

## 콘 히터의 유동적인 열선속을 적용한 PMMA의 연소 특성 분석 A Combustion Characteristic Analysis of PMMA by Cone Heater of the flexible Heat Flux

문성웅\* · 류상훈\*\* · 이동호†

Sung-Woong Moon\* · Sang-Hoon Ryu\*\* · Dong-Ho Rie†

\*인천대학교 대학원 안전공학과, \*\*(주)페스텍 인터내셔널, 인천대학교 안전공학과  
(2010. 3. 17. 접수/2010. 6. 11. 채택)

### 요 약

현재 열방출률을 측정하는 데 사용되고 있는 콘칼로리미터 법은 일정한 복사도 값을 가지고 실험한다. 하지만, 실물화재 시 가연물은 연소할 때 동일하지 않은 열선속을 방출한다. 본 연구에서는 일정 크기를 갖는 실내를 대상으로 FDS를 사용하여 실내 열선속 변화에 따른 연소특성을 분석하여 실내화재 시 온도 변화를 계산하여, 콘칼로리미터의 콘 히터에 유동적인 열선속을 적용하여 복사도에 반영하였다. 결과로 화재 성장기(Growth period) 및 감쇠기(Decline period)와 같은 복사도의 변화에 따라 실물화재에 근거한 PMMA의 열방출률을 얻을 수 있었다.

### ABSTRACT

The cone calorimeter method which is currently used to measure the heat release rate has a fixed rate of radiation. However, in the real fire, when flame combustible material burns, it releases the identical heat flux. We measured the changes of temperature of a fire using FDS in order to analyze flexible heat flux of combustion characteristics. In this study, the rate of radiation of cone calorimeter was adopted by using FDS. Follow those results, it produce between the rate of radiation in the growth period and decline period have a significant impact on heat release rate of PMMA.

**Key words** : Cone calorimeter, FDS, Heat release rate, PMMA, Heat flux

## 1. 서 론

가연물은 연소할 때 복사 에너지를 방출하게 된다. 이 에너지는 다른 가연물의 기화를 촉진하게 되어 직접 불꽃이 닿지 않더라도 착화가 일어난다.

이때 가연물은 화재 성장시간, 주변 가연물의 열방출률, 산소 공급 등 주변 환경에 따라 방출하는 복사도가 달라진다.<sup>1)</sup>

넓은 열선속 범위에 분포하는 상당수의 가연물에 대해 열방출률(Heat Release Rate)은 열선속에 선형적으로 비례하게 된다. 이러한 특징은 조사율에 대한 열방출률의 관계가 선형으로 나타나 단순한 형태로 표현할 수 있다. 반면 유용성이 제한적이며 특히 열선속이 매

우 높거나 낮은 경우 대부분의 물질이 선형성을 이탈한다.<sup>2)</sup> 이러한 열선속 개념을 도입하여 가연물의 특성을 열방출률로 평가하고 있다.

열방출률은 연소 반응이 열을 발생시키는 속도를 의미한다. 이러한 열방출률의 측정은 열량계를 사용하거나 실내 화재시험을 활용하는 방법이 있다. 이 중 축소 실험을 통해 열방출률을 측정하는 콘칼로리미터 법은 ASTM E1354,<sup>3)</sup> ISO 5660<sup>4)</sup>과 같이 정해져 열방출률 및 연기 분석 등 실험에 사용되고 있다.

실물화재 시 가연물은 연소할 때 동일하지 않은 열선속을 방출하지만 콘칼로리미터 실험은 일정 열선속으로 실험을 진행한다. 그러나 이러한 실험방법은 실물화재를 해석하는데 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여, 실물화재에서 나타나는 열선속의 변화를 고려하기 위한 콘칼로리미터 실

† E-mail: riedh@incheon.ac.kr

협 시 콘 히터 온도조절기(Conical Heater Temperature Controller)를 활용한 고정적인 열선속과 유동적인 열선속을 적용하였다. 또한 PMMA(polymethyl methacrylate)의 연소 특성을 관찰하여 실물화재 데이터와 비교, 분석하였다.

