

# 실내화재의 공학적 분석



김 은 형

경민대학  
소방안전관리과 교수

## 1. 머리말

실내화재(Compartment Fire)의 특성을 이해하기 위하여 먼저 화재에 관한 과학적인 정의가 필요하다. 인류 발전에 큰 기여를 한 유용한 에너지원으로서의 익화(Controlled Fire)와 더불어 해화(Uncontroll-

ed Fire)에 대한 연구는 화재로부터 인간을 보호하고 위험을 제거하기 위하여 많은 공학자에 의하여 지속적으로 이루어져 왔다. 화재(연소)는 가연물과 공기 중의 산소가 반응하여 우리가 인식할 수 있는 정도의 많은 양의 열과 빛을 방출하는 화학작용이다. 실내에서 흔하게 발견되는 대부분의 가연물은 탄소, 수소 그리고 약간의 산소와 질소를 포함하는 원자로 구성된다. 여기에 여러 가지 다른 원자가 첨가되면서 연소과정은 더욱 복잡해지며 그 결과 환경을 해칠 수도 있다. 실내 화재시 모든 원자들이 불변하는 소위 질량보존의 법칙이 적용되지만 분자는 재결합하여 새로운 분자들을 생성하면서 에너지를 방출하게 된다.

실내화재는 화학, 열역학, 유체 역학 및 열 전달 등의 학문을 이용 공학적으로 분석할 수 있다. 여기서는 실내화재의 확산 과정과 공기의 유입, 연기의 유동 그리고 화재공간에서 연기의 온도, 플래쉬오버 등의 공학적인 예측을 위한 분석 예를 통하여 실내화재의 공학적인 분석과정의 틀을 살펴보기로 한다. 본 글의 주요 내용은 Dr. James G. Quintiere 의 저서인 "Principles of Fire Behavior" (1998)를 참고하였음을 밝히며, 보다 자세한 내용에 관심 있는 독자는 참고문헌에 수록된 저서를 참고하기 바란다.

## 2. 실내화재 확산 단계

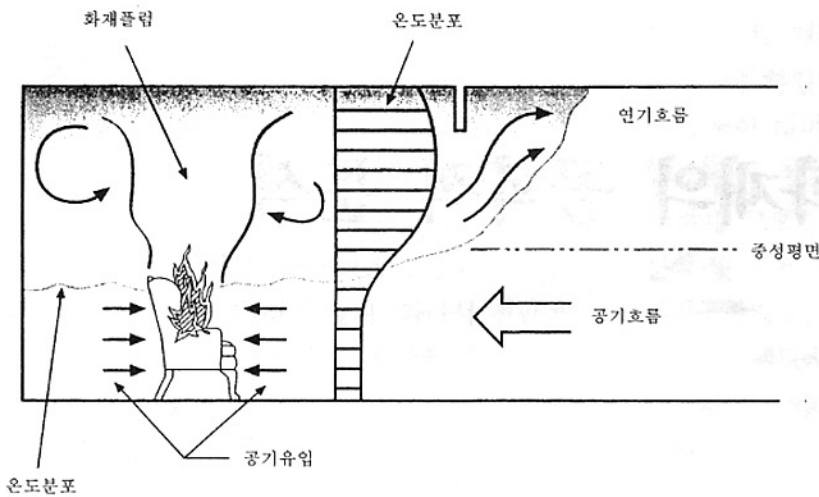
실내에서 발생한 화재는 초기에는 실의 크기나 형태와 무관하지만 공기 중의 산소가 소모되고 실의 온도가 상승하면서 공간 특성에 큰 영향을 받게 된다. 훈소(Smoldering Fire)를 제외한 경우에 화재 확산 단계는 일반적으로 다음과 같다.

### 가. 화재성장기

가연물이 발화하여 점차 다른 가연물로 확대된다. 실내의 산소 농도나 온도는 화재 이전과 별 차이가 없으며 옥외에서 발생한 화재와 동일한 모습을 가진다.

