조건에서 착화특성을 평가할 수 있어 착화시간에 의한 착화성 연구에 많이 사용되고 있으며 본 연구에서는 2.2.2의 열방출을 실험과 동일한 방법으로 25 kW/m<sup>2</sup>, 35 kW/m<sup>2</sup>, 50 kW/m<sup>2</sup> 복사열 조건에서 착화시간을 측정하였다.

2.2.2 열방출특성 실험(Heat release rate characteristic test)

열방출율은 콘칼로리미터를 이용하여 측정하였다. 콘칼로리미터에 의한 열방출을 측정은 대부분의 유기재료가 연소중에 산소 1kg이 소비되면 약 13.1 MJ의 열이 방출된다는 산소소비원리(oxygen consumption principle)를 바탕으로 하고 있다.<sup>3)</sup> 설정한 복사열에 노출된 시편이 착화되어 연소될 때의 열방출율은 연소생성물 흐름속의 산소농도와 유속으로부터 유도된 산소 소비량을 측정하여 평가하였다. 재료의 연소로 인한 열방출량과 단위면적당 열방출율은 식 (1)과 식 (2)에 의하여 계산한다.

$$\dot{q}(t) = (\Delta h_c / r_0)(1.10)C \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}} \frac{X_{O_2}^0 - X_{O_2}}{1.105 - 1.5X_{O_2}} \quad (1)$$

$$\dot{q}_A(t) = \dot{q}(t) / A_s \quad (2)$$

이때  $\dot{q}_A(t)$ : 단위면적당 열방출률(kW/m<sup>2</sup>),  $\dot{q}$ : 열방출률(kW),  $A_s$ : 실험체의 표면적(m<sup>2</sup>),  $\Delta h_c$ : 순수연소열(KJ/kg),  $r_0$ : 화학양론적 산소대 연료 질량비,  $C$ : 산

소소비량 보정상수(m<sup>1/2</sup>kg<sup>-1/2</sup>k<sup>1/2</sup>),  $\Delta p$ : 오리피스스의 압력차(Pa),  $T_e$ : 오리피스에서의 기체의 절대온도(K),  $X_{O_2}$ : O<sub>2</sub>의 물분율에 대한 산소분기 눈금 판독값,  $X_{O_2}^0$ : 산소분석기 눈금의 초기값이다.

콘칼로리미터시험은 현재 실제화재조건을 가장 잘 모사한 시험방법으로서 일정량의 공기를 공급하면서 재료의 연소성을 정확하게 평가할 수 있는 동적방법(dynamic method)이다. 콘칼로리미터는 콘히터, 질량 측정용 로드셀, 시편홀더, 산소분석장치, 유량측정장치를 부착한 배출시스템, 스파크점화기, heat flux meter, 교정용 버너 및 데이터수집 시스템들로 구성되어 있으며, 콘칼로리미터의 구조도는 Fig. 2와 같다.

실험방법은 ASTM E 1354(ISO 5660-1)에 따라 실시하였고 시편을 100 mm×100 mm 정사각형으로 절단하고 온도 23±2°C, 상습도 50±5%에서 항량이 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 설정한 다음 시편을 수평으로 설치한다. 시편의 상부표면과 콘히터 바닥판과의 거리를 2.54 cm로 조정한 다음 25 kW/m<sup>2</sup>, 35 kW/m<sup>2</sup>, 50 kW/m<sup>2</sup> 복사열에 노출시켜 10분동안 열방출율을 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 착화성실험(Ignitability test)

4.1.1 착화온도(Ignition temperature)

재료가 고온의 공기조건에서 착화되는 최저온도인

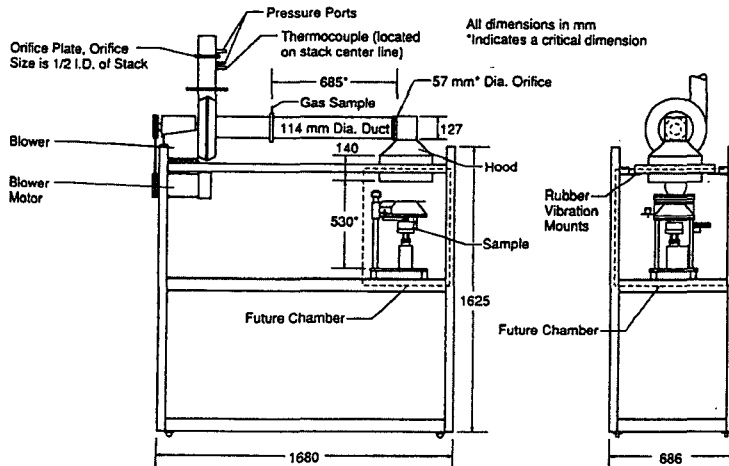


Fig. 2. Schematic diagram of cone calorimeter.

