

연기의 발생과 감지

이복영
(경보시험실 연구원)

1. 개요

화재시 발생한 연기는 시시각각, 화재 진전 양상에 따라 매우 다양하다. 따라서 생성된 연기의 성질, 량에 대한 논의는 광의의 표현으로써 설명할 수 밖에 없는 실험적 결과로 인한 부정확성을 가지고 있다. 불꽃 상층부에서의 Hot 가스 기류는 다양한 구성 요소로 이루어져 다음과 같이 세 그룹으로 분류할 수가 있다.

- ①연소 물질에 의해 방출되는 뜨거운 증기와 가스
 - ②미연소 열분해 물질과 응축 물질(엷은색에서 검은색까지 다양한 색으로 표현)
 - ③상승 기류에 의해 흡인된 공기와 불꽃에 의해 가열된 공기.
- 대부분 불꽃 주위를 둘러싸고 있으며 우리가 연기라고 부르는 증기(Cloud)는 이 세 그룹의 혼

합된 조성으로 그 그룹은 가스, 증기, 분산된 고체 물질을 포함하여 구성 된다.

생성된 연기량, 그것의 농도와 유독성은 연소 물질에 전적으로 의존적이나 전체 행동 특성에 비추어 각기 다른 인자에 의존적인 것이어서 이것은 각각 분리, 고려하는 것이 편리하다.

연기량은 연소시의 연기와 같은 거무칙칙한 생성물과 흡인된 공기와의 혼합되어 발생하는 연기의 량으로서 간주되며, 농도와 유독성은 연소 물질에 따라 상당한 상관 관계가 있다.

화재 크기에 한하여 연기 생성 량에 영향을 주는 가연물의 특성은 연소 대상과 그것의 연소율에 따른다. 이 연기는 매우 밀접할 수도 있고 그렇지 않을 수도 있으나, 경우에 따라 뜨겁고 인체에 위험을 줄 정도의 충분한 유독성

물질을 내포할 수도 있다.

2. 연기의 정의

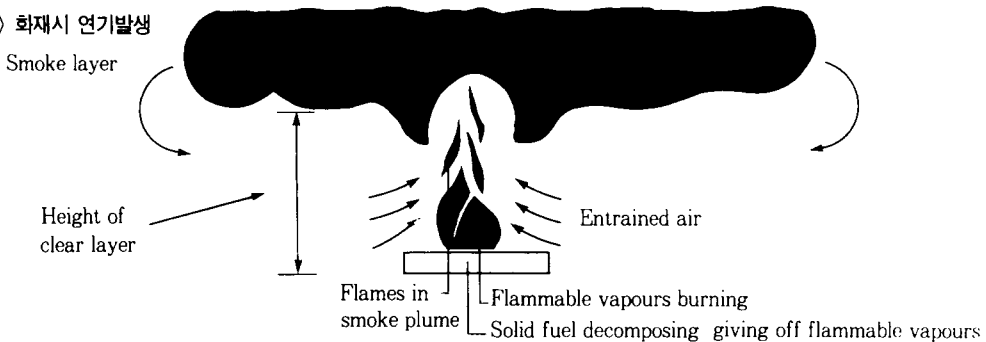
연기란 공기중에 부유하고 있는 고체·액체의 미립자를 총칭하며, 크기로 제한한다면 0.01~10 μ m 정도의 미립자를 말한다. 화재시의 연기는 연기 입자를 특별히 분리하지 않고 가스 성분을 포함하여 지칭한다.

3. 연기 발생의 구조

고체 물질의 연소는 이들 물질의 가열에 필요한 열(이 열은 통상 인접 연소 물질로부터 얻음)을 수반하게 되며, 가열에 따라 뜨거운 휘발성 가연성 증기를 방출하고, 이 증기는 불꽃(초기 불꽃) 상층부에서 점화가 이루어지게 된다.

Hot 가스와 불기둥은 Hot 가스 층의 농도가 주위 공기 농도보다

(그림1) 화재시 연기발생



훨씬 낮기 때문에 상승 기류가 형성·상승화되며, 그 결과 주위 공기는 상승 기류에 흡인되고 Hot 가스층과 혼합이 된다. 이 흡인된 공기는 연료의 열분해에 의해 방출된 가스 연소에 필요한 산소 공급원의 대부분으로 불꽃 발생을 일으키게 된다.