## 2. 수치해석을 통한 화재시나리오 도출

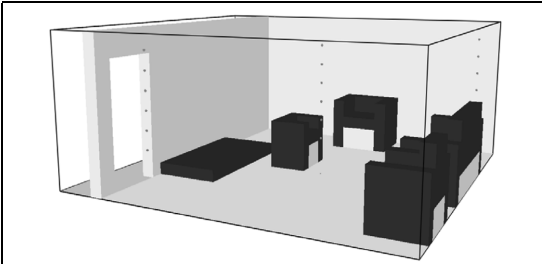
유동적인 열선속을 도출하기 위한 방법은 수치해석 프로그램을 사용하거나 실물화재시험을 고려할 수 있다. 실물화재시험은 고가의 실험비용, 동일 실험 재현의 어려움, 유해가스 처리 등의 제약이 많다. 수치해석 프로그램을 이용한 해석은 가연물에 대한 물리, 화학적인 특성 및 화재공간의 설계정보만을 통해 화재에 대한 연소특성, 연기 유동 및 가스 발생량 등을 낮은 비용으로 분석할 수 있는 특징이 있다.

따라서 본 연구는 대표적인 수치해석 프로그램인 FDS Ver. 5.0을 사용하여 실물화재 시나리오의 시간에 따른 온도 변화값을 ASCII값으로 데이터베이스화하여 평가를 수행하였다. FDS는 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발된 화재 전용 수치해석 프로그램으로서 화재에 의해 유도되는 연기와 온도의 유동에측에 사용되고 있다.<sup>5)</sup>

### 2.1 수치해석 프로그램을 통한 실물화재 시나리오

본 연구는 수치해석 프로그램인 FDS를 사용하여 실험에 필요한 유동적인 열선속을 도출하여 콘칼로리미터 열선속의 참조 값으로 활용하였다. 화재 해석에 사용된 설정은 FDS Ver. 5.0에서 제공 하는 데이터 중

Table 1. Scenario in a Compartment Fire

	
Sample File Name	room_fire.fds
FDS Version	5.4.1
Size [m]	5.2 × 5.4 × 2.4
Height of Measure [m]	0.6
Calculation [sec]	4,000

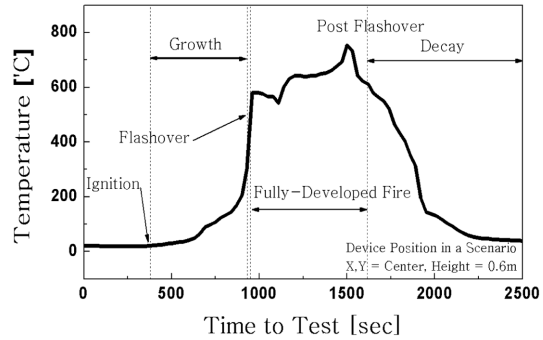


Figure 1. The stage of fire development in a temperature room fire device.

room\_fire.fds 파일을 활용하여 실물화재의 대표 모델로 선정하였다.<sup>5)</sup> 총 계산시간은 4,000sec로 설정하여 가구 및 테이블의 일반적인 높이인 0.6m의 실내 중앙 온도를 수집하게 된다. 이를 통해 화재의 성장기 및 감쇠기, 플래시오버의 발생시간 및 온도를 적용 하였다. Table 1은 본 수치해석에 적용된 모델링 및 설정을 나타낸다.

