

## 페놀 폼의 연소특성에 관한 연구 A Study on the Combustion Characteristics of Phenol Foam

박형주

Hyung-Ju Park

호원대학교 소방행정학과  
(2010. 1. 11 접수/2010. 2. 10 채택)

### 요 약

외부복사 열원(20, 25, 35, 50, 70kW/m<sup>2</sup>)과 산소/질소의 혼합가스의 농도 변화에 따른 페놀폼의 연소 특성을 분석하였다. 산소지수는 KS M ISO 4589-2를 만족하는 산소지수시험기를 사용하였으며, 점화시간, 임계열속, 그리고 질량감소속도는 ISO 5660-1를 만족하는 mass loss calorimeter를 사용하여 측정하였다. 연구결과, 외부 복사열원에서 임계열속은 28.99kW/m<sup>2</sup>, 평균질량감소속도는 0.56~1.77g/m<sup>2</sup>s로 측정되었으며, 한계산소지수는 45.1%를 나타내었다. 모든 연구결과를 종합한 결과 페놀 폼이 다른 발포 물질에 비해 아주 우수한 화재안정성을 나타낸다는 것을 알 수 있었다.

### ABSTRACT

The combustion characteristics of phenol foam were analysed using variable external irradiation level (20, 25, 35, 50, and 70 kW/m<sup>2</sup>) and in the mixture gas of oxygen/nitrogen. The oxygen index were carried out from the oxygen index tester (KS M ISO 4589-2) and ignition time, critical heat flux, and mass loss rate were carried out from the mass loss calorimeter (ISO 5660-1). As the results of this study, the critical heat flux and average mass loss rate were 28.99 kW/m<sup>2</sup> and 0.56~1.77 g/m<sup>2</sup>s respectively at the variable external irradiation level. And the limited oxygen index were 45.1% in mixture gas of oxygen/nitrogen. In conclusion, we knew that phenol foam had the best performance than other foam materials in fire safety from all data of this study.

**Key words** : Phenol foam, Critical heat flux, Ignition time, Mass loss rate, Limited oxygen index

### 1. 서 론

발포체를 이용한 단열재료는 폴리스티로폼(PS), 폴리우레탄(PU) 및 에폭시 수지 단열재가 대부분이며, 이들 단열재의 기재는 열에 약한 열가소성 수지로 이루어져 있어 화재에 취약한 특징을 지니고 있다. 이와 같이 건축용 단열재로 사용된 폴리스티로폼과 우레탄폼 단열재와 각종 구조물의 성형재료가 가연성 재료로 이루어짐에 따라 국내·외적으로 빈번하게 발생하고 있는 화재에 의해 인명피해가 매우 크게 발생하는 등의 문제점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 많은 연구와 대체소재의 개발이 진행되고는 있으나 아직까지 불연성능 및 난연성능을 만족하는 단열재는 개발되

지 않고 있다. 최근에는 별도의 난연제를 첨가하지 않아도 자체적인 난연성을 가지고 있는 고분자의 사용과 이와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 중에서도 열경화성 수지로서 내열성이 우수하며 자기소화온도가 480°C로 매우 높은 페놀수지(phenol resin)를 이용한 대체소재의 개발이 국내·외적으로 진행되고 있다. 페놀수지는 연소시 분해가스로 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 물(H<sub>2</sub>O)이 주 생성물로서 연기 발생량이 적고 독성가스의 발생량이 적어 발포 폼 형태의 제품으로 개발 및 생산이 진행되고 있다.<sup>1)</sup>

일정비용의 페놀수지에 정포제, 가소제, 발포제, 계면활성제, 경화제, 난연제 등을 첨가하여 발포시킴으로써 얻어지는 페놀수지 발포체는 여러 유기수지 발포체 중에서 특히 난연성, 내열성, 저발연성, 치수안정성, 우수한 가공성 및 높은 단열성 등을 가지고 있기 때문에

E-mail: sandelf@howon.ac.kr

각종 건축용 내·외장재의 건축재료나 공업용 단열소재, 철도차량이나 항공기 등의 구조재료로도 활용되고 있어 그 응용범위가 매우 넓다고 할 수 있다.<sup>1,2)</sup>