연기층에서의 온도는 그다지 높지않고, 산소와의 혼합도 완전치 못하여 이 가스의 연소는 불완전 연소 상태가 되며 미연소된 고체 입자는 분산되어 검은 연기 형태로 된다.

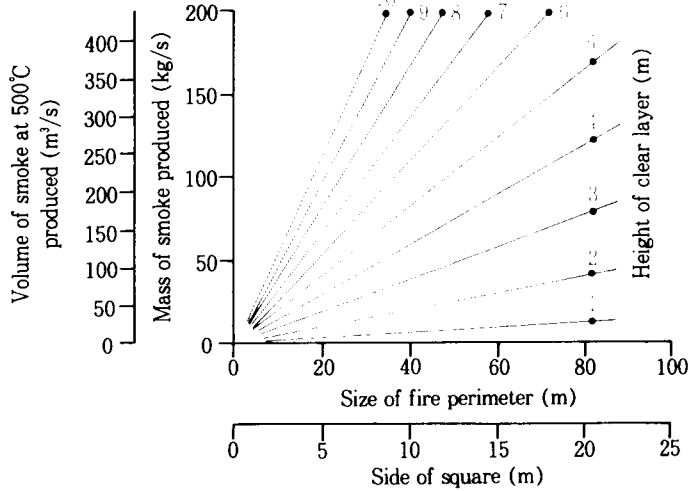
불꽃의 말단부 높이에서 상승 가스층은 연료 가스의 연소에 사용되거나 필요한 공기보다 훨씬 더 많은 공기를 포함하고 있고, 이 시간대에서 필요량 이상의 초과 공기는 가열이 되고 연소시 뜨거운 생성물과 혼합이 되어 연기의 대부분 구성 요소로서 형성이 되게 된다.

이것이 우리가 연기라고 볼 수 있는 연소 생성물의 발생 메커니즘이다.

4. 연기 발생의 정량적 평가

불꽃에 의해 흡인된 공기의 전체량과 비교하여 연료 가스의 량

(그림2) 화재에 의해 생성된 연기량



은 상대적으로 적기 때문에 연기 생성률은 대략 Hot 가스와 불꽃의 상승 작용에 의해 흡인되는 공기 율로서 정의한다.

이 공기 흡인율은

①화재의 Perimeter(Perimeter는 주어진 면적을 둘러싼 거리)

②불꽃의 열 방출

③불꽃 상층부 Hot Gas층의 유효 높이(바닥과 연기와 가스층 하부 사이 거리)에 의해 정해진다.

불꽃에 의해 흡인되는 가스량(즉, 연기 생성량)은 다음 관계식으로 표현이 된다.

$$M=0.096PY^{3/2}(g \frac{T_0}{T})^{1/2}(kg/s)$$

〈표1〉에서 수치는 연기 기둥내에서 불꽃이 천정 아래 연기층까지 확대되는 통상 화재 상황에 대해 대표적인 수치로 특별한 주위 영향에 대한 이용 가능한 정보가 없는한 연기 생성률의 개략적 계산에 사용된다.

〈표1〉의 수치를 대입하여 연기 생성률에 관한 식은 다음과 같이 간략화할 수가 있다.

$$M=0.188PY^{3/2}(kg/s)$$

이 식은 연기 생성률은 화재의 크기(P)와 천정 공간의 높이(Y)에 의존하는 정비례 관계가 성립된다는 것을 의미한다.

〈그림2〉는 화재 크기(P)와 천정 공간 높이(Y) (건물내 화재인 경우 예상 가능)의 수치에 대해 예상 연기 생성률의 값을 나타낸다.

화재 크기에 대한 수치는 화재의 주변 길이(m로 표현)와 정방형 화재의 한 면의 길이(m로 표현)로 나타낸다.