### 2.2 수치해석을 이용한 열선속 도출 결과

2.1의 시나리오를 토대로 한 화재해석 결과 FDS를 통해 실물화재의 온도 변화를 측정하였다. Figure 1은 공간 중심부 0.6m 상단 장치(Device)의 온도 그래프이다. 측정된 온도는 성장기인 화재발생 840sec 이후의 데이터를 활용하여 콘 히터 복사도 구현에 적용하였으며, 화재 성장 및 감쇠에 대한 온도변화를 생성하였다.

room\_fire 시나리오에서는 화재 발생 후 약 840sec에 화재가 급격히 성장하였다. 960sec에 플래시오버현상이 발생하여 600°C에 도달하는 것으로 나타났다. 이후 화재가 방 전체로 번져 약 1,200sec 경과 후 실내 모든 가연물이 인화되어 화재크기가 줄어들기 시작하였으며, 약 1,700sec 이후 화재가 모두 소멸하였다. 2,100sec 이후 약간의 잔불만 남긴 채 소화되어 실내 온도가 급격히 하강하기 시작하였으며 2,400sec 이후 정상 실내 온도로 돌아오게 된다.

## 3. 콘칼로리미터 실험 방법

### 3.1 3단계 콘 히터 온도 변환 장치

본 연구에는 열선속 변화에 대한 착화 및 연소특성을 파악하기 위해 콘칼로리미터(Cone Calorimeter 2006, Festec International Co., Ltd.)를 사용하여 분석하였다.

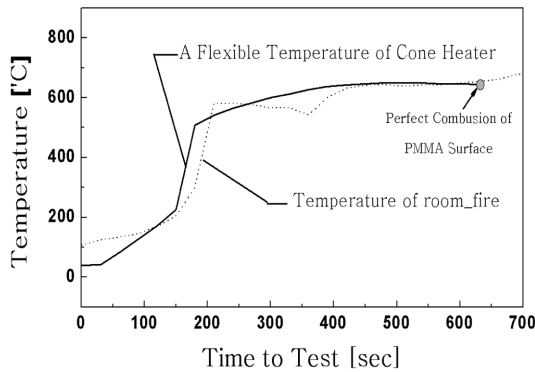


Figure 2. Changes of the temperature of room\_fire device.

본 시험장비는 ISO 5660 기준에 대응할 수 있는 장비이며, 3단계 콘 히터 온도 변환 장치(Conical Heater three step temperature controller)를 사용하여 열선속 변화를 설정할 수 있는 특징이 있다. 본 시험장비는 동시에 변화된 온도가 지속되는 시간설정이 가능하도록 콘칼로리미터에 장착하여 사용할 수 있으며, 온도 및 온도의 승온 속도와 승온 후 지속되는 시간을 설정할 수 있는 특징을 갖는다.

FDS를 통해 산출된 온도를 PMMA 표면에 적용시키기 위해 콘히터 온도 상승에 따른 PMMA 표면온도를 측정하였다. 그 결과 평균 콘히터의 온도와 표면온도는 평균 240.09°C의 온도 차이를 보였으며, 본 결과 값을 바탕으로 FDS를 통해 산출된 온도를 콘히터에 적용시켰다.

Figure 2는 3단계 콘 히터 온도 변환 장치를 사용하여 FDS를 통해 산출된 온도를 적용한 PMMA의 표면 온도를 나타낸다. 이 결과 PMMA는 134sec에 점화되어 이후 표면온도가 급격하게 증가되었으며, 630sec에 측정 표면이 완전 연소되었다.

### 3.2 열선속 측정 시험편 선정

PMMA는 연소열 및 각 물질에 대한 수득률이 일정하여 콘칼로리미터의 교정에 광범위하게 사용되고 있다. 본 연구에서는 고정 및 유동 열선속에 대한 연소 특성을 분석하고자 PMMA를 사용하여 실험을 실시하였다.

### 3.3 콘칼로리미터의 설정조건

일반적으로 콘칼로리미터의 히터 복사도는 ISO 시험 기준인 25, 50<sup>7)</sup> kW/m<sup>2</sup>로 일정하게 적용되어 왔다. 따라서 유동적인 열선속을 적용한 본 실험과 비교, 본

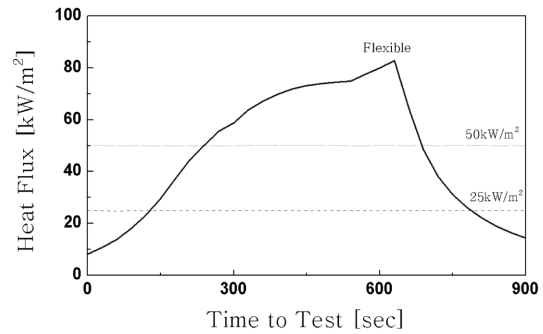


Figure 3. Heat flux of 25 kW/m<sup>2</sup>, 50 kW/m<sup>2</sup> and a flexible heat flux.