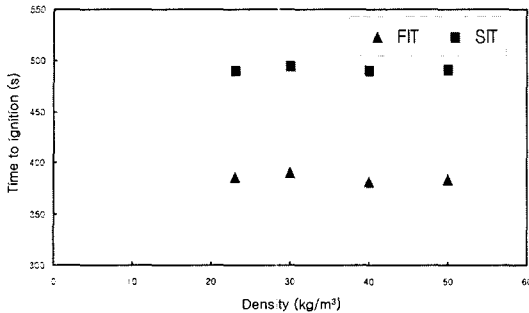


Fig. 3. Flash-ignition temperature and Self-ignition temperature of rigid PU foam.

착화온도를 파일롯트 불꽃이 있는 상태에서의 착화온도인 유도발화온도(FIT)와 파일롯트 불꽃이 없는 상태에서의 착화온도인 자연발화온도(SIT)로 나누어 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 각 밀도에서의 유도발화온도는 383°C~390°C, 자연발화온도는 493°C~495°C로 나타나 밀도별 착화온도는 큰 차이가 없었고 각 밀도에서 SIT가 FIT에 비해 약 100°C 높게 나타났다.

4.1.2 착화시간(Time to ignition)

재료의 착화는 화재가 개시되는 최초의 시점으로서 다양한 화재조건에서 재료가 얼마나 빨리 착화되는지를 평가하는 것은 화재위험성을 연구하는 측면에서 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 4가지 밀도를 갖는 경질폴리우레탄폼 실험체에 대하여 콘칼리미터를 사용하여 25 kW/m², 35 kW/m², 50 kW/m² 복사열을 가하고 착화시간을 측정하였다.

재료의 착화시간은 밀도, 열전도도, 비열의 곱으로 표현되는 thermal inertia에 큰 영향을 받는 것으로 보고되고 있으며,<sup>9)</sup> 경질폴리우레탄폼의 착화시간은 heat flux가 25 kW/m²에서 50 kW/m²로 증가함에 따라 착화시간이 급격하게 짧아지는 것으로 나타났다. 또한 동일한 heat flux에서는 밀도가 작은 실험체의 착화시간이 빠르게 나타나 밀도가 낮은 실험체의 착화가 상대적으로 용이하기 때문으로 판단된다. 이 결과로 볼 때 경질폴리우레탄폼의 착화시간은 heat flux의 크기와 밀도에 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었다. heat flux의 크기와 밀도에 큰 착화시간에 미치는 영향을 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

4.2 열방출특성 실험(Heat release rate characteristic test)

4.2.1 열방출율(Heat release rate)

재료의 화재위험성은 착화성과 함께 재료가 연소하

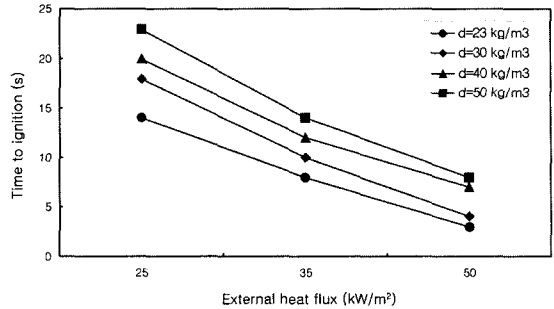


Fig. 4. Effect of external heat flux on time to ignition of rigid PU foam.

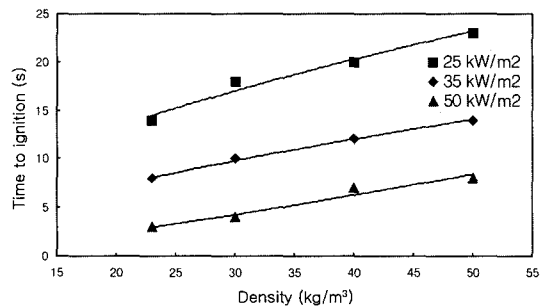


Fig. 5. Effect of density on time to ignition of rigid PU foam at 25 kW/m², 35 kW/m², 50 kW/m² heat flux level.