연기 생성률에 대한 값은 [kg/s]로 표현하고 500°C의 온도에서

〈표1〉 연기 생성률에 관계된 식의 기호의 의미와 대표값

기호	의미	대표값
P	Perimeter of fire	As appropriate(expressed in metres)
y	Distance between floor and bottom of smoke layer under ceiling	As appropriate(expressed in metres)
ρ_0	Density of the ambient air	1.22kg/m ³ at 17°C
T ₀	Absolute temperature of ambient air	290K
T	Absolute temperature of flames in smoke plume	1100K
g	Acceleration due to gravity	9.81m/s ²
M	Rate of production of smoke	in kg/s

연기 발생 체적률 (m³/s)로 나타내었다.

연기 발생 중량률 변화율은 다음과 같은 과정을 거쳐 체적 변화율로 바꿀 수가 있다.

- 온도 17℃에서 공기밀도 :

$$1.22(\text{kg/m}^3)$$

- T℃에서 공기(연기)밀도 :

$$1.22 \times \left(\frac{290}{T+273}\right)(\text{kg/m}^3)$$

- 연기 발생 중량률 (kg/s)은 연기 온도에 적당한 밀도로 나누어 (m³/s)로 변환된다.

연기생성의 중량률에 대한 체적률의 등가치가 다음(표2)에 주어졌다.

5. 연기 발생량

화재 규모가 3m×3m의 정방형(또는 동가원형으로 직경 3.8m)으로 크기가 제한되어 있다고

〈표3〉 화재 (3m×3m 크기)로부터 연기 생성률

Height of clear layer (distance between floor and bottom of smoke layer) metres	Rate of smoke production		
	kg/s	Smoke volume at 5500°C m ³ /s(ft ³ /min)	Smoke volume at 20°C m ³ /s(ft ³ /min)
2	6	13.1(27 710)	5.0(10 550)
2.5	9	19.6(41 570)	7.5(15 826)
3	12	26.2(55 420)	10.0(21 180)
4	18	39.2(83 135)	14.9(31 653)
5	25	54.5(115 466)	20.7(43 962)
6	33	71.9(152 415)	27.4(58 030)
8	51	111.2(235 550)	42.3(89 680)
10	71	154.8(327 920)	58.9(124 850)

가정하면 연기 발생률은

$$M=0.188PY^{3/2}$$

식으로 계산되거나 〈그림2〉에서 직접 찾아 낼 수 있다.

다음 〈표〉는 연기 층과 천정 하부에 형성된 Hot gas층으로 확대되는 불꽃과 같은 화재로부터의 열방출에 근거하여 계산된 대표값

이다.

이런 Hot gas에 의해 차지하는 체적은 Hot gas 온도에 의존하며 온도 500℃인 불꽃에 가까운 곳에서 1(kg)의 연기는 약 2(m³)공간을 차지하게 된다. 그러나 불꽃으로부터 먼곳의 연기는 주위 온도보다 약간 높게 되어 1kg의 연기는 약 0.8m³ 공간을 차지하게 된다.

〈표3〉에서 알 수 있듯이 작은 화재로부터 생성된 연기의 부피가 얼마나 크고, 얼마나 빠르게 건물을 연기로 채우게 되는가를 알아야 한다. 건물의 천정 하부에 형성된 연기층의 정도(높이)는 하부로 확산되어 위험에 처할 정도의 머리 부분까지 다다르는 상황도 매우 빠르게 전개가 될 수 있어 다음 〈표3〉에서는 3m×3m 화재에 의해 생긴 연기가 다양한 규모의 건물을 부분적으로나 전체적으로 채울 수 있는 개략적인 전 상태를 나타내고 있다.

〈표3〉에서 숫자로서 시사하는 바는 어깨 수준 이하로 실에 연기를 채우기 위한 시간이 정말로 짧은 시간이라는 것이다.