Table 2. Condition of the Cone Calorimeter

Heat Flux [kW/m <sup>2</sup> ]	Case A	25
	Case B	50
	Case C	Flexible
Experiment [times]	3	
Experiment [sec]	2,000	
Sample Surface and Distance of Heater Floor [mm]	25	

실험 하였다. Table 2는 콘칼로리미터의 설정 조건을 나타낸다. 각 시험편에 대한 항목별 시험은 3회씩 실시하였다.

### 3.4 실물화재 데이터의 분석

Table 3은 대형 칼로리미터를 통한 실물화재 시험에 대한 최대 열방출률, 최대 연기발생률 및 최대 연기발생 시간을 측정한 연구 결과이다.<sup>8)</sup> 이를 통해 각 요소에 대한 최대치 발생시간이 다르다는 것을 확인할 수 있었다. 이중 연기발생률의 최대값이 가장 먼저 발생하는 사례가 가장 많았으며, 열방출률의 최대값이 가장 늦게 발생하는 사례가 가장 많았다. 열방출률, 연기 발생률 및 CO발생률의 최대치에 대한 패턴은 같은 물질인 소파나 목재 가구류에서도 다르게 나타났다. 본 데이터와 콘칼로리미터 실험결과를 비교하여 열선속 변화에 따라 각 요소의 최대치의 가변성에 대해 비교해 보고자 한다.

## 4. 콘칼로리미터 실험 결과

FDS 실험결과 도출된 열선속과 고정 열선속은 PMMA 시험편을 사용한 콘칼로리미터 실험 통해 3가지 조건

**Table 3.** The Heat Release Rate, the Smoke Production Rate, CO, and the Peak Time by Real Scale Calorimeter According to the Standard Combustible Model<sup>8)</sup>

No	Material	Graph of various peak value [sec]
1	Sofa (Single)	
2	Sofa (Double)	
3	TV	
4	Book Shelf	
5	Sink	
6	Refrigerator	
7	Bed	
8	Dressing Desk	
9	Wardrobe	
10	Desk	
11	Chair	
12	Monitor	

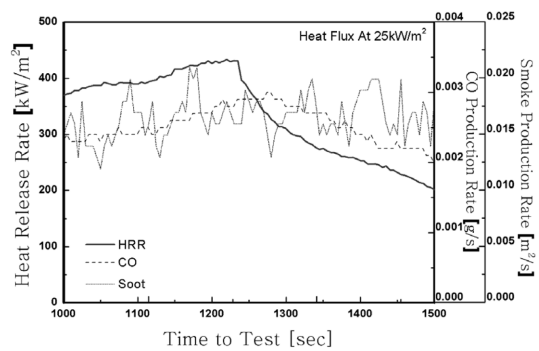
\*HRR: Heat Release Rate [kW/m<sup>2</sup>]  
 SPR: Smoke Production Rate [m<sup>2</sup>/s]  
 COV: Carbon Monoxide Value [ppm]

으로 분류하여 열방출률, CO발생률 및 연기발생률을 각각 분석하였다.

