

건축재료의 연기 위험도 실험

김운형*, 김현우* 현성호*, 이창우*
경민대학 소방안전관리과*

A Smoke Hazard Test of Interior Finish Materials

Kim, Woon Hyung*, **Kim Hyun Woo***, **Hyun Seong Ho***, **Lee Chang Woo***
Department of Fire Safety Management, Kyung Min College, Korea*

1. 건축화재와 연기

건물 화재 시 인명피해의 주된 원인은 거주자가 연기에 노출되기 때문이다. 연기는 연소과정의 생성물로 유독성 가스를 포함하는 공기 중 부유하는 작은 입자로서 화재가 발생한 위치에서 이동하여 멀리 떨어진 장소에도 인명안전에 치명적 영향을 준다. 최근에 발생한 인천 인현동 호프집 화재로 인한 대형 인명피해는 연기의 위험성을 보여주는 대표적인 예로 볼 수 있다. 화재 시 천장 면에 형성되는 연기층의 온도 역시 거주자에게 위협을 줄 수 있다.

건물에서 인명피해 또는 재산피해 등을 유발하는 연기 위험도 수준은 아래와 같은 요소를 기준으로 평가할 수 있다.

- 연기로 인한 시계저하 (Smoke Obscuration)
- 연기 유독성 (Toxicity)
- 연기 층의 온도

연기 중의 여러 가지 유독성 가스나 고온에 노출된 경우 직접적인 인명피해를 유발하게 된다. 또한 연기 중의 빛의 차단으로 인한 가시거리(Visibility) 저하는 간접적인 피해를 가져올 수 있다. 화재가 발생하면 짙은 연기 속에서 방향감각을 상실하거나 장기간 노출된 거주자의 인명안전은 확보될 수 없다. 본 연구는 연기 위험도에 관련된 이론적 고찰과 더불어 폴리우레탄 폼 건축 재료를 선정하여 연소 시 발생하는 유독성 가스의 생성량과 연기로 인한 시계저하를 측정하였다.

2. 연기위험성 평가의 이론적 고찰

2.1 Smoke Obscuration

연기로 인한 시야차단 정도를 나타내는 여러 가지 방법 중 하나는 연기가 발생된 일정한 길이를 빛이 투과하는 비율을 사용하는 것으로 이것을 투과비율(transmittance)이라고 한다.

$$T = I_x / I_0 \tag{1}$$

여기서 T = 투과비율

I_x = 단위 길이를 통과한 후 측정된 빛의 강도

I_0 = 단위 길이에 대한 최초의 빛의 강도

이것은 일정한 길이 x를 통과한 빛의 저하 정도를 기록하여 측정할 수 있다. 위

식에서 연기가 없는 조건의 빛의 강도는 측정 후에도 초기 강도를 유지하게 되면 그 값은 거의 1이 될 것이며 따라서 연기 속에서는 1보다 작게 된다. 연기 중의 시계성은 이 값을 기준으로 하여 광학밀도 (Optical density, δ) 또는 감광계수 (Attenuation coefficient, α)로 표현된다.

$$\delta = \log_{10} T / x \quad (2)$$

여기서 δ = 단위길이 당 광학밀도, m^{-1}
 T = 투과비율, 단위 없음
 x = 빛의 투과 거리, m

$$\text{또한 } \alpha = -\log_e T / x \quad (3)$$

한편 연기 중의 빛의 차단비율, λ 은 다음과 같다.

$$\lambda = 100 (1-T) \quad (4)$$

(2)와 (3)에서 $\log_{10}T$ 와 $\log_e T$ 를 $\log_e T = \log_e 10 \log_{10}T$ 로 바꾸면 $\log_e 10$ 은 약 2.303이므로 광학밀도와 감광계수와의 관계는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha = 2.303 \delta \quad \text{또는} \quad \delta = 0.4343 \alpha \quad (5)$$

가시거리, V 는 연기 중 빛의 차단 조건에서 물체를 식별할 수 있는 거리로서 연기의 색, 물체의 밝기, 배경조명의 강도 그리고 개인의 시각 능력 등에 따라 영향을 받는다. 가시거리와 연기 투과성과의 관계는 다음과 같다.

$$V = K / \alpha \quad (6)$$

여기서 V = 가시거리, m
 K = 비례상수
 α = 감광계수, m^{-1}

비례상수 K 는 Jin(일본)의 실험에 의하면

발광형 표식 : 6

반사형 표식 : 2

반사 빛을 받는 문 벽 등 구조체 : 2

Heskestad의 실험에 의하면 발광형 표식에서

$$Vis = K \delta^{-0.69} \quad (7)$$

여기서 $K = 2.0$

2.2 연기유독성

연기로 인한 사망원인의 반 이상은 일산화탄소로 알려져 있다. 훈소 등에서 오랜 시간 동안 노출되거나 급격한 화재성장에 따른 환기지배 조건에서 거주자가 일산화탄소를 흡입하게 되면 정상조건에서의 O_2Hb 가 $COHb$ 로 변화되면서 산소의 공급이 차단된다. HCN 역시 동일하다.