〈표2〉 연기의 중량 변화율 대 체적 변화율의 등가관계

Massrate of flow		Volume rate of flow			
kg/s	lb/s	m ³ /s		ft ³ /min	
		at20°C	at500°C	at20°C	at500°C
200	440.8	163.9	436.9	346,928	925,354
100	220.4	81.9	218.5	173,464	462,783
90	198.4	73.8	196.6	156,308	416,399
80	176.6	65.6	174.8	138,941	370,226
70	154.3	57.4	152.9	121,573	323,842
60	132.2	49.2	131.1	104,205	277,670
50	110.2	41.0	109.2	86,838	231,286
40	88.2	32.8	87.4	69,470	185,113
30	66.1	24.6	65.4	52,103	138,517
20	44.1	16.4	43.7	34,735	92,557
10	22.0	8.2	21.8	17,346	46,278
9	19.8	7.4	19.7	15,631	41,640
8	17.7	6.6	17.5	13,894	37,023
7	15.4	5.7	15.3	12,157	32,384
6	13.2	4.9	13.1	10,420	27,767
5	11.0	4.1	10.9	8,684	23,128
4	8.8	3.3	8.7	6,947	18,511
3	6.6	2.5	6.5	5,210	13,852
2	4.4	1.6	4.4	3,473	9,256
1	2.2	0.8	2.2	1,735	4,628

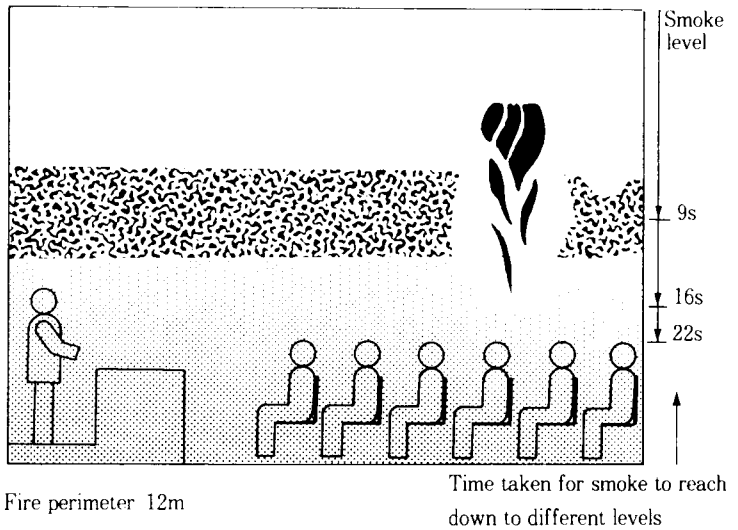
〈표4〉에서 바닥 면적이 100㎡인 가장 작은실, 그리고 건물 높이를 6m로 가정하고, 쉽게 100명의 수용 능력을 가진 작은 강의실의 경우 만약 정면의 탁자에서 화재(벤젠같은 가연성 액체 용기 파손으로 인한)가 발생하였다면 이는 순간적으로 전개되어 몇초안에 12[m]의 Perimeter를 가질 것이다.

이런 크기의 강의실에서 화재는 20여 초내에 1.5m 높이 정도의 어깨 높이까지 연기가 차게 될 것이고, 이것은 그 실에 있는 대부분의 사람이 피난 활동의 개시는 차지하고서라도 화재 상황을 인식하기도 전이 될 것이다.

비록 작은 화재에 의해 생성된 연기일지라도 매우 큰 양으로 변해 위험 상황으로 매우 빨리 진전이 된다는 것을 알려주고 있다.

〈표4〉에 대한 계산식은 연기가 경계벽에 이를 때까지 천정 하부를 따라 이동하는 시간을 무시한 개략식이지만, 이 시간은 연기 온도에 의하고 연기층의 선단 돌출부의 속도는 약 1m/s가 될 것이다.

〈그림3〉 소규모실에서의 연기 전파 정도(실높이 : 6m, 실면적 : 100㎡)



Fire perimeter 12m

이 가정을 이용하여 어떤 크기의 건물에 대해 연기로 채워지는데 소요되는 시간은 영국 사람인 Hinkley에 의해 다음 관계식으로 유추되었다.

$$t = \frac{20A}{Pg^{1/2}} \left(\frac{1}{Y^{1/2}} - \frac{1}{h^{1/2}} \right)$$

- t: 초(sec)로 표현된 소요 시간
- A: 건물, 실 또는 구획실의 바닥면적 (㎡)
- P: 화재의 Perimeter(m)
- Y: 바닥에서 연기층 하부의 거리(m)
- h: 건물, 실 또는 구획실의 높이(m)
- g: 중력 가속도 (9.8m/s²)

6. 화재 감지

화재에 의한 환경 변화를 감지하기 위해 인간의 오감을 흉내내는 기계적·전기적·전자 장치가 오늘날 화재 예방 분야에 급속하게 응용되어 보다 더 인간화된 장치로 신뢰성·자기 판단성·제어 능력을 겸비한 감지 장치가 출현되고 있다.