**4.1 열선속 적용에 따른 특성분석**

**4.1.1 열선속 25kW/m<sup>2</sup> 적용 실험 결과**

PMMA 시험체가 25kW/m<sup>2</sup>의 열선속에 노출된 경우 56sec에 착화되었고, 열방출률은 평균 256.01kW/m<sup>2</sup>로 나타났다. 최대치는 1,220sec에 433.70kW/m<sup>2</sup>가 발생하는 것으로 분석되었고, 2,000sec 이내에서 연소가 종료되었다. 본 실험은 착화 후 꾸준히 증가하여 최대값을 기록한 후 소화되는 50kW/m<sup>2</sup> 열선속의 열방출률과 유사한 모양의 그래프 성향을 보여주었다. 하지만 50kW/m<sup>2</sup> 열선속 그래프에 비해 소화시점이(1,500~1,900sec) 다소 길게 나타났다. CO 발생률은 평균 0.0018g/s로 나타났으며, 최대치는 1,275sec에 0.0030g/s가 발생하는 것으로 분석되었다. 최대 CO 발생시간은 최대 열방출률 및 연기 발생시간에 비해 가장 나중에 나타났다. 연기 발생률은 평균 0.012m<sup>2</sup>/s로 나타났으며, 최대치는 1,170sec에 0.021m<sup>2</sup>/s가 발생하는 것으로 분석되었다. 최대 연기 발생시간은 최대 열방출률 및 CO 발생시간에 비해 가장 먼저 나타났다.



**Figure 4.** Heat release rate, CO production rate and Smoke production rate in 25 kW/m<sup>2</sup>.

**4.1.2 열선속 50kW/m<sup>2</sup> 적용 실험 결과**

PMMA 시험체가 50kW/m<sup>2</sup>의 열선속에 노출된 경우 23sec에 착화되었고, 열방출률은 평균 497.95kW/m<sup>2</sup>로 나타났다. 최대치는 685sec에 812.51kW/m<sup>2</sup>가 발생하는 것으로 분석되었고, 1,000sec 이내에 연소가 종료되었다. 본 실험은 세 가지 사례 중 가장 가혹한 실험으로 가장 먼저 착화 및 연소가 종료되었으며, 평균 및 최

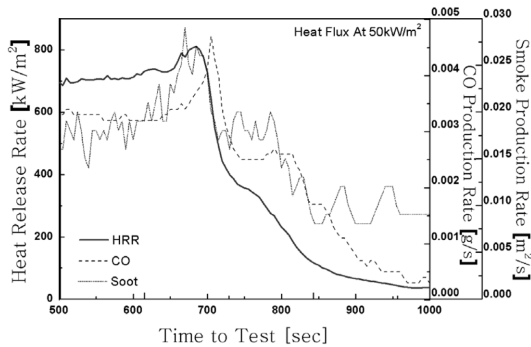


Figure 5. Heat release rate, CO production rate and Smoke production rate in 50 kW/m<sup>2</sup>.

대 열방출률 또한 가장 높은 값으로 나타났다. CO 발생률은 평균 0.0026g/s로 나타났으며, 최대치는 705sec에 0.0047g/s가 발생하는 것으로 분석되었다. 최대 CO 발생시간은 최대 열방출률 및 연기 발생시간에 비해 가장 나중에 나타났다. 연기 발생률은 평균 0.014m<sup>2</sup>/s로 나타났으며, 최대치는 670sec에 0.029m<sup>2</sup>/s가 발생하는 것으로 분석되었다. 최대 연기 발생시간은 최대 열방출률 및 CO 발생시간에 비해 가장 먼저 나타났다.

4.1.3 유동적인 열선속 적용 실험 결과

PMMA 시험체가 유동적인 열선속에 노출된 경우 235sec에 착화되었고, 열방출률은 평균 164.83kW/m<sup>2</sup>로 나타났다. 최대치는 675sec에 597.85kW/m<sup>2</sup>가 발생하는 것으로 분석되었고, 2,900sec 이내에 연소가 종료되었다. 본 실험은 초기 열선속이 낮아 착화시간이 가장 늦었으며, 600sec 이후 급격한 열선속 증가로 인해 열방출률도 함께 증가하였다. 최대 열방출률 시간은

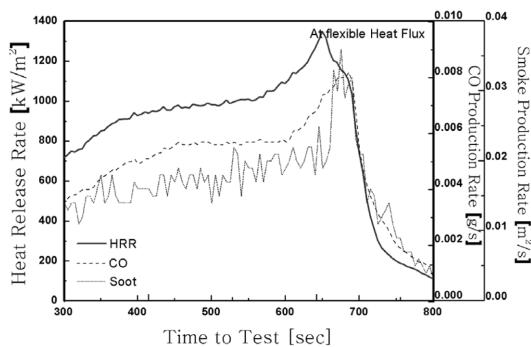


Figure 6. Heat release rate, CO production rate and Smoke production rate in a flexible heat flux.