본 연구에서는 페놀 폼에 대한 mass loss calorimeter를 이용한 일정한 외부 복사열원이 존재하는 상태에서의 착화시간(ignition time), 임계열유속(critical heat flux), 질량감소속도(mass loss rate)의 측정과 oxygen index tester를 이용한 산소지수(oxygen index) 등의 연소특성을 측정하고자 하였으며, 이들 측정결과와 다른 발포 폼과의 연소특성을 비교·검토하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험시료

시료는 샌드위치 패널 또는 냉·공조 설비의 덕트용 보드로 사용되고 있는 페놀 폼 단열재로 국내 D업체에서 양산 판매중인 밀도 40kg/m<sup>3</sup>, 두께 50mm의 레졸형 페놀 수지를 발포 성형한 페놀 폼을 사용하였다.

### 2.2 실험장치 및 방법

#### 2.2.1 Mass loss calorimeter<sup>3,5)</sup>

일정한 heat flux(20~70kW/m<sup>2</sup>)에서 페놀 폼 보드의 착화시간(ignition time), 질량감소속도(mass loss rate), 임계열유속(critical heat flux) 등의 연소특성을 측정하기 위해 ISO 5660(Fire tests - Reaction to Fire, part 1)을 만족하는 mass loss calorimeter(FTT 사)를 사용하였다.

Mass loss calorimeter를 이용한 연소특성 측정은 먼저 시료를 100mm × 100mm × 50mm의 크기로 절단하여 온도 23 ± 2°C, 상대습도 50 ± 5% 상태에서 전처리시킨 후 시험전 크기와 무게를 측정하고 두께 0.03~0.05mm 알루미늄 호일의 반쪽거리는 면이 시편을 향하도록 비 노출면을 감싼 뒤 사용하였다.

준비된 시편과 시편 홀더는 cone heater의 바닥면과 시편의 상부 표면 사이 거리를 25.0mm(약 1inch)가 되도록 load cell 장치위에 수평방향으로 설치하고 20, 25, 35, 50, 70kW/m<sup>2</sup>의 복사열에 300s 동안 노출시켰을 때의 착화시간(ignition time)과 중량감소율(mass loss rate)을 측정하였다. 시편에 대한 착화는 cone heater 하부와 시편 상부의 중간 위치에서 점화 스파크를 이용하여 실시하였으며, 실험 횟수는 3회 실시하고 그 결과를 기록하였으며 3회의 실험을 통해 얻어진 측정값을 평균해서 사용하였다. 실험시간 동안 시편의 중량변화는 매 1초 간격으로 load cell을 이용하여 측정하였다. 이때 각종 data는 data logger를 이용하여 computer에 자동으로 저장된다.

질량감소율은 ISO 5660-1:2002(E) “Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1 : Heat release rate(cone calorimeter method)”의 12.5 mass loss rate를 구하는 다음 식(1)~(5)을 이용하였으며, 시간 간격은 3초 간격으로 하여 계산하였다.

$$- [\dot{m}]_{i=0} = \frac{25m_0 - 48m_1 + 36m_2 - 16m_3 - 3m_4}{12\Delta t} \quad (1)$$

$$- [\dot{m}]_{i=1} = \frac{3m_0 + 10m_1 - 18m_2 + 6m_3 - m_4}{12\Delta t} \quad (2)$$

$$- [\dot{m}]_i = \frac{-m_{i-2} + 8m_{i-1} - 8m_{i+1} + m_{i+2}}{12\Delta t} \quad (3)$$

$$- [\dot{m}]_{i=n-1} = \frac{-3m_n - 10m_{n-1} + 18m_{n-2} - 6m_{n-3} + m_{n-4}}{12\Delta t} \quad (4)$$

$$- [\dot{m}]_{i=n} = \frac{-25m_n + 48m_{n-1} - 36m_{n-2} + 16m_{n-3} - 3m_{n-4}}{12\Delta t} \quad (5)$$

#### 2.2.2 산소지수(Oxygen index)

상온에서 페놀 폼 보드의 산소지수(oxygen index)를 측정하기 위해 ASTM D 2863, ISO 4589-2, KS M ISO 4589-2의 시험기준을 만족하는 oxygen index tester 2005(FESTEC 사)를 사용하였다.