화재의 가장 일반적인 현상 요소중 감지 가능한 것으로는 열(온도), 연기, 빛의 방사로 이루어지며 모든 화재 현상이 반드시 이런 요소들을 생성하는 것은 아니고 비화재 조건도 이들 현상 요소와 유사한 조건을 낼 수 있는 환경 조건을 가질 수가 있어 설계자·제조사는 화재시 예상되는 이들 요소들의 사이 분별화하는 것이 중요하며, 비화재 상태로부터 야기되는 화재 상태와 유사한 조건들을 구별해야 한다.

화재시 발생 요소 즉, 열·연기·빛은 화재 진행중 이론적인 정도

〈표4〉 Approximate times for a 3mx3m fire to fill a building with smoke down to a given distance from the floor

Building height (m)	Building area 100m ² Distance of smoke from floor (m)			Building area 1,000m ² Distance of smoke from floor (m)			Building area 1,000m ² Distance of smoke from floor (m)		
	3	2	1.5	3	2	1.5	3	2	1.5
4	4	11	17	0.7	1.8	2.8	6.9	18.4	28
5	7	14	20	1.2	2.3	3.3	11.5	23	33
6	9	16	22	1.5	2.6	3.6	15	26.5	36
8	12	19	25	2.0	3.1	4.1	20	31	41
10	14	21	27	2.3	3.5	4.4	23	35	44
15	17	24	30	2.8	4.0	4.9	28	40	49.5



(량)을 초과할 수도 있으며, 이들 요소중 하나는 화재시 통상 제일의 현상으로 나타나게 되며 이것이 인명 안전을 위한 설비의 최우선 설계 사항으로서 매우 중요한 사실이다.

즉, 화재에 대한 감지적 적용에 있어 보호 대상에 적합한 감지기 원리의 선정 또는 설치상의 문제점과 적정 검출 화재 규모를 갖는 감지기를 선정하여야 하며, 때로는 보다 고감도인 센서 출력을 가진 감지기로 처리가 필요한 경우도 있다.

다음(그림4)는 감지기의 일반적인 구조를 나타내지만 구성 요소의 일부가 복수로 존재하거나 빠지거

나 하는 경우도 있고 본체가 일체화되어 있지 않은 것도 있다.

〈그림4〉에서 K는 온도등 화재에 수반되는 변화량이며, 이것이 센서로 전달되어 기계적·전기적인 보조량 K'로 출력되어진다.

센서는 K를 일국소에서 포착하든지, 공간 분포의 평균치 혹은 누적치로 포착하는가에 따라 스포트형과 분포형으로 나누어지며, 이의 변형감지 방법으로서 sampling형과 scanning형 등이 있다. 정보를 하기 위한 변화량에 K를 쓰지 않고 K의 시간적 변화량(변화 속도, 적분치 등)이나 공간적 변화(두점간의 차등) (K')를 이용하는 경우에는 변환부에 의하여

$F_1(K')$ 로 바꿀 필요가 있다.

K'나 $F_1(K')$ 가 일정한 경보치 F_2 에 도달했을 때 경보치 비교부의 출력으로는 디지털량 $F_2(K')$ 가 변화하여 그에 대한 전기적 신호 S가 송출된다.

예를 들면 열감지 방식의 정온식 감지기의 구성은 시험실에서 이용되는 항온조용 Thermostat와 유사하며 K는 조내 온도, K'은 Bi-metal의 확곡 정도, 변환부는 이 경우 필요치 않고, $F_2(K')$ 는 급변하는 접점 저항치, S는 전류가 된다.

NFPA 72E에 따르면 자동 화재 감지기는 열·연기 불꽃·화재시 가스·기타 화재 감지기로 분류가 되며, 좀더 세분화할 경우 Line type, Spot type, Air sampling type으로 나뉘게 된다. (☉)

(그림4) 감지기의 일반구성