### 나. 플래쉬오버

한정된 공간에서 발생하는 매우 특수한 화재현상으로 가연물에서 발생하는 복사 플럭스(단위



[그림 1] 연기의 유동

면적당 발생 열량이 증가하면서 급격한 발화와 화염이 공간 전체로 확대된다. 플래쉬오버 현상은 실내에서 미연소된 가스가 축적된 상태에서 갑작스런 공기의 유입, 예를 들어 소방관이 진압을 위해 문을 여는 것으로 인하여 발생하기도 한다.

#### 다. 쇠퇴기 화재

공간 전체에 화염이 확산되고 창이나 문으로 화염이 분출되는 단계이다. 모든 가연물이 연소에 포함되며 건물 구조체에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 공기의 유입조건에 따라 환기배형 화재가 될 수도 있으며 이 경우 실내의 열 방출 비율은 유입 공기량으로 결정된다.

#### 라. 쇠퇴기

최성기 화재 이후 공간의 온도는 저하되면서 쇠퇴기 단계로 연결된다. 쇠퇴기의 단계는 연료 지배형 조건이 되며 공간의 온도에 따라 복사열로 인한 인접공간으로의 확산, 구조체의 붕괴, 연기의 오염 등 위험한 상황이 발생할 수 있다.

실내화재에서 대부분의 관심은 플래쉬오버의 발생과 최성기 화재에 두고 있으며 그 결과 성장기를 중심으로 한 소위 플래쉬오버 이전 단계는 간과되기도 한다. 성장기의 실내 온도는 높지 않으나 그 지속시간은 거주자의 최소 피난시간 확

보와 비상대응 조치를 위한 관점에서 볼 때 중요한 설계요소가 된다.

### 3. 연기의 유동

#### 가. 연기층의 형성과 공기 유동

창이나 문 등 개구부가 있는 대부분의 실내에서 발생한 화재는 부력에 의한 상승 열 기류를 천장에 형성하면서 점차 바닥을 향하여 내려오다가 문의 상단을 지나면서 공간 외부로 유출된다. 화재가 지속되면

연기 층은 점점 더 하강하게 된다. 발생된 연기는 개구부에 형성된 중성대보다 위에서 배출되며 외부의 공기는 중성대 아래 부분으로 유입되어 연소에 필요한 산소를 공급하게 된다. Quintiere 등의 실험 (1984)에 의하면 실내공기의 온도 및 벽체 표면의 온도분포는 일정한 높이를 기준으로 크게 고온의 연기층과 저온의 공기층인 두 개의 영역으로 구분되며 이러한 결과는 실내화재 해석



을 위한 모델의 기본개념이 된다.

### 나. 연기 축적 및 확산

실내의 개구부가 단혀 있어 밀폐된 경우나 화재 초기 단계에서는 건물의 구조적인 틈새에도 불구하고 연기가 공간에 충전하게 된다. 실내의 압력이 주변보다 약간 높아지면서 연기 충전과 연기의 누출이 발생된다. 화세가 감소되면 실내의 부압으로 인한 공기가 유입되며 꺼져가는 불길을 다시 소생시키기도 한다.

## 4. 공학적인 분석

실내공간의 화재 위험도를 정량적으로 평가하기 위하여 단일 개구부를 가진 공간에서의 연기 유동과 온도를 예측하여 본다.

### 가. 개구부에서의 공기 유동

연기와 실내공기의 온도차이로 인한 압력 차는 문이나 창문을 통한 공기의 유동을 발생시킨다. 이 경우 외부로 유출된 연기량과 실내로 유입되는 공기량은 거의 같다고 볼 수 있으며 개구부의 높이(m)와 단면적(m<sup>2</sup>)을 각각 H<sub>0</sub>, A<sub>0</sub> 라고 하면 개구부에서의 최대 공기 유동량은 다음과 같다.

$$m_a = 0.5 A_0 \sqrt{H_0} \text{ (kg/s)} \quad (1)$$

작은 개구부를 가지는 대형 화재에서 위의 공식은 공기 유입량을 예측하는 데 유용하다. 여기서 A<sub>0</sub> √H<sub>0</sub> 는 환기인자(Ventilation factor)라고 하며 유동량을 결정하는 주요 변수가 된다.