Table 4. The Heat Release Rate, the Smoke Production Rate, Carbon Monoxide Production Rate, and its Peak Time

Heat Flux		Avr.	Peak	Peak Time [sec]
25 kW/m <sup>2</sup>	HRR	256.01	433.70	1,220
	COP	0.0018	0.0030	1,275
	SPR	0.012	0.021	1,170
50 kW/m <sup>2</sup>	HRR	497.95	812.51	685
	COP	0.0026	0.0047	705
	SPR	0.0014	0.0029	670
Flexible	HRR	164.83	597.85	675
	COP	0.0011	0.0035	730
	SPR	0.007	0.018	655

\*HRR: Heat Release Rate [kW/m<sup>2</sup>]  
 SPR: Smoke Production Rate [m<sup>2</sup>/s]  
 COP: Carbon monoxide Production rate [g/s]

50kW/m<sup>2</sup> 열선속 실험과 비슷하나 이후 실내 화재 시나리오의 화재 감쇠기로 접어들어 열방출률도 함께 감소한다. 2,000sec 이후에는 열방출률의 변화가 거의 나타나지 않는데, 이는 화재 소멸 개시로 인해 복사 에너지가 거의 존재하지 않기 때문이다. CO 발생률은 평균 0.0011g/s로 나타났으며, 최대치는 730sec에 0.0035g/s가 발생하는 것으로 분석되었다. 최대 CO 발생시간은 최대 열방출률 및 연기 발생시간에 비해 가장 나중에 나타났다. 연기 발생률은 평균 0.007m<sup>2</sup>/s로 나타났으며, 최대치는 655sec에 0.018m<sup>2</sup>/s가 발생하는 것으로 분석되었다. 최대 연기 발생시간은 최대 열방출률 및 CO 발생시간에 비해 가장 먼저 나타났다.

Table 4는 주어진 열선속에 대한 열방출률, CO 발생률 및 연기발생률 평균값, 최대값 및 발생시간을 보여준다.

4.2 콘칼로리미터 실험 결과와 실물화재 데이터의 비교 및 분석

3.4에서 논의한 바와 같이 실물화재 실험데이터는 연기발생률, 열방출률 및 CO 발생률의 최대값이 시간간격을 두고 발생하고 있음을 확인하였으며, 콘칼로리미터 실험시 다음과 같이 각 요소에 대한 최대값이 발생하였다.

25kW/m<sup>2</sup>의 열선속의 경우 연기발생률, 열방출률 및 CO 발생률의 최대값이 순차적으로 발생하였으며, 시간차는 각각 50, 55sec이며, 최대값과 발생 전후의 값의 차이가 없이 평탄(Linear)하게 보여 각 요소들의 최대값 발생시간 특성 분석에는 어려움이 있다.

50kW/m<sup>2</sup>의 열선속의 경우 연기발생률, 열방출률 및

CO 발생률의 최대값이 순차적으로 발생하였다. 시간차는 각각 15, 20sec이며, 발생시간 간격이 좁고 열방출률의 값이 평탄한 것을 확인할 수 있었다.

유동적인 열선속의 경우 연기발생률, 열방출률 및 CO 발생률의 최대값이 순차적으로 발생하였다. 시간차는 각각 20, 55sec이며, 발생시간 간격이 비교적 크고, 전후의 값과 명확히 구분이 되는 것을 확인할 수 있었다.