1) 유독가스의 농도와 노출시간

Haber(1924)의 제안식(Haber's law)에 의하면 유독가스에 노출된 경우, 그 피해는 가스의 농도와 노출 시간에 관련된다고 한다.

$K = C t$ (8)

여기서 $K =$ 노출 효과 (ppm/min)
 $C =$ 가스 농도 (ppm)
 $t =$ 노출 시간 (min)

단위식은 가스의 농도가 일정한 경우에 적용할 수 있다.

2) FED (Fractional Effective Dose)

FED는 연기 중에 노출된 거주자가 가지는 전체적인 유독성 피해 중에서 각각의 특정 가스가 미치는 영향을 모두 합한 것을 말한다. 예로서 거주자가 CO 치사량의 50%와 HCN 치사량의 50% 상황에 노출되었다면 결과적으로 두 가지 유독가스의 합계가 1.0이 되므로 거주자는 치사 상태에 이르게 되는 것이다. (Levin 1987 제안) 연기 중에서 CO, CO₂, HCN, 그리고 산소 부족으로 인하여 거주자가 받는 유독성 가스의 피해는 피난불능 상태(Incapacitation) 에 도달하는 시간으로 계산된다.

$$\text{Total } F_{IN} = [(F_{ICO} + F_{ICN}) \times VCO_2 + F_{IO}] \text{ or } F_{ICO2} \quad (9)$$

여기서 F_{IN} 가 1.0에 이르면 CO, CO₂, HCN, 산소 부족 등의 종합적인 영향으로 거주자는 피난불능 상태에 도달하게 된다. 가스 농도 C 에서 1 분간 노출된 경우에 각 유독가스의 FED 계산식은 아래와 같다.(Purser)

- a) CO
 $F_{ICO} = 8.2925 \times 10^{-4} \times \text{ppm CO}^{1.036} / 30$
- b) HCN
 $F_{ICN} = 1 / \exp (5.396 - 0.023 \times \text{ppm HCN})$
- c) CO₂
 $VCO_2 = \exp (0.1903 \times \% CO_2 + 2.0004) / 7.1$
- d) 산소부족
 $F_{IO} = 1 / \exp [8.13 - 0.54(20.9 - \% O_2)]$
- e) CO₂
 $F_{ICO2} = 1 / \exp [6.1623 - 0.5189 \times \% CO_2]$

3. 실험 및 결과

3.1 실험 개요

실험에 사용한 재료는 실내 가구 소파 등의 충전재로 널리 사용되는 연질 폴리우레탄 폼과 (soft foam)과 최근 일련의 화재참사에서 연소 시 발생되는 유독성으로 인하여 공통적인 문제로 부각되고 있는 건축 내장재용 폴리우레탄 폼을 선정하였다. 시편의 크기는 30cm × 20cm × 5cm이며 연질 폼은 우레탄과 경화제를 무게 비 1:0.4의 비율로 제조하였으며 건축 내장재용 폴리우레탄은 시판되는 것을 사용하였다. 각 재료에 대하여 가시거리를 결정하는 연기 투과성과 일산화탄소의 생성량을 측정, 분석하였다.

실험공간의 크기는 2m × 2m × 2m (높이) 이며 바닥에서 높이 1.5m 높이에 설치된 연기 투과성 시험장치와 연기 유독성 측정장치(Ecom A⁺)를 이용하여 시간변화에 따른 빛의 투과성과 산소, 일산화탄소, 이산화탄소의 생성량을 측정하였다. 시편은 전기가열로 위에 수평으로 설치한 후 20분 동안 가열하였다.

3.2 실험결과

건축내장용 폼의 경우 5분 정도 경과한 후 연기가 공간의 1/3 높이까지 하강하였으며 심한 냄새와 함께 8분 이후에는 1/2 높이까지 흰색의 연기가 층만하였다. 전기 가열로를 사용한 Non flaming mode를 고려하여 10분 경과 후 시편표면에 점화하여 flaming mode로 시험을 진행하였다. 12분 경과 후 완전 연소되면서 시험이 종료되었다. 연질 폼의 경우는 불과 1분 30초 정도 경과 후 표면에서 발화되면서 검은 색 연기를 생성하기 시작하였다. 약 7-8분 경과 후 연기가 공간의 반 이상이 연기에 가득 차고 11분 정도 경과 후 완전 연소하였다. 실험도중의 산소농도는 초기와 거의 변화가 없는 상황이며 유독성 가스 중 가장 인명안전에 영향을 미치는 일산화탄소의 경우는 발화시점을 지나면서 급격하게 생성량이 증가함을 알 수 있다. 연질 폼의 경우는 200 ppm, 건축내장재의 경우는 350 ppm까지 측정되었다. 이외 이산화탄소, NO_x, SO_x의 생성량도 측정하였으며 그 양은 미비하였다.