### 나. 연기온도

연기층의 온도는 화재크기와 환기인자에 따라 결정된다. 화재발생 후 온도상승(ΔT)은 아래 식으로 계산된다.

$$\Delta T(^{\circ}\text{C}) = 6.85 [Q^2 / (hA)(A_0 \sqrt{H_0})]^{1/3} \quad (2)$$

여기서 A는 실의 내부 표면적(m<sup>2</sup>), h는 열 손실 계수로 다음 중 큰 값으로 결정한다.

$$h = \sqrt{k\rho c / t} \text{ 또는 } k/l \text{ (kyw/m}^2 \text{ - } ^{\circ}\text{C)} \quad (3)$$

여기서 열전도율과 밀도 그리고 비열로 결정되

는 kρc 는 재료의 온도상승률을 결정하는 열적 특성을 표현한다. l는 재료의 두께이며 t는 특성 시간이 된다.

예를 들어 실의 크기가 4×4×3m (높이)이고 문의 크기가 1×2 m (높이)인 공간에서 화재가 발생하여 100초 경과 후에 연기층의 온도는 얼마나 될 것인지를 예측하여 보자. 실의 내부마감은 석고플라스터(kρc = 0.60 kW<sup>2</sup>-s/m<sup>4</sup>-°C<sup>2</sup>)이고 화재크기는 500kW로 일정하다고 가정한다.

$$A_0 = 2 \text{ m}^2$$

$$A_0 \sqrt{H_0} = 2 \sqrt{2} \text{ m}^{5/2}$$

$$A = [2(4 \times 4) + 4(4 \times 3)] - 2 = 78 \text{ m}^2$$

$$h = \sqrt{k\rho c / t} = \sqrt{0.60 / 100}$$

$$= 0.0775 \text{ kW/m}^2 \text{ - } ^{\circ}\text{C}$$

식 (2)에서

$$\Delta T(^{\circ}\text{C}) = 6.85 [500^2 / (0.0775)(78)(2\sqrt{2})]^{1/3} \\ = 167^{\circ}\text{C}$$

따라서 화재이전의 실내온도를 22°C로 가정하면 100초 경과 후

연기층 온도 T = 167°C + 22°C = 189°C가 된다.

### 다. 플래쉬오버

화재로 인한 실내온도 상승, ΔT = 500°C 에 도달한 시점을 플래쉬오버로 본다면 식 (2)에서 플래쉬오버를 유발하는 최소 화재크기가 예측된다.

$$Q_{FO} = [(500) / (6.85)]^{3/2} [(hA)(A_0 \sqrt{H_0})]^{1/2} \quad (4) \\ = 624 [(0.0775)(86)(2\sqrt{2})]^{1/2} \\ = 2709 \text{ kW}$$

### 라. 환기 지배 조건에서의 화재 크기

식(1)에서 개구부를 통한 최대 공기유입량은 m<sub>a</sub> = 0.5 (2 √2) = 1.41 kg/s 이 된다. 환기 지배 조건시 모든 가연물은 공기1g당 약 3 kJ의 열량을 발생하므로 실내의 모든 산소가 소비된 경우 예상되는 최대 열 방출비율은 아래와 같이 계산된다.

$$Q_{\text{max}} = 1.41 \text{ (kg/s)} \times 3,000 \text{ (kJ/kg)} \\ = 4,24 \text{ MW}$$

따라서 플래쉬오버를 유발하는 화재보다도 큰 것을 알 수 있다.