면서 발생시키는 열방출율과 연소생성물에 의해 좌우된다. 재료가 착화되어 화재가 확대되기 위해서는 주위의 다른 가연물을 착화시킬 수 있는 충분한 양의 열을 방출해야 하고 동시에 주위의 차가운 공기에 의해 냉각되지 않을 만큼 빠른 속도로 방출되어야 한다. 따라서 여러가지 요소중 화재위험성을 가장 잘 나타낼 수 있는 요소가 열방출율이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 25 kW/m², 35 kW/m², 50 kW/m²의 복사열 조건에서 경질폴리우레탄폼의 열방출특성을 평가하였다. 각 heat flux 조건에서의 열방출을 측정결과를 Table 1~Table 3에 나타내었고, 밀도 40 kg/m³ 실험체의 열방출

Table 1. Heat release rate of rigid PU foam at 25 kW/m²

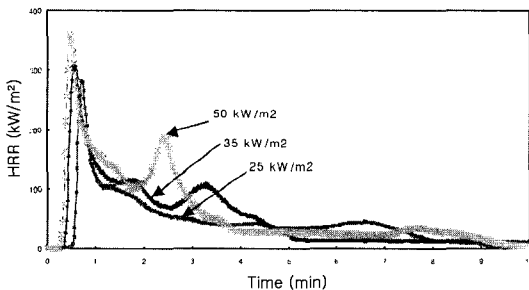
Density (kg/m³)	Heat release rate		
	Peak (kW/m²)	Total (MJ/m²)	Average (kW/m²)
23	220	20.7	35
30	233	18.6	32
40	277	19.1	33
50	289	30.9	54

**Table 2.** Heat release rate of rigid PU foam at 35 kW/m<sup>2</sup>

Density (kg/m <sup>3</sup> )	Heat release rate		
	Peak (kW/m <sup>2</sup> )	Total (MJ/m <sup>2</sup> )	Average (kW/m <sup>2</sup> )
23	257	23.7	40
30	272	19.3	33
40	311	31.5	53
50	323	35.9	61

**Table 3.** Heat release rate of rigid PU foam at 50 kW/m<sup>2</sup>

Density (kg/m <sup>3</sup> )	Heat release rate		
	Peak (kW/m <sup>2</sup> )	Total (MJ/m <sup>2</sup> )	Average (kW/m <sup>2</sup> )
23	291	29.4	49
30	297	24.9	42
40	326	36.4	61
50	357	43.9	74

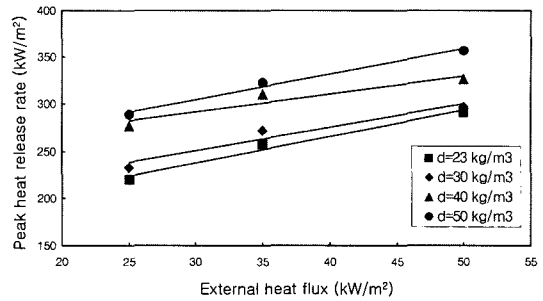


**Fig. 6.** Typical heat release rate curve of rigid PU foam (density : 40 kg/m<sup>3</sup>).

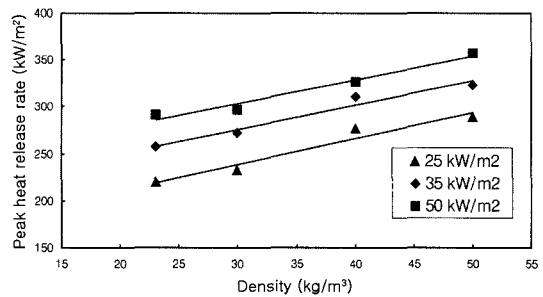
을 곡선을 Fig. 6에 나타내었다.

4.2.2 Heat flux 크기에 따른 열방출율의 영향

경질우레탄폼의 열방출율은 실험체 모두 heat flux가 증가함에 따라 열방출율도 증가하였다. 25 kW/m<sup>2</sup> 복사열조건에서의 밀도 50 kg/m<sup>3</sup> 경질우레탄폼의 최대열방출율(Peak heat release rate, PHRR)과 평균열방출율(Average heat release rate)을 비교해보면 35 kW/m<sup>2</sup>에서 최대열방출율이 12%, 평균열방출율이 13% 증가하였고, 50 kW/m<sup>2</sup>에서는 최대열방출율이 24%, 평균열방출율이 37% 증가하였다. 이와같은 추세는 다른 밀도에서도 비슷한 경향을 보였으며 heat flux에 따른 최대열방출율의 영향을 Fig. 7에 나타내었다. 총방출열(Total heat released, THR)의 경우 25 kW/m<sup>2</sup>에서 18.6~30.9 MJ/m<sup>2</sup>, 35 kW/m<sup>2</sup>에서 19.36~35.9 MJ/m<sup>2</sup>,



**Fig. 7.** Dependency of peak heat release rate on external heat flux of rigid PU foam.



**Fig. 8.** Dependency of peak heat release rate on density of rigid PU foam.

50 kW/m<sup>2</sup>에서 24.9~43.9 MJ/m<sup>2</sup>의 열량값을 갖는 것으로 나타났다.