Oxygen index tester 2005를 이용한 산소지수 측정은 KS M ISO 4589-2:2006(산소지수에 의한 연소 거동의 측정 - 제2부 상온시험법)의 시험방법에 따라 실시하였으며 시편의 크기는 시료를 120mm × 10mm × 10mm로 절단한 후 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

페놀 폼에 대한 mass loss calorimeter를 이용한 착화시간, 임계열유속, 질량감소속도 측정과 oxygen index tester를 이용한 산소지수를 측정할 결과는 다음과 같다.

### 3.1 착화시간(Ignition time)

외부 복사열의 변화에 따른 착화시간과 1/sqrt(t<sub>ig</sub>)은 Table 1에 나타내었다. 착화시간은 cone heater로부터 방출되는 각 외부 복사열의 단계에서 점화스파크에 의해 시료 표면에서 유염 착화가 발생할 때까지의 시간으로 3회의 측정 결과이며, 1/sqrt(t<sub>ig</sub>)은 측정된 각 착화시간으로부터 임계열유속을 예측하기 위해 착화시간

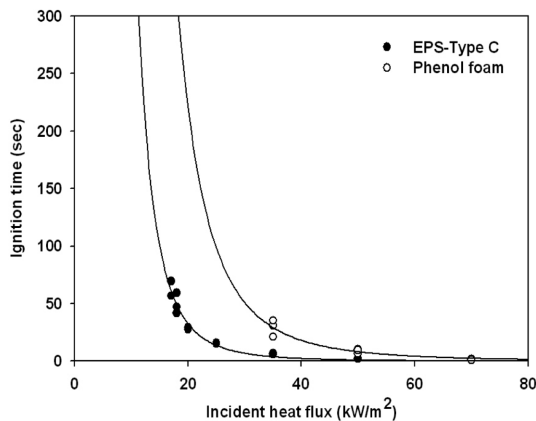
**Table 1.** Time to Ignition of Phenol Foam

Heat Flux (kW/m <sup>2</sup> )	Time to Ignition (s)	1/sqrt(t <sub>ig</sub> )
20	Non-ignition	-
25	Non-ignition	-
35	21.12	0.2176
	31.02	0.1795
	35.27	0.1684
50	6.56	0.3904
	10.05	0.3154
	9.65	0.3219
70	1.51	0.8138
	0.99	1.0050
	1.10	0.9535

에 대한 제공근의 역수로 계산된 결과이다.

Table 1에 나타난 바와 같이 각 단계별 외부 복사열 원에 5분간 노출시킨 동안 35kW/m<sup>2</sup>의 미만의 외부 복사열에서 육안으로 관찰할 만한 유염 착화가 발생하지 않았다. 이 결과는 박<sup>6)</sup>의 “복사열을 이용한 샌드위치 패널 심재의 연소특성 분석”의 연구결과인 난연처리된 EPS(Expandable Polystyrene)의 15~17kW/m<sup>2</sup> 미만의 외부 복사열에서 착화가 발생하지 않은 결과에 비해 약 2배 정도 높게 측정된 것으로 외부 복사열속에 대한 열안정성이 매우 높다는 것을 알 수 있다.

Figure 1은 외부 복사열의 변화와 측정된 착화시간과의 관계를 나타낸 그래프로 착화시간은 외부 복사열이 임계열유속에 가까워질수록 무한대(∞)로 접근하고,



**Figure 1.** Ignition time vs. incident heat flux for phenol foam and EPS-Type C.

외부 복사열이 임계열유속보다 무한이 커질 경우 0으로 접근함을 알 수 있다. 즉, 식 (6)로부터  $\dot{q}_i'' > \dot{q}_{cr}''$  일 때  $t_{ig} \rightarrow \infty$ 이고,  $\dot{q}_i'' \gg \dot{q}_{cr}''$  일 때  $t_{ig} \rightarrow 0$ 으로 수렴함을 알 수 있다.