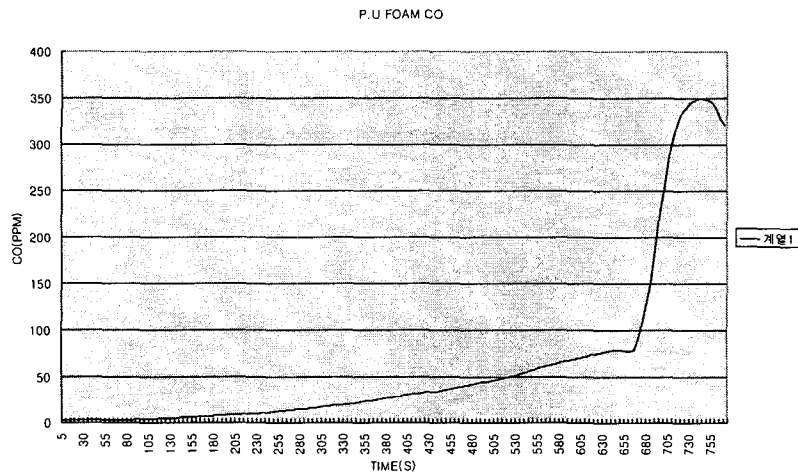


그림 1. 일산화탄소 생성량 (건축내장재)

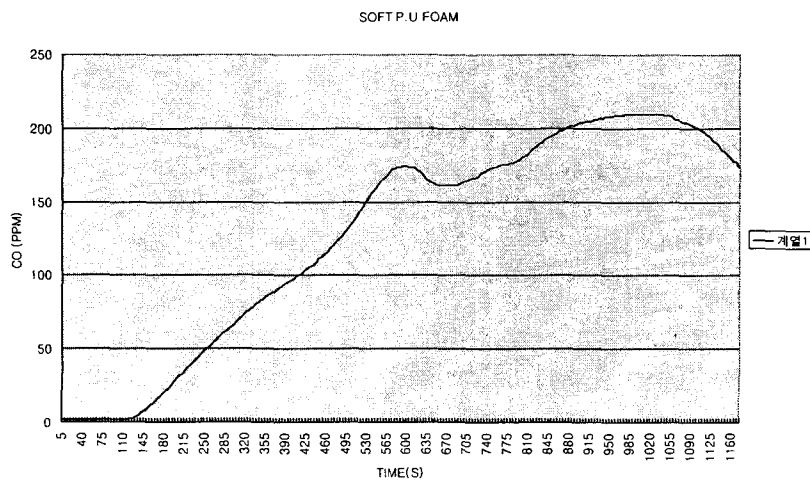


그림 2. 일산화탄소 생성량 (연질 폼)

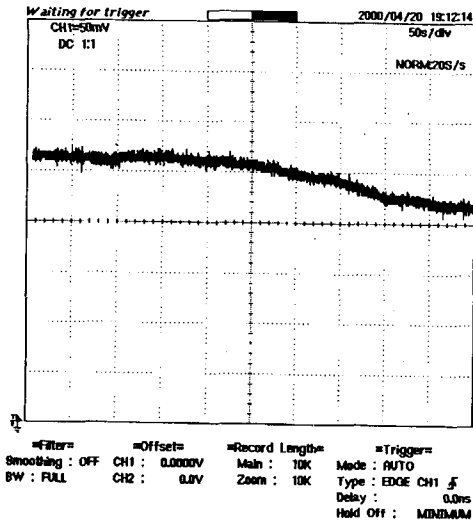


그림 3. 연기 투과성시험

다르다는 점을 고려할 때 이에 따른 지속적인 시험이 필요하다고 본다. 아울러 국내의 경우 건축재료의 다양화와 가연성 내장재료의 사용 증가에 따른 새로운 화염 확산 위험성과 유독성에 관한 성능평가가 요구된다. 이러한 점에서 현행 관련법규의 난연등급 평가방법은 실제 화재시 연기 유독성을 반영할 수 있는 평가방법(예로서 Room Corner Test)의 도입이 시급하다.

참고문헌

1. 김운형, “실내화재의 공학적 분석” 방재와 보험 2000년 봄호, (통권85호), pp. 11-15, 한국화재보험협회, 2000, 4.
2. John H. Klote, James A. Milke, “Design of Smoke Management Systems”, ASHREA, SFPE, 1992.
3. James A. Quintiere, “Principles of Fire Behaviors” Delmar Publishers, 1998. U.S.A
4. DiNunno, P. J., ed., The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd edition, NFPA, 1995.

4. 토의

현재 실내 내장재의 연소 특성 및 유독 가스 생성량을 시험하는 외국의 방법은 Steiner test (ASTM E 84, NFPA 255, UL 723), Smoke Density Chamber (NFPA 258, ASTM E 662) 등이 있으며 연기 투과성 시험(Extinction measurement)법은 ASTM E 84, ASTM E 662, NES 713 등이 있다. 위의 시험방법의 결과는 대부분 실제 화재 시 연소특성을 반영하지 못하며 산소공급이 충분한 조건이라는 한계가 있다. 이러한 배경에서 본 연구에서는 건축 내장재로 널리 사용되고 있는 폴리우레탄 폼을 대상으로 실제 공간에서의 연기 유독성과 연기 투과성을 시험하였다.

건축 재료는 실험실의 크기나 heat flux 수준, 환기조건, 연소 mode (flaming, 훈소, 열분해 등)에 따라 그 생성량이