#### 마. 가시거리

화재시 생성되는 연기입자로 인해 빛의 밝기가 저하되고, 이것은 연기 속에서 시야를 확보하는 능력 즉 가시거리의 저하를 가져온다. 가시거리 확보는 화재 발생시 다른 어느 화재 위험도보다도 가장 먼저 인식되는 문제로서 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$I = I_0 \exp(-k_s L) \quad (5)$$

여기서 I는 빛의 강도,  $I_0$ 는 원래 빛의 강도,  $k_s$ 는 연기 중에 산란, 흡수되는 정도를 측정하여 결정되는 감광계수, I는 빛의 통과 길이를 표시한다.

가시거리,  $L_v$ 는 감광계수와 관련되며 연기 중에서 물체를 식별할 수 있는 최대거리를 말한다. 질량광학밀도(Mass optical density,  $D_m$ )는 연기 중의 고체 및 액체 입자의 생성량과 직접 관련

되며 대표적인 재료의 측정된 값이 <표 1>과 같다.

감광계수는 연기 입자의 농도에 따라 다르며 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$k_s = m D_m / V \quad (6)$$

여기서 m은 연소비율, V는 연기의 용적당 유동비율을 표시한다.

예를 들어 지름 1m의 pool fire (재료 PS 수지)가 환기시배 조건에서 연소되는 경우 최대 연소 플럭스는  $38 \text{ m}^2 \text{ g/m}^2\text{-s}$  (실험치)이고 실내 공기온도와 같은 정도로 연기가 냉각된 경우를 가정하면 연기밀도는 대략  $1.0 \text{ kg/m}^3$ 으로 볼 수 있다. 연기량은 가연물과 공기량의 합으로 계산되지만 여기서는 가연물의 양이 공기량에 비하여 미미하므로 공기량으로 산정하기로 한다.

$$\begin{aligned} V &= m_{\text{smoke}} / \rho = 1.41(\text{kg/s}) / 1(\text{kg/m}^3) \\ &= 1.41 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

<표 1> 환기상태에 따른 가연물의 연기 생성량

	환기량이 많은 조건( $\phi < 1$ )						환기량이 적은 조건( $\phi > 1$ )		
	$Y_{\text{CO}_2}(\text{g/g})$	$Y_{\text{CO}}(\text{g/g})$	$Y_{\text{soot}}(\text{g/g})$	$\Delta H_c(\text{kJ/g})$	$\Delta H_{c, \text{ideal}}(\text{kJ/g})$	$D_m(\text{m}^3/\text{g})$	$Y_{\text{CO}}(\text{g/g})$	$Y_{\text{H}_2}(\text{g/g})$	$Y_{\text{HCl}}(\text{g/g})$
기체									
Propane	2.85	0.005	0.024	43.7	46.4	0.155	0.229	0.011	-
Acetylene	2.6	0.042	0.096	36.7	48.2	0.315	NA*	NA	-
액체									
Ethyl alcohol	1.77	0.001	0.008	25.6	26.8	NA	0.219	0.0098	-
Heptane	2.85	0.010	0.037	41.2	44.6	0.190	NA	NA	-
고체									
Red oak, pine	1.27	0.004	0.015	12.4	17.7	0.037	0.138	0.0024	-
Polymethyl methacrylate (PMMA)	2.12	0.010	0.022	24.2	25.2	0.109	0.189	0.0032	-
Polystyrene(PS)	2.33	0.060	0.164	27.0	39.2	0.335	NA	NA	-
Nylon	2.06	0.038	0.075	27.1	30.8	0.230	NA	NA	-
Polyurethane(PU)	1.51	0.031	0.227	19.0	27.2	0.326	NA	NA	-
-flexible foam									
Polyvinyl chloride (PVC)	0.46	0.063	0.172	5.7	16.4	0.400	0.36	NA	0.400

표에서 연료 지배조건 시  $D_m = 0.34\text{m}^2/\text{g}$  따라서

$$\begin{aligned} k_s &= m D_m / V = m'' (\pi/4 D^2) D_m / V \\ &= (38\text{m}^2/\text{g}\cdot\text{s})(0.785\text{m}^2)(0.34 \text{ m}^2/\text{g}) / \\ &1.41 (\text{m}^3/\text{s}) \\ &= 7.2 \text{ m}^{-1} \end{aligned}$$

화재가 환기지배 조건 즉  $\Phi$  (equivalence ratio)  $> 1$ 인 경우를 생각해보자.  $\Phi = 1.9$ 라고 하면 그림에서 보듯이 연기생성비가 약 1.5배 늘어나며 이는 같은 정도로  $D_m$ 이 증가된다고 볼 수 있다.