$$t_{ig} = \frac{4}{3}k\rho c \left[ \frac{1 - \beta_{ig}}{2 - \beta_{ig}} \right] \frac{(T_{ig} - T_0)^2}{[\dot{q}_i''(t_{ig})]^2} \tag{6}$$

**3.2 임계열유속(Critical heat flux)**

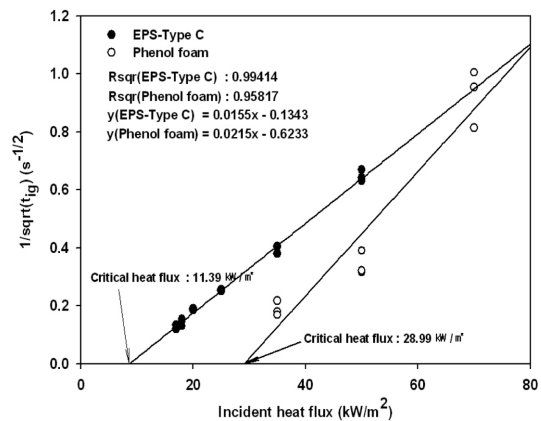
임계열유속은 외부 복사열에 노출된 시료가 착화하는데 필요한 최소 복사열을 의미하는 것으로 착화될 때의 가장 낮은 복사열과 착화되지 않는 가장 높은 복사열의 사이에서 실험적으로 열유속을 얻을 수 있다. 또한 각 외부 복사열에 따른 착화시간의 제공근의 역수(1/sqrt(t<sub>ig</sub>))와의 관계 그래프에서 직선의 절편으로부터 예측할 수 있다. 결국, 본 연구에서는 임계열유속을 식(6)로부터 유도된 다음 식(7)~(9)와 착화시간으로부터 예측하였다.

$$\frac{1}{\sqrt{t_{ig}}} = (\dot{q}_i'' - \dot{q}_{cr}'') \frac{1}{\sqrt{\frac{4}{3}k\rho c \left[ \frac{1 - \beta_{ig}}{2 - \beta_{ig}} \right] (T_{ig} - T_0)}} \tag{7}$$

$$\text{slope} = \frac{1}{\sqrt{\frac{4}{3}k\rho c \left[ \frac{1 - \beta_{ig}}{2 - \beta_{ig}} \right] (T_{ig} - T_0)}} \tag{8}$$

$$\text{intercept} = -\text{slope}(\dot{q}_{cr}'') \tag{9}$$

Figure 2는 모든 외부 복사열을 통한 직선의 회귀선을 갖는 페놀 폼에 대한 외부 복사열의 변화에 따른



**Figure 2.** Linear regression analysis of ignition time according to incident heat flux.

$1/\sqrt{t_{ig}}$  을 나타낸 것으로 각 직선의 절편 즉, 직선과 x 축이 만나는 점이 각 시료에 있어서의 임계열유속이 된다. 식(9)와 Figure 2로부터 예측된 페놀 폼의 임계 열유속은  $28.99\text{kW/m}^2$ 으로 예측되었다.

이 결과는 박<sup>6)</sup>의 “복사열을 이용한 샌드위치 페널 심재의 연소특성 분석”의 연구결과인 난연처리된 EPS (Expandable Polystyrene)의 Type C의 예측된 임계열유속인  $11.39\text{kW/m}^2$  보다 약 2.5배 정도 높은 것으로 화재 안정성이 우수하다고 할 수 있다.

**3.3 질량감소속도(Mass loss rate)**

페놀 폼에 대해 mass loss calorimeter를 이용하여  $20\text{kW/m}^2$ ,  $25\text{kW/m}^2$ ,  $35\text{kW/m}^2$ ,  $50\text{kW/m}^2$ ,  $70\text{kW/m}^2$ 의

복사열에서 300s 동안 노출시켰을 때 매 1초 간격으로 측정된 중량변화를 식(1)~(5)을 이용하여 mass loss rate 를 계산하였다.