4.2.2 밀도에 따른 열방출율의 영향

실험체는 밀도가 증가함에 따라 열방출율이 증가하였으며, 밀도에 따른 최대열방출율의 영향을 Fig. 8에 나타내었다. 25 kW/m<sup>2</sup>의 복사열조건에서는 밀도가 23 kg/m<sup>3</sup>에서 30 kg/m<sup>3</sup>, 40 kg/m<sup>3</sup>, 50 kg/m<sup>3</sup>으로 증가됨에 따라 최대열방출율이 각각 6%, 26%, 31% 증가하였다. 35 kW/m<sup>2</sup>과 50 kW/m<sup>2</sup>의 복사열 조건에서도 밀도가 증가함에 따라 최대열방출율과 평균열방출율은 증가하는 경향을 나타냈다.

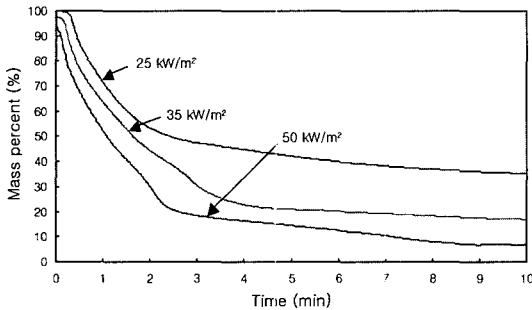
4.2.3 열방출율과 질량감소율과의 관계

재료의 연소로 인한 열방출율은 그 재료가 연소되어 감소된 질량과 밀접한 관계가 있다. Table 4에서는 각 heat flux에서 원 실험체의 질량을 100%로 하였을 때 실험체가 연소하여 감소된 질량의 백분율을 질량감소율(%)로 나타내었다.

Table 4에 나타난 바와 같이 heat flux가 25 kW/m<sup>2</sup>에서 50 kW/m<sup>2</sup>로 증가함에 따라 질량감소율도 커지는 경향을 나타내었다. 각 heat flux에서의 질량감소율과 Table 1~Table 3에 나타난 열방출율값을 비교하면 질량감소율이 큰 실험체가 열방출율도 크게 나타나 질량

**Table 4.** Mass loss of rigid PU foam at 25 kW/m<sup>2</sup>, 35 kW/m<sup>2</sup>, 50 kW/m<sup>2</sup>

Density (kg/m <sup>3</sup> )	Mass loss (%)		
	25 kW/m <sup>2</sup>	35 kW/m <sup>2</sup>	50 kW/m <sup>2</sup>
23	83	89	89
30	71	80	92
40	66	83	93
50	73	81	95



**Fig. 9.** Typical mass loss curve of rigid PU foam (density : 40 kg/m<sup>3</sup>).

감소율과 열방출율은 밀접한 상관관계가 있는 것을 알 수 있었다. 또한 25 kW/m<sup>2</sup>와 35 kW/m<sup>2</sup>의 Heat flux에서 밀도가 낮은 실험체의 질량감소율이 밀도가 높은 실험체에 비해 큰 것은 밀도가 낮은 실험체가 연소가 용이하기 때문으로 판단되며, 상대적으로 높은 Heat flux인 50 kW/m<sup>2</sup>에서는 밀도에 따른 질량감소율의 차이가 크지 않았다. Fig. 9에 25 kW/m<sup>2</sup>, 35 kW/m<sup>2</sup>, 50 kW/m<sup>2</sup>의 heat flux에 노출된 밀도 40 kg/m<sup>3</sup> 실험체의 질량감소율 곡선을 나타내었다.

**4.3 플래쉬오버 가능성의 예측**

소규모실험인 콘칼로리미터실험에 의해 측정된 착화시간(TTI, 초)과 최대열방출율(PHRR, kW/m<sup>2</sup>) 데이터를 이용하여 그 재료가 플래쉬오버를 일으킬 수 있는 가능성을 계산식에 의해 분류하는 방법을 Petrella가 제안하였다. Petrella의 제안에 의하면 식 (3)에 의해 계산된 x값이 0.1~1.0이면 낮음(low), 1.010이면 중간(intermediate), 10~100이면 높음(high)으로 플래쉬오버 가능성을 분류하였다.<sup>10)</sup>

$$x = \frac{PHRR}{TTI} \tag{3}$$

이 분류방법에 따라 계산한 x값은 Table 5와 같으며

**Table 5.** Estimation of flashover propensity of rigid PU foam

Density (kg/m <sup>3</sup> )	Parameter	Flashover propensity		
		25 kW/m <sup>2</sup>	35 kW/m <sup>2</sup>	50 kW/m <sup>2</sup>
23	x	15.7	32.1	97
	Classification	High	High	High
30	x	12.9	27.2	74.3
	Classification	High	High	High
40	x	13.9	25.9	46.6
	Classification	High	High	High
50	x	12.6	23.1	44.6
	Classification	High	High	High