이와 같은 분석을 통해 실물화재 열선속에 대한 가연물의 연기발생률, 열방출률 및 CO 발생률의 최대값의 발생 패턴은 벤치스케일인 콘칼로리미터에서도 나타나고 있으며, 발생시간 간격 및 기울기를 비교한 결과 유동적인 열선속을 적용하였을 경우 가장 뚜렷하게 나타나는 것으로 확인되어 실물화재 모사의 정확성을 높일 수 있는 가능성을 보여주었으며, 이는 벤치스케일의 단점으로 지적되고 있는 실물화재와의 연관성 부족에 대한 보완 방법으로 고려할 수 있음을 확인하였다.

## 5. 결 론

본 실험을 통해 다음과 같은 결론을 내렸다.

1. 열선속이  $50\text{kW/m}^2$ 와  $25\text{kW/m}^2$  같이 일정할 때 PMMA의 열방출률, CO 발생률 및 연기 발생률은 안정적인 증가를 보였으며, 열방출률, CO 발생률 및 연기 발생률의 최대값 발생시간 이후 PMMA의 연소 종료로 인해 급격히 감소하는 경향을 나타냈다.
2. 화재실험은 열선속의 유동에 상당한 영향을 받으므로, 열선속을 고정하여 실험하는 국내외 기준의 한계를 극복하기 위해 화재 평가 시 열선속의 변화에 따른 적절한 실험방법에 대한 연구가 필요하다.
3. Bench Scale 실험인 콘칼로리미터 실험방법에 3단계 콘 히터 온도변환장치를 적용할 경우 실물화재 시험과 유사한 결과를 얻을 수 있음을 밝힘으로서 단위재료에 대해 콘칼로리미터를 사용한 실물화재 모사의 가능성을 보여주었다.

## 참고문헌

1. 이동명, 이동호, 이승철, 민세홍, “성능위주 설계를 위

- 한 화재열전달”, 동화기술(2009).
2. Philip J. DiNunno, P.E., Dougal Drysdale, PhD., Craig L. Beyler, PhD., W. Douglas Walton, P.E., Richard L.P. Custer, John R. Hall, Jr., PhD., John M. Watts, Jr., PhD., “SFPE 방화공학 핸드북 제3판”, 한국화재보험협회(2005).
3. ASTM E 1354 - 021, “Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter”.
4. ISO 5660-1, “Reaction to fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate -Part 1:Heat release rate (cone calorimeter method)”.
5. Kevin McGrattan, Bryan Klein, Simo Hostikka and Jason Floyd, “Fire Dynamics Simulator (Version 5) User’s Guide”, NIST(2008).
6. KSFISO 9239-1, “바닥재의 화재시험방법 - 제2부: 고복사열원( $25\text{kW/m}^2$ )을 이용한 화염전파 측정”.
7. KSFISO 5660-1, “연소성능시험 - 열방출, 연기발생, 질량감소율 - 제1부: 열방출률(콘칼로리미터법)”.
8. S.-H. Ryu, Y.-H. Yoo, and D.-H. Rie, “The Study of a Correlation between Heat Release and Smoke Production by using Oxygen Consumption Calorimeter up to 10MW Facility”, APSS, pp.75-78, JSSE (2009).
9. 유용호, 권오상, 김홍열, “실물화재실험을 통한 공동주택의 화재안전성 연구”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.23, No.5, pp.57-65(2009).
10. 김명배, 한용식, 최병일, 도규형, “공동주택 실물화재 실험”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.23, No.4, pp.104-111(2009).
11. E. Arthur and P.E. Cote, “Fundamentals of Fire Protection”, NFPA(2004).
12. John H. Klotz and James A. Milke, “Principles of Smoke Management”, Ashrae(2002).
13. James G. Quintiere, “Principles of Fire Behavior”, Thomson(1998).
14. W.K. Chow, “Assessment on Heat Release Rate of Furniture Foam Arrangement by a Cone Calorimeter”, J. of Fire Sci., Vol.20, pp.319-328(2002).
15. Chuanmei Jiao, Jun Zhang, and Feng Zhang, “Combustion Behavior of Intumescent Flame Retardant Polypropylene Composites”, J. of Fire Sci., Vol.26, pp.455-469(2008).