Figure 3~6에 외부 복사열량의 변화에 따른 페놀 폼 과 EPS-Type C에 대한 시간변화에 따른 질량감소 곡 선을, Table 2에는 페놀 폼의 총질량감소(total mass loss), 평균질량감소속도(average mass loss rate), 최대 질량감소속도(maximum mass loss rate)를 나타내었다. 총질량감소는 실험전후의 무게변화를 나타낸 것이며, 평균질량감소속도는 총질량감소를 실험시간 300s로 나눈 값을 나타낸 것이다.

페놀 폼과 EPS-Type C의 질량감소 곡선을 살펴보면 EPS의 경우 연소초기 시표표면에 유염착화가 발생한

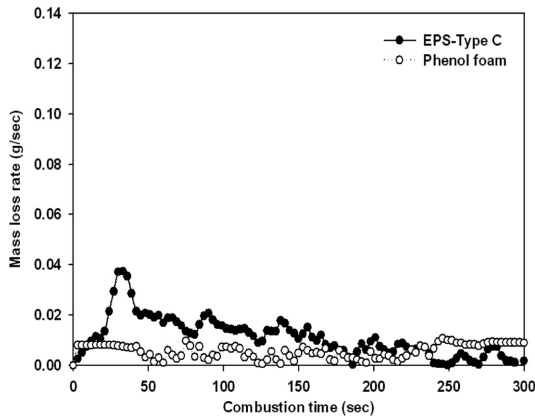


Figure 3. Mass loss rate profile during the combustion at  $20\text{kW/m}^2$ .

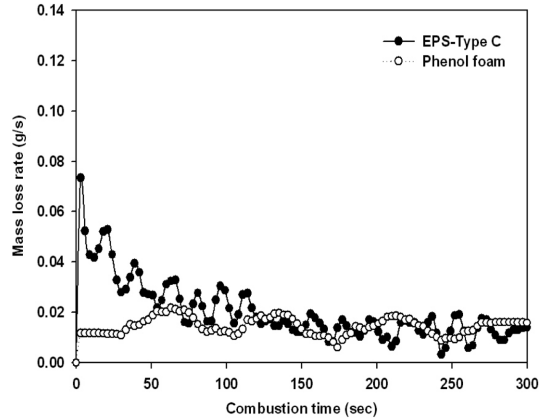


Figure 5. Mass loss rate profile during the combustion at  $35\text{kW/m}^2$ .

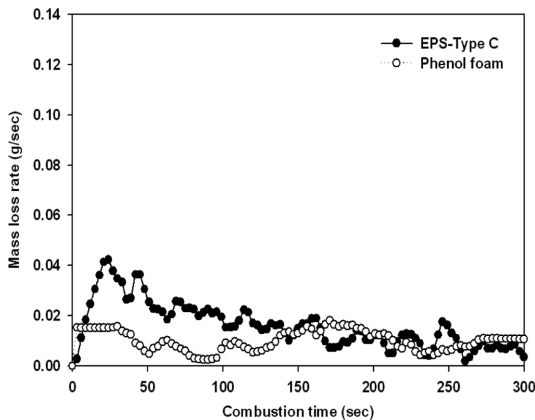


Figure 4. Mass loss rate profile during the combustion at  $25\text{kW/m}^2$ .