이 방법에 의한 플래쉬오버 가능성은 25 kW/m<sup>2</sup>, 35 kW/m<sup>2</sup>, 50 kW/m<sup>2</sup>의 복사열 조건에서 실험체 모두 높은 것으로 분류되었다. 또한 플래쉬오버 가능성을 나타내는 x값은 실험체에 가해진 heat flux가 커질수록 비례적으로 증가되는 경향을 보인 반면에 밀도의 크기에 따라서는 큰 차이를 나타내지 않았다.

본 연구에서는 난연처리되지 않은 경질우레탄폼에 대해서만 Petrella가 제안한 방법에 따라 플래쉬오버 가능성을 검토하였으나 향후 난연처리기법에 따른 플래쉬오버 가능성의 예측은 물론 여러가지 다양한 재료들에 대해서도 이에 대한 연구가 필요하며, 이러한 Petrella의 제안방법은 화재에 취약한 재료들을 규제하기 위한 분류방법의 하나로 활용이 가능하리라고 판단 된다.

**5. 결 론**

본 연구에서는 콘칼로리미터와 Setchkin 착화은도시험기를 사용하여 경질폴리우레탄폼의 착화성 및 열방출특성실험을 실시하였다. 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 경질폴리우레탄폼의 FIT는 383°C~390°C, SIT는 493°C~495°C이었고 SIT가 FIT에 비해 약 100°C 높게 나타났다.
2. 착화시간은 Heat flux의 크기가 증가함에 따라 급속히 짧아졌으며, 동일한 Heat flux에서는 밀도가 낮을수록 착화시간이 빠른 것으로 나타났다.
3. 열방출율은 50 kW/m<sup>2</sup>에서 가장 크게 나타났고, Heat flux와 밀도가 클수록 증가하는 경향을 보였다. 질량감소율은 Heat flux가 커질수록 증가하였으나 밀도가 커지면 감소하는 경향을 보였다.

4. 착화시간과 열방출특성의 관점에서 불 때 경질폴리우레탄폼의 화재성능은 가해진 Heat flux의 크기와 밀도에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

5. Petrella에 의해 제안된 방법에 의해 플래쉬오버 가능성을 분류한 결과 난연처리되지 않은 경질폴리우레탄폼은 플래쉬오버 가능성이 높은 것으로 나타났으며, 이 분류방법은 화재에 취약한 재료의 사용을 규제하는데 유용한 방법으로서 이러한 분류방법의 적용에 관한 다양한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## 감사의 글

본 연구는 2003학년도 경기대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 폴리우레탄 - 다양한 응용과 적용, 한국바스프(주) (1995).
2. Craig L. Beyler and Marcelo M. Hirschler, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 3rd ed., NFPA, Quincy, MA, pp.1-128(2002).
3. Marcelo M. Hirschler, Fire Performance of Organic Polymers, Thermal Decomposition and Chemical Composition, 2001 American Chemical Society Symposium Series 797, pp.293-300(2001).
4. Babrauskas and S. J. Grayson, Heat Release in Fires, Elsevier Science Publishing Co., New York (1992).
5. 이근원, 김관웅, "콘칼로리미터를 이용한 플라스틱 단열재의 화재특성", 화재·소방학회 논문지, Vol. 17, No. 1, pp.76-83(2003).
6. ASTM D 1929, Standard Test Method for Ignition Properties of Plastics, ASTM, Philadelphia(1991).
7. ASTM E 1354, Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products using an Oxygen Consumption Calorimeter, ASTM, Philadelphia(1990).
8. ISO 5660-1, Reaction to Fire, Part 1. Rate of Heat Release from Building Products (Cone Calorimeter), Geneva(2002).
9. Fu-Yu Hshieh, David B. Hirsch, and D. Beeson, Ignition and Combustion of Low-density Polyimide Foam, Fire and Materials, Vol. 27, pp.119-130 (2003).
10. R. V. Petrella, The Assessment of Full-scale Fire Hazards from Cone Calorimeter Data, Journal of Fire Sciences, Vol. 12, pp.14-43(1994).