각각의 감광계수에 대한 가지거리는 [그림 2]를 이용하여 결정한다.

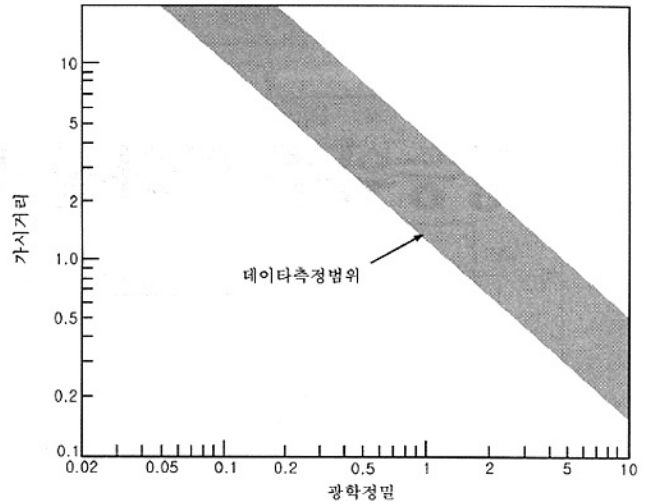
$$L_v = C_v / D_0 \quad (7)$$

따라서 1부터 4까지 다르다. 이러한 시험결과 는 모든 연기 상황을 정확히 대표한다고는 볼 수 없으나 매우 유용한 자료로 이용할 수 있다.

따라서  $L_v = (4-1) / 16.56 \text{ m}^{-1} = 0.06$ 에서 0.24m, 즉 6에서 24cm 정도로 매우 낮은 시야 확보 조건으로 볼 수 있다.

## 5. 맺는 말

실내화재의 공학적인 분석과 접근은 화재자체 를 공학적으로 이해하려는 노력에서 출발되어야 한다. 이러한 노력의 결과는 화재시 예상되는 위험으로부터 보호될 수 있는 구체적인 방법을 제시할 것이다. 화재는 자주 발생하는 재해가 아니며 우리는 종종 과거의 화재사례 등의 경험을 통하여 현실적인 문제를 해결하고자 하는 경향이



[그림 2] 가지거리 계산 표

있다.

전세계적으로 보면 홍수, 지진 등 자연재해 보다 화재로 인한 인명피해가 더 심각하며 그 경제적인 손실이 나라마다 다르지만 거의 GDP의 1%에 육박한다. 이러한 현실은 화재에 관한 많은 연구와 투자가 절실함을 잘 설명하고 있으며 우리나라도 예외가 될 수 없는 실정이다.

실내화재는 많은 변수가 포함되는 매우 복잡한 물리적인 현상이며 공학적, 경제적, 사회적 수용의 범주 안에서 적절한 대책을 마련해야 하는 유기적인 공학분야로 인식된다. 따라서 현재 우리가 사용하며 적용하고 있는 모든 화재 안전에 관한 노력과 적정 방화설계에 관한 타당성 여부는 실내화재의 성장과 확산과정 그리고 이로 인한 화재 위험도를 공학적으로 분석하고 정량적으로 평가하는 과정이 필수적으로 수반되어야 한다.

## 참고문헌

- [1] Quintiere, J.G., Principles of Fire Behavior, Delmar Publishers, U.S.A, 1998.
- [2] DiNunno, P.J., ed., The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd edition, NFPA, 1995.
- [3] Cote, A., ed., Fire Protection Handbook, 18th edition, NFPA, 1997.