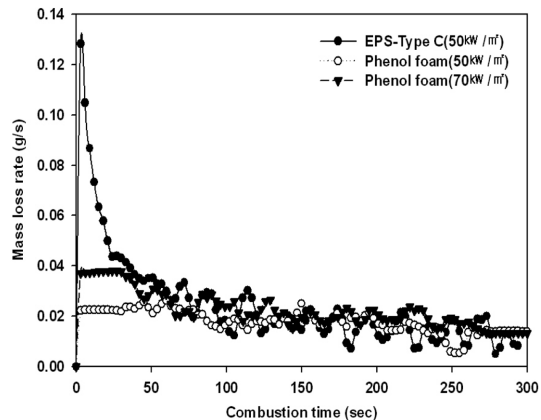


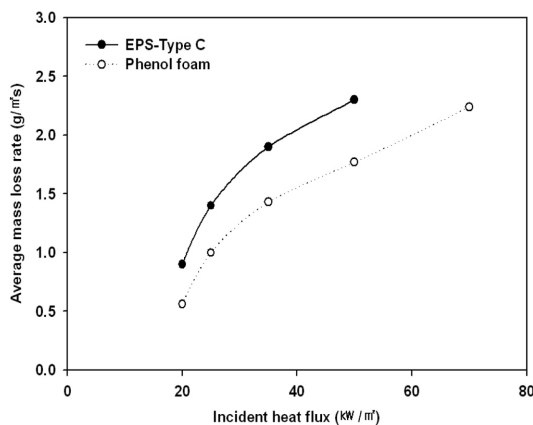
Figure 6. Mass loss rate profile during the combustion at 50 and  $70\text{kW/m}^2$ .

**Table 2.** Mass Loss Rate of Phenol Foam and EPS-Type C<sup>4)</sup> at Incident Heat Flux

Sample Type	Heat Flux (kW/m <sup>2</sup> )	Total Mass Loss (g)	Average Mass Loss Rate (g/m <sup>2</sup> s)	Maximum Mass Loss Rate (g/m <sup>2</sup> s)
Phenol Foam	20	1.68	0.56	1.06
	25	2.99	1.00	1.79
	35	4.30	1.43	2.16
	50	5.32	1.77	2.61
	70	6.71	2.24	3.79
EPS-Type C	20	2.78	0.9	3.7
	25	4.15	1.4	4.2
	35	5.75	1.9	7.3
	50	6.75	2.3	12.8

후 급격한 질량감소속도를 보이다가 화염이 안정화 되면서 감소하는 경향을 보이고 있으며 외부복사열량이 증가함에 따라 전체적으로 질량감소속도가 증가하는 경향을 나타낸 반면에 페놀 폼의 경우 연소초기 유염 착화 발생후와 화염이 안정화 된 후의 질량감소속도에 있어서 큰 변화없이 진행되었으며, 외부복사열량이 증가하더라도 질량감소속도의 급격한 증가 현상은 보이지 않았다. 이 결과로부터 페놀 폼의 경우 질량감소속도가 낮다는 것은 물질 자체의 연소성이 낮다는 의미로 샌드위치 패널 또는 보드용으로 사용되는 다른 유기물 단열재에 비해 화재안정성이 높다고 할 수 있다.

Figure 7은 외부 복사열량의 변화에 따른 페놀 폼과 EPS-Type C에서 발생한 단위면적당 평균질량감소속도



**Figure 7.** Average mass loss rate vs. incident heat flux for phenol foam and EPS-Type C.

를 나타낸 그래프로 외부 복사열량의 증가에 따라 평균질량감소속도가 증가함을 알 수 있다. 페놀 폼의 경우 박<sup>4)</sup>의 “EPS 샌드위치 패널 심재의 열방출율에 관한 연구”의 연구결과인 난연처리된 EPS-Type C에 비해 약 60~80% 수준으로 연소성이 낮음을 알 수 있다. 또한 외부 복사열량이 증가함에 따른 최대 질량감소속도에 있어서도 급격한 변화 없이 증가함을 알 수 있다. 이는 열경화성 물질인 페놀 수지가 탄화되면서 단열성의 탄화층을 형성함에 따라 심재 내부로의 열전달이 잘 이루어지지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

**3.4 산소지수(Oxygen index)**

산소지수(oxygen index)는 산소와 질소의 혼합기체 분위기에서 연소되기 위해 필요한 산소농도를 의미하고, 한계산소지수(limited oxygen index)는 식(10)을 이용하여 측정할 수 있으며 산소-질소 혼합 공기 분위기에서 가연성 물질이 착화 후 3분간 꺼지지 않고 타는데 필요한 최소한의 산소 부피 퍼센트를 말한다. 따라서 가연성 물질의 산소지수와 한계산소지수가 높을수록 난연성이 우수하다고 할 수 있다.<sup>7,8)</sup>

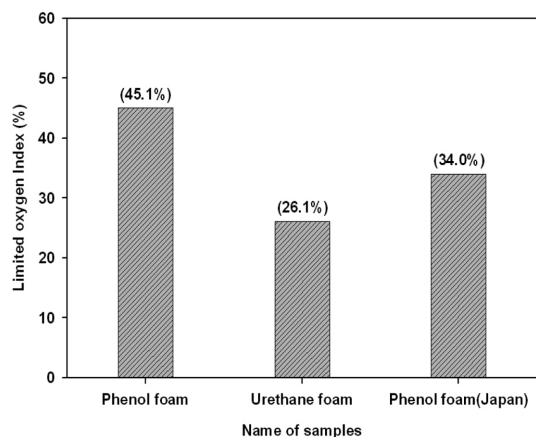
$$OI = C_f + k \cdot d \tag{10}$$

여기서, C<sub>f</sub>: 최종 test시 산소농도

k: 덕슨의 지수

d: 실험과정 산소농도의 step size(보통 0.2%)

Figure 8은 KS M ISO-4589-2의 상온 시험법과 식(10)을 이용하여 측정된 국내산 페놀 폼의 경우 45.1%로 가장 높은 값을 나타내었으며, 일본에서 시판되고 있는 페놀 폼 보드의 경우 34.0%, 그리고 국내산 난연



**Figure 8.** Limited oxygen index of the samples.

우레탄 폼의 경우 26.1%로 가장 낮은 값을 나타내었다. 따라서 이 연구 결과로부터 페놀 폼의 난연성이 난연 우레탄 폼에 비해 아주 우수하여 임계열유속과 질량감소속도 측정의 결과와 같이 화재 안정성이 높다고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

페놀 폼에 대한 외부복사열원에서의 착화시간, 임계열유속, 질량감소속도를 측정과 산소/질소 혼합가스 내에서의 한계산소농도를 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 외부복사열과 착화시간의 제곱근의 역수와의 관계 그래프로 부터 예측된 임계열유속은  $28.99\text{kW/m}^2$ 로 난연 처리된 EPS-Type C의  $11.39\text{kW/m}^2$ 에 비해 약 2.5 정도 높은 값을 나타내었다.
- 2) 산소/공기의 혼합가스 분위기에서 측정된 페놀 폼의 한계산소농도(LOI)는 45.1%로 난연 우레탄의 26.1%에 비해 아주 우수한 난연성을 나타내었다.
- 3) 난연처리된 EPS-Type C와의 착화시간 비교에 있어서 같은 외부복사열속에서 약 4배 정도 긴 착화시간을 나타내었다.
- 4) 외부복사열에서의 평균질량감소속도는  $0.56\sim 1.77\text{g/m}^2\text{s}$ 로 난연 처리된 EPS-Type C의  $0.9\sim 2.3\text{g/m}^2\text{s}$ 에 비해 낮은 값을 나타내었다.
- 5) 모든 연구결과를 종합한 결과 페놀 폼이 다른 발포 물질에 비해 아주 우수한 화재안정성을 나타낸다는 것을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 2009년 호원대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 수행하였으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 김동권, 이수복, “단열재용 페놀폼의 물성과 열적특성”, 공업화학회 논문지, Vol.17, No.4, pp.357-360(2006).
2. 김동권 외, “페놀수지 발포체의 제조방법”, pp.1-10, 대한민국특허청, 등록특허 10-06 13887(2006).
3. 박형주, “퍼즐매트의 연소속도에 관한 연구”, 한국안전학회지, Vol.23, No.6, pp.84-90(2008).
4. 박형주, 조명호, “EPS 샌드위치 패널 심재의 열방출율에 관한 연구”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.22, No.5, pp.72-78(2008).
5. ISO 5660-1, “Reaction to Fire Tests - Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate - Part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method)”, International Standard, pp.15-16(2002).
6. 박형주, “복사열을 이용한 샌드위치 패널 심재의 연소특성 분석”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.21, No.4, pp.25-31(2007).
7. KS M ISO 4589-2: 산소지수에 의한 연소 거동의 측정, 제2부: 상온시험법(2002).
8. 오규형, 이성은, 김황진, “실내 내장 벽지의 고온산소지수에 관한 연구”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.22, No.2, pp.57-62(2008).